

BAND 20 | SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

SAID OMERBEGOVIC

PRÄDIKTIVE LICHTFUNKTIONEN FÜR
VOLLADAPTIVE SCHEINWERFERSYSTEME



Said Omerbegovic

**Prädiktive Lichtfunktionen für
volladaptive Scheinwerfersysteme**

Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Prädiktive Lichtfunktionen für volladaptive Scheinwerfersysteme

von
Said Omerbegovic

Karlsruher Institut für Technologie
Lichttechnisches Institut

Prädiktive Lichtfunktionen für volladaptive Scheinwerfersysteme

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von M. Sc. Said Omerbegovic, geboren in Frankfurt am Main

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Mai 2018

Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller

Impressum



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

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

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2019 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2195-1152

ISBN 978-3-7315-0875-5

DOI 10.5445/KSP/1000088261

Meinen Eltern, die mir alles ermöglicht haben.

Ask yourself this question:
"Will this matter a year from now?"

Richard Carlson

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lichttechnischen Institut des Karlsruher Instituts für Technologie und als Kooperationsdoktorand in der Abteilung Entwicklung Innovationen Licht/Sicht der AUDI AG am Standort Ingolstadt.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann für die Betreuung, die richtungsweisende Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen während der Anfertigung dieser Arbeit. Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller danke ich für die Übernahme der Funktion des Korreferenten und die in diesem Zuge erfolgten fachlichen Diskussionen.

Dr.-Ing. Wolfgang Huhn und Stephan Berlitz danke ich für die Möglichkeit, meine Promotion als Kooperationsdoktorand in der Abteilung Entwicklung Innovationen Licht/Sicht der AUDI AG durchführen zu dürfen, sowie für die Unterstützung, welche für die Durchführung der in Rahmen dieser Arbeit erfolgten Untersuchungen erforderlich war. Mein herzlichster Dank gilt Dr.-Ing. Christian Funk, meinem Betreuer von Seiten der AUDI AG, für das persönlich und fachlich hervorragende Verhältnis sowie seinen Rückhalt und sein Vertrauen. Meinen Kollegen, sowohl am Lichttechnischen Institut als auch in der Abteilung Entwicklung Innovationen Licht/Sicht, danke ich für die angenehme und kollegiale Arbeitsatmosphäre sowie die zahlreichen Diskussionen und Anregungen im Rahmen meiner Promotion. Des Weiteren gilt den studentischen Mitarbeitern, die mit ihren Untersuchungen maßgeblich zur erfolgreichen Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben, besonderer Dank.

DANKSAGUNG

Mein größter Dank gilt meinen Eltern Safet und Almasa, meiner Schwester Sanela und meiner Frau Azra, die mein größter Rückhalt sind und mich immer unterstützt haben, sowie meiner Familie und meinen Freunden.

KURZFASSUNG

Hochauflösende Scheinwerfersysteme bieten das Potenzial die Leistungsfähigkeit lichtbasierter Assistenzsysteme zu verbessern. Weiterhin können neuartige Lichtfunktionen zur Unterstützung des Fahrers realisiert werden, die Handlungsempfehlungen bei der Quer- und Längsführung des Fahrzeugs auf der Fahrbahn darstellen.

Dabei wirken Latenzen bei der Ansteuerung der Scheinwerfer einer Erhöhung des Wirkungsgrads eines blendfreien Fernlichts entgegen. Die Lichtfunktionen, welche den Fahrer bei der Entscheidungsfindung unterstützen sollen, benötigen eine Interpretation der Verkehrssituation. Dieses Verständnis erfordert eine Verarbeitung von Sensordaten mithilfe von Ansätzen der künstlichen Intelligenz.

Diese Arbeit untersucht eine Umsetzung des blendfreien Fernlichts, die auf der Voraussage der Bewegung des Egofahrzeugs und anderer Verkehrsteilnehmer beruht. Das Ziel ist die Kompensation der Latenzzeit und die optimale Ausnutzung der Auflösung für die darzustellende Lichtverteilung. Des Weiteren werden Lichtfunktionen entwickelt und auf ihre Wirksamkeit analysiert, die situationspezifische Handlungsempfehlungen bei Abbiege- oder Spurwechselintentionen des Fahrers auf die Fahrbahn vor das Fahrzeug projizieren.

Die Entwicklung dieser Funktionen basiert auf dem Konzept des Situationsbewusstseins. Dieses definiert einen Prozess für Systeme, die mit der Umwelt interagieren. Dieser Prozess beinhaltet die Bestandteile Wahrnehmung, Verständnis und Vorausschau. Das in dieser Arbeit entwickelte System umfasst eine Manöverdetektion, welche die Intentionen eines Fahrers an Kreuzungen oder bei Spurwechseln basierend auf dessen Interaktion mit der Umwelt erkennt. Eine Trajektorienprädiktion trifft eine Voraussage über die zukünftige Bewegung des

Egofahrzeugs und der anderen Verkehrsteilnehmer auf Grundlage von Fahrdynamikdaten und den erkannten Manövern voraus. Diese Bestandteile werden für die Entwicklung der prädiktiven Lichtfunktionen genutzt, deren Wirkung mittels experimenteller Untersuchungen validiert wird.

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	1
1.1. Ausgangssituation	1
1.2. Motivation	3
1.3. Ziel und Aufbau der Arbeit	6
2. Grundlagen und Stand der Technik	9
2.1. Lichttechnik und Scheinwerfersysteme	9
2.1.1. Adaptive Scheinwerfer	10
2.1.2. Hochauflösende Scheinwerfer	12
2.2. Sensoren für Fahrerassistenzsysteme	18
2.2.1. Kamerasysteme und Bildverarbeitung	18
2.2.2. Nachtsichtsysteme	21
2.2.3. Radarsysteme	23
2.2.4. Lidarsysteme	26
2.2.5. Digitale Karten	27
2.2.6. Vehicle-to-X Kommunikation	29
2.2.7. Sensordatenfusion	31
2.3. Lichtbasierte Assistenzsysteme	33
2.3.1. Blendfreies Fernlicht	34
2.3.2. Markierungslicht	35
2.3.3. Navigationsbasierte Lichtassistenz	37
2.4. Situationsbewusstsein	39
2.5. Verfahren der künstlichen Intelligenz	41
2.5.1. Fuzzylogik	41
2.5.2. Bayes'sche Netze	43
2.6. Das Kalman Filter	44
2.7. Gesetzliche Rahmenbedingungen	47

3. Konzeptionierung und Anforderungserhebung	49
3.1. Problemstellung	49
3.2. Prädiktive Lichtfunktionen	51
3.2.1. Prädiktives blendfreies Fernlicht	52
3.2.2. Situationsadaptive Lichtassistentenfunktionen	54
3.3. Anforderungen an das System	60
3.4. Einordnung in das Gesamtsystem	66
4. Entwicklung des Gesamtsystems	69
4.1. Systemarchitektur	69
4.2. Definition der Eingangsdatenschnittstelle	72
4.3. Manöverdetektion	77
4.3.1. Detektion von Abbiegevorgängen	77
4.3.2. Detektion von Spurwechseln	83
4.4. Prädiktion von Fahrzeugtrajektorien	87
4.5. Entwicklung der prädiktiven Lichtfunktionen	93
4.5.1. Adaptive Ansteuerung des Ausblendbereichs	94
4.5.2. Lichtbasierte Situationsunterstützung	95
5. Experimentelle Untersuchungen	97
5.1. Aufbau des Versuchsfahrzeugs	98
5.1.1. Vernetzung des Fahrzeugs und der Messtechnik	98
5.1.2. Prototypisches Scheinwerfersystem	100
5.2. Auswertung der adaptiven Ansteuerung des Sicherheitsbereichs	102
5.2.1. Trajektorienprädiktion mit Fahrzeugdaten	103
5.2.2. Nutzung von Kartendaten für die Prädiktion	110
5.2.3. Untersuchung der Aufblendzeiten	112

5.3. Situationsadaptive Lichtassistenzfunktionen	115
5.3.1. Leistungsfähigkeit der Manöverdetektion in Kreuzungssituationen	115
5.3.2. Leistungsfähigkeit der Manöverdetektion für Spurwechselsituationen	125
5.3.3. Probandenstudie zur Spurwechselunterstützung	128
6. Zusammenfassung und Ausblick	143
A. Zugehörigkeitsfunktionen für Fuzzylogik	149
A.1. Manöverdetektion an Kreuzungen	150
A.2. Manöverdetektion bei Spurwechseln	154
B. Lichtverteilungen des Versuchsscheinwerfers	159
C. Fragebögen der Probandenstudie	165
Abkürzungsverzeichnis	185
Formelzeichen	187
Literaturverzeichnis	191
Publikationen	209
Offenlegungsschriften	211
Betreute Arbeiten	215

KAPITEL 1

EINLEITUNG

1.1. AUSGANGSSITUATION

Konstruktive Maßnahmen im Fahrzeug, welche die Fahrzeuginsassen und andere Verkehrsteilnehmer bei einem Unfall vor Verletzungen schützen und somit die Unfallfolgen mindern sollen, werden zu den Systemen der passiven Sicherheit gezählt. Die Entwicklung passiver Sicherheitssysteme reicht bis in die Mitte des letzten Jahrhunderts zurück. Gegenwärtig kommen serienmäßig Airbags im Fahrzeuginnenraum zum Einsatz, im Außenbereich wird die Fahrzeugkarosserie zum Schutz von Fußgängern mit verformbaren Materialien und einer entsprechenden Konstruktion versehen.

Allerdings hat sich der Fokus in der Vergangenheit von der Einführung passiver Maßnahmen hin zu der Entwicklung aktiver Sicherheitssysteme zur Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr verlagert. Ein Großteil dieser aktiven Systeme zählt zu den Fahrerassistenzsystemen (FAS), die den Fahrer bei der Aufgabe der Fahrzeugführung unterstützen und Unfälle vermeiden sollen. Sie greifen zeitlich vor einer potenziellen Kollision in den Fahrbetrieb ein und zielen auf eine aktive Unfallvermeidung. Grundlegend führen FAS einen Regeleingriff im Fahrbetrieb aus oder realisieren Signalfunktionen, die den Fahrer in kritischen Situationen informieren und vor Gefahren warnen. Eine Einteilung der FAS in konventionelle Systeme und Systeme mit maschineller Wahrnehmung wird anhand der Informationen getroffen, die als Eingangsdaten für die Funktion erforderlich sind. [92] Die

Fahrdynamikregelung, als Beispiel für ein konventionelles FAS, nutzt fahrzeugeigene Raddrehzahlsensoren, um die Räder des Fahrzeugs gezielt abzubremsen und einem kritischen Fahrzustand des Fahrzeugs entgegenzuwirken. [152] Vorausschauende Systeme benötigen Sensoren, die das Fahrzeugumfeld und die Verkehrssituation erfassen. Der Abstandsregelautomat unterstützt den Fahrer bei der Längsführung und erfordert Informationen über den vorausfahrenden Verkehr, die durch Kamera- und Radarsysteme zur Verfügung gestellt werden. [148] Eine Spurwechselunterstützung erfasst den folgenden Verkehr über ein Radarsystem und löst eine optische Warnung aus, falls ein geplanter Spurwechsel aufgrund eines anderen Verkehrsteilnehmers kritisch ist. [10]

Die Scheinwerfer eines Fahrzeugs dienen seit der Erfindung des Automobils der Beleuchtung des Fahrzeugvorfelds bei Nacht und unterliegen seit dieser Zeit einer stetigen Weiterentwicklung, vor allem seit der Einführung der elektrischen Lichterzeugung. Derzeit verbreitet sind Scheinwerfer mit Halogen- oder Gasentladungslampen als Lichtquelle, doch auch der Einsatz von Leuchtdioden zur Lichterzeugung findet vermehrt Anwendung. Als aktuellste Entwicklung sind laserbasierte Scheinwerfersysteme zu nennen, die das Licht mittels Laserdioden erzeugen. Dies ermöglicht eine erhöhte Lichtstärke und Reichweite der Lichtverteilung.

Die Entwicklung neuartiger Lichttechnologien erlaubt jedoch nicht nur die Erzeugung einer hellen und effizienten Lichtverteilung, sondern auch die Realisierung von lichtbasierten Assistenzsystemen (LBAS), die den FAS zugehörig sind. Diese haben zum Ziel, eine größtmögliche Ausleuchtung des Fahrzeugumfelds und eine optimale Unterstützung des Fahrers bei Nacht zu gewährleisten. Diesen Systemen zugehörig sind das dynamische Kurvenlicht, das blendfreie Fernlicht oder das Markierungslicht. Das prädiktive Kurvenlicht nutzt Daten des Kamera- und des Navigationssystems und verschiebt den Schwer-

punkt der Lichtverteilung vorausschauend zur Kurveninnenseite. [43] Das blendfreie Fernlicht passt die Lichtverteilung anhand der Daten eines Bildverarbeitungsalgorithmus an, um andere Verkehrsteilnehmer auszublenden und eine dauerhafte Aktivierung des Fernlichts zu ermöglichen. [64] Bestimmte Verkehrsteilnehmer, wie zum Beispiel Fußgänger oder Fahrradfahrer ohne aktive Beleuchtung, werden hingegen durch eine Anpassung der Lichtverteilung bewusst hervorgehoben, um die Aufmerksamkeit des Fahrers in einer kritischen Situation zu erregen. [118]

1.2. MOTIVATION

Das Hauptaugenmerk von Automobilherstellern sowie staatlichen und akademischen Einrichtungen liegt auf der Entwicklung von Fahrzeugsystemen, die einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr leisten.

In Deutschland verzeichnet das Statistische Bundesamt 2014 insgesamt 2,4 Millionen Unfälle. Die Unfälle mit Personenschäden betragen 12,5% der Gesamtheit an Unfällen, davon ereigneten sich 24,7% nachts. Eine Einschränkung auf Unfälle mit Todesfolge erhöht den nächtlichen Anteil sogar auf 34,1%. [129] Die Tatsache, dass nachts nur etwa 20% des Verkehrsaufkommens herrscht, verdeutlicht das erhöhte Risiko für Verkehrsteilnehmer bei nächtlichen Fahrten. [75]

Dabei ist ein Großteil des Unfallgeschehens auf eine Fehlhandlung des Fahrers zurückzuführen. Laut *Brown* und *Salmon et al.* ist ein fehlerhaftes Verhalten des Fahrers in 95% der Fälle anteilig ursächlich für das Unfallaufkommen. In 75% wird dieses sogar als alleinige Ursache für das Eintreten von Unfällen angesehen. [22][114] Ein häufiger Grund hierfür ist die fehlerhafte Wahrnehmung von relevanten Informationen und Risiken im Straßenverkehr. Der Fahrer übersieht andere

Verkehrsteilnehmer, schätzt Längsabstände zu anderen Verkehrsteilnehmern oder deren Geschwindigkeit falsch ein. [48]

Für eine sichere Fahrzeugführung sind vor allem die visuelle, akustische und haptische Wahrnehmungsfähigkeit von Bedeutung. Die visuelle Wahrnehmung ist nach *Cohen und Hirsig* und *Schlag et al.* fundamental, relevante Verkehrsinformationen werden zu 80-90% visuell wahrgenommen. [23][116] Bei Nacht ist dieses Wahrnehmungsvermögen aufgrund eingeschränkter Beleuchtungsverhältnisse limitiert. [33] Dies begünstigt die fehlerhafte Interpretation der Verkehrssituation und ein fehlerbehaftetes Verhalten des Fahrers. [146]

Besonders in dynamischen Verkehrsszenarien, wie zum Beispiel an Kreuzungen oder bei Fahrstreifenwechseln, führt eine unzureichende Absicherung im Vorfeld der Ausführung eines Fahrmanövers laut einer statistischen Auswertung der GIDAS¹ zu einem erhöhten Unfallrisiko. [10]

Der Einsatz hochauflösender Scheinwerfersysteme und die Realisierung einer optimalen Lichtverteilung eröffnen Möglichkeiten, um die Ausleuchtung des Fahrzeugvorfelds zu verbessern und neuartige Lichtfunktionen zur Unterstützung des Fahrers zu verwirklichen. [154] Die Umsetzung dieser Funktionen stellt hohe Anforderungen an die Fahrzeugsensoren und die Algorithmen einer Ansteuerungseinheit, die über eine reine Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds und die reaktive Verarbeitung von Informationen hinausgeht. [50]

Als grundlegende Idee für die Erweiterung dieses reaktiven Verarbeitungsprozesses dient die antizipatorische Fähigkeit des Menschen. Diese ermöglicht es einem Fahrer zukünftige Verkehrszustände, wie zum Beispiel einen anstehenden Überholvorgang eines vorausfahrenden Verkehrsteilnehmers, frühzeitig zu erkennen und diese Information bei der Fahrzeugführung zu nutzen. [32] Allerdings sind solche Informationen in aktuellen Fahrzeugsystemen nicht verfügbar. [81]

¹German In-Depth Accident Study

Entsprechend regeln LBAS die Lichtverteilung nach dem Prinzip der Reaktion auf ein Ereignis, das durch die Fahrzeugsensoren erfasst wird. Beispielhaft sei hier das blendfreie Fernlicht aufgeführt, das einen Bereich der Lichtverteilung auf Grundlage eines durch die Kamera erkannten Verkehrsteilnehmers unmittelbar abdunkelt.

Die Verwirklichung einer antizipatorischen Regelung der Lichtverteilung in Verbindung mit dem Einsatz hochauflösender Scheinwerfersysteme impliziert einerseits ein Verbesserungspotenzial für aktuell vorhandene LBAS, wie dem blendfreien Fernlicht. Die Kenntnis zukünftiger Zustände innerhalb der Verkehrssituation ermöglicht eine Verringerung des Sicherheitsvorhalts eines Dunkelbereichs der Fernlichtverteilung, welcher aufgrund von Toleranzen bei der Fertigung und dem Einbau der Scheinwerfer notwendig ist. Andererseits erlaubt eine vorausschauende Interpretation der gegenwärtigen Verkehrssituation die Entwicklung neuartiger Lichtfunktionen, welche die Entscheidungsfindung des Fahrers in dynamischen Verkehrsszenarien unterstützen. Diese Lichtfunktionen projizieren den zu befahrenden Weg bei einem Abbiegevorgang innerhalb einer Kreuzung oder bei einem Spurwechsel auf einer Autobahn. In kritischen Situationen bilden diese entsprechend eine Warnung auf der Fahrbahn ab. Dadurch wird eine Optimierung der Ausleuchtung des Fahrzeugumfelds und eine frühzeitige Hilfestellung bei der Entscheidungsfindung des Fahrer erreicht. Der Fokus liegt hierbei auf einer Verringerung der Reaktionszeit des Fahrers, um aktiv zur Unfallvermeidung beizutragen. [38]

Das Ziel der Untersuchungen in dieser Arbeit ist die Anwendung von prädiktiven Lichtfunktionen, die den Fahrer durch eine Erhöhung der Ausleuchtung und durch die Projektion von intuitiven Handlungsempfehlungen in unübersichtlichen Verkehrsszenarien unterstützen. Die Erhöhung der Ausleuchtung soll durch eine adaptive Ansteuerung der Sicherheitsbereiche eines blendfreien Fernlichts erzielt werden. Die Projektion soll dem Fahrer signalisieren, dass ein von ihm beabsichtig-

ter Abbiegevorgang an einer Kreuzung oder ein Spurwechsel sicher durchführbar ist. Andernfalls soll die Lichtverteilung eine entsprechende Warnfunktion realisieren.

1.3. ZIEL UND AUFBAU DER ARBEIT

In den folgenden Untersuchungen wird die Nutzung von Ansätzen aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz für die Ansteuerung von adaptiven Scheinwerfersystemen und die Entwicklung von neuartigen LBAS untersucht, die den Fahrer in dynamischen Verkehrssituationen unterstützen. Dies können beispielsweise Überholmanöver oder Kreuzungssituationen sein, die durch eine hohe Komplexität die Entscheidungsfindung des Fahrers erschweren. Die Lichtfunktionen sollen anhand einer Interpretation der aktuellen Verkehrssituation vorausschauend intuitive Handlungsempfehlungen für den Fahrer darstellen, die objektiv und subjektiv auf ihre Wirksamkeit zu prüfen sind. Des Weiteren soll die Möglichkeit einer Maximierung der Ausbeute des blendfreien Fernlichts durch eine Schätzung zukünftiger Zustände im Verkehrsraum und die anschließende Ermittlung von adaptiven Sicherheitsbereichen analysiert werden.

Das folgende Kapitel 2, das einen aktuellen Stand der Technik aus den Bereichen der Lichttechnik und Lichtassistentzfunktionen, der Fahrzeugsensoren und Ansätzen der künstlichen Intelligenz zusammenfasst, bildet die Basis für die Untersuchungen in dieser Arbeit. Die Anforderungen an das System zur Realisierung prädiktiver Lichtfunktionen und dessen Konzeptionierung wird in Kapitel 3 adressiert. In Kapitel 4 werden die Module, die zur Interpretation des Verkehrsraums notwendig sind, und die Lichtfunktionen entwickelt und zu einem Gesamtsystem zusammengeführt, um in Kapitel 5 die Leistungsfähigkeit der einzelnen Komponenten und die Auswirkung der

entwickelten Lichtfunktionen auf die Sicherheit im Straßenverkehr durch experimentelle Betrachtungen zu bewerten. Abschließend fasst Kapitel 6 die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen und liefert einen Ausgangspunkt für zukünftige Untersuchungen.

KAPITEL 2

GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik aus den Bereichen der Lichttechnik und der Sensortechnologien, die aktuator- bzw. sensorseitig für die Entwicklung von Lichtfunktionen eingesetzt werden. Anschließend werden gegenwärtige Lichtassistentensysteme erläutert, die in ihrer Funktions- oder Wirkungsweise den zu entwickelnden Lichtfunktionen ähneln. Des Weiteren wird der Ansatz des Situationsbewusstseins erläutert, der als Grundlage für die Konzeptionierung des Gesamtsystems dient. Die Funktionsweise der Fuzzylogik, des Bayes'schen Netzes und des Kalman Filters, die für die Entwicklung der Systemkomponenten genutzt werden, werden ebenso wie die gesetzlichen Rahmenbedingungen zum Abschluss dieses Kapitels beschrieben.

2.1. LICHTTECHNIK UND SCHEINWERFERSYSTEME

In diesem Abschnitt werden adaptive Scheinwerfersysteme beschrieben. Diese sind gegenwärtig auf dem Markt verfügbar und werden in Fahrzeugen der Mittel- und Oberklasse eingesetzt. Sie bilden die Basis für die Entwicklung von hochauflösenden Scheinwerfern, die anschließend anhand einer Auswahl von aktuellen Forschungsprojekten erläutert werden.

2.1.1. ADAPTIVE SCHEINWERFER

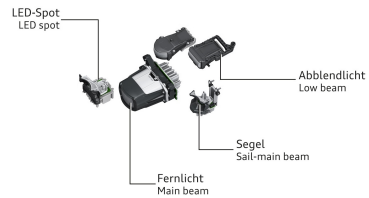
Die Entwicklung von Scheinwerfersystemen ist durch einen Zielkonflikt gekennzeichnet, der Erhöhung der Sichtbarkeitsweite des Fahrers bei gleichzeitiger Vermeidung einer Blendung anderer Verkehrsteilnehmer. [75] Adaptive Scheinwerfer erlauben eine Anpassung der Lichtverteilung an die Verkehrssituation, um eine Ausleuchtung entsprechend dieser Anforderungen zu realisieren.

Eine Einteilung adaptiver Scheinwerfer in subtraktive und additive Systeme erfolgt anhand des Funktionsprinzips, das bei der Erzeugung der Lichtverteilung eingesetzt wird. [58] Ein subtraktives System ist dadurch gekennzeichnet, dass durch die Lichtquelle erzeugtes Licht absorbiert wird, um eine gewünschte Lichtverteilung zu verwirklichen. Für die Anpassung der Fernlichtverteilung wird beispielsweise eine Blende innerhalb des Reflektor- oder Projektionsmoduls verwendet, die mittels eines Elektromotors verstellt werden kann. Die entsprechende Lichtverteilung wird als Adaptives Frontbeleuchtungssystem (AFS) oder blendfreies Fernlicht eingesetzt. [2] In derzeit verfügbaren Systemen werden für die Lichterzeugung sowohl Gasentladungslampen als auch Leuchtdioden (LEDs) verwendet. Ein additives System nutzt mehrere Lichtquellen zur Erzeugung der Lichtverteilung. Die Anordnung mehrerer Reflektor- oder Projektionsmodule in einem Scheinwerfer, die jeweils bestimmte Bereiche der Lichtverteilung realisieren, entspricht diesem Prinzip. Eine intelligente Aufteilung der Fernlichtverteilung ermöglicht das Ausblenden anderer Verkehrsteilnehmer für ein blendfreies Fernlicht oder die Verschiebung des Lichtschwerpunkts für ein synthetisches Kurvenlicht durch eine elektrische Ansteuerung der Lichtquellen. [15] In Abbildung 2.1 sind beispielhaft ein subtraktives und ein additives System dargestellt. Als subtraktives System ist das VarioX-Modul von Hella abgebildet, das eine drehbare Walze zur Anpassung der Lichtverteilung enthält. Der Matrix LED-Scheinwerfer

des Audi A7 repräsentiert mit seinen Ablend- und Fernlichtmodulen ein additives System. Durch eine Änderung des elektrischen Stroms lässt sich die Lichtverteilung beliebig anpassen.



(a) Hella VarioX-Modul [2]



(b) Ablend- und Fernlichtmodule des Audi A7 Matrix LED-Scheinwerfers [4]

Abbildung 2.1.: Darstellung eines subtraktiven Moduls (links) und eines additiven Systems (rechts)

Beide Prinzipien ermöglichen die Entwicklung von LBAS in unterschiedlichen Ausprägungen. Die Umsetzung des blendfreien Fernlichts mittels eines subtraktiven Systems erlaubt die Erzeugung lediglich eines Dunkelbereichs, um andere Verkehrsteilnehmer zu entblenden. Additive Systeme bieten hier den Vorteil, das abhängig von der Anzahl der eingesetzten Lichtquellen eine Vielzahl an Verkehrsteilnehmern ausgeblendet werden kann. Durch die stufenlose Ansteuerung der Walze innerhalb eines subtraktiven Systems besitzt die entstehende Dunkellücke eine quasi analoge Auflösung. Für ein dynamisches Kurvenlicht wird die Lichtverteilung eines subtraktiven Systems durch eine Drehung des gesamten Projektionsmodul erreicht. Dies bietet eine gleichbleibende Lichtverteilung, die in Richtung der Kurveninnenseite verschoben wird. Allerdings impliziert die mechanische Rotationsbewegung Latenzen bei der Ausrichtung, die durch ein additives System und die Verschiebung des Lichtschwerpunkts durch eine rein elektrische Ansteuerung der Lichtquellen vermieden werden. Der

Wirkungsgrad subtraktiver Systeme für ein blendfreies Fernlicht ist gering. Die Energie zur Lichterzeugung der Fernlichtverteilung wird bei deaktiviertem Fernlicht nicht genutzt. Additive Systeme bieten die Möglichkeit auf mechanische Komponenten innerhalb des Scheinwerfers zu verzichten. Dies bietet das Potenzial zur Reduktion der Teilekosten und zur Steigerung der Robustheit.

2.1.2. HOCHAUFLÖSENDE SCHEINWERFER

In Zukunft wird die Anzahl der Pixel im Bereich der Frontbeleuchtungssysteme stetig erhöht. Die Entwicklung wird durch den Einsatz neuartiger Technologien innerhalb der Projektionsoptik ermöglicht. Im Folgenden werden einige dieser Projekte zusammengefasst und die Inhalte erläutert.

Das Lichttechnische Institut des Karlsruher Instituts für Technologie hat zu Forschungszwecken die Plattform Propix entwickelt, die physiologischen Untersuchungen dient. [95] Das System besteht aus sechs Hochleistungsprojektoren, die jeweils auf Basis eines Mikrospiegelarrays arbeiten und etwa zwei Millionen Pixel realisieren. Durch ihre Anordnung ist die Darstellung beliebiger Lichtverteilungen und Lichtfunktionen innerhalb eines horizontalen Öffnungswinkels von 32° möglich. Das System projiziert insgesamt 30.000 lm und ermöglicht die Simulation beliebiger Scheinwerferkonzepte bei gleichzeitiger Kosten- und Zeitersparnis. [96] Das Versuchsfahrzeug mit dem Forschungssystem Propix ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

Derzeit fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung drei Forschungsprojekte, die sich mit der Entwicklung hochauflösender Scheinwerfer befassen: μ -AFS, VoLiFa2020 und iLaS.

Innerhalb des Projekts μ -AFS wird eine mikrostrukturierte Leuchtdiode entwickelt, die 64 Pixel auf 1 mm^2 abbildet. [88] Die Lichtquelle



Abbildung 2.2.: Versuchsfahrzeug des Karlsruher Instituts für Technologie mit Forschungsplattform Propix [96]

bietet insgesamt 1024 Pixel mit der Möglichkeit einer individuellen Ansteuerung. Das Projektziel beinhaltet den Aufbau eines Scheinwerfers, dessen Fernlichtverteilung durch die entwickelte Leuchtdiode bereitgestellt wird und eine Auflösung von $0,23^\circ$ in vertikaler und $0,35^\circ$ in horizontaler Richtung bietet. Die Ansteuerung erfolgt mittels eines Mikrocontrollers und eines FPGA¹. Abbildung 2.3 zeigt eine erste Realisierung des Systems, in der die Leuchtdiode und die Ansteuerungselektronik auf einem Kühlkörper angebracht sind.



Abbildung 2.3.: Versuchsaufbau aus dem Forschungsprojekt mit Lichtquelle und Leistungselektronik μ -AFS [105]

¹Field Programmable Gate Array

Den Einsatz eines LCD² als Blendelement untersucht das Projekt *VoLiFa2020*. Das Beleuchtungssystem nutzt eine Anordnung von Hochstrom-LEDs als Lichtquelle. Das System generiert eine Beleuchtungsstärke von 120 lx in 25 m Entfernung innerhalb der Lichtverteilung, die einen Öffnungswinkel von $\pm 20^\circ$ in horizontaler und $\pm 5^\circ$ in vertikaler Richtung ausleuchtet. [57] Die Auflösung beträgt in beiden Dimensionen 0,1°. In Abbildung 2.4 ist der optische Pfad des Systems dargestellt. Die LEDs zur Lichterzeugung sind auf einer Leistungselektronik angebracht. Aus Gründen der Effizienz wird das Licht polarisiert, bevor es das LCD beleuchtet. Die durch das LCD geformte Lichtverteilung wird über eine Sekundäroptik des Scheinwerfers abgebildet.

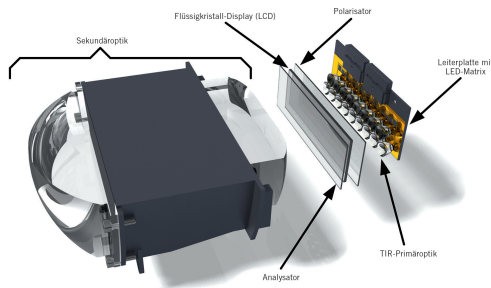


Abbildung 2.4.: Optischer Pfad des Systems aus dem Forschungsprojekt *VoLi-Fa2020* [57]

Das Prinzip des hochauflösenden Scheinwerfers, das im Projekt *iLaS* verfolgt wird, basiert auf einer blauen Laserdiode und einem MOEMS³. [50] Der Laserstrahl wird, wie in Abbildung 2.5 dargestellt, durch das MOEMS präzise über einen Phosphorkonverter bewegt. Der Phosphorkonverter wandelt das blaue Laserlicht in weißes Licht um. Durch die kontinuierliche Ablenkung des Laserstrahls wird eine homogene Lichtverteilung erzeugt. Des Weiteren bietet dieses System

²Liquid Crystal Display

³Mikro-opto-elektromechanisches System

die Möglichkeit, einen variablen Öffnungswinkel zu verwirklichen und den zur Verfügung stehenden Lichtstrom in diesem Bereich zu konzentrieren. Dies wird durch eine gezielte Ansteuerung des MOEMS erzielt, die eine erhöhte Aufenthaltszeit des Laserstrahls in bestimmten Bereichen bewirkt.

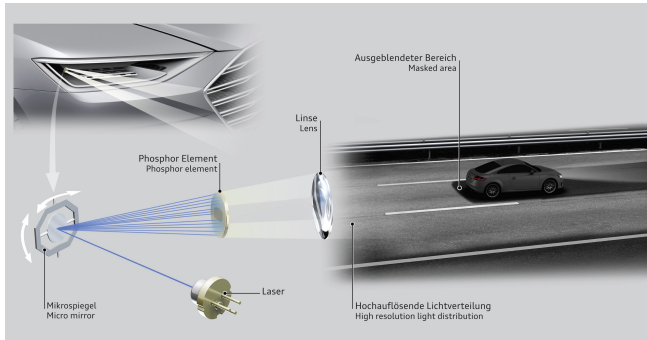


Abbildung 2.5.: Funktionsweise eines Scheinwerfers mit einem MOEMS aus dem Forschungsprojekt *iLaS* [4]

Eine weitere vielversprechende Technologie zur zukünftigen Entwicklung eines hochauflösenden Scheinwerfersystems basiert auf einem Mikrospiegelarray (engl.: Digital Micromirror Device, DMD). [16] Dieses wird durch eine Lichtquelle, in Abbildung 2.6 beispielsweise eine blaue Laserdiode mit anschließendem Phosphorkonverter, beleuchtet. Die individuelle Ansteuerung der Mikrospiegel ermöglicht die präzise Ablenkung von Lichtstrahlen, die entweder zur Erzeugung der Lichtverteilung genutzt oder in einer Senke absorbiert werden. [18]

Durch einen Vergleich der Technologien lassen sich individuelle Vor- und Nachteile aufzeigen. [51][66] Die Auslegung einer LED mit einer Mikrostruktur (μ -AFS) und der Einsatz eines LCD als Blendeneinheit (*VoLiFa2020*) sind ohne die Nutzung mechanischer Komponenten realisierbar und daher grundlegend robust. Die strukturierte LED

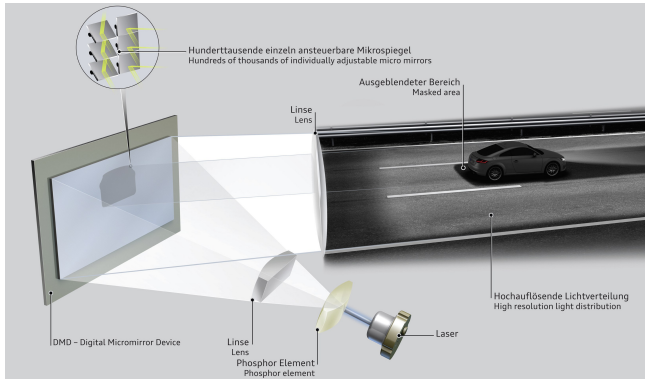


Abbildung 2.6.: Funktionsweise eines Scheinwerfers mit Mikrospiegelarray [4]

bietet im Vergleich eine Lichtverteilung mit geringer Auflösung. Das LCD bietet geringe Kontrastwerte und ist anfällig für Defekte der Flüssigkristalle. Die strukturierte LED und die auf MOEMS basierende Erzeugung der Lichtverteilung sind aufgrund des additiven Prinzips der Lichterzeugung effizient. Die Nutzung eines Mikrospiegelarrays ist aus Sicht der Effizienz nachteilig, bietet aber im Vergleich die höchste Auflösung. Tabelle 2.1 fasst die Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien zusammen.

	μ -AFS	LCD	MOEMS	DMD
Auflösung	–	○	+	+
Öffnungswinkel	+	+	–	–
Effizienz	+	–	+	–
Komplexität	+	○	–	○
Kosten	+	○	–	–
Energieverbrauch	+	–	+	+

Tabelle 2.1.: Vergleich der Technologien von hochauflösenden Scheinwerfern

Ungeachtet der Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien liegt allen Ansätzen das Ziel zugrunde, eine adaptive Lichtverteilung sowie eine gezielte und präzise Ausleuchtung der Verkehrssituation zu gewährleisten. So kann die Nutzungsdauer des Fernlichts durch hochauflösende Scheinwerfer weiter erhöht werden oder durch den Einsatz einer Auflösung von $0,1^\circ$ auf eine mechanische Ansteuerung der Leuchtweitenregulierung verzichtet werden. Allerdings impliziert dies gleichzeitig hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Fahrzeugsensoren, an die Latenzzeiten der Ansteuerungseinheit und der Datenübertragung sowie an die Kalibrierung des Systems.

Neben der Verbesserung vorhandener LBAS bietet eine hochauflösende Lichtverteilung das Potenzial, neuartige Abblendlichtfunktionen zu entwickeln, die den Fahrer in sicherheitskritischen Verkehrssituationen durch die Projektion von Handlungsempfehlungen aktiv unterstützen. Eine solche Lichtfunktion ist das Baustellenlicht, dessen Lichtverteilung in Abbildung 2.7 dargestellt ist.

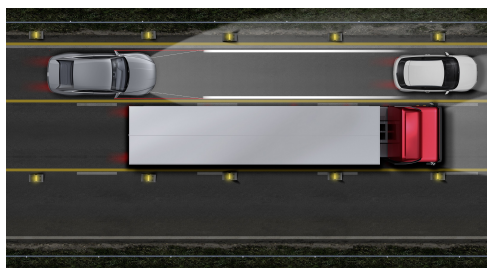


Abbildung 2.7.: Engstellensituation mit Baustellenlicht [4]

Das Baustellenlicht zeigt die Fahrzeugbreite durch die Projektion von zwei Lichtbalken mit einem entsprechenden lateralen Abstand auf der Straße vor dem Fahrzeug an. Es hilft dem Fahrer in Engstellen bei der Orientierung innerhalb der Fahrbahn und beim Einschätzen von Abständen zu Verkehrsteilnehmern auf benachbarten Fahrspuren. [154]

2.2. SENSOREN FÜR FAHRERASSISTENZSYSTEME

Die Entwicklung von FAS und LBAS bedingt Fahrzeugsensoren zur Umfelderkennung. Die Sensorinformationen dienen als Eingangsdaten für Systeme, die den Fahrer unterstützen. Grundlegend werden verschiedene Sensortechnologien in Fahrzeugen eingesetzt. Abbildung 2.8 zeigt eine Zusammenstellung von Fahrzeugsensoren, die gegenwärtig in Fahrzeugen eingesetzt werden, sowie deren Erfassungsbereiche. Im Folgenden werden die Funktionsprinzipien verschiedener Sensorarten beschrieben, die für die Untersuchungen in dieser Arbeit relevant sind. Des Weiteren werden die Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien betrachtet.

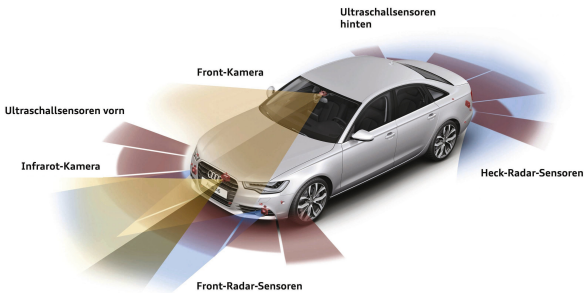


Abbildung 2.8.: Fahrzeugsensorset mit Erfassungsbereichen [4]

2.2.1. KAMERASYSTEME UND BILDVERARBEITUNG

Das visuelle Wahrnehmungsprinzip des Menschen wird im Automobil durch den Einsatz von Kamerasystemen und die Nutzung von Bildverarbeitungsalgorithmen nachgebildet. Die bildgebende Einheit,

der Bildsensor, entspricht der Fähigkeit des Menschen zur Informationsaufnahme, die Bildverarbeitung der Fähigkeit zur Informationsverarbeitung.

Die Optik des Kamerasystems bündelt einfallende Lichtstrahlen der Umgebung und bildet diese fokussiert auf einem Strahlungsaufnehmer ab, der das einfallende Licht in elektrische Größen umwandelt. Der Strahlungsaufnehmer wird durch eine Anordnung von Halbleiterdetektoren (CCD⁴- oder CMOS⁵-Sensoren) realisiert, wobei jedes Element der Anordnung einem Pixel entspricht. Die Halbleiterdetektoren arbeiten daher nach dem Prinzip des photoelektrischen Effekts. Der Bildsensor ordnet jedem Punkt der dreidimensionalen Welt einen Punkt auf der zweidimensionalen Abbildung zu. Diese Zuordnung hat den Verlust einer Dimension zur Folge, bei der Entfernungsinformationen des Fahrzeugumfelds verloren gehen.

Die Bildverarbeitung bereitet das erzeugte Bild auf und extrahiert relevante Informationen. Grundlegend wird der Prozess in eine Vorverarbeitung und eine Merkmalsextraktion unterteilt. [130] Die Vorverarbeitung kompensiert Störgrößen, beispielsweise verschiedene Formen des Rauschens oder Linsenfehler, und führt eine erste Filterung von möglichen Merkmalen aus. Innerhalb der Merkmalsextraktion werden die für eine Funktion relevanten Informationen beschrieben. Diese Beschreibung erfolgt in Form einer Liste an Parametern für jedes vorhandene Objekt.

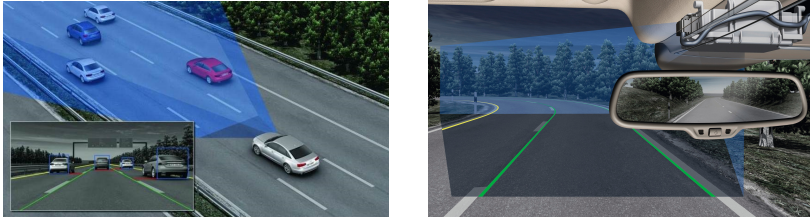
Ein Kamerasystem liefert keinen direkten Informationsgehalt wie andere Sensorarten, dieser wird erst durch die Bildverarbeitung generiert. Dies bietet die Möglichkeit, mehrere Arten von Bildverarbeitungsalgorithmen für verschiedene Anwendungen zu nutzen. Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von FAS ist die Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer. Hierzu zählen Fußgänger, Fahrradfahrer oder andere

⁴Charge-Coupled Device

⁵Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

Fahrzeuge. Die Erkennung erfolgt anhand einer Interpretation der Konturen innerhalb der Bildinformation. Durch dieses Vorgehen werden Parameter wie der Typ, die Dimension oder die Position des Objekts bestimmt. Diese Informationen werden für die Regelung von Abstandsregelautomaten oder aktiver Kollisionsvermeidungssysteme verwendet. Die Reichweite der Erkennung am Tag ist hierbei auf eine Entfernung von ungefähr 60 m beschränkt. Bei Nacht ist die Erkennung von Konturen anderer Objekte stark eingeschränkt. Deshalb basiert die blendfreie Fernlichtfunktion auf einer Bildverarbeitungslogik, die relevante Verkehrsteilnehmer anhand ihrer Beleuchtungseinrichtung erfasst. Die erzeugte Parameterliste enthält Informationen über den Typ, die Position und die Dimension des Objekts, die anhand der Erkennung von Scheinwerfern oder Rückleuchten berechnet werden. Die Informationstiefe ist im Gegensatz zur konventionellen Bildverarbeitung reduziert, allerdings werden andere Verkehrsteilnehmer in einer Entfernung von bis zu 800 m erfasst. Bei Fernlichtsystemen mit einer Reichweite von bis zu 600 m ist dies für die Ausführung eines blendfreien Fernlichts erforderlich. Die Erkennung von Fahrbahnmarkierungen ist für einen Spurhalteassistenten oder einen Spurwechselassistenten erforderlich. Notwendige Parameter sind die Art der Fahrbahnmarkierung und die jeweilige Entfernung zum Fahrzeug. Abbildung 2.9 illustriert die Erkennung von Objekten und Fahrbahnmarkierungen im Fahrzeugvorfeld.

Die Bildverarbeitung ermöglicht die Detektion und Klassifizierung von Objekten im Fahrzeugumfeld mit einem räumlichen Auflösungsvermögen in horizontaler Richtung. Verschiedene Verarbeitungsprinzipien ermöglichen die Realisierung einer Vielzahl an FAS. Allerdings sind die angewendeten Detektionsalgorithmen aufgrund der umfangreichen Bildinformationen aufwendig. Der Dimensionsverlust, der durch die Abbildung der dreidimensionalen Welt in eine zweidimen-



(a) Objekterkennung

(b) Erkennung der Fahrbahnmarkierung

Abbildung 2.9.: Darstellung der Detektion eines automobilen Kamerasystems
[4]

sionale Ebene entsteht, kann lediglich durch zusätzliche Informationen kompensiert werden.

2.2.2. NACHTSICHTSYSTEME

Die beschriebenen Kamerasysteme unterliegen einer eingeschränkten Wahrnehmung bei Dunkelheit. Dies betrifft vor allem die Detektion von unbeleuchteten Objekten. Um eine Erkennung dieser Verkehrsteilnehmer gewährleisten zu können, werden in der Automobilindustrie Nachtsichtsysteme eingesetzt. Die bevorzugten Technologien basieren auf der Nutzung von Infrarot- oder Wärmestrahlung und werden in Nah- und Ferninfrarotsysteme unterteilt.

Nahinfrarotsysteme nutzen die Reflektionseigenschaften von Objekten im Infrarotbereich. Das System sendet Nahinfrarotstrahlung aus, die an Objekten im Fahrzeugumfeld reflektiert wird. Die reflektierte Strahlung wird durch einen infrarotempfindlichen Bildsensor aufgenommen. Aufgrund der notwendigen Bestrahlung des Fahrzeugumfelds werden diese Systeme auch als aktive Systeme bezeichnet. [132] Die Reichweite der Detektion beträgt bis zu 120 m.

Im Gegensatz zu aktiven Nahinfrarotsystemen basieren Ferninfrarotsysteme auf der von Objekten ausgehenden Planck'schen Strahlung. [145] Der Wellenlängenbereich dieser Strahlung befindet sich fern von sichtbarer Strahlung und wird als Ferninfrarotstrahlung bezeichnet. Diese Systeme werden daher als passiv bezeichnet. Die Wärmestrahlung wird durch einen entsprechenden Bildsensor aufgenommen, innerhalb des Graustufenbilds werden Wärme abstrahlende Objekte hell dargestellt. Die Reichweite ist mit bis zu 300 m größer als bei Nahinfrarotsystemen.

Die Verarbeitungsschritte der Bildverarbeitung entsprechen denen konventioneller Kamerasysteme. Die verarbeiteten Informationen dieser Systeme werden für den Einsatz eines Nachtsichtassistenten oder eines Markierungslichts genutzt. Der Nachtsichtassistent gibt eine optische oder akustische Rückmeldung an den Fahrer, falls sich ein Objekt im unmittelbaren Umfeld befindet. In Abbildung 2.10 sind der Erfassungsbereich, die Einteilung der Klassifikationsbereiche und die Anzeige des Nachtsichtassistenten im Kombiinstrument dargestellt.



Abbildung 2.10.: Sichtbereich eines Nachtsichtassistenten mit Einteilung in Gefahrenbereiche und Darstellung im Kombiinstrument [4]

Durch den Einsatz von Nachtsichtsystemen wird die eingeschränkte Wahrnehmungsfähigkeit konventioneller Kamerasysteme bei Dunkelheit ergänzt. Die Funktionsweise ist grundlegend vergleichbar mit der in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen, Vorteile ergeben sich durch die Nut-

zung von Bildsensoren, die für Strahlung in nicht sichtbaren Wellenlängenbereichen empfindlich sind. Passive Nachtsichtsysteme ermöglichen die Wahrnehmung von Wärmestrahlung, der Verkehrsraum wird nicht wie bei aktiven Systemen zusätzlich beleuchtet. Des Weiteren ist die Reichweite von Ferninfrarotsystemen größer. [132]

2.2.3. RADARSYSTEME

Der Ursprung der Radartechnologie⁶ stammt aus der Militärtechnik mit dem primären Ziel der Ortung von Flugzeugen. Der Einzug in die Automobiltechnik erfolgte im Jahr 1998 und diente der Einführung einer adaptiven Geschwindigkeitsregelung. [147]

Die Technologie basiert auf dem Prinzip der Laufzeitmessung (engl.: Time of Flight, ToF). Eine Sendevorrichtung strahlt Mikrowellen aus, die von Objekten im Erfassungsbereich reflektiert werden. Das Reflektionsvermögen eines Objekts wird als Radarquerschnitt (engl.: Radar Cross Section, RCS) ω bezeichnet und ist abhängig vom Material, der Geometrie, der Entfernung und der Orientierung des Objekts. Die Reflektionen werden von einer Empfangsvorrichtung erfasst. Der Abstand d_x zu einem Objekt ergibt sich zu

$$d_x = \frac{1}{2}c \cdot t_{ToF}, \quad (2.1)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit und t_{ToF} die Laufzeit der Strahlung ist. Des Weiteren ermöglicht die Technologie die Nutzung des Dopplereffekts, der die Frequenzverschiebung von Strahlung bei einer Relativbewegung zwischen Objekten beschreibt. Die Doppler-Frequenz f_D ist beschrieben durch

$$f_D = -2\dot{d}_x \cdot \frac{f_0}{c}, \quad (2.2)$$

⁶Radio Detection and Ranging

mit der Trägerfrequenz f_0 der Strahlung. Diese Frequenzverschiebung ist proportional zur Relativgeschwindigkeit der Objekte, die sich folglich ermitteln lässt.

Als Sende- und Empfangsvorrichtung dienen Antennen, die eine konzentrierte Strahlung in eine bestimmte Richtung aussenden. Diese Mikrowellen sind lediglich Informationsträger, der notwendige Informationsgehalt wird sendeseitig aufmoduliert und an der Empfangsvorrichtung demoduliert. In aktuellen Systemen werden hierfür Amplituden- oder Frequenzmodulationen genutzt.

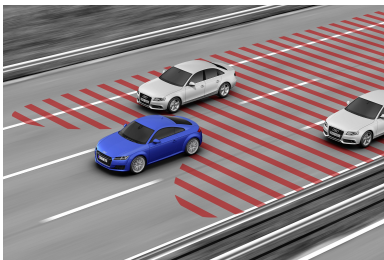
Für die Anwendung im Automobil sind Frequenzen im Bereich von 24 GHz und 77 GHz nutzbar. Ein Short-Range-Radar (SRR) arbeitet im Frequenzband um 24 GHz und erlaubt eine verlustarme Leitungsführung und kostengünstige Bauteile. Der Erfassungsbereich ist größer verglichen zu einem System in einem höheren Frequenzband, allerdings ist die Winkelauflösung und die Reichweite eingeschränkt. Ein höherfrequentes System im Frequenzband um 77 GHz wird als Long-Range-Radar (LRR) bezeichnet und erzielt eine Reichweite von 250 m. Die Hauptanwendung der Radartechnologie ist die Realisierung eines Abstandsregelautomaten. Dabei wird die Entfernung zu einem vorausfahrenden Fahrzeug, die der Fahrer über die Wahl einer Zeitlücke τ einstellt, durch automatische Eingriffe in die Längsführung gehalten. [148] Abbildung 2.11 zeigt die Funktion des Abstandsregelautomaten bei Erfassung eines vorausfahrenden Verkehrsteilnehmers. Aufgrund der Möglichkeit einer hohen Relativgeschwindigkeit und die Beschränkung der Regelung auf Objekte auf der eigenen Fahrspur eignen sich besonders LRR für die Funktion des Abstandsautomaten.

Eine weitere Funktion, bei der Radarsensoren genutzt werden, ist die Spurwechselunterstützung. Dabei wird der rückwärtige Verkehr durch SRR, die auf beiden Seiten am Heck des Fahrzeugs angebracht sind, betrachtet. Falls der Fahrer zu einem Spurwechsel ansetzt, wird die Durchführbarkeit des Spurwechsels ausgewertet. Bei Erkennung



Abbildung 2.11.: Funktionsweise eines Abstandsregelautomaten [4]

eines herannahenden Verkehrsteilnehmers auf der entsprechenden Fahrspur wird der Fahrer durch eine optische Anzeige gewarnt. [10] Der Erfassungsbereich der SRR und eine mögliche Anbringung der optischen Anzeige am Außenspiegel des Fahrzeugs sind in Abbildung 2.12 dargestellt.



(a) Erfassungsbereich der Radarsensoren



(b) Außenspiegel mit optischer Anzeige

Abbildung 2.12.: Funktionsweise eines Spurwechselasistenten [4]

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Kamerasystemen basiert die Radartechnologie auf einem direkten Messprinzip. Der Informationsgehalt beinhaltet den Abstand, die Relativgeschwindigkeit und den Azimutwinkel eines Objekts zur Sendevorrichtung. Ein Vorteil der Technologie ist die Messung des Doppler-Effekts und somit von Abstands- und Relativgeschwindigkeitsinformationen, die für

Sicherheits- und Komfortfunktionen zwingend erforderlich sind. Eine Trennung mehrerer Objekte ist durch die Auswertung der Abstände und Relativgeschwindigkeiten möglich. Die verwendeten Sensoren sind robust gegenüber schlechten Witterungsverhältnissen, wobei jedoch die Erfassungsreichweite reduziert sein kann. Nachteilig sind die geringe Raumaufösung im Vergleich zu einer bildbasierten Detektion und die Mehrwegeausbreitung der Mikrowellen, die zu einer Spiegelung von Objekten führen kann.

2.2.4. LIDARSYSTEME

Die Lidartechnologie⁷ stellt ein optisches Messverfahren zur Detektion von Objekten und zur Messung von Entfernungen im Raum dar. Das Funktionsprinzip basiert wie bei Radarsystemen auf einer Laufzeitmessung, allerdings wird hierbei Ultraviolett-, Infrarot- oder sichtbare Lichtstrahlung als Informationsträger genutzt. Die messbaren Informationen beinhalten die Entfernung, die Relativgeschwindigkeit und die Lage eines Objekts. Dabei ist die Reichweite abhängig von der Intensität der Strahlung und der Empfindlichkeit des Empfängers. [45] Ein Vorteil gegenüber der Radartechnologie liegt in der verwendeten Strahlung. Optische Strahlen werden unabhängig von Materialeigenschaften anderer Objekte reflektiert, die Strahlung eines Radarsystems wird lediglich von metallischen Oberflächen reflektiert. Des Weiteren erzielt das optische Messverfahren eine höhere Winkelaufösung. Neben Informationen über die Entfernung zu einem Objekt und die Relativgeschwindigkeit können Lidarsysteme für Sichtweitenmessungen oder eine Dunkelheits- und Verschmutzungserkennung genutzt werden. Allerdings ist der Einsatz von Lidarsensoren in Fahrzeugen kostenintensiv. Dies ist begründet durch teure Komponenten für die

⁷Light Detection and Ranging

eigentliche Messung, aber auch durch gesetzliche Anforderungen zur Erfüllung von Laserschutzanforderungen, die ein aufwendiges Sicherheitskonzept erfordern.

2.2.5. DIGITALE KARTEN

Bei der Einführung des ersten Navigationsgeräts im Fahrzeug bestand die vorrangige Aufgabe des Systems in der Führung zu einem geographischen Ziel. Grundlegend sind die Systembestandteile eine digitale Karte und ein Algorithmus zur Positionierung des Nutzers innerhalb dieser Karte.

Die Lokalisierung eines Nutzers basiert auf dem GPS⁸, einem System zur Positionsbestimmung mittels Satellitenortung. Die Entwicklung des NAVSTAR-GPS-Systems wurde für militärische Anwendungen durch das Verteidigungsministerium der USA im Jahr 1973 in Auftrag gegeben. Ziel des Systems ist die Bereitstellung einer einheitlichen Zeitbasis und die Bestimmung der Position und der Geschwindigkeit eines Objekts. Die Standortbestimmung basiert auf der Positionsangabe der Satelliten und einer Laufzeitmessung unter Nutzung der Uhrzeitdifferenz zwischen Sender und Empfänger. Die bestimmte Position des Empfängers wird innerhalb des globalen Referenzsystems WGS84 ausgegeben. Die Genauigkeit dieser Angabe liegt im Bereich von 10-20 m und ist abhängig von atmosphärischen Effekten, der Qualität der Satellitenkonstellation und von Fehlerquellen wie der Mehrwegeausbreitung der Signale durch Reflektionen. [79]

Die Kartendaten werden ebenfalls unter Nutzung des Bezugssystems WGS84 erhoben und mit einer Genauigkeit von ungefähr 5 m digitalisiert. Neben Informationen, die für eine Routenführung erforderlich sind, enthalten diese Karten weitere Daten über das Straßennetz.

⁸Global Positioning System

Die Positionierung des Empfängers in einer digitalen Karte erfolgt durch die Ortung und einen Kartenabgleich (engl: Map Matching). Die Ortung beinhaltet die Bestimmung der absoluten Position anhand des GPS. Der Kartenabgleich nutzt aufgrund der für Automobilanwendungen zu geringen Abtastrate der Position Odometriedaten des Fahrzeugs, um eine Bestimmung des Bewegungsvektors innerhalb eines Messzyklus zu erlauben. Dabei wird die Trajektorie des Fahrzeugs berechnet, um die wahrscheinlichste Position innerhalb der Karte zu bestimmen.

Im Rahmen von FAS können die Position des Nutzers in einer digitalen Karte und die Daten über das Straßennetz als zusätzliche Sensorinformationen genutzt werden. Dies erfordert eine hohe Genauigkeit der Positionsbestimmung und der Einordnung innerhalb des Straßennetzes sowie einen entsprechenden Informationsgehalt der genutzten Karte. Die Standardisierung der Kartendaten, der Anforderungen und der Schnittstellen für die Nutzung in FAS erfolgt innerhalb des ADASIS⁹-Forums, einem Zusammenschluss von Automobilherstellern und -zulieferern. [1] Aktuelle FAS, die auf Attributen einer digitalen Karte basieren, unterstützen den Fahrer mit Empfehlungen für eine effiziente Fahrzeugführung oder realisieren eine vorausschauende Lichtsteuerung bei Kurvenfahrten. [43][80]

Ein Vorteil von Navigationsdaten ist der Informationsgehalt, der in der digitalen Karte hinterlegt werden kann. Allerdings ist eine alleinige Nutzung dieser Daten für die Entwicklung von Fahrzeugfunktionen aufgrund deren Aktualität und der unzureichenden Genauigkeit meist ungeeignet und muss durch Fahrzeugsensoren angereichert werden. In Zukunft werden die Informationen der digitalen Karten und die Einordnung eines Fahrzeugs in der digitalen Karte bedeutend präziser. Dies erfolgt durch verbesserte Referenztechnologien bei der Einmessung des Straßennetzes sowie die Nutzung von Sensordaten

⁹Advanced Map-Enhanced Driver Assistance Systems

vernetzter Fahrzeuge. Diese können aktuelle Ereignisse detektieren und anderen Verkehrsteilnehmern bereitstellen. Gleichzeitig ermöglicht ein Abgleich der Sensordaten mit präzisen Informationen der digitalen Karte eine sehr genaue Positionierung im Straßennetz. [107]

2.2.6. VEHICLE-TO-X KOMMUNIKATION

Eine zukünftige Technologie stellt die Kommunikation zwischen einem Fahrzeug und anderen Verkehrsteilnehmern oder der Infrastruktur dar. Diese Technologie wird umfassend als V2X¹⁰-Kommunikation bezeichnet, dabei beschreibt V2V¹¹ den Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen und V2I¹² die Übertragung von Daten zwischen einem Fahrzeug und der Infrastruktur.

Die Entwicklung der Technologie unterliegt vielen Anforderungen. [79] Die Kommunikation zwischen verschiedenen Teilnehmern soll bis zu einer Entfernung von 1000 m möglich sein und dabei eine Datenübertragung ermöglichen, die Robust gegenüber Unterbrechungen, Störungen und einer Mehrwegeausbreitung in innerstädtischen Verkehrsszenarien ist. Des Weiteren ist eine Kommunikation zwischen Fahrzeugen verschiedener Hersteller Bedingung für einen flächendeckenden Einsatz der Informationen und erfordert die Spezifikation von herstellerübergreifenden Standards.

Der Informationsaustausch basiert einerseits auf dem Wireless-LAN-Standard IEEE 802.11p, der für die automobilen Anwendung optimiert wurde, und andererseits dem Mobilfunknetz. Für das Funknetz 802.11p wird ein Frequenzband bei 5,9 GHz genutzt. Der Standard ermöglicht eine direkte Kommunikation mit vernachlässigbarer Verzö-

¹⁰Vehicle-to-X

¹¹Vehicle-to-Vehicle

¹²Vehicle-to-Infrastructure

gerung. [110] Die Bereitstellung eines geeigneten Mobilfunkstandards für V2X ist Grundlage aktueller Forschungs- und Entwicklungsarbeit von akademischen Einrichtungen und Unternehmen aus verschiedenen Bereichen. Das ETSI¹³ ist zuständig für die Standardisierung des Mobilfunknetzes ITS¹⁴ 5G für Intelligente Transportsysteme. Dieser Standard ermöglicht die Übertragung von Informationen mit einer geringen Latenzzeit von 10 ms. Heutige Technologien weisen hierbei deutlich größere Verzögerungen (3G: 500 ms, 4G/LTE: 100 ms) auf. Bei den zu übertragenden Informationen wird zwischen zwei Nachrichtentypen unterschieden. Eine CAM¹⁵ versendet periodisch Positions- und Bewegungsdaten des Fahrzeugs. Situationsabhängige Ereignisse werden als DENM¹⁶ bezeichnet und enthalten Informationen über Gefahrenstellen.

Die Technologie ermöglicht den Einsatz einer Vielzahl an neuartigen Assistenzfunktionen. Die Erkennung von Gefahrensituationen beinhaltet eine Stau- oder Baustellenwarnung. Des Weiteren bietet sich die Entwicklung kooperativer Kollisionsvermeidungssysteme an, um eine Bremsung vorausfahrender Fahrzeuge frühzeitig zu detektieren oder den Fußgängerschutz zu optimieren. [134] Eine Vernetzung unter Fahrzeugen und zwischen Fahrzeugen und der Infrastruktur führt bei entsprechender Anwendung zu einer Verbesserung der Verkehrseffizienz. Die Information über die Phasen von Lichtsignalanlagen ermöglicht die Bestimmung einer Geschwindigkeitsempfehlung für den Fahrer. Durch Kenntnis über die verbleibende Haltezeit kann die Fahrzeugbeleuchtung zur Effizienzsteigerung auf eine geringere Intensität geregelt werden. [3]

Die V2X-Technologie bietet aufgrund der Informationsübertragung enorme Vorteile gegenüber anderen Sensortechnologien. Die Über-

¹³European Telecommunications Standards Institute

¹⁴Intelligent Transport Systems

¹⁵Cooperative Awareness Message

¹⁶Decentralized Environment Notification Message

mittlung erfordert keine direkte Sichtverbindung zwischen den Teilnehmern. Die Information ist präzise, da diese den einzelnen Verkehrsteilnehmern entstammt. Allerdings ist eine effektive Nutzung von V2X erst bei einem flächendeckenden Einsatz in Fahrzeugen möglich.

2.2.7. SENSORDATENFUSION

Im Rahmen der Betrachtung von Sensoren im automobilen Umfeld nimmt der Begriff der Sensordatenfusion einen bedeutenden Stellenwert ein. Der Ansatz zur Sensordatenfusion findet seinen Ursprung in der Nutzung für militärische Anwendungen zu Beginn der 1980er.

[7] Die Sensordatenfusion kann allgemein definiert werden als das Vorgehen, Eingangsdaten verschiedener Quellen zu nutzen, um Ausgangsdaten von höherer Qualität zu erhalten. [143]

Die Ziele bei der Anwendung im Automobilbereich sind die Fusion verschiedener Erfassungsbereiche um das Fahrzeug oder die Fusion verschiedener Umfeldsensoren und digitaler Karten. [29] Ausgehend von der nachgelagerten Anwendung unterscheiden sich die Ziele im Detail. Komplementäre Informationen können den räumlichen Informationsgehalt durch die Nutzung unterschiedlicher Sensortechnologien erhöhen. [31][26] Außerdem kann die Erfassungsgeschwindigkeit durch eine parallele Verarbeitung gesteigert werden. [6][139] Durch redundante Informationen über dasselbe Objekt wird die Güte der Erkennung erhöht sowie die Verfügbarkeit und die Robustheit der Ausgangsdaten gesteigert. [30][91][112][150]

Abhängig von der Fahrzeugvernetzung und der Anwendung werden unterschiedliche Architekturen für die Sensordatenfusion verwendet. [52][78][138] In einer dezentralen Architektur erfolgt die Objektdetektion und -verfolgung jeweils innerhalb der Verarbeitungseinheit der

Sensoren. Die Zusammenführung erfordert neben der eigentlichen Information ein Maß für die Güte der bereitgestellten Daten. [77] Die notwendige Bandbreite für die Kommunikation zwischen den Sensoren und der Fusionseinheit wird durch die vorgelagerte Abstraktion der Daten reduziert. [20][137]

Eine zentrale Architektur nutzt Rohdaten oder extrahierte Merkmale einer Vorverarbeitung und kombiniert diese in einer zentralen Verarbeitungseinheit. Diese Vorgehensweise erlaubt eine bestmögliche Zusammenführung für die zeitliche Verfolgung von Objekten und die Verarbeitung von Daten mit unterschiedlichen Messzeitpunkten. [9] Der vollständige Informationsgehalt der Sensoren ist für eine Zusammenführung verfügbar, allerdings ist die bereitzustellende Datenmenge aufgrund der fehlenden Abstraktion erhöht. Des Weiteren ist die Erweiterbarkeit eingeschränkt und die Anpassung der Datenfusion aufwendig.

In direkter Abhängigkeit zu der Hardwarearchitektur steht die Ebene der genutzten Eingangsdaten. Die Eingangsdaten liegen als Rohdaten, Daten der Merkmals- oder der Entscheidungsebene vor. [128] Die Fusion von Rohdaten oder extrahierten Merkmalen bedingt einen Ansatz mit zentraler Fusionsarchitektur. [21][27][144][149] Eine Fusion von Daten auf Entscheidungsebene ist einer dezentralen Architektur gleichbedeutend.

Eine Sensordatenfusion kann mittels zahlreicher Methoden durchgeführt werden. In den meisten Fällen werden Ansätze der Wahrscheinlichkeitstheorie verwendet. [72][113] Bei dieser Vorgehensweise stellt die notwendige Ermittlung der Wahrscheinlichkeitsverteilung und die Annahme unabhängiger Eingangsdaten einen Nachteil dar. Die Evidenztheorie von Dempster und Shafer ist eine Verallgemeinerung der Wahrscheinlichkeitstheorie, bietet allerdings nur geringe Freiheitsgrade bei der Verknüpfung der Eingangsdaten. [136] Die Fuzzytheorie beschreibt die Zugehörigkeit der Eingangsdaten zu einer Menge an

Klassen. Die Festlegung der Zugehörigkeit basiert auf Expertenwissen. [99][112] Des Weiteren können Eingangsdaten durch die Nutzung von Neuronalen Netzen fusioniert werden. Diese bestehen aus einer Menge an Verarbeitungsschichten, die mittels Trainingsdaten durch das Neuronale Netz bestimmt werden. Aus diesem Grund sind Neuronale Netze sinnvoll, falls die Verbindung zwischen Eingangs- und Ausgangsdaten nicht bekannt ist. [85]

Eine Sensordatenfusion kombiniert die Stärken verschiedener Sensortechnologien und kann die Leistungsfähigkeit der Umfeldwahrnehmung durch komplementäre Informationen anreichern. [14][28][60] Im Vorfeld sind die Anforderungen der Anwendung sowie die Fragen hinsichtlich Architektur, Funktionsebene und Erweiterbarkeit zu betrachten.

2.3. LICHTBASIERTE ASSISTENZSYSTEME

Visuelle Informationen sind essentiell für eine sichere Fahrzeugführung. [142] Im Straßenverkehr basiert die Informationsaufnahme zu ca. 90% auf der visuellen Wahrnehmung der Umgebung. [123] Allerdings ist die Fähigkeit der menschlichen Wahrnehmung im nächtlichen Straßenverkehr stark eingeschränkt. [33] Dabei lässt sich laut *Nagayama* die Hälfte aller Unfälle bei Dunkelheit vermeiden, falls ein Hindernis frühzeitiger durch den Fahrer erkannt werden kann. [98] Das Ziel lichtbasierter Assistenzsysteme ist die optimale Ausleuchtung der Fahrzeugumgebung, um der Einschränkung der Sichtverhältnisse bei nächtlichen Fahrten entgegenzuwirken und dadurch die Sicherheit zu erhöhen. In diesem Abschnitt wird eine Auswahl an lichtbasierten Assistenzsystemen vorgestellt, die für die im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Lichtfunktionen relevant sind.

2.3.1. BLENDFREIES FERNLICHT

Das Fernlicht wird ohne eine automatisierte Ansteuerung lediglich in einem Bruchteil der Fahrzeit genutzt. [53] Bereits der Einsatz einer automatisierten Fernlichtfunktion bietet das Potenzial, die Nutzungsdauer bei Fahrten auf Landstraßen wesentlich zu erhöhen und die Gefahr einer Blendung anderer Verkehrsteilnehmer durch ein verspätetes Ausschalten des Fernlichts zu reduzieren. [126] Andere Untersuchungen zeigen, dass durch die Nutzung des blendfreien Fernlichts die Fernlichtfunktion fast durchgehend aktiviert werden kann. [5] Des Weiteren erhöht das blendfreie Fernlicht die Erkennbarkeitentfernung und somit die Sicherheit im nächtlichen Straßenverkehr. [153] Das blendfreie Fernlicht stellt eine Adaption des konventionellen Fernlichts dar. Ermöglicht wird dies durch die Nutzung einer vertikalen Hell-Dunkel-Grenze (vHDG) in der Lichtverteilung. Dies bedeutet, dass die Lichtverteilung in horizontaler Richtung in Bereiche unterschiedlicher Intensität eingeteilt werden kann. Mittels der vHDG werden die Bereiche, in denen sich andere Verkehrsteilnehmer befinden, entblendet. Gleichzeitig wird die restliche Umgebung durch die Fernlichtverteilung ausgeleuchtet. Dies ermöglicht eine dauerhafte Aktivierung des Fernlichts ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden.

Die Realisierung der Funktion erfordert den Einsatz einer Umfeldwahrnehmung mit entsprechender Reichweite. Relevante Regelobjekte stellen hierbei Verkehrsteilnehmer mit eingeschalteter Außenbeleuchtung dar. Daher werden Kamerasysteme zur Detektion und Klassifikation anderer Verkehrsteilnehmer eingesetzt. Die Bildverarbeitung erkennt mittels geeigneter Algorithmen Scheinwerfer und Heckleuchten innerhalb des Kamerabilds und bestimmt so relevante Objekte sowie deren Position. Die Ansteuerungseinheit berechnet anhand der übermittelten Informationen die nötigen Dunkelbereiche in

der Lichtverteilung. In Abhängigkeit des vorhandenen Scheinwerfersystems werden bei einem subtraktiven System Informationen zur Ansteuerung der Blende oder bei einem additiven System Informationen zur elektrischen Ansteuerung der Lichtquellen an den Scheinwerfer übertragen. [44] Eine Fahrsituation mit blendfreiem Fernlicht ist in Abbildung 2.13 dargestellt.

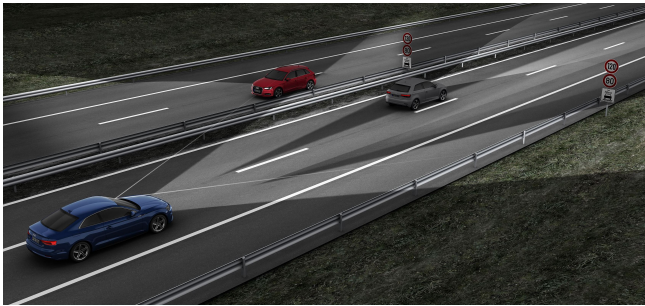


Abbildung 2.13.: Darstellung der Lichtverteilung eines blendfreien Fernlichts auf einer Autobahn [4]

Das blendfreie Fernlicht ist laut *Kauschke* neben dem Markierungslicht das LBAS, das durch die Optimierung der Fernlichtausleuchtung den größten Kundennutzen erwirkt. [74]

2.3.2. MARKIERUNGSLICHT

Das Ziel des Markierungslichts ist die gezielte Beleuchtung von Fußgängern im Fahrschlauch des Fahrzeugs, um die Erkennbarkeitsentfernung des Fahrers bei Nacht zu erhöhen. [118] Die Umsetzung basiert auf Informationen eines Nachtsichtsystems. Dieses ist erforderlich, um die Detektion und Klassifikation von Fußgängern bei Nacht und die notwendige Reichweite der Erkennung zu gewährleisten. [61] Eine Ansteuerungseinheit für Scheinwerfersysteme verarbeitet die

Information über die Position des Fußgängers und bestimmt die Lichtverteilung, die notwendig ist, um die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die potenzielle Gefahrensituation zu lenken. Aktuelle Scheinwerfersysteme ermöglichen die genaue Beleuchtung des Bereichs, in dem sich der Fußgänger befindet. Die Funktion kann als statische oder dynamische Lichtverteilung mit Variation der Blinkfrequenz ausgeprägt sein. In Abbildung 2.14 ist eine Verkehrssituation mit aktiviertem Markierungslicht dargestellt.



Abbildung 2.14.: Lichtverteilung eines Markierungslichts [4]

Das Potenzial zur Vermeidung von Unfällen mit Fußgängern wird bei Betrachtung des Unfallgeschehens deutlich. Die Auswertung von Unfallstatistiken zeigt, dass ein Großteil der Unfälle mit getöteten Fußgängern bei Nacht geschieht. [13] Im Jahr 2006 ereigneten sich über die Hälfte dieser Unfälle bei Dunkelheit, obwohl nachts ein deutlich geringeres Verkehrsaufkommen herrscht. [119]

Ein Grund für die hohe Unfallrate ist die schlechte Sichtbarkeit von Fußgängern. [42] Die Nutzung des Abblendlichts erlaubt die Erkennung von Fußgängern bis zu einer Entfernung von ca. 60 m. [140] Ein Markierungslicht bietet das Potenzial, die Erkennbarkeitsentfernung des Fahrers maßgeblich zu erhöhen. [67] Dies führt zu einer Verbesserung der Reaktionszeit bei der Ausführung eines Manövers, um eine Kollision zu vermeiden. [49] Des Weiteren erspart das Markierungslicht die Blickabwendung des Fahrers bei einer Warnung des

Nachtsichtsystems, die grundsätzlich im Kombiinstrument dargestellt wird. [118]

2.3.3. NAVIGATIONSBASIERTE LICHTASSISTENZ

Das Navigationssystem eines Fahrzeugs ermöglicht neben der grundlegenden Funktionalität der Routenführung die Bereitstellung von Informationen der digitalen Karte für FAS und LBAS. Die Nutzung dieser zusätzlichen Informationsquelle führt zu einer Verbesserung der Funktionsausprägung.

Seit der Einführung der ECE¹⁷-Regelung R123, die den Einsatz von AFS erlaubt, kann die Lichtverteilung eines Fahrzeugs an den Straßentyp angepasst werden. [34] Grundlegend stehen ein Stadt-, ein Landstraßen- und ein Autobahnlicht zur Verfügung. Das Stadtlicht stellt eine breite Ausleuchtung bei gleichzeitiger Verringerung der Reichweite bereit, um im städtischen Verkehr eine optimale Ausleuchtung von Kreuzungen zu gewährleisten. Das Landstraßenlicht entspricht der asymmetrischen Lichtverteilung eines konventionellen Abblendlichts und bietet eine hohe Reichweite bei der Ausleuchtung der eigenen Fahrspur bei gleichzeitiger Vermeidung einer Blendung des Gegenverkehrs. Der Einsatz eines Autobahnlichts erfolgt auf Straßen mit einer baulichen Trennung der Fahrspuren, die in gegenläufiger Fahrtrichtung verlaufen. Das Autobahnlicht bietet eine in horizontaler Richtung konzentrierte Lichtverteilung mit hoher Reichweite. Abbildung 2.15 zeigt die beschriebenen Lichtverteilungen aus der Vogelperspektive. Grundlegend werden die verschiedenen Lichtverteilungen mittels der Fahrzeuggeschwindigkeit angesteuert, allerdings ist dies in bestimmten Situationen nicht ausreichend und eine Anreicherungen mit Informationen der digitalen Karte sinnvoll. [86]

¹⁷Economic Commission for Europe

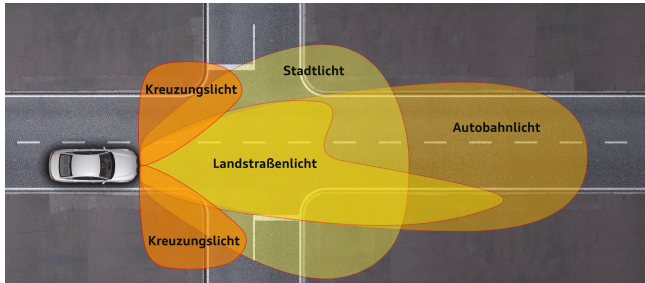


Abbildung 2.15.: Adaptive Lichtverteilungen [4]

In Abbildung 2.15 ist neben den AFS-Lichtverteilungen das Kreuzungslicht schematisch dargestellt. Dieses stellt eine weitere navigationsbasierte Lichtfunktion dar, die das statische Kurvenlicht und das Abbiegelicht ergänzt. Das statische Kurvenlicht und das Abbiegelicht werden über die Fahrzeuggeschwindigkeit und den Lenkwinkel oder die Betätigung des Fahrtrichtungsanzeigers aktiviert, um in Kreuzungsbereichen die seitliche Umgebung des Fahrzeugs auszu-leuchten. Das Kreuzungslicht erweitert diese Funktionalität, indem die Entfernung zu einer Kreuzung aus der digitalen Karte als Aktivierungsbedingung genutzt wird. Dies ermöglicht eine vorausschauende Beleuchtung von Kreuzungen, um Fußgänger und Fahrradfahrer frühzeitig erkennen und potenzielle Gefahrensituationen vorbeugen zu können.

Das Landstraßenlicht bietet eine Lichtverteilung, die für Straßenabschnitte mit großen Kurvenradien eine optimale Ausleuchtung gewährleistet. Allerdings ist diese in Kurven nicht ausreichend. Das dynamische Kurvenlicht bietet eine angepasste Ausleuchtung durch eine mechanische Drehung des Projektionsmoduls oder durch eine Verschiebung des Lichtschwerpunkts mittels einer Anpassung der elektrischen Ströme der Lichtquellen. Dies führt zu einer Erhöhung der Erkennbarkeitsentfernung bei Kurvendurchfahrten. [54] Die An-

steuerung erfolgt grundlegend unter Nutzung der Fahrzeuggeschwindigkeit, des Lenkwinkels und der Gierrate. Eine Ansteuerung mittels Fahrzeugdaten bedeutet, dass eine Anpassung der Lichtverteilung bei der Kurvendurchfahrt erfolgt. Dies ist besonders in s-förmigen Kurven von Nachteil. [84] Eine optimale Ausleuchtung aber erfordert eine vorausschauende Verlagerung der Ausleuchtung vor Eintritt in die Kurve. [63] Deshalb werden Informationen über den horizontalen Straßenverlauf genutzt, um das dynamische Kurvenlicht vorausschauend anzusteuern. Eine vorausschauende Ansteuerung des Kurvenlichts wird mittels der Erkennung von Fahrbahnmarkierungen durch das Kamerasystem in Verbindung mit den Informationen über die Straßengeometrie einer digitalen Karte ermöglicht. Auf diese Weise ist eine frühzeitige Erkennung von Gefahrenquellen möglich, der Fahrer kann rechtzeitig auf die Situation reagieren und Maßnahmen zur Unfallvermeidung ergreifen. [43]

2.4. SITUATIONSBEWUSSTSEIN

Das Konzept des Situationsbewusstseins (engl.: Situation Awareness) beschreibt eine Vorgehensweise zur Interpretation der Umgebung. Dies beinhaltet das Verständnis von Zusammenhängen zwischen den Umgebungsvariablen, unmittelbaren Ereignissen und der gegenwärtigen und zukünftigen Auswirkung des eigenen Handelns auf das Umfeld. Das Ziel des Situationsbewusstseins ist die Bereitstellung eines tiefgreifenden Informationsgehalts über die Vorgänge und Abhängigkeiten der Umwelt, welcher als Eingang für die Entscheidungsfindung und die Handlungsausführung genutzt werden kann. Der Prozess wird durch ein Modell nach *Endsley* beschrieben und ist in Abbildung 2.16 dargestellt. [36][37] Die drei Ebenen des Situationsbewusstseins bestehen aus der Wahrnehmung, dem Verständnis und

der Vorausschau. Innerhalb der Wahrnehmung werden die Objekte der Umgebung in Bezug auf Raum und Zeit erfasst. Das Verständnis bildet Zusammenhänge zwischen den Objekten, um im folgenden Verarbeitungsschritt eine Vorausschau über mögliche Ereignisse für einen ausreichend großen Zeitraum zu treffen. Diese Informationen werden anschließend für die Entscheidungsfindung und das Auslösen einer Handlung genutzt.

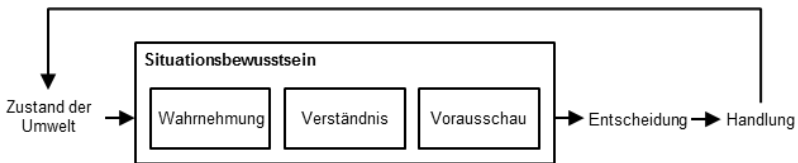


Abbildung 2.16.: Situationsbewusstsein nach Endsley [36][37]

Bei der Betrachtung von Unfallursachen wird nach *Hartels et al.* und *Merket et al.* einem fehlenden oder unzureichenden Situationsbewusstsein des Menschen ein hoher Anteil zugeschrieben. [55][93] Aus diesem Grund wird das Konzept des Situationsbewusstseins vermehrt in Bereichen der Luft- oder Schifffahrt, des Gesundheitswesens und der militärischen Führung oder von Notfalldiensten eingesetzt. [19][47][100][122]

Die Funktionsweise von FAS und LBAS beruht grundlegend auf einer reaktiven Handlung, die auf der Wahrnehmung der Umwelt beruht. Eine Interpretation in Form von Verständnis oder Vorausschau findet nur begrenzt statt, allerdings wird dies bei der Entwicklung zukünftiger FAS im Rahmen des automatisierten Fahrens von zentraler Bedeutung sein. Bei der Konzeptionierung der zu entwickelnden LBAS soll der Ansatz des Situationsbewusstseins als Grundlage für die Konzeptionierung des Gesamtsystems dienen.

2.5. VERFAHREN DER KÜNSTLICHEN INTELLIGENZ

Der Begriff der Künstlichen Intelligenz bezeichnet den Ansatz, menschliche Intelligenz oder menschliches Wissen durch Algorithmen nachzubilden. Das Ziel ist eine eigenständige Lösung von Problemstellungen im Bereich von Expertensystemen oder der Mustererkennung. In diesem Abschnitt werden die Fuzzylogik und das Bayes'sche Netz als Methoden aus diesem Bereich erläutert, die für die Erkennung von Manövern innerhalb dieser Arbeit betrachtet werden.

2.5.1. FUZZYLOGIK

Die Fuzzylogik wird erstmalig im Jahr 1965 durch *Zadeh* beschrieben. [151] Diese Theorie erlaubt die Modellierung von Unsicherheiten durch den Einsatz linguistischer anstatt mathematischer Beschreibungen.

Eine Variable x wird dabei durch eine Anzahl an linguistischen Termen M_k beschrieben. Die Gesamtheit der linguistischen Terme M_k wird als Fuzzy-Menge (engl.: Fuzzy Set) M bezeichnet. Die funktionale Zuordnung der Variable x zu einem linguistischen Term M_k erfolgt durch die Zugehörigkeitsfunktion (engl.: Membership Function) $\mu_{M_k}(x)$. Diese ordnet jedem Wert von x einen Zugehörigkeitswert $\mu_{M_k} \in [0, 1]$ zum linguistischen Term M_k zu. Die Gesamtheit aller Zugehörigkeitsfunktionen $\mu_M(x)$ wird als Fuzzyfunktion bezeichnet.

In Abbildung 2.17 ist der Verarbeitungsprozess eines Fuzzysystems dargestellt. Dieses besteht aus der Fuzzyfizierung, einem Regelwerk und der Defuzzyfizierung.

Die Fuzzyfizierung wendet die Zugehörigkeitsfunktionen aller linguistischen Terme auf die Eingangsvariablen an. Das zentrale Element ist das Regelwerk, das grundlegende Regeln enthält und eine Konse-

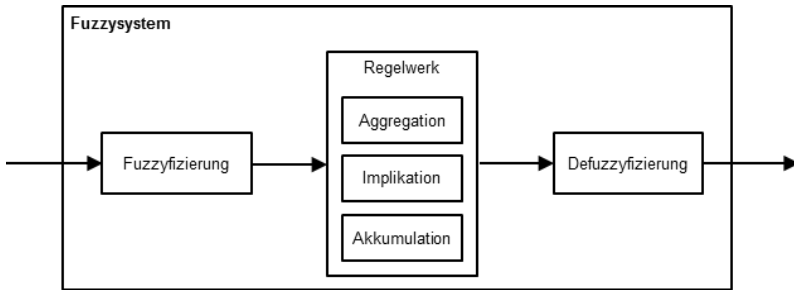


Abbildung 2.17.: Verarbeitungsprozess eines Fuzzysystems

quenz aus den Einzelregeln bestimmt. Dazu wird zunächst innerhalb der Aggregation der Erfüllungsgrad einer Regel bestimmt. Die Implikation ordnet anhand der Erfüllungsgrade der einzelnen Regeln Konsequenzen zu, die durch die Akkumulation zu einer unscharfen Gesamtkonsequenz kombiniert werden. Durch die Defuzzyfizierung wird diese Konsequenz zu einem scharfen Ausgabewert reduziert. Für die Verknüpfung von Zugehörigkeitsgraden stehen logische Operatoren zur Verfügung, die denen der klassischen Mengenlehre entsprechen.

Die Fuzzy-Logik erlaubt eine intuitive Darstellung von komplexen Systemen mittels Expertenwissen oder menschlicher Erfahrung unter Nutzung von sprachlichen Beschreibungen. Sie findet in Form von Fuzzy-Reglern Anwendung in der Automatisierungs- und Fahrzeugtechnik. In verschiedenen Untersuchungen sind Fuzzysysteme für die Erkennung von Fahrmanövern erfolgreich eingesetzt worden. *Bauer* oder *Lidström und Larsson* nutzen diese für die Erkennung von Abbiegevorgängen an Kreuzungen im städtischen Verkehr. [12][87] Eine Spurwechselabsicht mittels einer unscharfen Logik wird in den Arbeiten von *Schneider* und *Schmitt et al.* detektiert. [117][120]

2.5.2. BAYES'SCHE NETZE

Das Bayes'sche Netz ist eine Methode, um bedingte Wahrscheinlichkeitsverteilungen darzustellen. Es wird repräsentiert durch einen gerichteten, azyklischen Graph $G = (V, E)$. Dabei stellen die Knoten V die Zufallsvariable dar, die Kanten E des Graphen entsprechen den bedingten Abhängigkeiten zwischen den Zufallsvariablen. Durch den Graph lassen sich die bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Knoten und schließlich die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Variable bestimmen. Dies erfolgt durch die Nutzung des Satzes von Bayes:

$$P(A | B) = \frac{P(B | A)P(A)}{P(B)} \quad (2.3)$$

Dazu wird die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(V_i | V_{\text{Eltern}(i)})$ eines Knoten V_i unter Betrachtung von dessen Elternknoten $V_{\text{Eltern}(i)}$ bestimmt zu

$$P(V_i | V_{\text{Eltern}(i)}) = P(V_i) \prod_i P(V_{\text{Eltern}(i)} | P(V_i)). \quad (2.4)$$

Die Inferenz erfolgt je nach Problemstellung entweder kausal oder diagnostisch.

Die Topologie eines Netzes wird grundsätzlich mittels Expertenwissens erstellt. Auch die bedingten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen lassen sich auf diese Weise vorgeben, allerdings ist der Einsatz von Parameterlernverfahren weit verbreitet. An dieser Stelle existieren exakte und approximative Verfahren. Der populärste Ansatz ist das stochastische Schätzverfahren MLE¹⁸, das eine approximative Lösung berechnet. [68]

Der Ansatz des Bayes'schen Netzes wird in Expertensystemen zur Mustererkennung eingesetzt. Entsprechend existieren Detektionsalgorithmen, die Fahrerintentionen mittels Bayes'scher Netze erkennen.

¹⁸Maximum Likelihood Estimation

Die Erkennung eines Abbiegemanövers ist in den Ausarbeitungen von *Herrmann und Schroven*, *Klanner* oder *Liebner et al.* beschrieben. [56][76][89] Auch die Detektion eines Spurwechsellvorgangs wird durch *Kasper et al.*, *Schubert et al.* oder *Tezuka et al.* nachgewiesen. [73][121][133]

2.6. DAS KALMAN FILTER

Die Beschreibung einer Vielzahl an technischen Prozessen kann in einem Zustandsraum modelliert werden. Dieses Zustandsraummodell kann zeitkontinuierlich oder diskret sowie linear oder nichtlinear sein. Im Folgenden werden zeitdiskrete Systeme betrachtet, die sowohl lineare als auch nichtlineare Modelle nutzen. [9]

Die grundlegende Problemstellung stellt die Schätzung des Zustandsvektors \mathbf{x}_k aus einer vorhandenen Messung \mathbf{y}_k dar. \mathbf{x}_k und \mathbf{y}_k sind Vektoren und werden zu diskreten Zeitpunkten k erfasst. Der Zustandsvektor

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{v}_k) \tag{2.5}$$

ist eine Funktion des Zustandsvektors \mathbf{x}_{k-1} zum vorigen Zeitschritt $k - 1$ und der Realisierung des stochastischen Systemrauschens \mathbf{v}_k . Die Beobachtung

$$\mathbf{y}_k = h(\mathbf{x}_k, \mathbf{w}_k) \tag{2.6}$$

ist eine Funktion des Zustandsvektors \mathbf{x}_k zum aktuellen Zeitschritt k und der Realisation des stochastischen Beobachtungsrauschens \mathbf{w}_k . Die Schätzung der Wahrscheinlichkeitsdichte $p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{y}_0, \dots, \mathbf{y}_k)$ unter Betrachtung der vorhandenen Beobachtungen \mathbf{y}_k und die Auswahl einer Realisierung dieser Wahrscheinlichkeitsdichte stellt eine Lösung der Problemstellung dar. Die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsdichte $p(\mathbf{x}_k \mid \mathbf{y}_0, \dots, \mathbf{y}_k)$ ist im Allgemeinen analytisch nicht möglich.

Die Annahme eines linearen Systems und einer Normalverteilung der Wahrscheinlichkeitsdichten ermöglicht die Anwendung des Kalman Filters (KF), der eine optimale Schätzung der relevanten Daten ermittelt. [71]

Unter Annahme eines linearen stochastischen Systems kann Gleichung 2.5 als

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{v}_{k-1} \quad (2.7)$$

mit der Systemmatrix \mathbf{F} und Gleichung 2.6 als

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad (2.8)$$

mit der Messmatrix \mathbf{H} beschrieben werden.

Die Bestimmung einer Schätzung $\hat{\mathbf{x}}_k$ des Zustandsvektors \mathbf{x}_k durch das KF erfolgt rekursiv und in zwei Schritten. In einem Prädiktionsschritt wird $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ zum Zeitpunkt $k - 1$ prädiziert durch

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}. \quad (2.9)$$

Gleichzeitig wird die Kovarianz $\mathbf{P}_{k|k-1}$ bestimmt zu

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{Q}, \quad (2.10)$$

wobei \mathbf{Q} die Kovarianz des Systemrauschens \mathbf{v}_k ist, und die Messung $\hat{\mathbf{y}}_{k|k-1}$ prädiziert mit

$$\hat{\mathbf{y}}_{k|k-1} = \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}. \quad (2.11)$$

In einem Korrekturschritt wird anhand der aktuellen Messung \mathbf{y}_k die Schätzung $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ des Zustandsvektors \mathbf{x}_k berechnet durch die Gleichung

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{y}_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (2.12)$$

und die Kovarianz $\mathbf{P}_{k|k}$ durch die Gleichung

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H})\mathbf{P}_{k|k-1} \quad (2.13)$$

aktualisiert. Die Kalman-Matrix \mathbf{K}_k ist gegeben durch

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^T \left[\mathbf{H} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R} \right]^{-1}, \quad (2.14)$$

mit der Kovarianz \mathbf{R} des Beobachtungsrauschens \mathbf{w}_k .

Das KF bestimmt eine optimale Schätzung von \mathbf{x}_k für lineare Systeme und bei Normalverteilung der Wahrscheinlichkeitsdichten. Falls es sich um ein nichtlineares System handelt, muss das Filterverfahren angepasst werden. Das Extended Kalman Filter (EKF) linearisiert dabei das Modell anhand einer Taylor-Reihenentwicklung. [46]

Für ein nichtlineares System gilt grundlegend die Zustandsgleichung

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{v}_k \quad (2.15)$$

und die Messgleichung

$$\mathbf{y}_k = h(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k. \quad (2.16)$$

Die Funktionen f und h werden genutzt, um den prädizierten Zustand oder den Korrekturschritt zu berechnen. Allerdings müssen diese für die Berechnung der Kovarianz linearisiert werden. Dies wird durch die Nutzung der Jacobimatrix \mathbf{J} , die Matrix der ersten partiellen Ableitungen, erreicht. Der Prädiktionsschritt ergibt sich zu

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}) \quad (2.17)$$

und

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{J}_F \mathbf{P}_{k-1|k-1} \mathbf{J}_F^T + \mathbf{Q}, \quad (2.18)$$

wobei die Jacobimatrix \mathbf{J}_F die partielle Ableitung

$$\mathbf{J}_F = \left. \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}} \quad (2.19)$$

ist. Die Linearisierung des Korrekturschritts führt zu den Gleichungen

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k \left(\mathbf{y}_k - h(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \right), \quad (2.20)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{J}_H) \mathbf{P}_{k|k-1}, \quad (2.21)$$

und

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^T \left[\mathbf{J}_H \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{J}_H^T + \mathbf{R} \right]^{-1} \quad (2.22)$$

mit

$$\mathbf{J}_H = \left. \frac{\partial h}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}}. \quad (2.23)$$

Das KF oder dessen Abwandlungen stellen ein gängiges Verfahren zur Prädiktion von zukünftigen Systemzuständen dar. Die Bewegung von Fahrzeugen als Anwendung im Automobilbereich wurde in verschiedenen Untersuchungen erfolgreich vorausgesagt. [11][65][106][131] Eine allgemein praktikable Lösung kann durch die Nutzung von Partikelfiltern erfolgen. [111] Ein Partikelfilter approximiert die Wahrscheinlichkeitsdichte $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{y}_0, \dots, \mathbf{y}_k)$ und ermöglicht die Bestimmung einer Lösung durch geeignete Verfahren.

2.7. GESETZLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Grundlegend bedarf die Zulassung eines Kraftfahrzeugs in der Europäischen Union einer Betriebserlaubnis. Die notwendigen Bestimmungen zur Erlangung einer Betriebserlaubnis sind in Form von Regelungen der Wirtschaftskommission für Europa (engl.: Economic Commission for Europe, ECE) der Vereinten Nationen festgehalten. Lichttechnische Einrichtungen in einem Kraftfahrzeug unterliegen gesetzlichen Regelungen, die bei der Auslegung von LBAS beachtet werden müssen.

Für den Einsatz von LBAS gelten insbesondere die ECE-Regelungen

- R48 *Beleuchtung/Signaleinrichtungen Kraftfahrzeug* und
- R123 *Adaptive Frontbeleuchtungssysteme (AFS)*. [34][35]

Die ECE-Regelung R48 bestimmt Rahmenbedingungen der geometrischen Form und Anordnung der Beleuchtungseinrichtung, dem Aufbau an einem Kraftfahrzeug und der elektrischen Schaltung. [63] Des Weiteren ist der Einsatz verschiedener Lichtverteilungen für bestimmte Situationen geregelt, die ein adaptives Frontbeleuchtungssystem erfordern.

Eine ausführliche Regelung von adaptiven Lichtfunktionen ist in der ECE-Regelung R123 beschrieben. Dies beinhaltet die Erlaubnis zum Betreiben eines adaptiven Fernlichts mit einer an den Verkehrsraum angepassten Lichtverteilung, um die Sichtweite des Fahrers zu erhöhen, allerdings unter Vorbehalt der Sicherstellung einer Entblendung anderer Verkehrsteilnehmer.

Die prädiktiven Lichtfunktionen, die in dieser Arbeit entwickelt werden, erfordern eine Betrachtung der Zulassungsfähigkeit. Das blendfreie Fernlicht mit einer adaptiven Ansteuerung der Sicherheitsbereiche ist regelkonform, insofern die Entblendung anderer Verkehrsteilnehmer unter Einhaltung der laut ECE-Regelung R123 vorgegebenen Messwerte eingehalten wird. Die situationsadaptiven Lichtfunktionen, die eine Handlungsempfehlung für den Fahrer in bestimmten Verkehrssituationen darstellen, sind unter Berücksichtigung der ECE-Regelung R48 als Lichtverteilungen eines AFS möglich. Dabei sind die Verkehrssituationen, in denen die Handlungsempfehlungen aktiviert werden, anhand von Rahmenbedingungen zu definieren und die vorgeschriebenen Messwerte der Regelung einzuhalten.

KAPITEL 3

KONZEPTIONIERUNG UND ANFORDERUNGSERHEBUNG

In den folgenden Abschnitten werden die Aufgabenstellung, die in dieser Arbeit betrachtet werden soll, und die zu entwickelnden Lichtfunktionen beschrieben. Außerdem werden die Anforderungen an das zu entwickelnde System und dessen Einordnung im Bereich der Lichtassistentenfunktionen diskutiert.

3.1. PROBLEMSTELLUNG

Eine hochauflösende Lichtverteilung bietet ein großes Potenzial für die Entwicklung von Lichtassistentenfunktionen. Einerseits lassen sich bestehende Lichtfunktionen verbessern, andererseits lassen sich neuartige Lichtassistentensysteme realisieren, die den Fahrer bei nächtlichen Fahrten unterstützen. Allerdings ergeben sich gleichzeitig hohe Anforderungen an die Fahrzeugsensoren und die Ansteuerungseinheit der Scheinwerfer. Das Potenzial soll in dieser Arbeit anhand des blendfreien Fernlichts und der Entwicklung einer Lichtfunktion zur Unterstützung des Fahrers in dynamischen Verkehrsszenarien untersucht werden.

Der Nutzungsgrad des blendfreien Fernlichts hängt von dem zu entblendenden Bereich um einen anderen Verkehrsteilnehmer ab, der so klein wie möglich zu wählen ist. [64] Für das blendfreie Fernlicht ist

die Kalibrierung der Scheinwerfer im Fahrzeug eine grundlegende Problemstellung. Die Funktionsfähigkeit des blendfreien Fernlichts erfordert aufgrund von Fertigungs- und Einbautoleranzen eine Kalibrierung der Scheinwerfer und der Fahrzeugsensoren zueinander. Durch Ungenauigkeiten bei der Einstellung ist der Vorhalt eines Sicherheitsbereichs erforderlich, der den Dunkelbereich bei der Entblendung anderer Verkehrsteilnehmer vergrößert, um diesen Toleranzen entgegenzuwirken. [135] Ein fortlaufender Abgleich der Lage zwischen Fahrzeugsensoren und Scheinwerfern erlaubt allerdings eine ausreichend genaue Kalibrierung der Scheinwerfer im Fahrbetrieb und eine Vernachlässigung dieses Vorhalts. [124] Eine wesentliche Auswirkung, die einem höheren Wirkungsgrad des Fernlichts entgegenwirkt, ergibt sich aus der Latenz bei der Verarbeitung von Sensordaten und der anschließenden Ansteuerung des Scheinwerfersystems. [50] In Verbindung mit der hohen Dynamik im Straßenverkehr reduziert sich das Potenzial einer hochgenauen Ausblendung anderer Verkehrsteilnehmer. [51][109] Entsprechend dem Prinzip des Situationsbewusstseins, das in Kapitel 2 diskutiert wurde, stellt der Ansatz der Vorausschau eine Möglichkeit dar, um dem entgegenzuwirken. [159] Das Ziel ist eine Voraussage von zukünftigen Zuständen der Verkehrsteilnehmer im Verkehrsraum zu treffen. Dabei ist der Zustand eines Fahrzeugs durch eine Trajektorie bestimmt. Die Annahme, dass eine Prädiktion dieser Fahrzeugtrajektorie über einen ausreichend großen Zeitraum die Auswirkung von Latenzen bei der Verarbeitung von Informationen kompensieren kann, ist eine Problemstellung, die in dieser Arbeit untersucht werden soll.

Die Entwicklung von neuen LBAS basiert auf der Möglichkeit, mit hochauflösenden Scheinwerfersystemen präzise Handlungsempfehlungen auf der Fahrbahn darzustellen. Bei der Konzeptionierung dieser Lichtfunktionen ist eine Auswahl nach Verkehrsszenarien sinnvoll, die eine hohe Aufmerksamkeit des Fahrers erfordern und daher ein

Risikopotenzial für Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern darstellen. Bei Betrachtung von Unfallstatistiken zeigt sich, dass besonders bei Abbiegevorgängen an Kreuzungen in Ortschaften oder auf Landstraßen oder bei Spurwechseln auf Bundesstraßen und Autobahnen eine erhöhte Gefährdung ausgeht. Im Jahr 2006 geschahen etwa 36% aller Unfälle mit Personenschaden an Kreuzungen. [90] Einer Untersuchung von *Vollrath et al.* zufolge könnten etwa 26% der schweren Unfälle durch den Einsatz von FAS verhindert werden. [141] Nach einer Auswertung von Unfalldaten der GIDAS ereignen sich zwischen den Jahren 1985 und 1999 durchschnittlich etwa 5% aller Unfälle bei der Durchführung von Spurwechseln auf Landstraßen und Autobahnen. [10]

Deshalb werden im Verlauf dieser Arbeit situationsadaptive Lichtfunktionen entwickelt, die den Fahrer bei einem Abbiege- oder Spurwechselwunsch assistieren sollen. Im Detail soll eine Lichtverteilung realisiert werden, die bei einem Abbiegevorhaben des Fahrers in einem Kreuzungsszenario oder bei einem anstehenden Spurwechsel auf einer Landstraße oder Autobahn eine Handlungsempfehlung zur Durchführung des Manövers darstellt, falls dieses als sicher klassifiziert wird. Auf der anderen Seite soll die Lichtfunktion eine Warnung darstellen, falls eine Ausführung der Manövers zu einer Kollision mit einem anderen Verkehrsteilnehmer führen könnte. Auch hier bietet das Konzept des Situationsbewusstseins mit den Ansätzen der Interpretation und der Prädiktion eine mögliche Vorgehensweise zur Verwirklichung.

3.2. PRÄDIKTIVE LICHTFUNKTIONEN

In diesem Abschnitt werden die prädiktiven Lichtfunktionen konzeptioniert, die in den folgenden Kapiteln entwickelt und auf ihre Leistungsfähigkeit und Wirksamkeit untersucht werden sollen. Das

blendfreie Fernlicht mit prädiktivem Anteil nutzt die Voraussage über zukünftige Positionen der Verkehrsteilnehmer, um die Grenzen der Dunkelbereiche anzupassen. Die situationsadaptiven Lichtassistentenfunktionen entsprechen bei einem bevorstehenden Abbiege- oder Spurwechselfvorgang einer Lichtverteilung, welche die Ausführung des Manövers empfiehlt oder eine Warnung darstellt.

3.2.1. PRÄDIKTIVES BLENDFREIES FERNLICHT

Der Dunkelbereich des blendfreien Fernlichts, der zur Entblendung eines vorausfahrenden oder entgegenkommenden Fahrzeugs dient, wird derzeit aufgrund von Toleranzen bei der Fertigung, beim Einbau, bei der Einstellung des Scheinwerfers im Fahrzeug sowie von Latenzen bei der Ansteuerung mit einem Sicherheitsbereich versehen. Dieser vergrößert den Dunkelbereich, der grundlegend auf die Ausdehnung des Objekts ausgelegt wird, um einen statischen Wert. Eine Visualisierung des Dunkelbereichs mit einer Aufteilung in eine Sicherheitslücke, die durch das zu entblendende Objekt bestimmt ist, und in einen Sicherheitsbereich, der aufgrund von Toleranzen veranschlagt wird, ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

Bei dem Einsatz einer hochauflösenden Lichtverteilung ohne prädiktiven Anteil wirkt dieser Sicherheitsbereich der Maximierung der Fernlichtausbeute entgegen. Dieser ist vor allem aufgrund der Latenz bei der Erfassung des Objekts und Ansteuerung des Scheinwerfers notwendig. Die Verringerung des Sicherheitsbereichs bewirkt vorrangig eine Erhöhung des Komforts für den Fahrer bei Nacht. Die Auswirkung auf den Sicherheitsgewinn ist im Vergleich hierzu aufgrund des niedrigen Anteils an der gesamten Fernlichtverteilung geringer.

Das blendfreie Fernlicht mit prädiktivem Anteil nutzt eine Voraussage über die Trajektorie des eigenen Fahrzeugs sowie über die Trajektorie

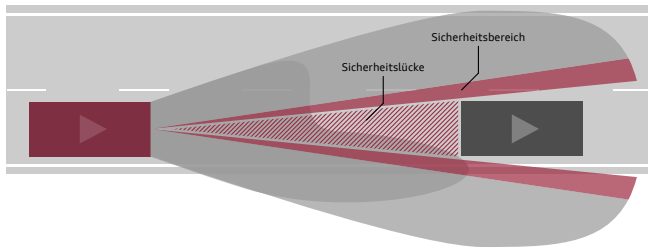
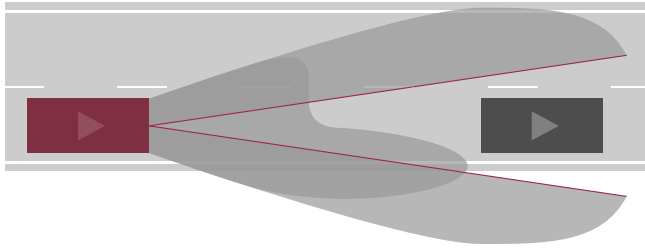
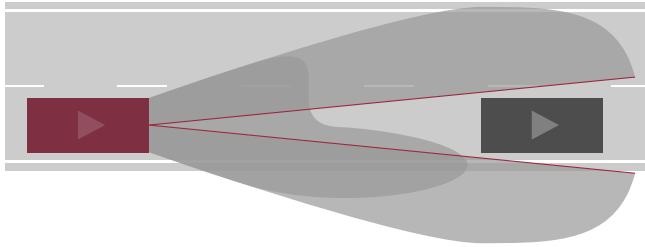


Abbildung 3.1.: Lichtverteilung eines blendfreien Fernlichts mit einem vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer und einer Einteilung des Dunkelbereichs in Sicherheitslücke und Sicherheitsbereich

eines anderen Verkehrsteilnehmers, um die Sicherheitsbereiche adaptiv anzupassen. Da der Einfluss der Fertigungs- und Einbautoleranzen, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, mittels einer Kalibrierung des Scheinwerfers zur Laufzeit vernachlässigbar ist, kann auf einen statisch festgelegten Sicherheitsbereich verzichtet werden. Der Sicherheitsbereich wird nur bei Bedarf in Situationen mit erhöhter Dynamik addiert. Abbildungen 3.2 und 3.3 zeigen eine mögliche Gestaltung des adaptiven Sicherheitsbereichs und einen Vergleich zur konventionellen Ansteuerung bei der Fahrt auf einer geraden und einer kurvigen Straße. Dabei ist der Sicherheitsbereich bei der Fahrt auf einer geraden Straße beidseitig verringert, da keine Querdynamik des vorausfahrenden Verkehrsteilnehmers präzisiert wird. Innerhalb einer Kurvenfahrt kann anhand der Voraussage der Trajektorien der Sicherheitsbereich zur Kurveninnenseite vergrößert und zur Außenseite reduziert werden. Durch die dynamische Ansteuerung des Sicherheitsbereichs mithilfe der Prädiktion wird eine Erhöhung des Nutzungsgrads des Fernlichts erwartet.



(a) Dunkellücke ohne prädiktive Ansteuerung der Sicherheitsbereiche



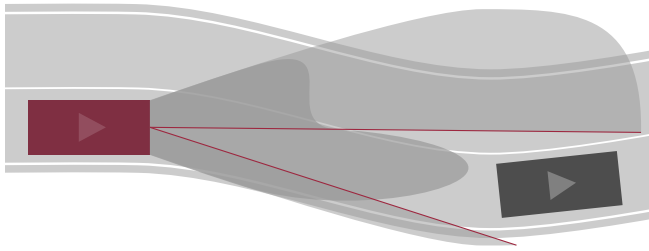
(b) Dunkellücke mit prädiktiver Ansteuerung der Sicherheitsbereiche

Abbildung 3.2.: Vergleich des Dunkelbereichs bei einem geraden Straßenverlauf

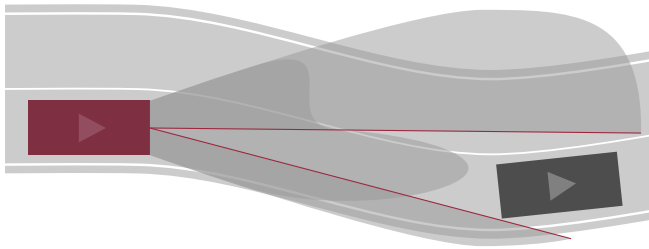
3.2.2. SITUATIONSADAPTIVE LICHTASSISTENZFUNKTIONEN

Die situationsadaptiven Lichtassistentenfunktionen dienen der Unterstützung des Fahrers in Verkehrsszenarien, die eine erhöhte Aufmerksamkeit erfordern. Laut Abschnitt 3.1 sind dies vorwiegend Abbiegevorgänge an Kreuzungen und Spurwechsel auf Landstraßen oder Autobahnen.

An Kreuzungen können verschiedene Konstellationen auftreten, die ein Kollisionspotenzial hervorrufen. Grundlegend sind Lichtsignalanlagen und Verkehrszeichen zur Regelung des Verkehrsflusses zu beachten. Diese können von Fahrzeugsensoren erfasst werden, um Assistenzfunktionen für den Kreuzungsbereich auszulösen. In folgenden Untersuchungen liegt der Fokus auf Kreuzungen, in denen



(a) Dunkellücke ohne prädiktive Ansteuerung der Sicherheitsbereiche



(b) Dunkellücke mit prädiktiver Ansteuerung der Sicherheitsbereiche

Abbildung 3.3.: Vergleich des Dunkelbereichs bei einem geraden Straßenverlauf

dieser Umstand nicht gegeben ist. Eine solche Situation ist beispielhaft in Abbildung 3.4 dargestellt. Unter der Annahme, dass der Fahrer des Fahrzeugs die Absicht hat einen Abbiegevorgang durchzuführen, ergeben sich verschiedene mögliche Konstellationen. In einer ersten befinden sich keine weiteren Verkehrsteilnehmer innerhalb der Kreuzung. In diesem Fall kann der Abbiegevorgang sicher ausgeführt werden. Die andere Situation ist beschrieben durch einen anderen Verkehrsteilnehmer, der den angestrebten Weg des Fahrzeugs kreuzt. Dies kann ein entgegenkommendes Fahrzeug sein oder ein Fahrradfahrer, der in dieselbe Fahrtrichtung fährt. In diesem Fall besteht eine erhöhte Kollisionsgefahr, bei der vor allem für Verkehrsteilnehmer wie Fußgänger oder Fahrradfahrer ein hohes Verletzungsrisiko besteht.

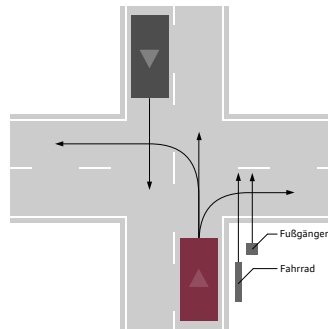


Abbildung 3.4.: Schematische Darstellung einer Kreuzungssituation

Spurwechsel werden vorrangig auf Bundesstraßen oder Autobahnen mit baulicher Trennung für Fahrspuren mit entgegengesetzter Fahrtrichtung ausgeführt. Dieser Vorgang ist in den meisten Fällen begründet durch die Intention, einen vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer zu überholen. In diesem Szenario kann ebenfalls zwischen einer sicheren und einer kritischen Ausführung unterschieden werden. Für den Fall, dass sich kein anderer Verkehrsteilnehmer mit einer höheren Geschwindigkeit auf der Nebenspur annähert, kann der Spurwechsel sicher durchgeführt werden, ansonsten ist ein Kollisionspotenzial gegeben. Diese beiden Möglichkeiten zeigt Abbildung 3.5.

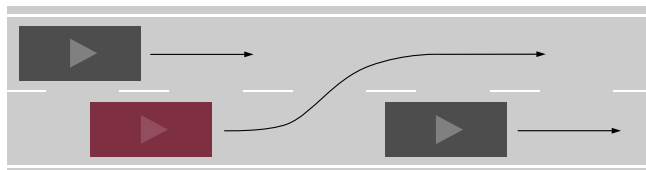


Abbildung 3.5.: Schematische Darstellung einer Spurwechselsituation

Um den Fahrer in diesen Situationen optimal zu unterstützen, muss grundlegend die Wahrnehmung und Interpretation der Verkehrssituation sichergestellt werden, vor allem müssen aber die Lichtassistentenfunktionen für den Fahrer eindeutig und intuitiv sein. Dies kann durch

eine durchgängige Gestaltung erreicht werden, die in ihrer Auslegung den beschriebenen LBAS aus Kapitel 2 entspricht. Als Grundlage kann bei hochauflösenden Scheinwerfersystemen eine Lichtfunktion dienen, die die eigene Fahrspur präzise ausleuchtet, wie in Abbildung 3.6 skizziert.



Abbildung 3.6.: Simulation einer Fahrspurausleuchtung als Basis für situationsadaptive Lichtfunktionen

Ausgehend von dieser Lichtfunktion kann eine Adaption durchgeführt werden, die situationsabhängig eine Handlungsempfehlung darstellt. Einerseits kann eine Empfehlung durch eine Darstellung der Abbiege- oder Spurwechseltrajektorie innerhalb der Lichtverteilung erreicht werden. Diese Auslegung entspricht dem Funktionsprinzip des dynamischen Kurvenlichts mit einer prädiktiven Schwenkstrategie. [43] Das Blickverhalten des Fahrers wird durch die Verlagerung der Lichtintensität gesteuert und dementsprechend dessen Aufmerksamkeit, die direkt mit dem Blickverhalten zusammenhängt. [24] Eine ähnliche Lichtfunktion wurde durch *Krahnstöver* für eine Einfädelsituation nach Auffahrten untersucht. [82] Andererseits kann zur Warnung bei einer möglichen Kollision mit einem anderen Verkehrsteilnehmer die Ausleuchtung der Fahrspur begrenzt und eine Haltelinie projiziert werden. Das Prinzip einer Lichtsperrung als Projektion auf der Fahrbahn, die diesem Ansatz entspricht, wurde bereits in Verbindung mit einem Markierungslicht durch *Grunert* untersucht. [49] Diese Variante der

empfehlenden und der warnenden Lichtfunktionen ist in Abbildung 3.7 beispielhaft für eine Spurwechselsituation skizziert.

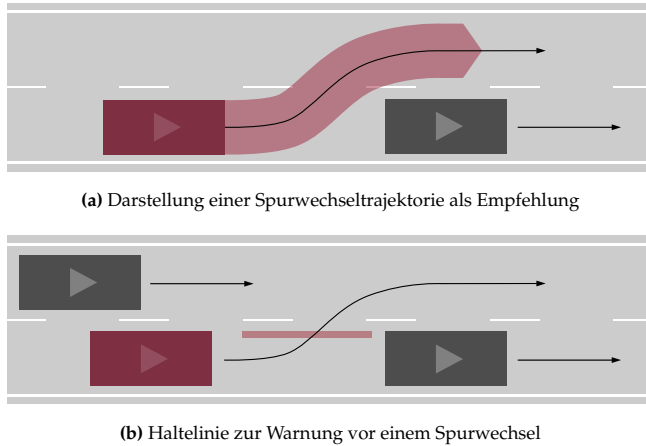
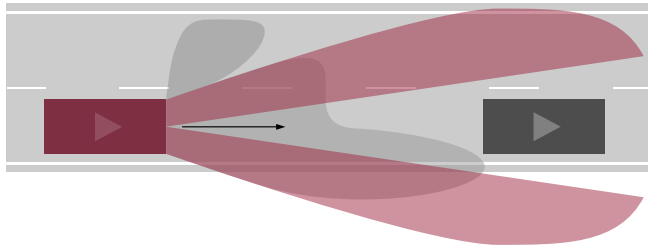
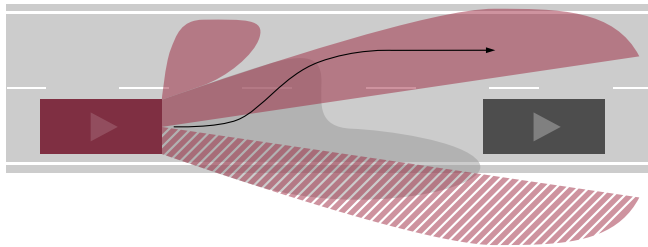


Abbildung 3.7.: Situationsadaptive Lichtfunktionen für ein Spurwechselmanöver

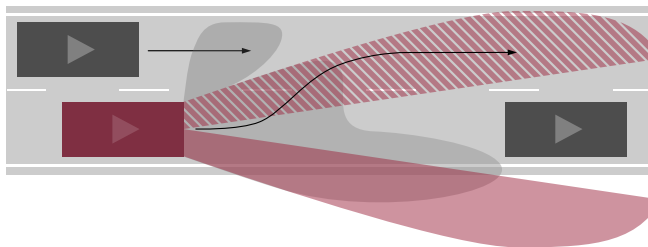
Die beschriebene Ausführung der Lichtassistenzfunktionen ist jedoch nur mit einem Einsatz hochauflösender Scheinwerfersysteme möglich. Allerdings bieten auch adaptive Scheinwerfer, die in Kapitel 2 beschrieben wurden, gewisse Möglichkeiten zur Darstellung einer intuitiven Lichtverteilung, die einer Empfehlung zur Durchführung oder einer Warnung zum Abbruch der Intention entsprechen. Möglich wird dies durch die Ansteuerung der einzelnen Fernlichtbereiche und des Abbiegelichts sowie einer Lichtschwerpunktverschiebung im Abblendlicht. Eine mögliche Ausführungsform zeigt Abbildung 3.8. Dabei wird zur Darstellung der Spurwechselempfehlung das Abbiegelicht auf der entsprechenden Seite eingeschaltet, während die Intensität des Fernlichts auf der entgegengesetzten Seite reduziert wird. Die Warnung wird durch das Verringern der Fernlichthelligkeit erreicht.



(a) Ausgangssituation mit blendfreiem Fernlicht



(b) Lichtverteilung zur Empfehlung eines Spurwechsels



(c) Lichtverteilung zur Warnung vor einem Spurwechsel

Abbildung 3.8.: Situationsadaptive Lichtassistenzfunktion bei einem Spurwechsel für ein adaptives Scheinwerfersystem

3.3. ANFORDERUNGEN AN DAS SYSTEM

Die Lichtfunktionen und das Gesamtsystem müssen verschiedenen Anforderungen genügen, die im Folgenden erfasst werden.

Das Ziel hinsichtlich des Gesamtsystems ist eine Möglichkeit der Portierung mit festgelegten Schnittstellen für den Einsatz unterschiedlicher Sensor- und Aktuatorkonstellationen. Deshalb muss die Modularität des Systems sichergestellt werden. In einem ersten Schritt muss die Verfügbarkeit von Sensordaten, die für die weitere Verarbeitung notwendig sind, sichergestellt werden. Die Fahrzeugsensoren müssen zumindest die erforderlichen Daten bereitstellen, um die Eingangsschnittstelle des Systems bedienen zu können.

Für die prädiktive Ansteuerung des blendfreien Fernlichts ist eine permanente Voraussage der Trajektorien des eigenen Fahrzeugs sowie anderer Verkehrsteilnehmer notwendig. Ausschlaggebend für die Nutzung sind der prädizierte Zeitraum und die Genauigkeit der Trajektorienprädiktion innerhalb dieses Zeitraums. Für die Bestimmung des erforderlichen Zeitraums sind einerseits die Latenzzeit bei der Ansteuerung von Sensor zu Aktuator, andererseits die mögliche Bewegungsspanne der Verkehrsteilnehmer innerhalb dieser Latenzzeit zu betrachten. In Abbildung 3.9 ist die Verarbeitungskette von den Fahrzeugsensoren bis zu den Scheinwerfern vereinfacht dargestellt und jeder Einheit eine Verarbeitungs- oder Übertragungszeit zugeordnet. Diese können je nach Sensor, Übertragungstechnologie oder Ansteuerungseinheit variieren, die angenommenen Werte entsprechen Erwartungswerten des aktuellen Stands der Technik. Nach Abbildung 3.9 beträgt die angenommene Latenzzeit über die gesamte Verarbeitungskette 100 ms.

Die Bewegung, welche die betrachteten Verkehrsteilnehmer in dieser Zeit ausführen, ist abhängig von dem betrachteten Verkehrsszenario. Für die weitere Betrachtung wird eine Begegnungsfahrt zweier Ver-

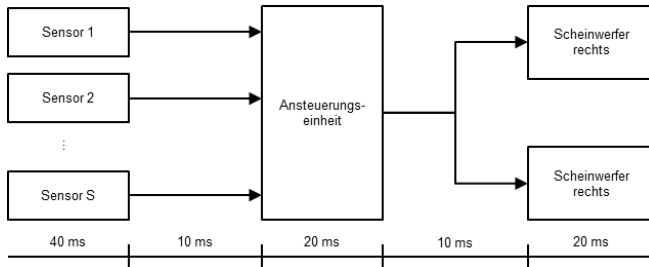


Abbildung 3.9.: Verarbeitungskette von Sensor zu Scheinwerfer mit einer Abschätzung der Latenzzeiten

kehrsteilnehmer auf einer Landstraße, die in Abbildung 3.10 skizziert ist, als Situation ausgewählt, da die Dynamik bei einer Begegnungsfahrt die höchsten Anforderungen an die Latenz der Ansteuerung stellt.

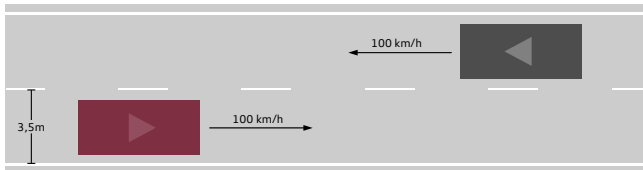


Abbildung 3.10.: Begegnungsfahrt zweier Fahrzeuge auf einer geraden Landstraße

Für die Bewegung der Verkehrsteilnehmer wird für beide Fahrzeuge eine Geschwindigkeit von 100 km/h angenommen, eine übliche Geschwindigkeitsbegrenzung für diese Straßenart. Entsprechend beträgt die Relativgeschwindigkeit $v_{rel} = 55,5$ m/s. In einer Zeit $t_{Latenz} = 100$ ms beträgt die zurückgelegte Wegstrecke daher $x_{Latenz} = 5,6$ m. Unter der Annahme einer Fahrspurweite von 3,5 m kann diese Wegstrecke in Abhängigkeit der Entfernung d_x zwischen den Fahrzeugen in eine Winkeländerung δ_{Latenz} umgerechnet werden. Diese ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

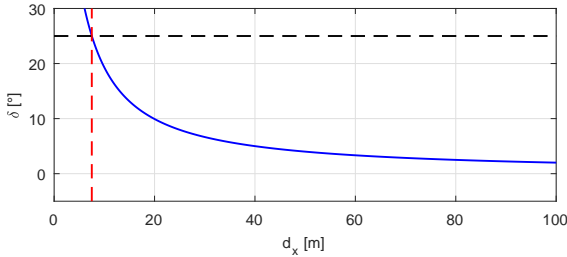


Abbildung 3.11.: Winkeländerung bei einer Begegnungsfahrt in Abhängigkeit der Entfernung

Bei einem Öffnungswinkel des Fernlichts von $\pm 25^\circ$ erfolgt die größte relevante Winkeländerung bei einer Entfernung von $d_x = 7,5$ m und entspricht einer Winkeländerung $\delta_{Latenz_{max}} = 10^\circ$. Bei einer konventionellen Ansteuerung müsste der Sicherheitsbereich entsprechend groß sein, um eine Blendung des entgegenkommenden Verkehrsteilnehmers sicherzustellen. Um dies zu kompensieren, muss die Trajektorien innerhalb dieses Zeitraums vorausgesagt werden. Daher gilt als Anforderung für die Trajektorienprädiktion eine Prädiktionszeit $t_{TP} \geq 100$ ms.

Des Weiteren ist bei der Trajektorienprädiktion der Prädiktionsfehler ϵ_{TP} innerhalb der Prädiktionszeit t_{TP} zu betrachten. Grundlegend soll die prädiktive Ansteuerung den Wirkungsgrad des Fernlichts erhöhen. Aktuelle Fernlichtsysteme nutzen eine Größe des Sicherheitsbereichs zwischen $0,6^\circ$ und $0,9^\circ$. [135] Deshalb wird als Anforderung für die Genauigkeit der Trajektorienprädiktion innerhalb der Prädiktionszeit t_{TP} ein Wert $\epsilon_{TP} \leq 0,6^\circ$ festgelegt.

Die Entwicklung der situationsadaptiven Lichtassistentenfunktionen aus Abschnitt 3.2.2 erfordert eine frühzeitige Erkennung einer Abbiege- oder Spurwechselabsicht, die im weiteren Verlauf als Manöverdetektion bezeichnet wird. Die Leistungsfähigkeit dieser Manöverdetektion wird ebenfalls anhand der Voraussagezeit und der Zuverlässigkeit der

Erkennung gemessen. Die erforderliche Voraussagezeit unterscheidet sich wie bei der Trajektorienprädiktion abhängig vom Verkehrsszenario. Ausgehend von den gängigen Geschwindigkeitsbegrenzungen sind die meisten Überholvorgänge auf Autobahnen abgedeckt durch eine Verkehrssituation, in der ein Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 130 km/h die Absicht hat, einen Lastwagen, der mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h fährt, zu überholen. Diese Situation ist beispielhaft in Abbildung 3.12 dargestellt.

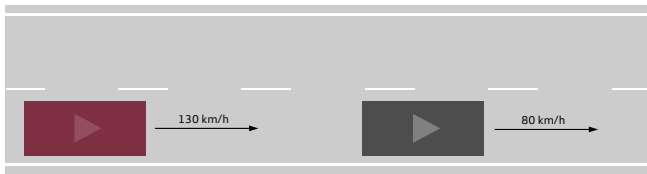


Abbildung 3.12.: Überholvorgang auf einer zweispurigen Straße

Der einzuhaltende Abstand bei einer Folgefahrt beträgt im Allgemeinen den halben Wert der Geschwindigkeit in Metern, was in dieser Situation einem Abstand von $d_{v/2} = 65$ m entspricht. Dieser Abstand bedeutet bei einer Relativgeschwindigkeit von $v_{rel} = 13,8$ m/s, dass die Aufprallzeit (engl.: Time to Collision, TTC) $t_{TTC_{v/2}} = 4,68$ s beträgt. Ein Verstoß gegen die Abstandsregelung wird in Deutschland bei Unterschreiten eines Abstands begangen, der einem Viertel des Geschwindigkeitswerts entspricht. In der beschriebenen Situation bedeutet das einen Abstand $d_{v/4} = 32,5$ m und eine Aufprallzeit $t_{TTC_{v/4}} = 2,34$ s. Die Durchführung eines Spurwechsels ist innerhalb dieses Zeitfensters sinnvoll. Daher ist eine Erkennung der Intention des Fahrers mit einer Voraussagezeit von $t_{MD_{max}} = 4,68$ s wünschenswert, eine Voraussagezeit von $t_{MD_{min}} = 2,34$ s zwingend erforderlich, um rechtzeitig eine Handlungsempfehlung für den Fahrer realisieren zu können.

Die Zuverlässigkeit der Manöverdetektion wird anhand einer Metrik für Klassifikatoren mittels der Richtig-positiv- und der Falsch-positiv-Rate bewertet. Als Anforderungen an das System werden dabei Werte von $R_{MD_{RP}} = 95\%$ für die Richtig-positiv-Rate und $R_{MD_{FP}} = 5\%$ für die Falsch-positiv-Rate festgelegt.

Die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Lichtfunktionen sollen sowohl für hochauflösende Scheinwerfersysteme als auch für adaptive Scheinwerfer, die gegenwärtig in Fahrzeugen verfügbar sind, anwendbar sein. Deshalb ist eine abstrakte Schnittstelle zu definieren, auf deren Basis eine hochaufgelöste Lichtverteilung generiert oder die elektronische Ansteuerung der Lichtquellen ermöglicht werden kann. Außerdem ist bei der Gestaltung darauf zu achten, dass die Lichtfunktionen eine intuitive Handlungsempfehlung für den Fahrer darstellen und dabei andere Verkehrsteilnehmer bei der Ausübung der Fahraufgabe nicht ablenken.

Die Anforderungen an das Gesamtsystem und die einzelnen Funktionssteile sind gesammelt in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Gesamtsystem	<ul style="list-style-type: none"> • Portierbarkeit des Systems • Modularer Aufbau
Sensoren	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung der erforderlichen Sensordaten • Nutzung einer definierten Schnittstelle
Trajektorienprädiktion	<ul style="list-style-type: none"> • Permanente Voraussage der Trajektorie von Fahrzeug und anderen Verkehrsteilnehmern • Prädiktionszeit $t_{TP} \geq 100$ ms • Prädiktionsfehler $\epsilon_{TP} \leq 0,6^\circ$
Manöverdetektion	<ul style="list-style-type: none"> • Erkennung einer Abbiege- oder Spurwechselabsicht • Voraussagezeit $t_{MD_{min}} \geq 2,34$ s • Richtig-positiv Rate $R_{MD_{RP}} \geq 95\%$ • Falsch-positiv Rate $R_{MD_{FP}} \leq 5\%$
Lichtfunktionen	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung für verschiedene Scheinwerfersysteme • Intuitive Handlungsempfehlung

Tabelle 3.1.: Anforderungen an die Funktionsteile des Gesamtsystems

3.4. EINORDNUNG IN DAS GESAMTSYSTEM

Die Lichtfunktionen, welche in Abschnitt 3.2 beschrieben sind, erfordern eine Eingliederung in das Gesamtsystem der Lichtassistentenfunktionen im Fahrzeug. Dies bedeutet, dass eine Abgrenzung zwischen den bereits bestehenden und den zu entwickelnden Lichtfunktionen besteht und eine Rückfallebene für einen Fehlerfall spezifiziert wird. Die prädiktive Berechnung des Sicherheitsbereichs für das blendfreie Fernlicht stellt eine Erweiterung der Funktion dar, daher bildet die grundlegende Ansteuerung mit statischen Sicherheitsbereichen die Rückfallebene, falls die Trajektorienprädiktion nicht verfügbar ist. In Abbildung 3.13 ist dies in einem Flussdiagramm dargestellt.

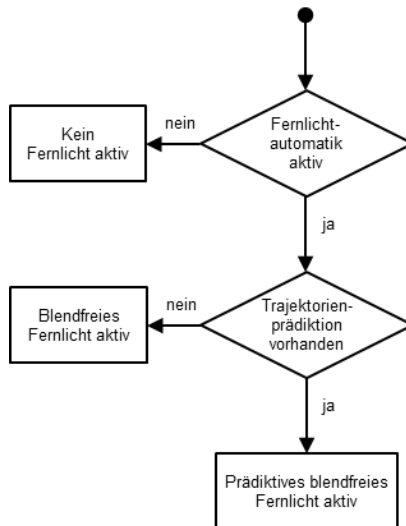


Abbildung 3.13.: Flussdiagramm zur Einordnung eines blendfreien Fernlichts mit prädiktiver Ansteuerung der Sicherheitsbereiche

Für die situationsadaptiven Lichtassistentenfunktionen ist eine Eingliederung abhängig von der Scheinwerfertechnologie erforderlich. Han-

delt es sich um ein hochauflösendes Scheinwerfersystem, kann die grundlegende Funktionsaktivierung an die automatische Lichtsteuerung des Ablend- oder Fernlichts gekoppelt werden. Unter der Annahme, dass die Grundlichtverteilung eine Lichtfunktion implementiert, welche die eigene Fahrspur beleuchtet, sind die situationsadaptiven Lichtassistentzfunktionen an deren Aktivierungslogik gekoppelt. Diese wird bis zu dem Zeitpunkt dargestellt, an dem eine Handlungsempfehlung aktiviert wird. Abbildung 3.14 zeigt einen möglichen Ablauf.

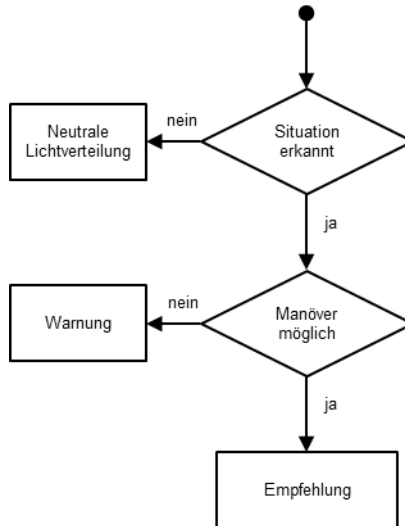


Abbildung 3.14.: Flussdiagramm zur Einordnung von situationsadaptiven Lichtassistentzfunktionen

KAPITEL 4

ENTWICKLUNG DES GESAMTSYSTEMS

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung des Systems zur Realisierung prädiktiver Lichtfunktionen. Dazu wird zunächst der Ansatz des Situationsbewusstseins auf die zu entwickelnden Funktionsteile abgebildet und die Systemarchitektur entworfen. In einem nächsten Schritt werden die erforderlichen Eingangsdaten definiert, die notwendigen Sensortechnologien für die Gewährleistung der Funktionsfähigkeit ausgewählt und die Schnittstelle zum System spezifiziert. Anschließend werden die Teilsysteme der Manöverdetektion und der Trajektorienprädiktion beschrieben, bevor in einem letzten Abschnitt die Lichtfunktionen und die Ausgangsschnittstelle diskutiert werden.

4.1. SYSTEMARCHITEKTUR

Ausgehend von der in Kapitel 3 beschriebenen Problemstellung und Anforderungserhebung wird im Folgenden die Systemarchitektur festgelegt. Den Anforderungen entsprechend, benötigt die Verwirklichung der beschriebenen Lichtfunktionen eine Erkennung von Abbiege- oder Spurwechselvorgängen sowie eine Voraussage über die zukünftige Bewegung des Egofahrzeugs und anderer Verkehrsteilnehmer. Diese Vorgehensweisen werden im Folgenden unter den Begriffen der Manöverdetektion und der Trajektorienprädiktion zusammengefasst.

Das Konzept des Situationsbewusstseins beinhaltet die Bestandteile der Wahrnehmung, des Verständnisses und der Vorausschau. Die Wahrnehmung entspricht der Umfelderkennung der Sensoren. Dabei können vorverarbeitete Daten der einzelnen Sensoren oder Informationen einer Sensordatenfusion genutzt werden. Das Verständnis entspricht der Manöverdetektion. Diese erkennt Zusammenhänge in der Umwelt, die auf einer Interaktion zwischen dem Fahrzeug und anderen Verkehrsteilnehmern oder der Umgebung basieren und nicht durch die reine Wahrnehmung der aktuellen Situation durch die Sensoren abbildbar sind. Grundlegend stellt die Manöverdetektion eine Vorausschau dar, da bereits Intentionen des Fahrers oder anderer Verkehrsteilnehmer erkannt werden. Vervollständigt wird die Vorausschau durch die Trajektorienprädiktion, die anhand von Fahrzeug- und Sensordaten sowie der Erkennung von Manövern die zukünftige Bewegung des Fahrzeugs und der anderer Verkehrsteilnehmer schätzt. Die Entscheidungsfindung beruht auf der Festlegung der Ausblendbereiche des blendfreien Fernlichts mittels der aktuellen und prädizierten Position des Egofahrzeugs und der anderen Verkehrsteilnehmer. Des Weiteren erfolgt in diesem Schritt die Aktivierung der situationsadaptiven Lichtfunktionen an einer Kreuzung oder bei einem bevorstehenden Spurwechsel. Als Handlungsschritt wird eine Lichtverteilung unter Berücksichtigung der darzustellenden Lichtassistenzsysteme realisiert und durch die Scheinwerfer dargestellt.

Die Gegenüberstellung zwischen den abstrakt definierten Bestandteilen des Situationsbewusstseins und den zu entwickelnden Systembestandteilen ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Daraus lässt sich die Systemarchitektur ableiten, die in Abbildung 4.2 gezeigt ist und im Folgenden beschrieben wird.

Die Umfeldinformationen der Sensoren dienen, wie in Abbildung 4.2 gezeigt, als Eingangsdaten einer Sensordatenfusion, die redundante oder komplementäre Inhalte fusioniert, oder direkt als Eingang für

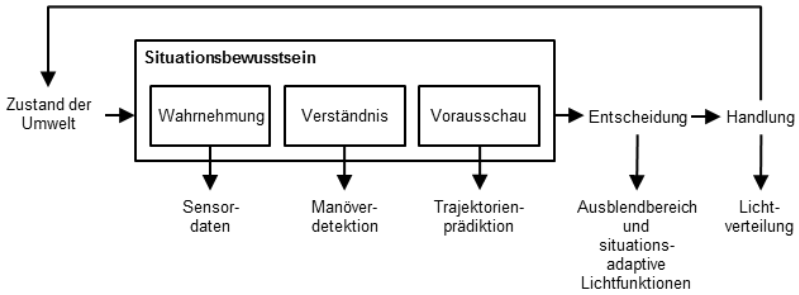


Abbildung 4.1.: Gegenüberstellung der Bestandteile des Situationsbewusstseins und der Systembestandteile

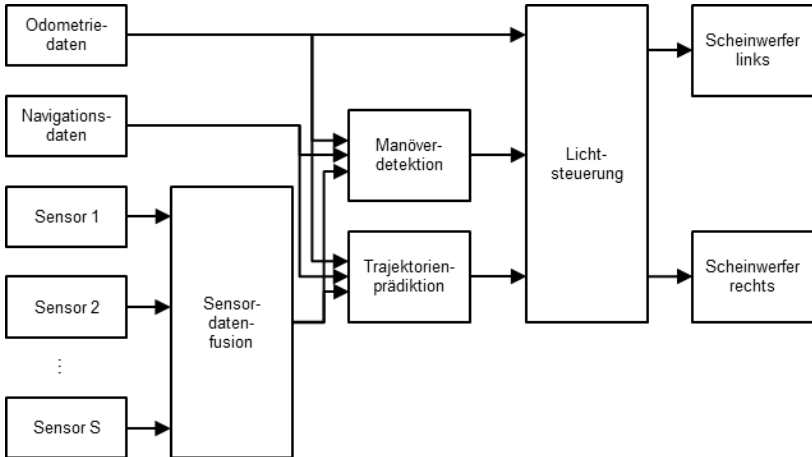


Abbildung 4.2.: Funktionsarchitektur des Systems

die Manöverdetektion und die Trajektorienprädiktion. Des Weiteren werden Odometriedaten des Fahrzeugs und Daten des Navigationssystems für die Funktionsteile bereitgestellt. Es besteht eine Verbindung zwischen der Manöverdetektion und der Trajektorienprädiktion, da die Trajektorienprädiktion die Information über die Erkennung eines Abbiege- oder Spurwechsellvorgangs nutzen kann, um die Voraussage der Bewegung anzupassen. Die grundlegende Verarbeitung der Infor-

mationen und die Aufbereitung für die Ansteuerung der Scheinwerfer erfolgt in einem Funktionsteil für die Lichtsteuerung. Dieser regelt das Zusammenspiel zwischen den einzelnen Lichtassistentzfunktionen und bestimmt allgemeingültige Informationen, die für die Berechnung der Lichtverteilung notwendig sind. Da das System verschiedene Scheinwerfertechnologien bedienen soll, verarbeitet die Lichtsteuerung diese Informationen anhand einer Spezifikation des Scheinwerfers, um die Darstellung der Lichtverteilung sicherzustellen.

4.2. DEFINITION DER EINGANGSDATENSCHNITTSTELLE

Das Egofahrzeug stellt Odometriedaten für die Berechnung der Manöverdetektion und der Trajektorienprädiktion bereit, wie die Geschwindigkeit v , die Beschleunigung a und die Gierrate γ . Des Weiteren werden Information über den Lenkwinkel θ , den Fahrtrichtungsanzeiger B sowie die Gas- und Bremspedalstellung p genutzt. Eine Übersicht über die Schnittstelle des Egofahrzeugs gibt Tabelle 4.1. Sowohl für die Odometriedaten des Egofahrzeugs als auch für die durch die Sensoren erfassten Objektdaten wird ein kartesisches Fahrzeugkoordinatensystem angenommen, dessen x-Achse, wie in Abbildung 4.3 gezeigt ist, die Längsachse des Fahrzeugs beschreibt. Die Berechnung der Manöverdetektion und der Trajektorienprädiktion benötigt genaue Informationen über die Distanz d_x und d_y , die Relativgeschwindigkeit v_x und v_y und die Relativbeschleunigung a_x und a_y anderer Verkehrsteilnehmer in longitudinaler und lateraler Richtung sowie deren Ausmaße in Form von Breite b und Höhe h . Tabelle 4.2 fasst die Schnittstelle zusammen, welche die Umfeldwahrnehmung des Egofahrzeugs für ein Objekt j , $j = 1, \dots, J$ bereitstellen muss. Dabei gilt die Schnittstelle sowohl für Objekte vor, neben als

Signal	Beschreibung	Einheit
v	Geschwindigkeit	m/s
a	Beschleunigung	m/s ²
$\dot{\gamma}$	Gierrate	°/s
θ	Lenkwinkel	°
B_{li}	Fahrtrichtungsanzeiger links	-
B_{re}	Fahrtrichtungsanzeiger rechts	-
p_{Gas}	Gaspedalstellung	%
p_{Brems}	Bremspedalstellung	%

Tabelle 4.1.: Schnittstelle des Egofahrzeugs

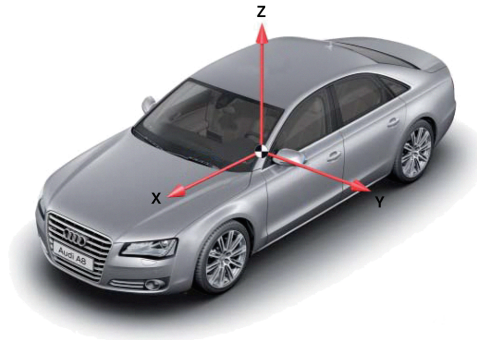


Abbildung 4.3.: Koordinatensystem des Egofahrzeugs

auch hinter dem Egofahrzeug. Eine Gegenüberstellung der einzelnen Sensortechnologien und deren Systemgrenzen sind in Kapitel 2 dargestellt. Zur Bereitstellung der benötigten Schnittstelle ist die Leistungsfähigkeit der Sensoren bei Dunkelheit zu bewerten. Im Allgemeinen reduziert sich bei Kamerasystemen und Bildverarbeitungsalgorithmen die Leistungsfähigkeit in der Nacht. Lediglich die Erkennung von Scheinwerfern oder Heckleuchten anderer Fahrzeuge über ein Kamerasystem ist nachts anderen Sensortechnologien überlegen. Für eine genaue Entfernungsmessung bieten nur Radar- oder Lidarsysteme

Signal	Beschreibung	Einheit
$d_x^{(j)}$	Entfernung in longitudinaler Richtung	m
$d_y^{(j)}$	Entfernung in lateraler Richtung	m
$v_x^{(j)}$	Relativgeschwindigkeit in longitudinaler Richtung	m/s
$v_y^{(j)}$	Relativgeschwindigkeit in lateraler Richtung	m/s
$b^{(j)}$	Breite	m
$h^{(j)}$	Höhe	m

Tabelle 4.2.: Schnittstelle der Umfeldwahrnehmung für ein Objekt $j, j = 1, \dots, J$

Messverfahren, die eine ausreichende Genauigkeit für eine Manöverdetektion oder eine Trajektorienprädiktion bieten. Das Messprinzip dieser Sensortechnologien erfährt weiterhin keine Einschränkung bei Dunkelheit.

Eine Erkennung von Fußgängern, die vor allem in Kreuzungsszenarien frühzeitig erkannt werden müssen, wird lediglich durch den Einsatz eines Nachtsichtsystems ermöglicht. In Tabelle 4.3 ist eine Bewertung der verschiedenen Sensortechnologien zusammengestellt, wobei für ein Kamerasystem zwischen einer konventionellen Bildverarbeitung für Fahrerassistenzsysteme (BV) und einer Bildverarbeitung für lichtbasierte Assistenzsysteme (LBAS) unterschieden wird. Die Gegenüberstellung in Tabelle 4.3 lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Nutzung jeweils einer einzelnen Sensortechnologie für die Entwicklung einer Trajektorienprädiktion oder einer Manöverdetektion im nächtlichen Straßenverkehr nicht zielführend ist. Daher ist es sinnvoll, verschiedene Sensortechnologien komplementär zu nutzen. Diese Informationen werden entweder durch eine Sensordatenfusion verknüpft oder durch die Auswahl von Objektdaten der einzelnen Sensoren anhand von Entfernungsbereichen gesteuert. Die in dieser Arbeit betrachteten Lichtfunktionen erfordern eine Konfiguration aus einer Kamera sowie einem Radar- oder Lidarsystem. Ein Nachtsichtsystem ist zur Erkennung von Fußgängern im Kreuzungsbereich sinnvoll.

	Kamera		Radar	Lidar	Nacht- sicht
	BV	LBAS			
Detektion Fußgänger	O	--	--	+	++
Detektion Fahrrad	O	+	-	+	+
Detektion Fahrzeug	O	++	+	+	-
Klassifikation	++	+	-	O	++
Winkelauflösung	++	++	-	+	++
Entfernungsmessung	-	--	++	++	-
Reichweite	--	++	+	O	+

Tabelle 4.3.: Bewertung von Sensortechnologien zur Spezifikation der Eingangsschnittstelle

Das Navigationssystem liefert Informationen über eine vorausliegende Kreuzung. Dazu zählen die Entfernung zur Kreuzung d_{Nav} , der Abzweigewinkel zur Straße φ_{Nav} und die Information über einen Abzweigezwang Z_{Nav} . Des Weiteren gibt die digitale Karte des Navigationssystems Auskunft über die Straßenart A_{Nav} , die Anzahl der Fahrspuren F_{Nav} , die Existenz einer baulichen Trennung der Fahrspuren T_{Nav} oder über mögliche Geschwindigkeitsbegrenzungen G_{Nav} und Überholverbote U_{Nav} . Hinsichtlich der Straßengeometrie sind weiterhin die aktuelle Krümmung $c_{0_{Nav}}$ und die Krümmungsänderung $c_{1_{Nav}}$ der Fahrspur verfügbar. Die Informationen sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst.

Schließlich ist die Erkennung von Fahrbahnmarkierungen eines Kamerasystems erforderlich, die Rückschlüsse auf die Art A_{BV} , die Krümmung $c_{0_{BV}}$ und die Krümmungsänderung $c_{1_{BV}}$ der Fahrbahnmarkierungen zulässt. Des Weiteren enthält diese Schnittstelle die Entfernung $d_{y_{BV}}$ zum Fahrzeug in lateraler Richtung, die die Erfassungsreichweite $d_{x_{BV}}$ und die Winkeldifferenz γ_{BV} zum Fahrzeug. Tabelle 4.5 zeigt die Schnittstelle des Bildverarbeitungsalgorithmus.

Signal	Beschreibung	Einheit
d_{Nav}	Entfernung zur Kreuzung	m
R_{Nav}	Abzweigerichtung	-
φ_{Nav}	Abzweigewinkel	°
Z_{Nav}	Abzweigezwang	-
S_{Nav}	Straßenart	-
F_{Nav}	Anzahl Fahrspuren	-
T_{Nav}	Bauliche Trennung	-
G_{Nav}	Geschwindigkeitsbegrenzung	km/h
V_{Nav}	Überholverbot	-
c_{0Nav}	Anfangskrümmung	1/m
c_{1Nav}	Krümmungsänderung	1/m ²

Tabelle 4.4.: Schnittstelle des Navigationssystems

Signal	Beschreibung	Einheit
A_{BV}	Art der Fahrbahnmarkierung	-
d_{xBV}	Vorausschau	m
d_{yBV}	Distanz in y-Richtung	m
γ_{BV}	Winkeldifferenz zum Fahrzeug	°
c_{0BV}	Anfangskrümmung	1/m
c_{1BV}	Krümmungsänderung	1/m ²

Tabelle 4.5.: Schnittstelle der Fahrspurmarkierungserkennung

4.3. MANÖVERDETEKTION

Die Manöverdetektion soll für das Egofahrzeug und andere Verkehrsteilnehmer angewendet werden. Daher ist die Funktionsfähigkeit für eine Eingangsschnittstelle zu gewährleisten, die sowohl durch das Egofahrzeug als auch durch die Umfelderkennung bereitgestellt wird. Die Genauigkeit wird durch zusätzliche Informationen, die auf das Egofahrzeug beschränkt sind, erhöht.

Die Zielsetzung der Manöverdetektion ist die Erkennung der Intention des Fahrers bzw. eines Fahrzeugs. Wie in Kapitel 3 beschrieben sollen das Abbiegen an einer Kreuzung und der Spurwechsel auf einer Landstraße oder Autobahn durch die zu entwickelnden Algorithmen erkannt werden.

4.3.1. DETEKTION VON ABBIEGEVORGÄNGEN

In der Realität existieren verschiedenste Topologien von Kreuzungen mit beliebigen Abzweiganzahlen und -richtungen. Grundlegend lässt sich die Aufgabenstellung dahingehend verallgemeinern, dass sich einem Verkehrsteilnehmer an einer Kreuzung zwei Aktionsmöglichkeiten bieten, nämlich die Fahrt über die Kreuzung fortzuführen oder ein Abbiegemanöver durchzuführen. Daher lassen sich die Szenarien, die im folgenden betrachtet werden, auf die in Abbildung 4.4 gezeigten Kreuzungsarten beschränken, ohne die Allgemeingültigkeit der Manöverdetektion zu beeinträchtigen.

Für die Erkennung eines Abbiegemanövers vor dem Eintritt in eine Kreuzung sind verschiedene Informationen notwendig. Als Mindestanforderung für eine erfolgreiche Detektion sind die Geschwindigkeit v und deren Standardabweichung $\sigma(v)$ eines Fahrzeugs sowie die

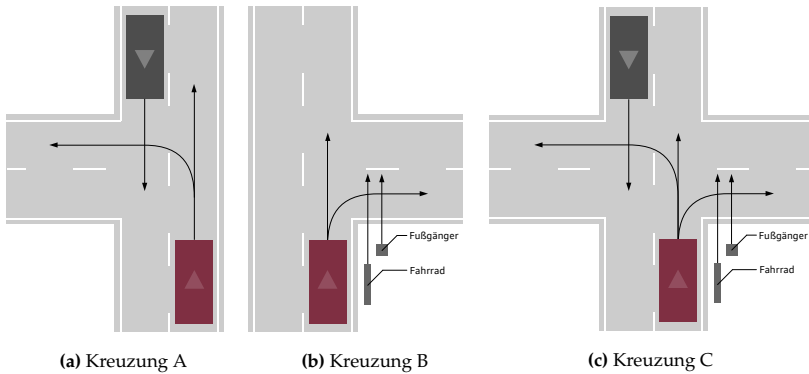


Abbildung 4.4.: Betrachtete Kreuzungsszenarien

Egofzgz.	Fremdfzgz.	Beschreibung	Indikator
d_{Nav}	$d_{Nav}^{(j)}$	Distanz zur Kreuzung	Rel. Bewegung
v	$v_x^{(j)}$	Geschwindigkeit	Rel. Bewegung
$\sigma(v)$	$\sigma(v_x^{(j)})$	Standardabweichung	Rel. Bewegung
B_{li}, B_{re}	-	Fahrtrichtungsanzeiger	Fahrer
θ	-	Lenkwinkel	Fahrer

Tabelle 4.6.: Relevante Informationen für die Berechnung der Manöverdetektion an Kreuzungen

Entfernung zu einer Kreuzung d_{Nav} erforderlich und bilden den Indikator *Relative Bewegung*. Um in einem Szenario mit verschiedenen Abzweigungsmöglichkeiten die Richtung der Abbiegeintention zu schätzen, sind Informationen über den Fahrtrichtungsanzeiger B oder den Lenkwinkel θ notwendig, wobei diese nur für das Egofahrzeug bereitstehen und daher den Indikator *Fahrer* bilden. In Tabelle 4.6 sind die notwendigen Informationen zusammengefasst. Die Berechnung der Abbiegeintention ist notwendig, falls sich eine Kreuzung innerhalb einer bestimmten Entfernung befindet. Deshalb wird die Ausführung des Algorithmus ausgeführt, sobald die Existenz einer Kreuzung durch das Navigationssystem bestätigt wird und die Entfer-

nung d_{Nav} einen Schwellwert unterschreitet. Außerdem werden für die Aktivierung der Manöverdetektion Angaben über die Topologie der Kreuzung genutzt. Das Flussdiagramm ist in Abbildung 4.5 dargestellt.

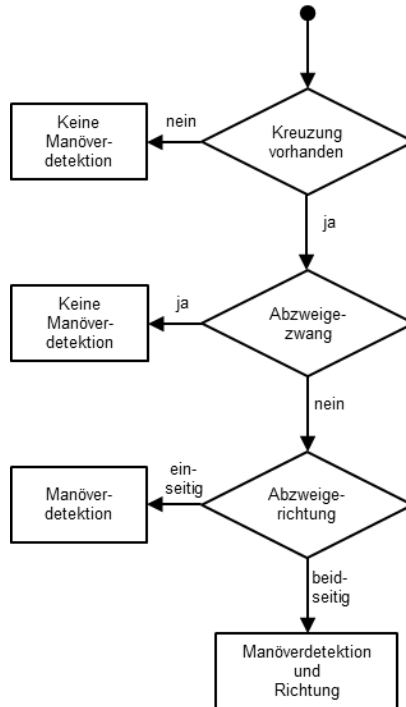
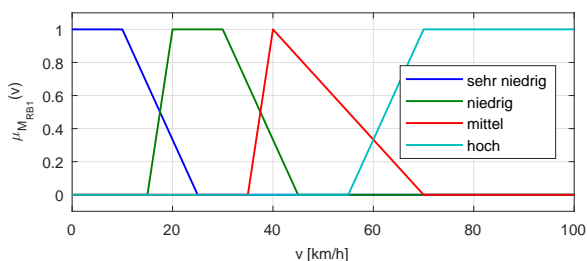


Abbildung 4.5.: Flussdiagramm der Manöverdetektion von Abbiegevorgängen

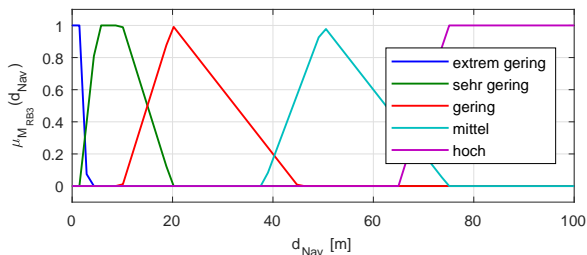
Die Manöverdetektion wird mittels der in Kapitel 2 beschriebenen Ansätze, der Fuzzylogik und dem Bayes'schen Netz, implementiert. Im Folgenden werden die Vorgehensweisen beschrieben. Die Ausführungen basieren dabei teilweise auf der Ausarbeitung von *Schiener*, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden ist. [186]

ERKENNUNG MITTELS FUZZYLOGIK

Für die Erkennung eines Abbiegemanövers mittels einer Fuzzylogik werden die in Tabelle 4.6 aufgeführten Eingangsgrößen durch entsprechende Zugehörigkeitsfunktionen M_k auf eine Fuzzy-Menge M abbildet. In Abbildung 4.6 sind die unscharfen Mengen für die Geschwindigkeit v und die Abzweigungsdistanz d_{Nav} dargestellt. Die Gesamtheit aller im Fuzzysystem verwendeten Fuzzy-Mengen ist in Anhang A zusammengestellt.



(a) Fuzzy-Menge der Geschwindigkeit v



(b) Fuzzy-Menge der Abzweigungsdistanz d_{Nav}

Abbildung 4.6.: Darstellung zweier Fuzzy-Mengen M_k des Fuzzysystems

Das System ist in zwei Indikatoren aufgeteilt, den Indikator *Relative Bewegung* und den Indikator *Fahrer*. Dabei nutzt der Indikator *Relative Bewegung* die Parameter, die sowohl für das Egofahrzeug als auch für andere Verkehrsteilnehmer verfügbar und deshalb allgemein

Verarbeitungsschritt	Operator
Aggregation	max
Implikation	min
Akkumulation	prod
Defuzzifizierung	centroid

Tabelle 4.7.: Operatoren in den einzelnen Verarbeitungsschritten der Fuzzylogik

anwendbar sind. Der Indikator *Fahrer* verwendet die Informationen über den Lenkwinkel ϑ und den Fahrtrichtungsanzeiger B , beides Informationen, die lediglich für das Egofahrzeug bereitstehen. Dieser modulare Aufbau bietet die Möglichkeit, die Berechnung auf die verfügbaren Eingangsdaten zu skalieren. Die beiden Indikatoren werden innerhalb eines weiteren Regelwerks kombiniert und zu einer Gesamtkonsequenz zusammengefasst. Der Systemaufbau ist in Abbildung 4.7 gezeigt.

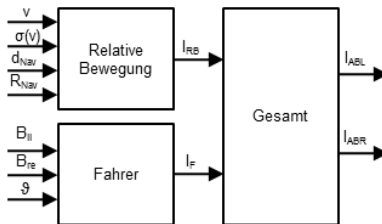


Abbildung 4.7.: Aufbau des Fuzzysystems zur Erkennung von Abbiegevorgängen

Das Regelwerk des Indikators *Relative Bewegung* umfasst 66 Regeln, der Indikator *Fahrer* implementiert 36 Regeln. Das Fuzzysystem nutzt die in Tabelle 4.7 dargestellten Operatoren für die einzelnen Verarbeitungsschritte. Diese dienen der Verknüpfung unscharfer Mengen. Der Maximumoperator *max* entspricht der ODER-Operation der klassischen Mengenlehre, der Minimumoperator *min* der UND-Verknüpfung. Der Prod-Operator *prod* bewirkt die Stauchung einer unscharfen Menge

anhand eines Zugehörigkeitsgrads. Die Schwerpunktmethod *centroid* ist die gebräuchlichste Methode bei der Defuzzifizierung. Dabei wird der Flächenschwerpunkt der unscharfen Gesamtkonsequenz berechnet. Der scharfe Ausgabewert entspricht der Schwerpunktkoordinate der Abszisse

Die Verknüpfung der beiden Indikatoren *Relative Bewegung* und *Fahrer* ergibt die beiden Werte I_{li} und I_{re} , die eine Aussage über die Abbiegeintention des Fahrers geben.

ERKENNUNG MITTELS EINES BAYES'SCHEN NETZES

Das Bayes'sche Netz nutzt dieselben Eingangsdaten für die Manöverdetektion, um einen Vergleich mit der Leistungsfähigkeit des Fuzzy-systems zu gewährleisten. Die Eingangsgrößen für die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines Abbiegemanövers sind untereinander unabhängig, lediglich die Geschwindigkeit v und deren Standardabweichung $\sigma(v)$ stehen in direkter Abhängigkeit zueinander. Die Topologie des Bayes'sche Netzes ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Die bedingte Wahrscheinlichkeit wird durch eine kausale Inferenz bestimmt.

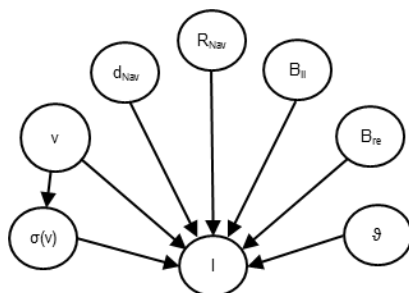


Abbildung 4.8.: Topologie des Bayes'schen Netzes

Die Wahrscheinlichkeiten für die Übergänge zwischen den Netzknoten werden mittels des Maximum Likelihood Schätzverfahrens angelernt. Für das Anlernen des Netzes stehen Simulationsdaten zur Verfügung, welche die Kreuzungsszenarien nachbilden. In Tabelle 4.8 sind ist die Verteilung der Trainingsdaten auf die einzelnen Kreuzungsarten sowie auf Ego- und Fremdfahrzeug aufgelistet.

	Kreuzung A	Kreuzung B	Kreuzung C	Gesamt
Egofzg.	82	82	278	442
Fremdfzg.	67	67	140	274
Gesamt	149	149	418	716

Tabelle 4.8.: Anzahl und Aufteilung der Simulationsdaten für das Parameterlernen

4.3.2. DETEKTION VON SPURWECHSELN

Die Ursache für einen Spurwechsel liegt grundlegend in der Routenführung des Fahrers oder einem bevorstehenden Überholvorgang begründet. Als Ausgangslage für die Detektion eines Spurwechsels wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit ein Überholwunsch des Fahrers zugrunde gelegt. Auch Spurwechsel sind grundsätzlich komplexe Ereignisse, die sich aber ähnlich einem Kreuzungsszenario durch die Betrachtung der Interaktion von drei Verkehrsteilnehmern abstrahieren lassen. Die drei möglichen Konstellationen, die einen Spurwechselvorgang hinreichend und allgemeingültig beschreiben, sind in Abbildung 4.9 skizziert. Das Egofahrzeug kann einem vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer folgen oder zum Überholen ansetzen. Ein Überholvorgang gilt als kritisch, falls sich ein anderes Fahrzeug seitlich auf der Nebenspur befindet, ein anderes Fahrzeug auf der entsprechenden Fahrspur überholt oder entgegenkommt.

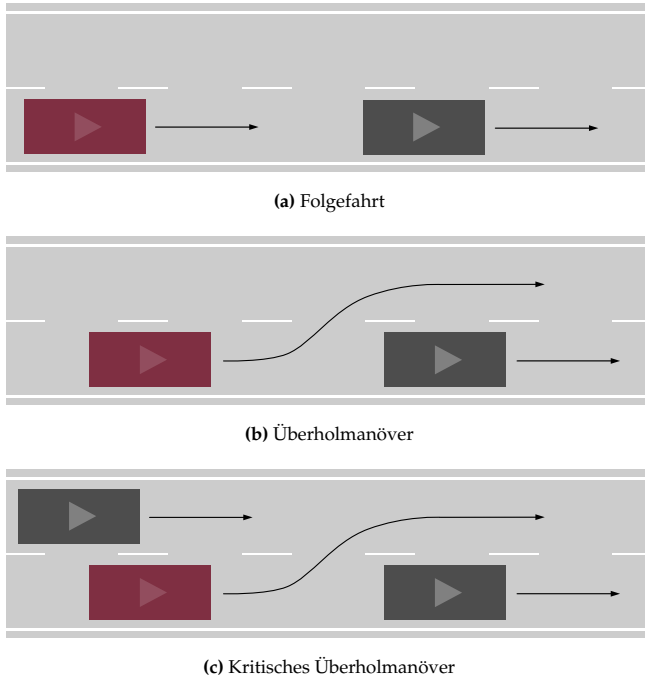


Abbildung 4.9.: Mögliche Spurwechselszenarien

Die Ausführung der Manöverdetektion wird auf Land- und Bundesstraßen sowie Autobahnen angewendet. Die notwendigen Informationen über die Straßenklasse und die Anzahl an Fahrspuren sowie mögliche Geschwindigkeitsbegrenzungen und Überholverbote werden durch das Navigationssystem bereitgestellt. Des Weiteren wird die Spurerkennung eingesetzt, um die Fahrzeuge auf der Fahrbahn einzuordnen. Befindet sich ein Fahrzeug auf der linken Fahrspur oder besteht ein Überholverbot, wird die Wahrscheinlichkeit eines Spurwechsels nicht berechnet. Das Flussdiagramm der Vorgehensweise ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

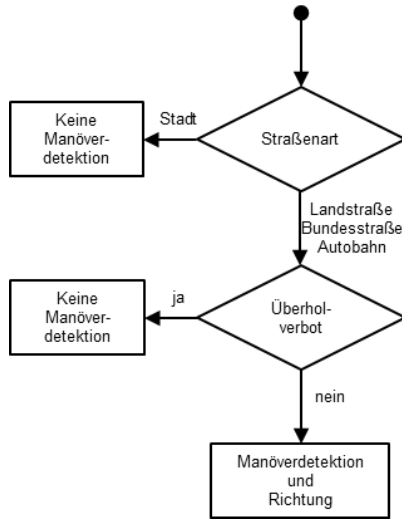


Abbildung 4.10.: Flussdiagramm der Manöverdetektion von Spurwechseln

Ähnlich wie die Detektion von Abbiegevorgängen kann auch im Fall eines Spurwechsels mit Daten gearbeitet werden, die sowohl für das Ego- als auch das Fremdfahrzeug zur Verfügung stehen. Notwendige Informationen sind die Geschwindigkeit v und die Time-to-Collision t_{TTC} als geschwindigkeitsunabhängige Größe, die die Entfernung und die Relativgeschwindigkeit in Verbindung setzt und sich zu

$$t_{TTC} = \frac{d_x}{v} \quad (4.1)$$

berechnet. Außerdem wird die Zeitlücke τ genutzt, die der Time-to-Collision entspricht, allerdings die Geschwindigkeit in km/h annimmt. Diese ermöglicht es, die grundlegenden Richtlinien hinsichtlich der einzuhaltenen Abständen zu vorausfahrenden Fahrzeugen auf Autobahnen, aus denen sich die notwendige Prädiktionszeit eines Spurwechsels in der Anforderungserhebung ableitet, einzubeziehen. Betrachtet man die Manöverdetektion für das Egofahrzeug, kann diese durch Informationen über die Gas- oder Bremspedalstellung p sowie

den Fahrtrichtungsanzeiger B ergänzt werden. Tabelle 4.9 gibt einen Überblick über die relevanten Informationen.

Egofzг.	Fremdfzг.	Beschreibung	Indikator
v	$v_x^{(j)}$	Relativgeschwindigkeit	Relative Bewegung
t_{TTC}	$t_{TTC}^{(j)}$	Time-to-Collision	Relative Bewegung
τ	$\tau^{(j)}$	Zeitlücke	Relative Bewegung
B_{li}, B_{re}	-	Fahrtrichtungsanzeiger	Fahrer
p_{Gas}	-	Gaspedalstellung	Fahrer
p_{Brems}	-	Bremspedalstellung	Fahrer

Tabelle 4.9.: Relevante Informationen für die Berechnung der Manöverdetektion von Spurwechseln

Analog zu Abschnitt 4.3.1 wird die Funktionsarchitektur in einen Indikator *Relative Bewegung* und einen Indikator *Fahrer* mit anschließender Kombinationslogik aufgeteilt. [157] Dabei besteht das Regelwerk des Indikators *Relative Bewegung* aus 31 Regeln, der Einfluss des Fahrers wird durch 13 zusätzliche Regeln integriert. Zusätzlich enthält die Kombinationslogik 56 Regeln für die Verknüpfung und die Bestimmung einer Konsequenz. Diese Regeln implementieren eine Fallunterscheidung für Spurwechsel auf einspurigen und mehrspurigen Straßen durch eine zusätzliche Gewichtung der Indikatoren, wie in der Ausarbeitung von *Habermayr* beschrieben. [183] Der Systemaufbau ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

Die Operatoren der einzelnen Verarbeitungsschritt zeigt Tabelle 4.10, welche für alle drei Inferenzsysteme gelten.

Für die Detektion von Spurwechseln wird auf die Entwicklung eines Bayes'schen Netzes verzichtet und lediglich ein Fuzzysystem realisiert.

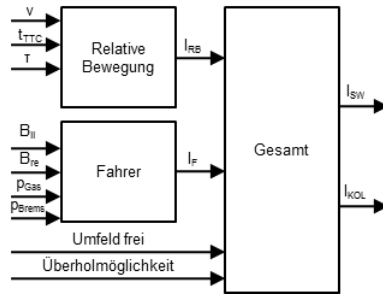


Abbildung 4.11.: Aufbau des Fuzzysystems zur Erkennung von Spurwechseln

Verarbeitungsschritt	Operator
Aggregation	max
Implikation	min
Akkumulation	prod
Defuzzyfizierung	centroid

Tabelle 4.10.: Operatoren in den einzelnen Verarbeitungsschritten der Fuzzylogik

4.4. PRÄDIKTION VON FAHRZEUGTRAJEKTORIEN

Die Trajektorienprädiktion stellt eine Voraussage der Trajektorie des Egofahrzeugs und der Trajektorien anderer Verkehrsteilnehmer bereit. Dabei ist eine Trajektorie \mathbf{X}_K definiert als ein zeitlicher Verlauf eines Zustandsvektors \mathbf{x}_k über einen Zeitraum $k = 0, \dots, K$. Die vorausgesagte Trajektorie entspricht einer Schätzung $\hat{\mathbf{X}}_{K+N}$ des Zustandsvektors $\hat{\mathbf{x}}_{K+n}$, $n = 1, \dots, N$.

Die Nutzung eines Kalman Filters, welches in Kapitel 2 beschrieben wurde, ist eine verbreitete Vorgehensweise, um zukünftige Zustände eines Systems zu schätzen. Dabei sind die Parameter des Zustandsvektors \mathbf{x}_k abhängig von der zugrundeliegenden Modellierung des Systems, die als Systemmodell durch das Kalman Filter verwendet

wird. Die Bewegung von Fahrzeugen wird basierend auf dem Einspurmodell grundlegend durch die nichtlinearen Modelle Constant Turn Rate and Velocity (CTRV) und Constant Turn Rate and Acceleration (CTRA) oder die linearen Modelle Constant Velocity (CV) oder Constant Acceleration (CA) beschrieben. Die Bewegungsmodelle CTRV und CTRA nehmen eine Bewegung des Fahrzeugs auf einer Kreisbahn mit einer konstanten Gierrate und einer konstanten Geschwindigkeit oder Beschleunigung an. Der Zustandsvektor \mathbf{x}_k ergibt sich zu

$$\mathbf{x}_{CTRV,k} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ v \\ \gamma \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

oder

$$\mathbf{x}_{CTRA,k} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ v \\ a \\ \gamma \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

wobei p_x und p_y die longitudinale und laterale Position des Egofahrzeugs darstellen. Der Übergang von \mathbf{x}_{k-1} zu \mathbf{x}_k ergibt sich zu

$$\mathbf{x}_{CTRV,k} = \mathbf{x}_{CTRV,k-1} + \begin{bmatrix} \frac{v_{k-1}}{\dot{\gamma}_{k-1}} \sin(\gamma_{k-1} + \dot{\gamma}_{k-1}T) - \frac{v_{k-1}}{\dot{\gamma}_{k-1}} \sin(\gamma_{k-1}) \\ -\frac{v_{k-1}}{\dot{\gamma}_{k-1}} \cos(\gamma_{k-1} + \dot{\gamma}_{k-1}T) + \frac{v_{k-1}}{\dot{\gamma}_{k-1}} \cos(\gamma_{k-1}) \\ 0 \\ \dot{\gamma}_{k-1}T \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

und

$$\mathbf{x}_{CTRA,k} = \mathbf{x}_{CTRA,k-1} + \begin{bmatrix} \Delta p_x(T) \\ \Delta p_y(T) \\ a_{k-1}T \\ 0 \\ \dot{\gamma}_{k-1}T \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

mit

$$\begin{aligned} \Delta p_x(T) = & \frac{1}{\dot{\gamma}_{k-1}^2} [(v_{k-1}\dot{\gamma}_{k-1} + a_{k-1}\dot{\gamma}_{k-1}T) \sin(\gamma_{k-1} + \dot{\gamma}_{k-1}T) \\ & + a_{k-1} \cos(\gamma_{k-1} + \dot{\gamma}_{k-1}T) - v_{k-1}\dot{\gamma}_{k-1} \sin(\gamma_{k-1}) \\ & - a_{k-1} \cos(\gamma_{k-1})] \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned} \Delta p_y(T) = & \frac{1}{\dot{\gamma}_{k-1}^2} [(-v_{k-1}\dot{\gamma}_{k-1} - a_{k-1}\dot{\gamma}_{k-1}T) \cos(\gamma_{k-1} + \dot{\gamma}_{k-1}T) \\ & + a_{k-1} \sin(\gamma_{k-1} + \dot{\gamma}_{k-1}T) + v_{k-1}\dot{\gamma}_{k-1} \cos(\gamma_{k-1}) \\ & - a_{k-1} \sin(\gamma_{k-1})]. \end{aligned}$$

Die Nutzung der Modelle CV und CA erlaubt die Beschreibung einer voneinander unabhängigen Bewegung in longitudinaler und lateraler Richtung mit konstanter Geschwindigkeit oder Beschleunigung in die entsprechende Richtung. Die Zustandsvektoren ergeben sich zu

$$\mathbf{x}_{CV,k} = \begin{bmatrix} d_x \\ v_x \\ d_y \\ v_y \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

und

$$\mathbf{x}_{CA,k} = \begin{bmatrix} d_x \\ v_x \\ a_x \\ d_y \\ v_y \\ a_y \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

der Übergang von \mathbf{x}_{k-1} zu \mathbf{x}_k ist beschrieben durch

$$\mathbf{x}_{CV,k} = \mathbf{x}_{CV,k-1} + \begin{bmatrix} v_{x,k-1} \cdot T \\ 0 \\ v_{y,k-1} \cdot T \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

und

$$\mathbf{x}_{CA,k} = \mathbf{x}_{CA,k-1} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} a_{x,k-1} \cdot T^2 \\ a_{x,k-1} \cdot T \\ 0 \\ \frac{1}{2} a_{y,k-1} \cdot T^2 \\ a_{y,k-1} \cdot T \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Die Betrachtung der in Abschnitt 4.2 beschriebenen Schnittstellen legt die Nutzung der Modelle CTRV und CTRA für die Beschreibung der Bewegung des Egofahrzeugs nahe, die Nutzung der Modelle CV und CA für die Beschreibung der Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer. Aus der Anforderungsanalyse in Kapitel 3 ergeben sich für ein Fahrzeug grundlegend zwei Bewegungsszenarien, die durch die Trajektorienprädiktion differenziert betrachtet werden müssen:

1. Das Fahrzeug folgt dem Straßenverlauf.
2. Das Fahrzeug führt ein Manöver aus.

Diese Situationen sind in Abbildung 4.12 für die Fahrt auf einer zweispurigen Straße mit einem Spurwechsel als mögliches Manöver dargestellt.

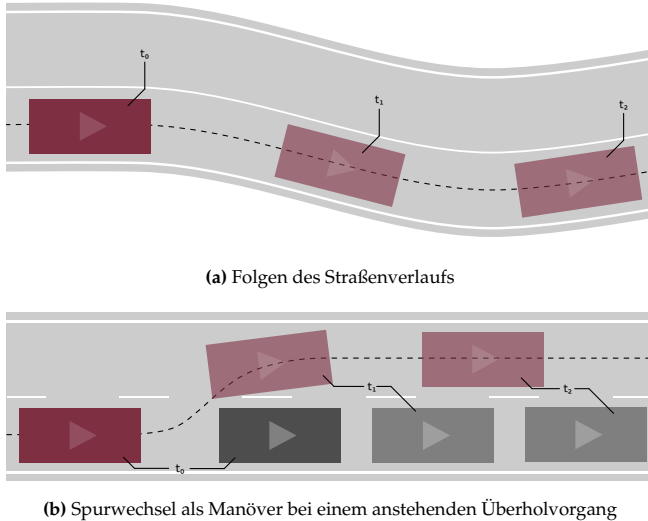


Abbildung 4.12.: Mögliche Situationen bei einer Fahrt auf einer zweispurigen Straße

An die Trajektorienprädiktion wird in diesen Situationen die Anforderung gestellt, die Trajektorie des Egofahrzeugs und der anderen Verkehrsteilnehmer unter Betrachtung des Straßenverlaufs und eines möglichen Manövers vorauszusagen. Die Trajektorienprädiktion wird für den ersten Fall anhand der Odometriedaten des Fahrzeugs errechnet. Des Weiteren können Informationen über den Straßenverlauf in das Modell integriert werden. Das Bezugssystem ist dabei das Koordinatensystem des Egofahrzeugs zum Zeitpunkt K der Ausführung der Trajektorienprädiktion.

Da für das Egofahrzeug die nichtlinearen Modelle CTRV und CTRA genutzt werden, wird die Trajektorienprädiktion mittels des EKF verwirklicht, das in Kapitel 2 beschrieben ist. [157][187]

Ausgehend von den verfügbaren Beobachtungen \mathbf{y}_k , $k = 1, \dots, K$ werden die Zustände $\hat{\mathbf{x}}_k$, $k = 1, \dots, K$ geschätzt und das EKF initialisiert, indem die Prädiktions- und Korrekturschritte aus Gleichungen 2.17 und 2.20 ausgeführt werden. Die Prädiktion erfolgt anschließend über den Prädiktionsschritt:

$$\hat{\mathbf{x}}_{K+n} = f(\hat{\mathbf{x}}_{K+n-1}), \quad n = 1, \dots, N \quad (4.10)$$

Die Anzahl N der Wiederholungen ist abhängig von der Schrittweite T und des zu prädizierenden Zeitraums t_{TP} :

$$N = \frac{t_{TP}}{T} \quad (4.11)$$

Die Prädiktion der Trajektorie eines anderen Verkehrsteilnehmers j , $j = 1, \dots, J$ erfolgt entsprechend unter Nutzung des KF und der Modelle CV und CA. [157][187] Die Prädiktionsgleichung für eine Anzahl J an Verkehrsteilnehmern ergibt sich zu:

$$\hat{\mathbf{x}}_{K+n}^{(j)} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{K+n-1}^{(j)}, \quad n = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, J \quad (4.12)$$

Die Integration von Informationen über den Straßenverlauf erfolgt mittels der Krümmung c . Die Anfangskrümmung c_0 und die Krümmungsänderung c_1 werden durch die Erkennung von Fahrbahnmarkierungen der Kamera und durch das Navigationssystem bereitgestellt. Mittels einer Sensordatenfusion können die komplementären Informationen kombiniert werden, um die Genauigkeit und die Reichweite zu verbessern. [43] Die Krümmung $c(l)$ entlang des Straßenverlaufs wird über den linearen Zusammenhang der Krümmungsänderung von Klothoiden

$$c(l) = c_0 + c_1 \cdot l \quad (4.13)$$

beschrieben, wobei l die Distanz zu dem Punkt beschreibt, an dem die Krümmung berechnet werden soll. Aus der Krümmung $\kappa(l)$ kann anschließend die Gierrate $\dot{\gamma}$ des Egofahrzeugs mit

$$\dot{\gamma}(l) = c(l) \cdot v \quad (4.14)$$

oder die Querbeschleunigung $a_y(l)$ eines anderen Verkehrsteilnehmers mit

$$a_y(l) = c(l) \cdot v_x^2 \quad (4.15)$$

berechnet werden. Die berechneten Werte werden der Prädiktion zugeführt, um den Einfluss des Straßenverlaufs auf die vorausgesagte Trajektorie zu integrieren.

Analog kann ein bevorstehendes Manöver in die Prädiktion anhand einer Gierrate $\dot{\gamma}$ oder einer Querbeschleunigung a_y für ein Fremdfahrzeug integriert werden. Dabei wird eine Beschreibung des Manövers als Bewegungsmodell eines Steuervektors genutzt. Die Beschreibung eines Spurwechsels kann durch eine Sigmoidfunktion erfolgen. Dabei können die Breite der lateralen Bewegung und die maximale Querbeschleunigung vorgegeben werden. [127] Die Modellierung eines optimalen Spurwechsels beschreibt *Kraus* für die Nutzung in automatisierten Fahrzeugführungssystemen. [83] Die im Rahmen dieser Arbeit angefertigte Ausarbeitung von *Bissinger* zeigt weiterhin die Integration eines fahrerspezifischen Spurwechselsmodells anhand einer Datenbank. [181]

4.5. ENTWICKLUNG DER PRÄDIKTIVEN LICHTFUNKTIONEN

Anhand der Informationen, die durch die Manöverdetektion und die Trajektorienprädiktion ermittelt werden, werden die prädiktiven Lichtfunktionen realisiert. Die folgenden Abschnitte erläutern die notwendige Verarbeitung.

4.5.1. ADAPTIVE ANSTEUERUNG DES AUSBLENDBEREICHS

Die Objektgrenzen eines Verkehrsteilnehmers, die für ein blendfreies Fernlicht erforderlich sind, können aus den verfügbaren Informationen berechnet werden. Die Gleichungen für die linke und rechte Objektgrenze α_{li} und α_{re} einer Anzahl von J Verkehrsteilnehmern, die sich im Umfeld des Egofahrzeugs befinden, ergeben sich zu

$$\alpha_{li}^{(j)} = \arctan \left(\frac{d_y^{(j)} + \frac{b}{2}}{d_x^{(j)}} \right) \quad (4.16)$$

und

$$\alpha_{re}^{(j)} = \arctan \left(\frac{d_y^{(j)} - \frac{b}{2}}{d_x^{(j)}} \right), \quad j = 1, \dots, J. \quad (4.17)$$

Diese Parameter lassen sich sowohl für die Sensorinformationen zu einem aktuellen Zeitpunkt K als auch für die prädizierte Trajektorie zu einem Zeitpunkt $K + N$ berechnen. Dabei sind $\alpha_{li,K}^{(j)}$ und $\alpha_{re,K}^{(j)}$ für $j = 1, \dots, J$ die Objektgrenzen aller Verkehrsteilnehmer ohne die Betrachtung eines additiven Sicherheitsbereichs.

Die prädizierten Objektgrenzen der Verkehrsteilnehmer müssen um die prädizierte Richtungsänderung γ_{K+N} des Egofahrzeugs korrigiert werden:

$$\alpha_{li,K+N}^{(j)} = \arctan \left(\frac{d_{y,K+N}^{(j)} + \frac{b}{2}}{d_{x,K+N}^{(j)}} \right) - \gamma_{K+N}, \quad j = 1, \dots, J, \quad (4.18)$$

$$\alpha_{re,K+N}^{(j)} = \arctan \left(\frac{d_{y,K+N}^{(j)} - \frac{b}{2}}{d_{x,K+N}^{(j)}} \right) + \gamma_{K+N}, \quad j = 1, \dots, J. \quad (4.19)$$

Die Ausgangsschnittstelle, die die auszublendenden Objektgrenzen $\beta_{li}^{(j)}$ und $\beta_{re}^{(j)}$ enthält, wird durch

$$\beta_{li}^{(j)} = \max \left(\alpha_{li,K}^{(j)}, \alpha_{li,K+N}^{(j)} \right) \quad (4.20)$$

und

$$\beta_{re}^{(j)} = \min \left(\alpha_{re,K}^{(j)}, \alpha_{re,K+N}^{(j)} \right) \quad (4.21)$$

für $j = 1, \dots, J$ bestimmt. Diese Festlegung gewährleistet, dass andere Verkehrsteilnehmer zum aktuellen Zeitpunkt K nicht geblendet werden, obwohl sie sich möglicherweise in einer lateralen Bewegung befinden und die prädizierten Objektgrenzen $\alpha_{li,K+N}^{(j)}$ und $\alpha_{re,K+N}^{(j)}$ eine signifikante Änderung vorgeben. Gleichzeitig ermöglicht die Bestimmung des Ausblendbereichs eine vorausschauende Ansteuerung ohne einen statischen Sicherheitsbereich.

4.5.2. LICHTBASIERTE SITUATIONSUNTERSTÜTZUNG

Die Manöverdetektion bestimmt die Intention I eines Fahrers zur Ausführung eines Manövers. Dabei kann dieses Manöver ein Abbiegevorgang an einer Kreuzung oder ein Spurwechsel bei einem Überholvorgang sein. Um eine Entscheidung zu treffen, ob dieses Manöver durchführbar ist und ob entsprechend eine Empfehlung oder eine Warnung dargestellt werden muss, ist die prädizierte Trajektorie des Egofahrzeugs für alle Prädiktionszeitpunkte $n = 1, \dots, N$ mit den Trajektorien $\hat{\mathbf{x}}_{K+n}^{(j)}$, $j = 1, \dots, J$ der anderen Verkehrsteilnehmer zu vergleichen. Dazu wird die Euklidische Norm der Trajektorien der anderen Verkehrsteilnehmer in zwei Dimensionen, der longitudinalen und der lateralen Distanz $d_x^{(j)}$ und $d_y^{(j)}$, mit einem Schwellwert τ_{Dist} verglichen:

$$\| \hat{\mathbf{x}}_{K+n}^{(j)} \|_2^2 \leq \tau_{Dist}, \quad j = 1, \dots, J, \quad n = 1, \dots, N \quad (4.22)$$

Trifft dieser Vergleich für einen beliebigen Prädiktionszeitpunkt n zu, entspricht dies einer potentiellen Kollision. In diesem Fall wird die warnende Lichtfunktion ausgelöst. Andernfalls kann von einer sicheren Durchführung des Manövers ausgegangen und die entsprechende

Handlungsempfehlung dargestellt werden. Die Ausgangsschnittstelle stellt neben der Information der darzustellenden Lichtfunktion die notwendigen Parameter zur Gestaltung der Projektion dar. Für eine Kreuzungssituation sind dies die Entfernung zur Kreuzung d_{Nav} und der Abzweigewinkel φ_{Nav} , im Falle eines Spurwechsels sind dies die Distanzen $d_x^{(j)}$ und $d_y^{(j)}$ zu einem zu überholenden Verkehrsteilnehmer in longitudinaler und lateraler Richtung sowie dessen Breite $b^{(j)}$. Grundlegend sind weiterhin Informationen über die Fahrbahn erforderlich, um die Lichtfunktion mittels hochauflösender Scheinwerfer korrekt zu projizieren. Dazu zählen die Fahrbahnbreite und der Verlauf in horizontaler Richtung.

KAPITEL 5

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

In diesem Kapitel werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit des entwickelten Systems zu beurteilen. Dazu wird zunächst das Versuchsfahrzeug sowie das prototypische Scheinwerfersystem beschrieben, das für die Versuchsdurchführung genutzt wird.

Die Trajektorienprädiktion wird in einem ersten Schritt durch eine Betrachtung des Fehlers zwischen der vorausgesagten und der tatsächlichen Trajektorie sowohl für das Egofahrzeug als auch für ein vorausfahrendes Fremdfahrzeug analysiert. Die prädiktive Ansteuerung der Sicherheitsbereiche wird anhand eines Vergleichs der Aufblendzeiten einer konventionellen und der prädiktiven Ansteuerung des blendfreien Fernlichts ausgewertet.

Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine Auswertung der situationsadaptiven Lichtfunktionen. Dabei wird zunächst die Funktionalität der Manöverdetektion an Kreuzungen und bei Spurwechseln durch eine Betrachtung der Klassifikationsraten und der Voraussagezeit überprüft. Abschließend wird die Wirksamkeit im Rahmen einer Studie mit Versuchspersonen verifiziert.

5.1. AUFBAU DES VERSUCHSFAHRZEUGS

Das Versuchsfahrzeug zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen ist ein Audi A7. Das Fahrzeug verfügt serienmäßig über FAS wie einen Abstandsregelautomaten und eine Spurwechselunterstützung. Dies gewährleistet die Verfügbarkeit der Sensoren, die zur Umsetzung der Funktionen in dieser Arbeit notwendig sind. Die Bildverarbeitung des Kamerasystems erkennt Fahrbahnmarkierungen für die Realisierung eines Spurhalteassistenten und Verkehrsteilnehmer mit eingeschalteter Beleuchtungseinrichtung für LBAS. Die Abstandsregelung erfolgt mithilfe zweier LRR, die in der Fahrzeugfront integriert sind. Die Beobachtung des folgenden Verkehrs gewährleisten zwei SRR, die seitlich im hinteren Stoßfänger des Fahrzeugs angebracht sind. Neben den Fahrzeugsensoren ist ein Navigationssystem für den Zugriff auf die Daten einer digitalen Karte verfügbar. Der Einsatz von serienmäßiger Sensorik erlaubt die Analyse der entwickelten Funktionsteile unter realitätsnahen Bedingungen. Aus diesem Grund wird auf den Verbau einer Referenzsensorik verzichtet.

Zur Auswertung ist der Verbau eines prototypischen Scheinwerfersystems erforderlich, das die beschriebenen Lichtfunktionen darstellen kann. Des Weiteren ist eine Messtechnik integriert, um Informationen der Sensoren abzugreifen und Messungen durchzuführen. Die verbauete Messtechnik und die Vernetzung des Fahrzeugs sowie Einzelheiten zu den verbauten Scheinwerfern werden im Folgenden beschrieben.

5.1.1. VERNETZUNG DES FAHRZEUGS UND DER MESSTECHNIK

Die gesamte Vernetzung, die für die Integration des entwickelten Systems notwendig ist, ist in Abbildung 5.1 skizziert.

Die Kamera, welche am Innenspiegelfuß des Fahrzeugs montiert ist,

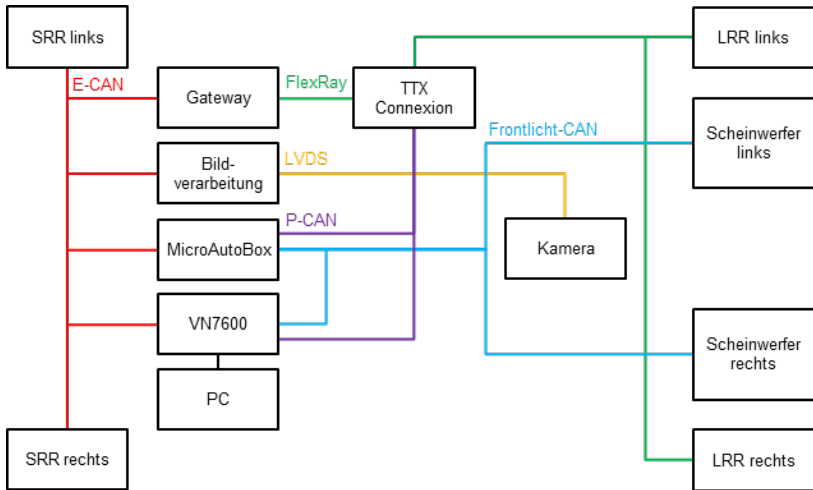


Abbildung 5.1.: Vernetzung des Versuchsfahrzeugs

ist durch eine LVDS¹-Leitung mit dem Bildverarbeitungssteuergerät verbunden. Dieses sendet Daten der Objekt- und Fahrbahnmarkierungserkennung auf den Extended-CAN² des Fahrzeugs. Die SRR sind ebenfalls mit dem Extended-CAN verbunden. Die Informationen der LRR werden serienmäßig über den FlexRay übertragen.

Die Implementierung des entwickelten Systems erfolgt auf einer dSPACE MicroAutoBox[®]. Dies ist ein Echtzeitsystem für eine prototypische Funktionsentwicklung und erlaubt die Integration von modellbasierter Software, die in MathWorks Simulink[®] entwickelt ist. Die dSPACE MicroAutoBox[®] ist mit dem Extended-CAN des Fahrzeugs verbunden. Der Zugriff auf die Daten der LRR erfolgt mittels einer Weiterleitung der Daten auf einen Private-CAN. Dies wird durch die Nutzung einer TTCConnexion der Firma TTTech erreicht, einer programmierbaren Messschnittstelle zur Manipulation und zum

¹Low Voltage Differential Signaling

²Controller Area Network

Umleiten von Daten. Die Ansteuerung der Scheinwerfer erfolgt über den Frontlicht-CAN, der ebenfalls mit der dSPACE MicroAutoBox[®] verbunden ist. Dieser überträgt Werte zur Ansteuerung der LEDs des Scheinwerfers. Das Auslesen von Messdaten wird durch den Einsatz einer Vector VN7600-Messschnittstelle ermöglicht, welche die CAN-Busse des Fahrzeugs abgreift. Die Daten werden dem Messrechner zur Verfügung gestellt.

5.1.2. PROTOTYPISCHES SCHEINWERFERSYSTEM

Für die Untersuchung des in Kapitel 4 beschriebenen Systems wird ein prototypisches Scheinwerfersystem eingesetzt, das weitreichende Möglichkeiten zur Anpassung der Lichtverteilung bietet. Eine Darstellung der Konstruktion des Scheinwerfers zeigt Abbildung 5.2.

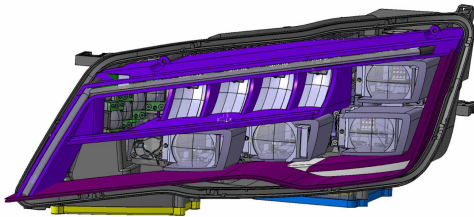


Abbildung 5.2.: Prototypischer Scheinwerfer zur Versuchsdurchführung

In diesem Scheinwerfer ist ein Reflektormodul für das Abblendlicht und jeweils ein Projektionsmodul für das Abbiege- und das Fernlicht integriert.

Die Abbildung der Abblendlichtverteilung erfolgt mittels vier Reflektoren. Jeder dieser Reflektoren wird durch eine LED als Lichtquelle beleuchtet, die einen Lichtstrom von 795 lm bei einem Strom von 700 mA liefert und einzeln ansteuerbar ist. Durch den Einsatz dieser Konstruktion ist es möglich, den Lichtschwerpunkt im Abblendlicht für

ein dynamisches Kurvenlicht zu verschieben. Die Lichtverteilung des Abblendlichts ist symmetrisch, da die Asymmetrie durch die Fernlichtmodule realisiert wird. Abbildung 5.3 zeigt die Gesamtlichtverteilung des Abblendlichts des linken Hauptscheinwerfers. Die Lichtverteilungen der einzelnen Reflektoren sind in Anhang B zu finden.

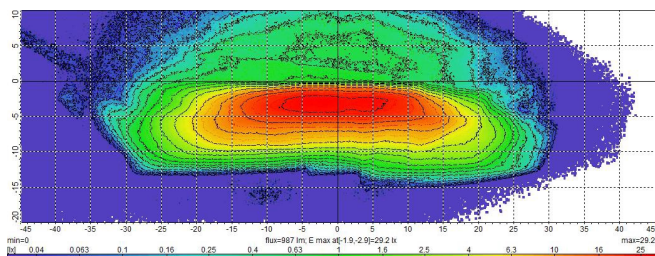


Abbildung 5.3.: Abblendlichtverteilung des linken Scheinwerfers

Das Abbiegelicht ist ebenfalls in vier Bereiche unterteilt, wobei im Gegensatz zum Abblendlicht vier Projektionsmodule zur Umsetzung der Lichtverteilung genutzt werden. In jedem dieser Projektionsmodule ist eine LED verbaut, die einen Lichtstrom von 637 lm bei einem Strom von 700 mA bereitstellt. Abbildung 5.4 stellt die Zusammensetzung der Lichtverteilung des Abbiegelichts dar.

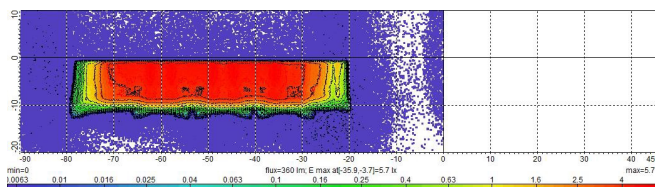


Abbildung 5.4.: Abbiegelichtverteilung des linken Scheinwerfers

Wie das Abbiegelicht wird auch das Fernlicht durch vier Projektionsmodule umgesetzt. In einem Projektionsmodul sind 16 LEDs verbaut, die in vier Spalten und vier Zeilen angeordnet sind. Jede dieser Lichtquellen liefert einen Lichtstrom von 180 lm bei einem Strom von 1000

mA. Das erzeugte Licht wird mittels einer Primäroptik ausgekoppelt, um eine in Zeilen und Spalten segmentierte Fernlichtverteilung zu erzeugen. Diese wird mittels einer Sekundäroptik durch den Scheinwerfer ausgestrahlt. Da jedes Modul eine 4x4-Matrix erzeugt, ergibt sich eine Unterteilung des Fernlichts eines Scheinwerfers in insgesamt 64 Bereiche. In Abbildung 5.5 ist die gesamte Lichtverteilung dargestellt.

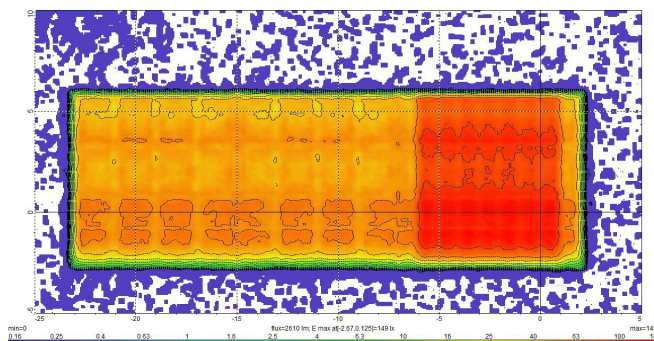


Abbildung 5.5.: Fernlichtverteilung des linken Scheinwerfers

Die Lichtverteilung eines einzelnen Projektionsmoduls des Fernlichts findet sich in Anhang B. Die beiden inneren Projektionsmodule sind mit einem Versatz von 1° überlagert, um die Auflösung zu erhöhen. Durch die individuelle Ansteuerung der Lichtquellen des prototypischen Scheinwerfersystems ist die Anpassung der gesamten Lichtverteilung für die Darstellung der entwickelten Funktionen möglich.

5.2. AUSWERTUNG DER ADAPTIVEN ANSTEUERUNG DES SICHERHEITSBEREICHS

In diesem Abschnitt wird die prädiktive Ansteuerung des Sicherheitsbereichs für die Funktion des blendfreien Fernlichts ausgewertet. Die

Auswertung befasst sich zunächst mit der Trajektorienprädiktion, welche die Grundlage für die Entwicklung bildet. Anschließend wird die Prädiktion der Trajektorien auf die Ansteuerung des blendfreien Fernlichts angewendet. Die prädiktive Ansteuerung wird anhand der Aufblendzeiten des Fernlichts bei einer Realfahrt mit einer konventionellen Ansteuerung verglichen

5.2.1. TRAJEKTORIENPRÄDIKTION MIT FAHRZEUGDATEN

Die Auswertung der Trajektorienprädiktion erfolgt auf einer Referenzstrecke im Raum Ingolstadt. Die Strecke beinhaltet sowohl einen Landstraßen- als auch einen Autobahnabschnitt, um die unterschiedlichen Eigenschaften dieser Straßenklassen bei der Auswertung einbeziehen zu können. Die Strecke ist in Abbildung 5.6 dargestellt, die Länge beträgt insgesamt 99 km. Die Trajektorienprädiktion wird sowohl für das Egofahrzeug als auch für ein Fremdfahrzeug ausgewertet. Dieses Fremdfahrzeug fährt mit einem der Situation entsprechenden Abstand voraus.

Die Voraussage der Trajektorie des Egofahrzeugs wird mit den Bewegungsmodellen CTRV und CTRA berechnet. Die Auswertung der Leistungsfähigkeit dieser erfolgt anhand des mittleren quadratischen Fehlers ϵ zwischen der prädizierten Trajektorie $\hat{\mathbf{x}}_{K+n}$ und der tatsächlich gefahrenen Strecke \mathbf{x}_{K+n} für $n = 1, \dots, N$ über einen Zeitraum von 3 s. Dabei werden für das Egofahrzeug drei Dimensionen der Zustandsvektoren betrachtet: die Position p_x und p_y und die Richtung γ . Der mittlere quadratische Fehler ϵ ist beschrieben durch die Euklidische Norm zweiter Ordnung

$$\epsilon = \|\mathbf{x}_{K+n} - \hat{\mathbf{x}}_{K+n}\|_2^{(1,2,4)}, \quad n = 1, \dots, N, \quad (5.1)$$

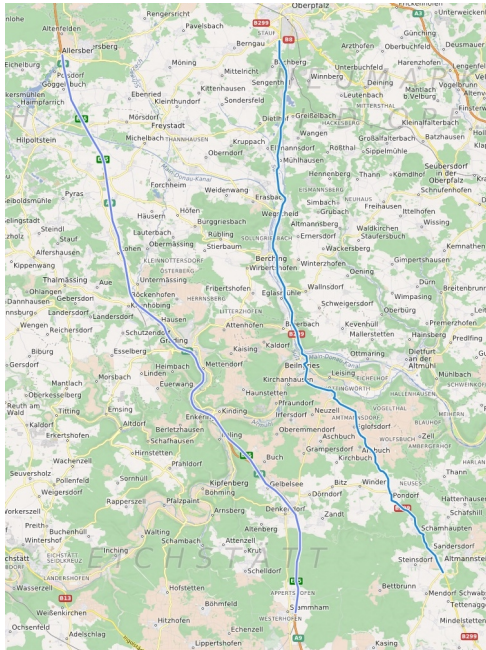
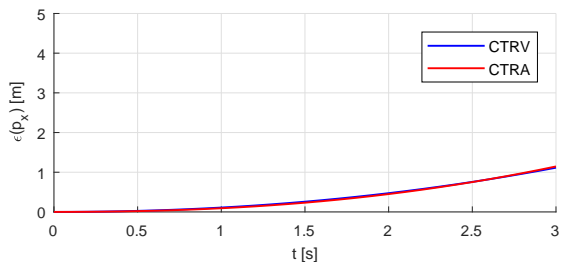
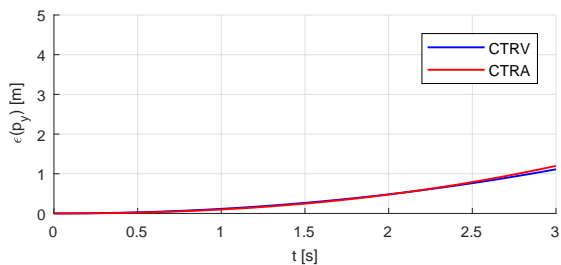


Abbildung 5.6.: Referenzstrecke zur Auswertung der Trajektorienprädiktion [104]

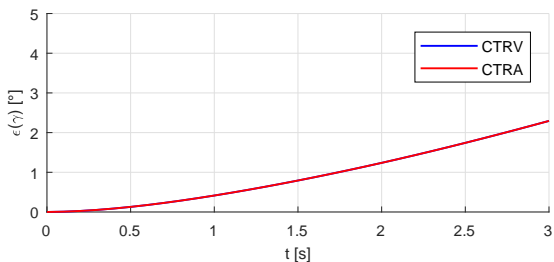
wobei sich N aufgrund der Schrittweite $T = 10 \text{ ms}$ und der Prädiktionzeit $t_{TP} = 3 \text{ s}$ zu $N = 300$ ergibt. In Abbildung 5.7 ist der mittlere quadratische Fehler ϵ für das Egofahrzeug über die Zeit aufgetragen. Auffallend ist, dass sich die Trajektorienprädiktionen mit den Modellen CTRV und CTRA hinsichtlich der Position p_x in longitudinaler und p_y lateraler Richtung annähernd gleich verhalten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Fahrten mit einer konstanten Geschwindigkeit durchgeführt wurden. Hinsichtlich der Richtung γ ist der Fehler bei beiden Prädiktionen gleich, da sich die Berechnung der Fahrzeugrichtung zwischen den Modellen CTRV und CTRA nicht unterscheidet.



(a) Fehler in x-Richtung



(b) Fehler in y-Richtung



(c) Fehler der Fahrzeugrichtung

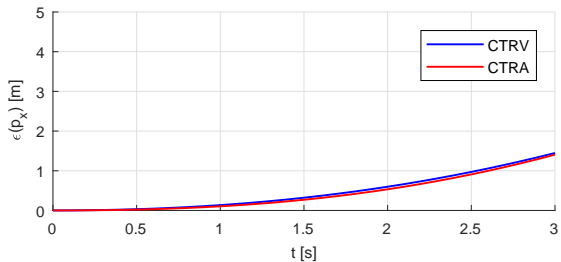
Abbildung 5.7.: Fehler der Trajektorienprädiktion für das Egofahrzeug auf der Gesamtstrecke

Mit Hinblick auf die Genauigkeitsanforderung aus Kapitel 3 wird diese von beiden Prädiktionen erfüllt. Für CTRV ergibt sich ein maximaler Fehler von $\epsilon_{\text{CTRV}} = 0,033^\circ$ bei einer Prädiktionszeit von $t_{TP} = 100$ ms, für CTRA ein Fehler von $\epsilon_{\text{CTRA}} = 0,027^\circ$. Diese

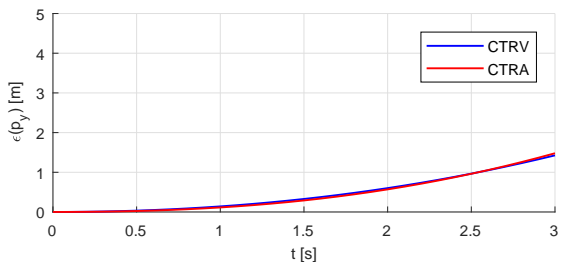
Werte ergeben sich als Richtungsfehler unter der Annahme, dass sich das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h bewegt und der Positionsfehler berücksichtigt wird. Diese sind geringer als der geforderte Wert von $\epsilon_{TP} = 0,6^\circ$.

Grundlegend unterscheiden sich Landstraßen und Autobahnen in Hinsicht auf das Geschwindigkeitsprofil der Verkehrsteilnehmer und die Krümmungsradien der Straßengeometrie. Aus diesem Grund wird der mittlere quadratische Fehler ϵ in der folgenden Betrachtung getrennt für den Abschnitt auf der Landstraße und den Abschnitt auf der Autobahn diskutiert. Dabei zeigt Abbildung 5.8 den Fehler ϵ bei der Fahrt auf der Landstraße, Abbildung 5.9 für die Autobahnfahrt.

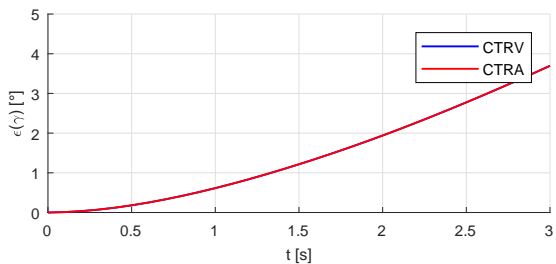
Erneut sind die Unterschiede der Prädiktionen mit den Modellen CTRV und CTRA vernachlässigbar. Ein Vergleich hinsichtlich der Straßenart zeigt, dass die Prädiktion auf Landstraßen sowohl hinsichtlich der Position p_x und p_y als auch der Richtung γ einen größeren Fehler liefert. Dies ist zurückzuführen auf die Charakteristik der Straßengeometrie, da sich die Fahrzeuggeschwindigkeit und die Fahrtrichtung im Vergleich zur Fahrt auf der Autobahn stärker verändern. Trotzdem wird auch in diesem Fall die Anforderung an die Trajektorienprädiktion erfüllt, der maximale Fehler ϵ bei einer Prädiktionszeit von $t_{TP} = 100$ ms beträgt $\epsilon = 0,04^\circ$.



(a) Fehler in x-Richtung

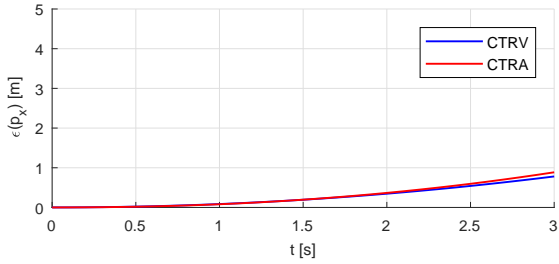


(b) Fehler in y-Richtung

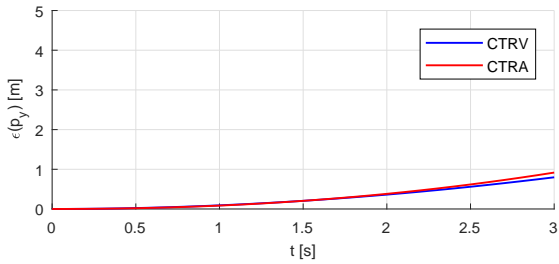


(c) Fehler der Fahrzeugrichtung

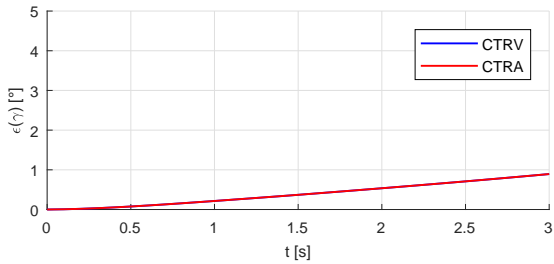
Abbildung 5.8.: Fehler der Trajektorienprädiktion für das Egofahrzeug auf dem Landstraßenabschnitt



(a) Fehler in x-Richtung



(b) Fehler in y-Richtung



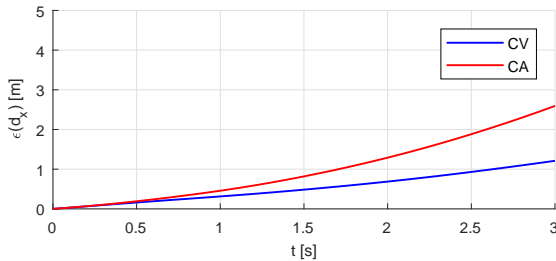
(c) Fehler der Fahrzeugrichtung

Abbildung 5.9: Fehler der Trajektorienprädiktion für das Egofahrzeug auf dem Autobahnabschnitt

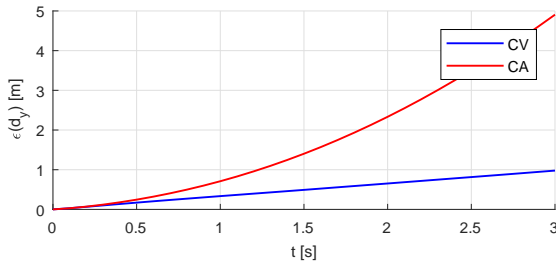
Die Prädiktion der Trajektorie des vorausfahrenden Fahrzeugs erfolgt unter Verwendung der Bewegungsmodelle CV und CA. Hierfür wird die Euklidische Norm in den ersten beiden Dimensionen betrachtet:

$$\epsilon = \| \mathbf{x}_{K+n} - \hat{\mathbf{x}}_{K+n} \|_2^2, \quad n = 1, \dots, N, \quad (5.2)$$

Die Gegenüberstellung des mittleren quadratischen Fehlers ϵ für die Distanz d_x in longitudinaler und d_y in lateraler Richtung ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Auf eine Unterscheidung zwischen den Fahrten auf der Landstraße und der Autobahn wird verzichtet.



(a) Fehler in x-Richtung



(b) Fehler in y-Richtung

Abbildung 5.10.: Fehler der Trajektorienprädiktion für das Fremdfahrzeug

Ein Vergleich mit der Trajektorienprädiktion des Egofahrzeugs zeigt, dass die Voraussage für das Fremdfahrzeug ungenauer ist. Die Prädiktion mittels des Modells CV ist hinsichtlich des Fehlers deutlich überlegen. Dies ist auf die ungenauen Sensordaten bezüglich der Be-

schleunigung des Fremdfahrzeugs zurückzuführen, die für die Prädiktion mittels des Modells CA genutzt werden. Unter der Annahme, dass sich das vorausfahrende Fahrzeug in einer kleinen Entfernung von 10 m vor dem Egofahrzeug befindet und somit ein Prädiktionsfehler der Distanz eine starke Auswirkung auf den geschätzten Azimutwinkel des Fremdfahrzeugs hat, beträgt der maximale Richtungsfehler $\epsilon = 0,17^\circ$.

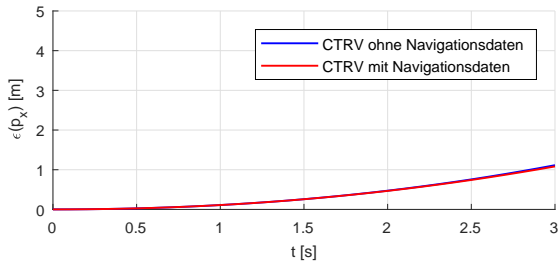
Eine Betrachtung des Fehlers, der sich bei der Berücksichtigung der Prädiktion für das Egofahrzeug und das vorausfahrende Fahrzeug ergibt, führt zu einer maximalen Abweichung von $\epsilon = 0,2^\circ$. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Trajektorienprädiktion der gestellten Anforderung eines Fehlers von $\epsilon_{TP} = 0,6^\circ$ genügt.

5.2.2. NUTZUNG VON KARTENDATEN FÜR DIE PRÄDIKTION

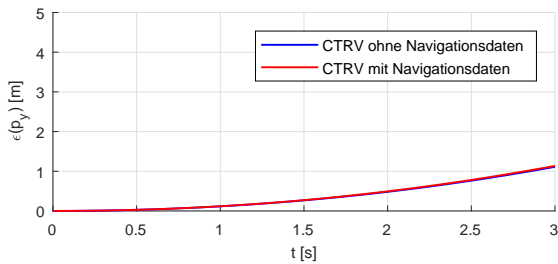
Die Betrachtung des Fehlers ϵ in Abschnitt 5.2.1 basiert auf einer Trajektorienprädiktion, die lediglich Daten der Fahrzeugdynamik nutzt. Im Folgenden wird diese Herangehensweise mit einer Prädiktion verglichen, die durch Informationen des Navigationssystems über den Straßenverlauf angereichert ist. Dabei beschränkt sich der Vergleich auf eine Auswertung der vorausgesagten Trajektorie des Egofahrzeugs unter Nutzung des Bewegungsmodells CTRV.

In Abbildung 5.11 ist der mittlere quadratische Fehler ϵ für die longitudinale und laterale Position p_x und p_y sowie die Fahrzeugrichtung γ dargestellt. Der Vergleich der beiden Graphen lässt den Schluss zu, dass die Einbeziehung von Daten eines Navigationssystem die Trajektorienprädiktion nicht maßgeblich verbessert. Der Fehler ϵ unterscheidet sich in keiner der betrachteten Dimensionen wesentlich. Daher ist eine Nutzung von Informationen über die Straßengeometrie

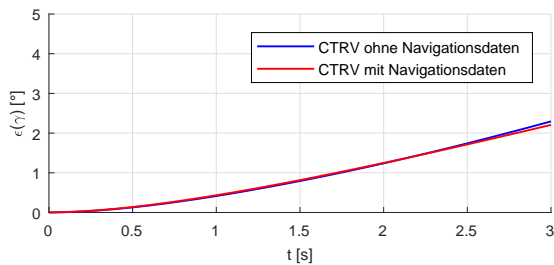
in diesem Kontext vernachlässigbar. Für weitere Diskussionen der Ergebnisse wird auf die Arbeit von *Stricker* verwiesen. [187]



(a) Fehler in x-Richtung



(b) Fehler in y-Richtung



(c) Fehler der Richtung

Abbildung 5.11.: Fehler der Trajektorienprädiktion für das Egofahrzeug ohne und mit Navigationsdaten

5.2.3. UNTERSUCHUNG DER AUFBLENDZEITEN

Nachfolgend wird die Nutzung der Trajektorienprädiktion für die Realisierung eines blendfreien Fernlichts mit einem adaptiven Sicherheitsbereich untersucht. Die Ergebnisse beruhen dabei teilweise auf der Ausarbeitung von *Gschlößl* und einer Publikation, die im Rahmen dieser Arbeit veröffentlicht wurde. [158][182]

Die Untersuchung erfolgt anhand einer Fahrt auf einer Referenzstrecke für LBAS in der Umgebung von Ingolstadt, die in Abbildung 5.12 dargestellt ist. Die Strecke wird in beide Richtungen mit einem Fahrzeug, das das blendfreie Fernlicht implementiert hat, und einem vorausfahrenden Fahrzeug abgefahren. Dabei werden Messdaten für die Auswertung durch den im Fahrzeug verbauten Messrechner aufgenommen.

Das blendfreie Fernlicht ist mit statischen und adaptiven Sicherheitsbereichen umgesetzt, wobei die konventionelle Ansteuerung als Referenz lediglich im Hintergrund aktiv ist. Folglich stellt die Lichtverteilung das blendfreie Fernlicht mit prädiktivem Anteil dar, um neben den Aufblendzeiten eine subjektive Aussage über eine mögliche Blendung zu erlauben. Ausgehend von den Ergebnissen aus den Abschnitten 5.2.1 und 5.2.2 nutzt die Trajektorienprädiktion für das Egofahrzeug das Modell CTRV, die Voraussage des Fremdfahrzeugs erfolgt mittels des Modells CV. Abbildung 5.13 zeigt die Aufblendzeiten über den Scheinwerferöffnungswinkel θ unter Verwendung des in Abschnitt 5.1.2 beschriebenen Scheinwerfersystems mit der konventionellen und der prädiktiven Ansteuerung des blendfreien Fernlichts. Die Sicherstellung, dass keine Blendung durch das Fernlicht des Versuchsfahrzeugs auftritt, erfolgt dabei anhand der subjektiven Wahrnehmung einer Versuchsperson im vorausfahrenden Fahrzeug.

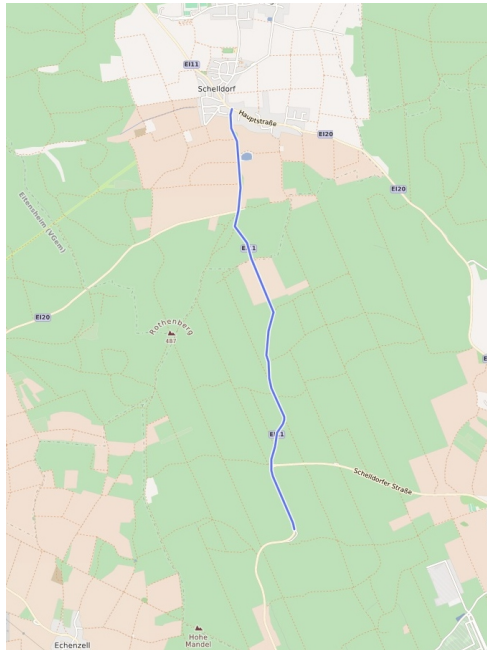


Abbildung 5.12.: Referenzstrecke zur Auswertung der Aufblendzeiten des blendfreien Fernlichts [104]

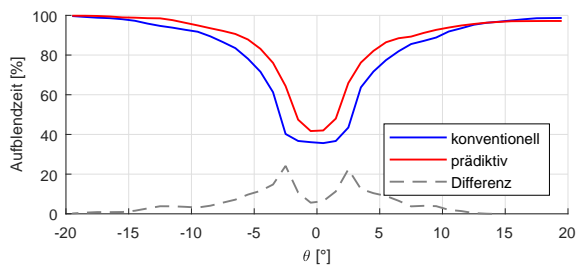


Abbildung 5.13.: Vergleich der Aufblendzeiten bei einer konventionellen und einer adaptiven Ansteuerung der Sicherheitsbereiche

Anhand des Vergleichs der Aufblendzeiten lässt sich ein erhöhter Wirkungsgrad des Fernlichts feststellen. Im zentralen Bereich beträgt der

Gewinn hinsichtlich der Aktivierungszeit vergleichsweise mehr als 5%, seitlich des vorausfahrenden Fahrzeugs sogar bis zu über 20%. Dies zeigt, dass bei einem identischen Scheinwerfersystem die Erhöhung der Aufblendzeiten durch eine prädiktive Ansteuerung erhöht werden kann. Die Anforderungen, die in Kapitel 3 spezifiziert wurden, sind für diesen Anwendungsfall ausreichend. Gleichzeitig ist die Blendung durch das Scheinwerfersystem, die durch den Fahrer des vorausfahrenden Fahrzeugs bewertet wird, gering.

Da das Scheinwerfersystem lediglich eine Auflösung von 1° im zentralen Bereich der Lichtverteilung besitzt, stützen sich die folgenden Untersuchungen auf simulierte Scheinwerfersysteme mit einer höheren Auflösung unter Nutzung der vorliegenden Messdaten des Fahrzeugs. In Abbildung 5.14 ist eine Gegenüberstellung der Aufblendzeiten von Scheinwerfersystemen mit einer Auflösung zwischen 2° und $0,1^\circ$ dargestellt.

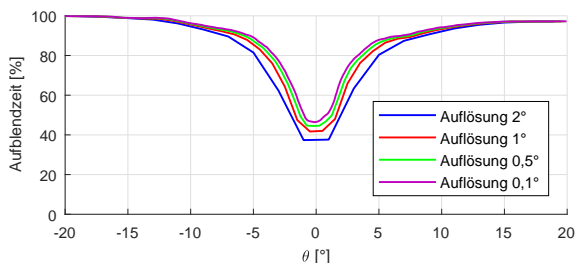


Abbildung 5.14.: Vergleich der Aufblendzeiten bei verschiedenen Auflösungen

Die Auswertung zeigt, dass die Aktivierungszeit des Fernlichts mit steigender Auflösung erhöht wird. Dies ist auf einer Seite der Auflösung selbst geschuldet. Jedoch zeigen Untersuchungen durch *Austerschulte et al.*, dass mit zunehmender Auflösung des Scheinwerfers die Aufblendzeiten einen Bereich der Sättigung erreichen. [5] Durch die Nutzung eines adaptiven Sicherheitsbereichs ist keine Sättigung nach-

weisbar, die Aufblendzeiten werden auch bei geringen Auflösungen erhöht.

5.3. SITUATIONSADAPTIVE LICHTASSISTENZFUNKTIONEN

Nachdem im vorigen Abschnitt das blendfreie Fernlicht mit einem adaptiven Sicherheitsbereich analysiert wurde, betrachtet der folgende Abschnitt die situationsadaptiven Lichtfunktionen. Dabei wird zunächst die Detektionsrate der Manöverdetektion ausgewertet. Anschließend wird die Wirkung der Lichtfunktionen anhand von Ergebnissen einer Probandenstudie objektiv und subjektiv validiert.

5.3.1. LEISTUNGSFÄHIGKEIT DER MANÖVERDETEKTION IN KREUZUNGSSITUATIONEN

In diesem Abschnitt wird die Leistungsfähigkeit der Manöverdetektion für eine Kreuzungssituation ausgewertet. Zu diesem Zweck werden sowohl Simulationsdaten als auch Messdaten aus Versuchsfahrten genutzt. Die Generierung der Simulationsdaten erfolgt durch das Programm Virtual Test Drive der Firma VIRES. Der Vorteil einer Nutzung von simulierten Daten ist die Entwicklung und Absicherung von Funktionen, in diesem Fall der Manöverdetektion, in gleichbleibenden Verkehrsszenarien mit idealen Sensormodellen. Einflüsse von Messfehlern können in diesem Schritt vernachlässigt werden. Um die Funktionsentwicklung mittels Simulationsdaten zu verifizieren, wird die entwickelte Manöverdetektion unter Verwendung von Messdaten aus Realfahrten ausgewertet.

Die Manöverdetektion wird, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, mittels eines Bayes'schen Netzes sowie eines Fuzzysystems realisiert und die Ergebnisse der beiden Verfahren gegenübergestellt. Die Kreuzungen, welche für die Auswertung relevant sind, bieten jeweils die Möglichkeit zur Weiterfahrt oder zur Durchführung eines Abbiegevorgangs. Dabei können die Abbiegemöglichkeiten auf einer Seite oder beidseitig gegeben sein. Sowohl in der Simulation als auch bei den Versuchsfahrten folgt das Egofahrzeug einem anderen Verkehrsteilnehmer, um die Anwendung der Funktion gleichzeitig für ein vorausfahrendes Fahrzeug zu untersuchen.

Die Auswertung erfolgt anhand der Klassifikationsraten mit Hinblick auf die Anforderungen aus Kapitel 3. Eine weitere Beurteilungsmöglichkeit bieten Kenngrößen, die aus den Messdaten entnommen werden. In einer Kreuzungssituation ist dies die Entfernung zur Kreuzung zum Zeitpunkt der Klassifikation. Eine Messung der Zeit bis zum Eintreffen an der Kreuzung ist aufgrund des ungleichmäßigen Geschwindigkeitsverlaufs bei der Annäherung ungeeignet.

Die Richtig-positiv- und Falsch-positiv-Raten der Manöverdetektion zur Klassifikation eines Abbiegevorgangs des Egofahrzeugs, die durch das Bayes'sche Netz und das Fuzzysystem bestimmt werden, sind in den Tabellen 5.1 und 5.2 dargestellt. Anhand der Klassifikationsraten ist ersichtlich, dass sowohl das Bayes'sche Netz als auch die Fuzzylogik eine Erkennung des Abbiegevorgangs gewährleisten. In beiden Fällen genügt die Klassifikation für die Simulationsdaten den gestellten Anforderungen von $R_{RP} > 95\%$ und $R_{FN} < 5\%$. Die Ergebnisse für die Realfahrt liegen knapp unter den geforderten Klassifikationsraten. Ein signifikanter Unterschied bei der Erkennung mittels eines Bayes'schen Netzes oder eines Fuzzysystems ist nicht ersichtlich. Lediglich bei einer Kreuzung mit beidseitiger Abbiegemöglichkeit und der Klassifikation von Realdaten ist die Richtig-positiv-Rate des Bayes'schen Netzes mit 85,4% bedeutend geringer.

	links	rechts	beidseitig	Gesamt
Anzahl Manöver	36	36	120	192
R_{RP}	35	32	119	186
R_{FN}	1	4	1	6
R_{RP} [%]	97,2	88,9	99,2	96,8
R_{FN} [%]	2,8	11,1	0,8	3,2

(a) Simulationsdaten

	links	rechts	beidseitig	Gesamt
Anzahl Manöver	23	23	41	87
R_{RP}	22	22	38	82
R_{FN}	1	1	3	5
R_{RP} [%]	95,6	95,6	92,7	94,2
R_{FN} [%]	4,4	4,4	7,3	5,8

(b) Realdaten

Tabelle 5.1: Klassifikationsraten mittels eines Bayes'schen Netzes für das Egofahrzeug

	links	rechts	beidseitig	Gesamt
Anzahl Manöver	36	36	120	192
R_{RP}	36	35	116	187
R_{FN}	0	1	4	5
R_{RP} [%]	100,0	97,2	96,7	97,4
R_{FN} [%]	0,0	2,8	3,3	2,6

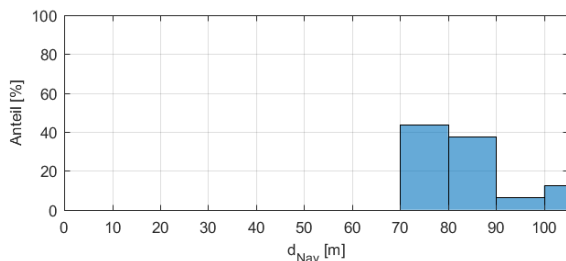
(a) Simulationsdaten

	links	rechts	beidseitig	Gesamt
Anzahl Manöver	23	23	41	87
R_{RP}	23	23	35	81
R_{FN}	0	0	6	6
R_{RP} [%]	100,0	100,0	85,4	93,1
R_{FN} [%]	0,0	0,0	14,6	6,9

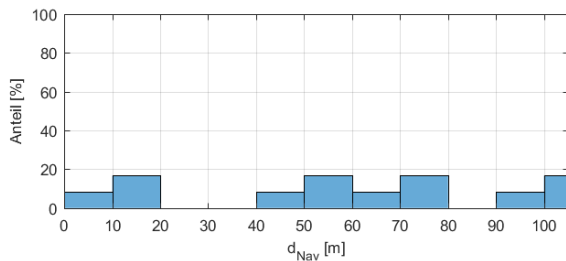
(b) Realdaten

Tabelle 5.2.: Klassifikationsraten mittels eines Fuzzysystems für das Egofahrzeug

Neben der Beurteilung der Klassifikation dient die Entfernung zur Kreuzung zum Zeitpunkt der Entscheidung als weiteres Bewertungskriterium. Die Abbildungen 5.15 und 5.16 bilden die Anzahl der Klassifikationen über die Entfernung zur Kreuzung ab.



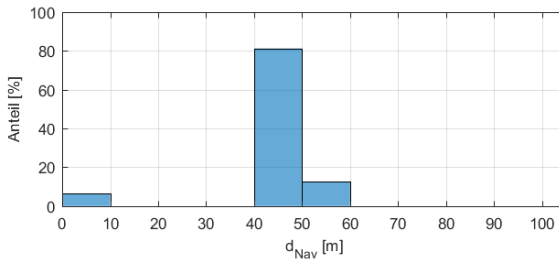
(a) Simulationsdaten ($\mu = 83,3$ m; $\sigma = 10,9$ m)



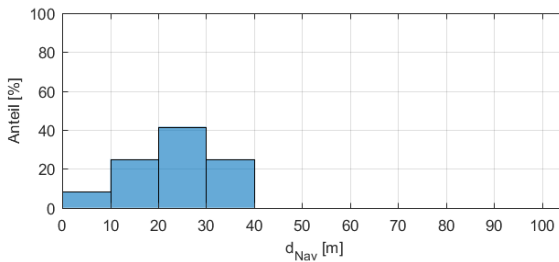
(b) Realdaten ($\mu = 64,3$ m; $\sigma = 41,7$ m)

Abbildung 5.15.: Erkennungsentfernung mittels eines Bayes'schen Netzes für das Egofahrzeug

Die Entfernung zur vorausliegenden Kreuzung bei einer Klassifikation durch das Bayes'sche Netz ist im Vergleich größer. Der Mittelwert der Erkennungsdistanz liegt für die simulierte Daten bei 83,3 m oder bei 64,3 m im Fall der Realfahrt. Allerdings weist diese vor allem bei der Nutzung von Fahrzeugdaten eine hohe Standardabweichung von 41,7 m auf. Das Fuzzysystem liefert hier mit einer Standardabweichung von 11,2 m einen verlässlicheren Wert. Gleichzeitig verbleibt bei einem Großteil der Fälle eine Entfernung von mehr als 10 m zur



(a) Simulationsdaten ($\mu = 39,2$ m; $\sigma = 10,3$ m)



(b) Realdaten ($\mu = 24,8$ m; $\sigma = 11,2$ m)

Abbildung 5.16.: Erkennungsentfernung mittels eines Fuzzysystems für das Egofahrzeug

Kreuzung zum Zeitpunkt der Detektion. Dieser Entfernungsbereich ermöglicht die Projektion einer situationsadaptiven Lichtfunktion, um den Fahrer zu unterstützen.

Nach der Analyse der Manöverdetektion für die Erkennung eines Abbiegevorgangs des Egofahrzeugs wird in den folgenden Betrachtungen die Manöverdetektion auf das vorausfahrende Fremdfahrzeug angewendet. Für die Erkennung eines Abbiegevorgangs fehlen hier, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, Informationen über den Lenkwinkel und den Fahrtrichtungsanzeiger des Fahrzeugs, um eine Richtungsentscheidung zu treffen.

	links	rechts	beidseitig	Gesamt
Anzahl Manöver	30	30	75	135
R_{RP}	30	30	67	127
R_{FN}	0	0	8	8
R_{RP} [%]	100,0	100,0	89,3	94,1
R_{FN} [%]	0,0	0,0	10,7	5,9

(a) Simulationsdaten

	links	rechts	beidseitig	Gesamt
Anzahl Manöver	14	14	10	38
R_{RP}	7	13	9	29
R_{FN}	7	1	1	9
R_{RP} [%]	50,0	92,9	90,0	76,3
R_{FN} [%]	50,0	7,1	10,0	23,7

(b) Realdaten

Tabelle 5.3.: Klassifikationsraten mittels eines Bayes'schen Netzes für das Fremdfahrzeug

Entsprechend den Ausführungen für das Egofahrzeug sind in den Tabellen 5.3 und 5.4 die Klassifikationsraten für das Fremdfahrzeug dargestellt. Die Ergebnisse bei der Nutzung von Simulationsdaten zeigen bei beiden Vorgehensweisen den Anforderungen entsprechende Detektionsraten. Im Vergleich dazu sinkt die Leistungsfähigkeit für die Erkennung bei einer Realfahrt, hier werden lediglich knapp drei Viertel der Vorgänge richtig erkannt. Dies lässt den Schluss einer funktionierenden Erkennung von Abbiegevorgängen anderer Verkehrsteilnehmer zu, die allerdings genaue Sensordaten für eine entsprechende Entscheidungsfindung erfordert. Aufgrund der mit Messfehlern behafteten Daten der Sensoren sinkt die Detektionsrate bedeutend.

	links	rechts	beidseitig	Gesamt
Anzahl Manöver	30	30	75	135
R_{RP}	30	30	66	126
R_{FN}	0	0	9	9
R_{RP} [%]	100,0	100,0	88,0	93,3
R_{FN} [%]	0,0	0,0	12,0	6,7

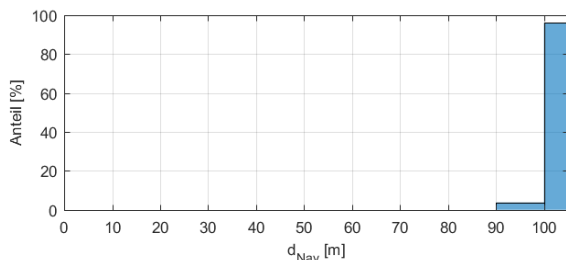
(a) Simulationsdaten

	links	rechts	beidseitig	Gesamt
Anzahl Manöver	14	14	10	38
R_{RP}	9	14	6	29
R_{FN}	5	0	4	9
R_{RP} [%]	64,3	100,0	60,0	76,3
R_{FN} [%]	35,7	0,0	40,0	23,7

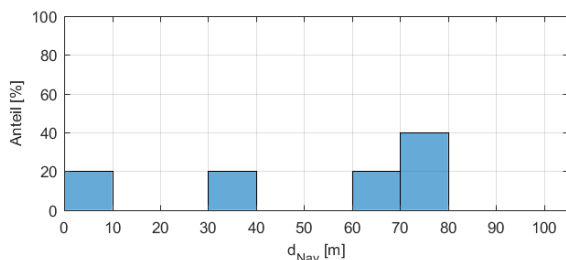
(b) Realdaten

Tabelle 5.4.: Klassifikationsraten mittels eines Fuzzysystems für das Fremdfahrzeug

Des Weiteren zeigen die Abbildungen 5.17 und 5.18 den Abstand des Fremdfahrzeugs zur Kreuzung zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung. Diese wird anhand der Distanz zum vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer und der Distanz des Egofahrzeugs zur Kreuzung bestimmt.



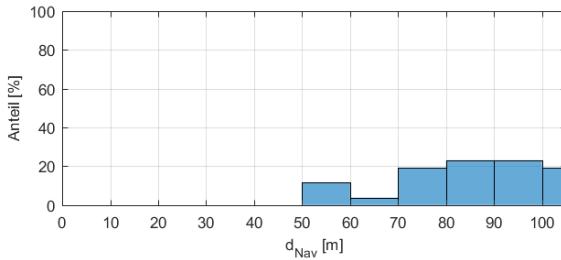
(a) Simulationsdaten ($\mu = 153,3$ m; $\sigma = 38,4$ m)



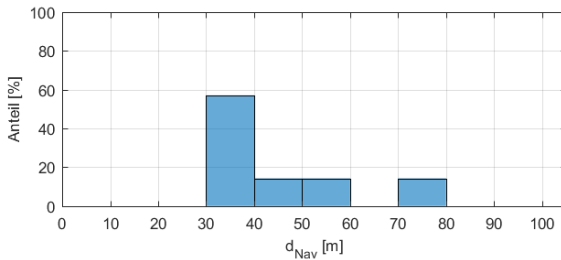
(b) Realdaten ($\mu = 50,4$ m; $\sigma = 29,3$ m)

Abbildung 5.17.: Erkennungsentfernung mittels eines Bayes'schen Netzes für das Fremdfahrzeug

Die Entfernung des Fremdfahrzeugs zur vorausliegenden Kreuzung verhält sich ähnlich zu der Betrachtung des Egofahrzeugs. Während die Entfernung bei der Nutzung eines Bayes'schen Netzes größer ist, ist die Standardabweichung bei der Nutzung des Fuzzysystems bedeutend geringer. Für zusätzliche Untersuchungen wird auf die Ausarbeitung von *Schiener* verwiesen. [186]



(a) Simulationsdaten ($\mu = 86,1$ m; $\sigma = 16,3$ m)



(b) Realdaten ($\mu = 44,9$ m; $\sigma = 16,3$ m)

Abbildung 5.18.: Erkennungsentfernung mittels eines Fuzzysystems für das Fremdfahrzeug

Zusammenfassend entspricht die Manöverdetektion zur Erkennung von Abbiegevorgängen den Anforderungen, die in Kapitel 3 spezifiziert wurden. Sowohl mittels eines Bayes'schen Netzes als auch einer Fuzzylogik ermöglicht eine rechtzeitige Klassifikation mit einer ausreichenden Genauigkeit. Durch die Gegenüberstellung von Ergebnissen mittels Simulationsdaten und experimentellen Daten lässt sich die reduzierte Leistungsfähigkeit im Fahrbetrieb auf Messfehler der Fahrzeugsensorik zurückführen. Die Ansätze liefern ähnliche Ergebnisse, wobei das Bayes'sche Netz eine höhere Erkennungsreichweite bei gleichzeitig größerer Streuung besitzt. Dies ist auf eine grundlegende Eigenschaft des Bayes'schen Netzes zurückzuführen: Die Detektion eines Manövers erfolgt, sobald die bedingte Wahrscheinlichkeit einen

Schwellwert zu einem Zeitpunkt übersteigt. Es besteht keine zeitliche Verknüpfung aufeinanderfolgender Wertekonstellationen, um das Manöver anhand einer Abfolge zu beschreiben. Deshalb kann die Erkennung eines Manövers ausgelöst werden, obwohl die gegenwärtige Situation unter Umständen keinen Zusammenhang mit dem eigentlichen Vorgang darstellt. Ein Fuzzysystem hingegen kann diesem Effekt durch eine geschickte Abstimmung des Regelwerks entgegenwirken. Aus diesem Grund zeigt die Fuzzylogik eine geringere Erkennungsreichweite, aber auch eine geringere Streuung als das Bayes'sche Netz. Für eine weitere Betrachtung ist daher das Fuzzysystem sinnvoll.

5.3.2. LEISTUNGSFÄHIGKEIT DER MANÖVERDETEKTION FÜR SPURWECHSELSITUATIONEN

Nachdem die Leistungsfähigkeit der Manöverdetektion für die Erkennung von Abbiegemanöver diskutiert wurde, wird im Folgenden die Detektion von Spurwechseln untersucht. Ein Auszug dieser Ergebnisse ist in Form einer Publikation veröffentlicht. [157] Die Auswertung der Manöverdetektion für Spurwechsel auf Landstraßen erfolgt anhand einer Betrachtung der Klassifikationsrate und einer Kenngröße, die eine zeitliche Einordnung der Entscheidungsfindung erlaubt. Im Gegensatz zu der Entfernung zur Kreuzung wird bei einem Spurwechsel die TTC als Kenngröße betrachtet, die im Fall einer Annäherung ein geschwindigkeitsunabhängiges Maß darstellt.

Die Untersuchung der Manöverdetektion erfolgt mittels einer Probandenstudie, um eine realitätsnahe Bewertung zu ermöglichen. Die Probandenstudie erfolgt auf einer Strecke im öffentlichen Straßenverkehr, die sowohl Abschnitte auf einer Land- und Bundesstraße als auch auf einer Autobahn beinhaltet. Die Strecke ist in Abbildung 5.19 dargestellt. Die Manöverdetektion ist in dem Versuchsfahrzeug imple-

mentiert, das in Abschnitt 5.1 beschrieben ist. Nachdem in Abschnitt 5.3.1 ein Vergleich zwischen der Klassifikation eines Bayes'schen Netzes und einer Fuzzylogik erfolgt ist, wird im Folgenden lediglich ein Fuzzysystem ausgewertet.

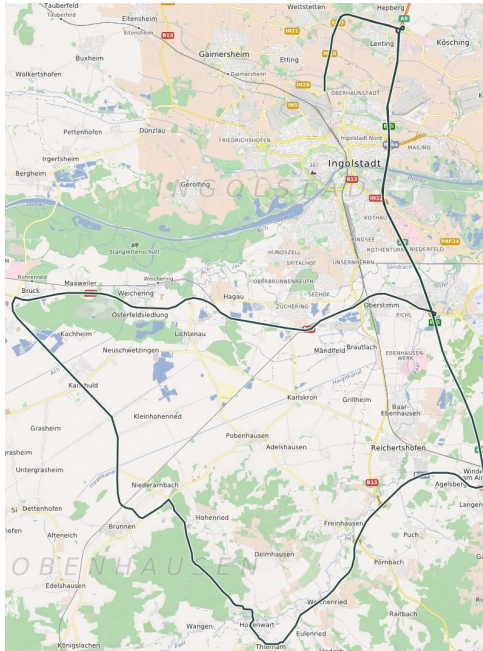


Abbildung 5.19.: Teststrecke zur Auswertung der Manöverdetektion für Spurwechsel [104]

Für die Durchführung stehen 10 Probanden zur Verfügung, die sich in 8 männliche und 2 weibliche Personen im Alter zwischen 23 und 52 Jahren aufteilen. Die Probanden sind angewiesen die Strecke der Straßenverkehrsordnung entsprechend abzufahren. Dabei ist ihnen freigestellt, bei Möglichkeit andere Verkehrsteilnehmer zu überholen. Die Leistungsfähigkeit der Klassifikation ist vergleichbar mit den Ergebnissen für einen Abbiegevorgang. Insgesamt werden 150 Spur-

	Landstraße	Bundesstraße	Autobahn	Gesamt
Anzahl Manöver	19	25	106	150
R_{RP}	19	24	103	146
R_{FN}	0	1	3	4
R_{RP} [%]	100	96,0	97,2	97,3
R_{FN} [%]	0	4,0	2,8	2,7

Tabelle 5.5.: Auswertung der Klassifikationsraten für die Probandenstudie

wechselmanöver durch die Versuchspersonen durchgeführt. Dabei werden 97,3% der Vorgänge richtig erkannt. Daher genügt die Erkennungsrate der gestellten Anforderung an das System. Die meisten Manöver werden bei der Fahrt auf der Autobahn durchgeführt. Dies bestätigt die Vermutung, dass der Einsatz der lichtbasierten Spurwechselunterstützung vor allem für ein Autobahnzenario geeignet ist. Eine Erkennung entgegenkommender Fahrzeuge, die mit aktuellen Sensoren ohne den flächendeckenden Einsatz der V2X-Kommunikation nicht gewährleistet werden kann, ist für diesen Anwendungsfall nicht notwendig.

Neben der Klassifikationsraten sind für die Bewertung des Systems die Zeitpunkte der Erkennung eines Manövers relevant. Der prozentuale Anteil der richtig klassifizierten Spurwechselmanöver ist in Abbildung 5.20 über die TTC aufgetragen.

Ein Großteil der Spurwechsel wird mit einer Vorlaufzeit zwischen 2 s und 4 s erkannt. Grundlegend werden 75,34% der durchgeführten Spurwechsel mit einer Vorlaufzeit von mehr als 2 s vor dem eigentlichen Spurwechsel detektiert. Der Mittelwert ergibt sich zu 2,83 s und entspricht somit der in Kapitel 3 gestellten Anforderung.

Die vorgestellten Ergebnisse bestätigen die Eignung der Manöverdetektion für die Umsetzung von situationsadaptiven Lichtfunktionen. Die Untersuchung mittels einer entsprechenden Anzahl an Versuchspersonen im öffentlichen Straßenverkehr zeigt die Eignung, Spur-

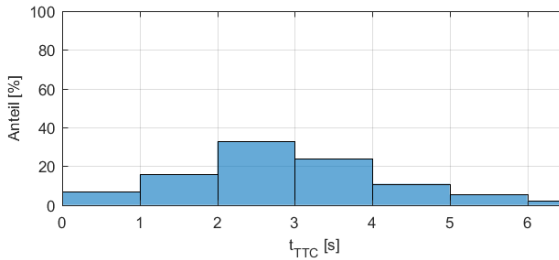


Abbildung 5.20.: Vorlaufzeiten der Klassifikation von Spurwechselmanövern
($\mu = 2,83$ s; $\sigma = 1,36$ s)

wechselmanöver mit gegenwärtigen Fahrzeugsensoren unter realen Verkehrsszenarien zu erkennen. Die Klassifikation erfolgt mit einer Vorlaufzeit, die gesetzliche Grenzen hinsichtlich des Abstands auf Autobahnen nicht unterschreitet. Eine weiterführende Diskussion der Leistungsfähigkeit ist in der Ausarbeitung von *Habermayr* zu finden.

5.3.3. PROBANDENSTUDIE ZUR SPURWECHSELUNTERSTÜTZUNG

In einer abschließenden Betrachtung wird das entwickelte System mittels einer Studie mit Testpersonen hinsichtlich der subjektive Wahrnehmung des Fahrers und der Wirkung auf dessen Blick- und Fahrverhalten untersucht. Dabei wird die Lichtfunktion zur Spurwechselunterstützung, die in Abschnitt 4.5.2 beschrieben wurde, als Beispiel für ein situationsadaptives LBAS genutzt.

In einem ersten Schritt werden Hypothesen generiert, die innerhalb der Studie zu überprüfen sind, und das Versuchsdesign erklärt. Anschließend wird die Durchführung der Studie beschrieben. Dabei wird ebenfalls auf die Umsetzung der Lichtfunktionen mittels des in Abschnitt 5.1.2 dargestellten Scheinwerfersystems eingegangen. In einem

letzten Schritt werden die Ergebnisse der Studie dargelegt und diskutiert.

HYPOTHESENGENERIERUNG UND VERSUCHSDESIGN

Das Ziel der Lichtfunktionen ist, die Einschätzung der Situation durch die Darstellung einer Empfehlung oder einer Warnung vor der Durchführung eines Fahrmanövers zu unterstützen. Daher ist deren Wirkung auf das Blick- und Fahrverhalten eines Probanden zu prüfen.

Hinsichtlich des Blickverhaltens ist eine Blickfixation mit einer Verlagerung der Aufmerksamkeit in den entsprechenden Bereich verbunden. [59] Ebenfalls lässt sich nach *Miura* eine antiproportionale Verbindung zwischen der Dauer einer Blickfixation und der visuellen Beanspruchung des Fahrers herstellen. [97] Die situationsadaptiven Lichtfunktion sollen die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die bevorstehende Handlung verlagern, ohne den Fahrer zu beanspruchen oder abzulenken. Die Hypothesen lauten entsprechend:

- H1: Es besteht ein Unterschied bei der Anzahl der Blickfixationen in einem relevanten Bereich zwischen Fahrten ohne und mit einer lichtbasierten Empfehlung.
- H2: Es besteht ein Unterschied bei der Dauer der Blickfixationen in einem relevanten Bereich zwischen Fahrten ohne und mit einer lichtbasierten Empfehlung.
- H3: Es besteht ein Unterschied bei der Anzahl der Blickfixationen in einem relevanten Bereich zwischen Fahrten ohne und mit einer lichtbasierten Warnung.
- H4: Es besteht ein Unterschied bei der Dauer der Blickfixationen in einem relevanten Bereich zwischen Fahrten ohne und mit einer lichtbasierten Warnung.

Das Fahrverhalten bei einem Spurwechsel kann anhand verschiedener Kenngrößen gemessen und klassifiziert werden. Bei der Ausführung von Spurwechseln wurden bisher Unterschiede hinsichtlich der Dauer des Manövers und der Querschleunigung identifiziert. [39][115][125] Des Weiteren wird von Unterschieden bei dem Startzeitpunkt des Spurwechsels, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung sowie des Abstands und der Differenzgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer ausgegangen. Für die Untersuchung innerhalb der Studie lauten die Hypothesen folglich:

- H5: Es besteht ein Unterschied bei dem Startzeitpunkt des Spurwechsels zwischen Fahrten ohne und mit einer lichtbasierten Empfehlung.
- H6: Es besteht ein Unterschied bei der Dauer des Spurwechsels zwischen Fahrten ohne und mit einer lichtbasierten Empfehlung.
- H7: Es besteht ein Unterschied bei der Querschleunigung während des Spurwechsels zwischen Fahrten ohne und mit einer lichtbasierten Empfehlung.
- H8: Es besteht ein Unterschied bei der maximalen Geschwindigkeit zwischen Fahrten ohne und mit einer lichtbasierten Warnung.
- H9: Es besteht ein Unterschied bei der maximalen Beschleunigung zwischen Fahrten ohne und mit einer lichtbasierten Warnung.
- H10: Es besteht ein Unterschied bei dem minimalen Abstand zum Vorderfahrzeug zwischen Fahrten ohne und mit einer lichtbasierten Warnung.
- H11: Es besteht ein Unterschied bei der maximalen Differenzgeschwindigkeit zwischen Fahrten ohne und mit einer lichtbasierten Warnung.

Bei der Durchführung und Auswertung der Studie wird die anzuwendende Lichtfunktion als unabhängige Variable festgelegt, die Wahrnehmung des Fahrers und dessen Fahrverhalten stellen die abhängigen

Variablen dar. Die Wahrnehmung wird durch ein Blickerfassungssystem gemessen, das Fahrverhalten wird durch die Messtechnik des Fahrzeugs von den Sensoren abgegriffen. Zur Erfassung des subjektiven Empfindens wird ein Fragebogen genutzt, den die Probanden nach der Durchführung der Studie ausfüllen. Die Studie entspricht einem einfaktoriellen Within-Subject-Design, die Versuchspersonen erfahren jeweils gleiche experimentelle Bedingungen.

Die statistische Auswertung der Studie erfolgt mit einer Festlegung des Signifikanzniveaus von $\alpha \leq .05$. Ausreißer in den erfassten Blick- und Fahrdaten werden im Vorfeld mittels einer z-Transformation und einer Ausreißerschwelle von ± 3.5 entfernt. [69] Die Prüfung der aufgestellten Hypothesen erfolgt durch die Anwendung parametrischer t-Tests für verbundene Stichproben und nicht-parametrischer Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests. Die Normalverteilung der Stichprobe wird für jede Variable anhand des Shapiro-Wilk-Tests geprüft, um den anzuwendenden Test auszuwählen. Bei einer nachgewiesenen Signifikanz wird die Effektstärke berechnet und klassifiziert. Die Klassifizierung erfolgt nach *Cohen* in kleine ($d = 0.2$), mittlere ($d = 0.5$) und große Effekte ($d = 0.8$). [25]

DURCHFÜHRUNG DER STUDIE

Die Studie wird auf dem Gelände des Audi driving experience center in Neuburg an der Donau durchgeführt, welches in Abbildung 5.21 dargestellt ist. Neben einem Rund- und Geländekurs bietet das Fahrerlebniszentrum einen Bereich an, der für die Entwicklung und Erprobung von FAS konzipiert ist. Dieser Teil zeichnet sich durch zwei Geraden mit einer Länge von 550 m und jeweils drei parallelen Fahrspuren aus. Die Durchführung der Studie auf einer Teststrecke bietet den Vorteil, eine realitätsnahe Fahrsituation nachstellen zu können, al-

lerdings ist das Gefahrenbewusstsein von Testpersonen eingeschränkt. Dies kann unter Umständen zu einem Fahrverhalten führen, das nicht dem im alltäglichen Straßenverkehr entspricht.



Abbildung 5.21.: Versuchsstrecke des Audi driving experience center für die Durchführung der Probandenstudie [4]

Die Durchführung der Studie ist in drei Teile gegliedert. Der erste Teil beinhaltet die Begrüßung, eine kurze Einführung und einen demographischen Fragebogen, den die Probanden vor Fahrtantritt ausfüllen. Der Fahrversuch bildet den zweiten Teil. Dieser gliedert sich in fünf Durchläufe. Dabei fährt der Proband im Versuchsfahrzeug einem vorausfahrenden Fahrzeug hinterher und ist angewiesen, dieses bei gegebener Möglichkeit zu überholen. Des Weiteren fährt ein weiteres Fahrzeug dem Probanden hinterher und stellt in bestimmten Situationen ein Hindernis für einen Fahrstreifenwechsel dar, indem es zum Überholvorgang ansetzt. Diese Situationen werden für jeden Probanden in randomisierter Reihenfolge festgelegt.

Zu Beginn und am Ende fährt die Versuchsperson jeweils einen Durchlauf ohne ein aktiviertes Assistenzsystem, d.h. die Entscheidungsfindung zur Durchführung eines Überholmanövers wird nicht unterstützt. Diese Fahrten dienen der Bestandsaufnahme des Fahrverhaltens und als Basis für einen Vergleich mit den Fahrten, in denen der Proband durch eine situationsadaptive Lichtfunktion unterstützt wird. Zwischen diesen grundlegenden Fahrten erfolgen drei Durchläufe, in denen die Versuchsperson jeweils durch die empfehlende Lichtfunktio-

on, die warnende Lichtfunktion oder einen Spurwechselassistenten unterstützt wird. Die Spurwechselunterstützung dient bei der Studie als Vergleichssystem. Nach jeder dieser Fahrten erfolgt eine Befragung des Probanden durch den Versuchsleiter, in der die subjektive Wahrnehmung und die Beeinflussung des Probanden durch das Assistenzsystem erfasst wird. Der Abschluss der Versuchsdurchführung findet durch eine abschließende Befragung statt, in der die Versuchsperson die Systeme mittels eines semantischen Differentials mit fünf Abstufungen beurteilen sowie Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge machen kann.

Zum Zeitpunkt der Durchführung der Studie ist kein hochauflösendes Scheinwerfersystem verfügbar. Deshalb werden die situationsadaptiven Lichtfunktionen für die Anwendung mit dem in Abschnitt 5.1.2 vorgestellten Scheinwerfersystem angepasst. Die Gestaltung der Lichtfunktionen erfolgt mithilfe einer Expertenstudie, die durch *Kammann* durchgeführt wurde. [184] Die Auswertung dieser Expertenstudie zeigt, dass eine Veränderung der Intensität in Verbindung mit einer dynamischen Bewegung innerhalb der Lichtverteilung den notwendigen Reiz bedingt, um die Aufmerksamkeit des Fahrers zu erregen.

Die Ausgangssituation für die situationsadaptiven Lichtfunktionen bildet das blendfreie Fernlicht. Für die zum Spurwechsel empfehlende Lichtfunktion wird zunächst die Helligkeit des gesamten Fernlichts reduziert. Ausgenommen davon ist der Bereich links des vorausfahrenden Fahrzeugs, dessen Intensität zur Beleuchtung der Nebenspur erhöht wird. Die Dynamik wird durch ein Auffächern dieses Bereichs nach links erreicht, indem die Intensität der benachbarten Segmente schrittweise erhöht wird. Diese Bewegung wird durch das Abbiegelicht fortgeführt, sobald die Lichtverteilung des Fernlichts die volle Helligkeit erreicht hat. Entsprechend wird für die warnende Lichtfunktion eine entgegen gerichtete Bewegung gewählt. Die Intensität des Fernlichts wird links des vorausfahrenden Fahrzeugs von außen

nach innen reduziert. Die beiden Lichtverteilungen sind neben der Grundlichtverteilung des blendfreien Fernlichts in Abbildung 5.22 dargestellt.



(a) Grundlegende Lichtverteilung



(b) Lichtverteilung der empfehlenden Lichtfunktion



(c) Lichtverteilung der warnenden Lichtfunktion

Abbildung 5.22.: Lichtverteilungen der situationsadaptiven Lichtfunktionen mittels des prototypischen Scheinwerfersystems

Für die objektive Auswertung der Studie ist die Erfassung von Blick- und Fahrdaten notwendig. Die Blickdaten werden mittels eines Bli-

ckerfassungssystem gemessen, das aus einer Kamera von Dikablis, die am Kopf des Probanden angebracht wird, und der Bildverarbeitungssoftware D-Lab 2.5 besteht. Als Messdaten stehen die Anzahl der Blicke in eine bestimmte Area of Interest (AOI) und der Mittelwert der Blickdauer in diese AOI zur Verfügung. Als AOIs für die Fahrversuche werden der Bereich, in dem die Lichtfunktionen sichtbar sind, und der Bereich am Außenspiegel, in der die visuelle Rückmeldung der Spurwechselunterstützung erfolgt, gewählt. Zur Veranschaulichung sind die AOIs aus Fahrersicht in Abbildung 5.23 dargestellt. Die für die Auswertung des Fahrverhaltens notwendigen Fahrdaten und das Bild der fahrzeugeigenen Kamera werden mittels des Messrechners im Versuchsfahrzeug erfasst und durch die Software Elektrobit Assist ADTF³ aufgezeichnet.

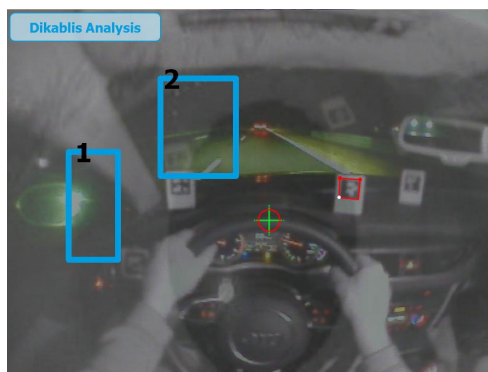


Abbildung 5.23.: Festgelegte AOIs) für den Fahrversuch

Die Studie wird mit einem Probandenkollektiv von $N_{Prob} = 33$ Probanden durchgeführt. Dabei sind 20 der Versuchspersonen männlich und 13 Teilnehmer weiblich. Um einen altersbedingten Einfluss bei der Wahrnehmung der FAS einbeziehen zu können, wird weiterhin auf eine gleichmäßige Verteilung der Probanden in verschiedene Al-

³Automotive Data and Time-Triggered Framework

tersgruppen geachtet. Die Versuchspersonen sind zu 52,9% unter 50 Jahre und zu 47,1% über 50 Jahre alt. Weiterhin wird bei der Auswahl der Versuchspersonen auf eine bestehende Sehschwäche geachtet sowie darauf, dass das eigene Fahrzeug mindestens über Xenon- oder LED-Scheinwerfer verfügt.

AUSWERTUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Anhand der Fragebögen beurteilen die Versuchspersonen die eigene Wahrnehmung der Lichtfunktionen und deren subjektiven Nutzen. Durch das semantische Differential werden die Lichtfunktionen tendenziell als gut, nützlich, angenehm, wichtig und vorteilhaft eingestuft. Die durchschnittliche Verteilung der Angaben ist in Abbildung 5.24 ersichtlich.

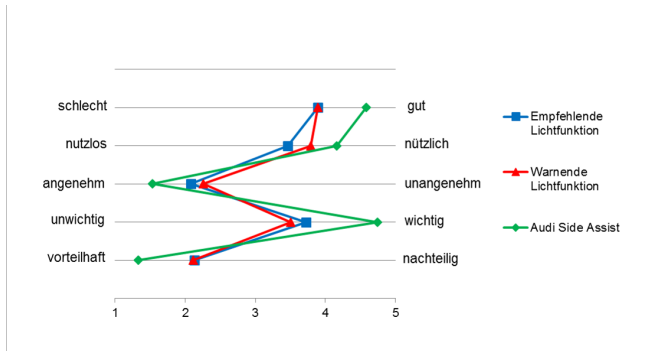


Abbildung 5.24.: Semantisches Differential zur Empfindung der situationsadaptiven Lichtfunktionen

Im Vergleich zu der optischen Spurwechselunterstützung Audi Side Assist, die als Referenzsystem dient, zeigt sich eine ähnliche Tendenz, allerdings mit einer schwächeren Ausprägung. Dies lässt sich zum einen dadurch erklären, dass die Spurwechselunterstützung als eta-

bliertes FAS einigen Versuchspersonen bekannt ist. Dies kann die deutlichere Einstufung im Vergleich zu den Lichtfunktionen erklären. Auf der anderen Seite sind die Lichtfunktionen aufgrund des prototypischen Scheinwerfersystems nicht intuitiv genug. Dies zeigt die Befragung der Probanden hinsichtlich der Wahrnehmung. Die Lichtfunktion, die den Spurwechsel aufgrund eines anstehenden Überholmanövers empfiehlt, wird bei den Fahrten von 84,8% der Versuchspersonen wahrgenommen. Dabei nehmen 45,5% der Probanden den Lichtkegel im Fernlicht am Anfang wahr, 75,8% die dynamische Bewegung im Fernlicht und 66,7% im Abbiegelicht. Keiner der Versuchspersonen fühlte sich durch die Lichtfunktion in der Ausführung der Fahraufgabe behindert und 66,7% fühlten sich sogar unterstützt. Die komplementäre Lichtfunktion, die vor einem Spurwechsel aufgrund eines herannahenden Fahrzeugs warnt, wird lediglich von 48,5% der Fahrer wahrgenommen und von 17,6% als unterstützend bei der Fahraufgabe eingestuft.

Hinsichtlich des Blickverhalten bei Fahrten ohne und mit der empfehlenden Lichtfunktion ergibt sich eine Signifikanz ($t(26) = 4.1, p = .000, d = 0.89$) bei der Anzahl der Blicke in die AOI 2. Der Mittelwert und die Standardabweichung ohne die unterstützende Lichtfunktion ergeben sich zu $\mu_B = 1,14$ und $\sigma_B = 0,67$ bei einer Stichprobe $N_{Prob} = 27$, bei der Fahrt mit Lichtfunktion zu $\mu_E = 2,27$ und $\sigma_E = 1,47$. Bei der Dauer der Blickfixationen ergibt sich keine Signifikanz ($t(26) = 1.293, p = .,207$), die Werte sind bei beiden Fahrten ähnlich. Die Fahrt, bei der der Überholvorgang aufgrund eines anderen Fahrzeugs nicht durchführbar ist und die warnende Lichtfunktion auslöst, zeigt eine Signifikanz sowohl für die Anzahl der Blickfixationen ($T(27) = -3.916, p = .000, d = 1.14$) als auch für die Dauer dieser Blickfixationen ($T(27) = -2.174, p = .030, d = 0.44$). Die Anzahl der Blicke und die Dauer der Blicke der Probanden in die AOI 2 sind etwa doppelt so hoch bei Fahrten mit der Assistenzfunktion. Die

Auswertung des Blickverhaltens wird durch Box-Whisker-Plots in den Abbildungen 5.25 bis 5.28 veranschaulicht. Die Box stellt dabei jeweils den Bereich zwischen dem unteren und dem oberen Quartil dar, der Strich innerhalb der Box entspricht dem Median. Die Antennennumfassen den gesamten Wertebereich der Datenwerte.

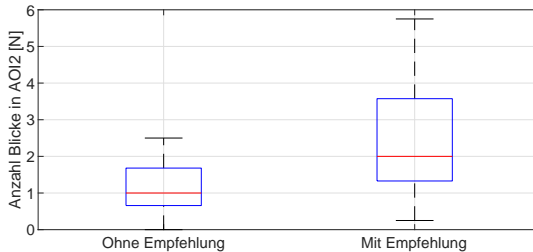


Abbildung 5.25.: Anzahl der Blicke in AOI2 mit empfehlender Lichtfunktion

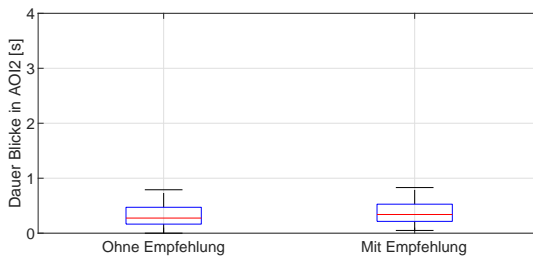


Abbildung 5.26.: Dauer der Blicke in AOI2 mit empfehlender Lichtfunktion

Das Fahrverhalten beim Überholen ohne und mit empfehlender Lichtfunktion wird anhand des Zeitpunkts des Spurwechselbeginns, der Dauer des Spurwechsels und der Querbeschleunigung beim Spurwechsel bewertet. Dabei wird der Zeitpunkt des Beginns mittels der TTC und die Dauer des Spurwechsels anhand des Übertritts der Fahrspurmarkierung gemessen.

Ein signifikanter Unterschied ist lediglich beim Startzeitpunkt des

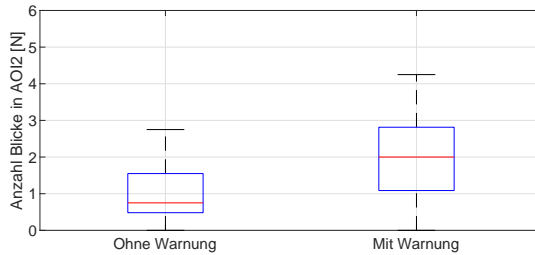


Abbildung 5.27.: Anzahl der Blicke in AOI2 mit warnender Lichtfunktion

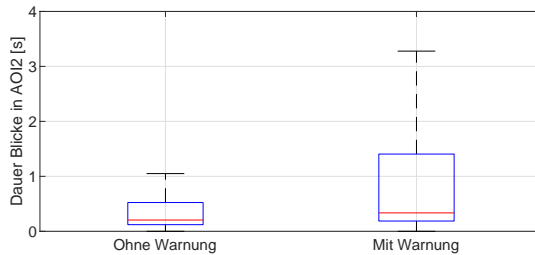


Abbildung 5.28.: Dauer der Blicke in AOI2 mit warnender Lichtfunktion

Spurwechsels ($T(24) = -2.171; p = .030; d = 0.37$) ersichtlich. Dieser erfolgt bei Anwendung der Lichtfunktion durchschnittlich eine Sekunde später. Bei Betrachtung sowohl der Querbeschleunigung ($t(24) = -.666; p = .512$) als auch der Dauer des Spurwechsels ($t(24) = 0.231; p = .820$) ergibt sich keine Signifikanz. Die zugehörigen Box-Whisker-Plots sind in den Abbildungen 5.29 bis 5.31 dargestellt. Die warnende Lichtfunktion wird anhand der Geschwindigkeit, der Beschleunigung, des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug und der Geschwindigkeitsdifferenz ausgewertet. Die Geschwindigkeit unterscheidet sich dabei signifikant ($t(24) = 2.448; p = .022; d = 0.49$), wobei die Geschwindigkeit bei Nutzung der warnenden Lichtfunktion höher ist. Bei der Beschleunigung ($t(24) = -1.246; p = .225$), dem Abstand ($t(24) = -.133; p = .895$) und der Geschwindigkeitsdifferenz

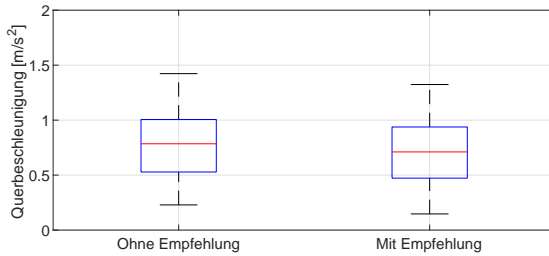


Abbildung 5.29.: Maximale Querbeschleunigung mit empfehlender Lichtfunktion

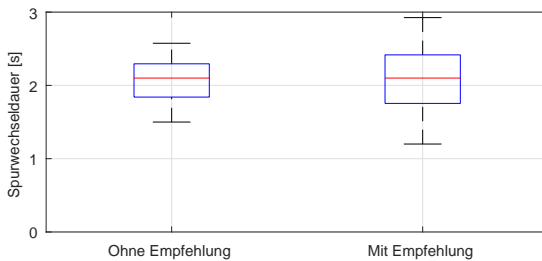


Abbildung 5.30.: Spurwechseldauer mit empfehlender Lichtfunktion

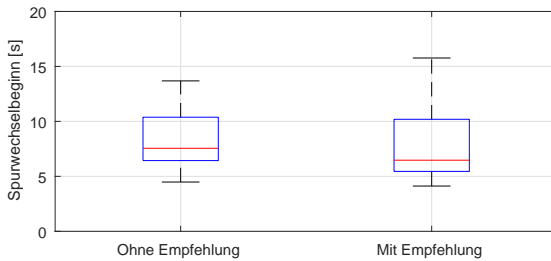


Abbildung 5.31.: Beginn des Spurwechsels mit empfehlender Lichtfunktion

($t(24) = -1.215; p = .236$) ergeben sich keine Unterschiede durch die Verwendung der warnenden Lichtfunktion. Die Abbildungen 5.32 bis 5.35 veranschaulichen die Wirkung der warnenden Lichtfunktion auf

das Fahrverhalten. Für weitere Ergebnisse wird auf die Arbeit von *Kammann* verwiesen.

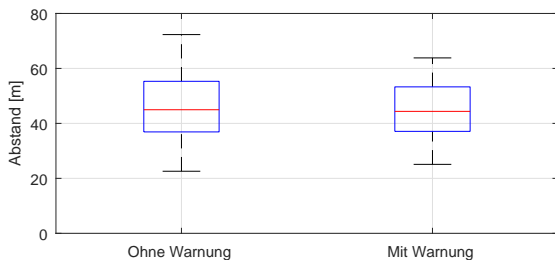


Abbildung 5.32.: Minimaler Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug mit warnender Lichtfunktion

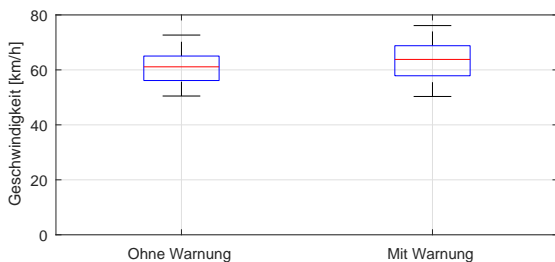


Abbildung 5.33.: Maximale Geschwindigkeit des Fahrzeugs mit warnender Lichtfunktion

Die Probandenstudie erlaubt eine erste Einschätzung der Wirkung von situationsadaptiven Lichtfunktionen auf den Fahrer. Durch die subjektive Bewertung der Versuchspersonen und die Auswertung des Blick- und Fahrverhaltens kann eine grundlegend positive Auswirkung festgestellt werden. Die Probanden schätzen die Lichtfunktionen, insbesondere die empfehlende Ausprägung, als hilfreich ein, weshalb ein Einsatz als komplementäres Assistenzsystem im Zusammenspiel mit einer optischen Spurwechselunterstützung denkbar ist. [160] Die Auswertung des Blickverhaltens bekräftigt diese Einschätzung, die

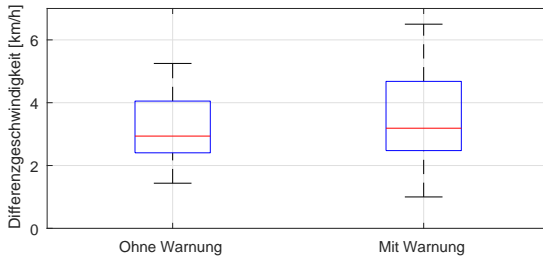


Abbildung 5.34.: Maximale Differenzgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug mit warnender Lichtfunktion

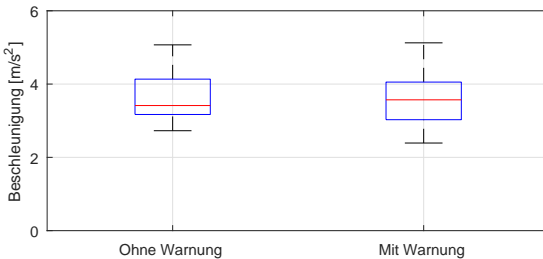


Abbildung 5.35.: Maximale Beschleunigung des Fahrzeugs mit warnender Lichtfunktion

Aufmerksamkeit der Probanden wird erwartungsgemäß beeinflusst. Lediglich die Auswirkung auf das Fahrverhalten entspricht insgesamt nicht der vorausgegangenen Annahme, da es nicht beeinflusst wird und sich zu Fahrten ohne unterstützende Funktionen unterscheidet. Um eine weitere Untersuchung des Fahrverhaltens zu ermöglichen, ist der Einsatz eines hochauflösenden Scheinwerfersystems notwendig, das eine intuitive Darstellung der Handlungsempfehlung realisiert.

KAPITEL 6

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wird die Anwendung des Situationsbewusstseins für lichtbasierte Assistenzsysteme untersucht. Das Situationsbewusstsein beschreibt einen Prozess, bei dem die Entscheidungsfindung und die Handlungsausführung eines Systems auf der Wahrnehmung und Interpretation der Umwelt sowie der Vorausschau zukünftiger Systemzustände basiert. Die Anwendung dieser Vorgehensweise auf Lichtassistenzsysteme bedeutet, dass Informationen der Umfeldwahrnehmung genutzt werden, um die aktuelle Verkehrssituation zu verstehen und eine Aussage über unmittelbare Ereignisse zu treffen. Darauf aufbauend werden Lichtfunktionen umgesetzt, die den Fahrer in kritischen Situationen unterstützen, indem die Lichtausbeute der Scheinwerfer erhöht oder Handlungsempfehlungen dargestellt werden.

Mit Hinblick auf den zukünftigen Einsatz hochauflösender Scheinwerfer werden in Kapitel 3 Lichtfunktionen spezifiziert und in dieser Arbeit entwickelt werden. Anhand eines blendfreien Fernlichts wird das Potential zur Erhöhung des Wirkungsgrads untersucht, indem die Sicherheitsbereiche einer Dunkellücke durch eine adaptive Ansteuerung reduziert werden. Dies bedingt, dass die Latenzzeit der Ansteuerung durch die Vorausschau des Situationsbewusstseins kompensiert werden kann.

In einem weiteren Schritt werden kritische Verkehrssituationen identifiziert, in denen die Unterstützung des Fahrers durch LBAS als sinnvoll erachtet wird. Aufgrund des nächtlich erhöhten Kollisionspotenzials

werden Abbiegemanöver an Kreuzungen oder Spurwechsel auf Landstraßen und Autobahnen ausgewählt. Für diese Vorgänge werden Lichtfunktionen spezifiziert, die dem Fahrer die Durchführung des Manövers empfehlen oder im Fall einer möglichen Kollision warnen. Ausgehend von der Spezifikation der Lichtfunktionen ergeben sich Anforderungen an das Gesamtsystem. Diese beinhalten zeitliche oder räumliche Genauigkeitsanforderungen für das Erkennen von Abbiegevorgängen und Spurwechseln. Weiterhin ist die Voraussage der zukünftigen Positionen des Egofahrzeugs und anderer Verkehrsteilnehmer von Interesse.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Interpretation der Verkehrsszenarien, also die Erkennung von Abbiegevorgängen oder Spurwechseln von Verkehrsteilnehmern, als Manöverdetektion bezeichnet. Die Manöverdetektion wird in Kapitel 4 anhand zweier Ansätze realisiert, dem Bayes'schen Netz und der Fuzzylogik. Die Auswertung erfolgt unter der Nutzung von Simulationsdaten und realen Fahrzeugdaten sowie im Rahmen einer Expertenstudie für die Spurwechselerkennung. Grundlegend erfüllen beide Vorgehensweisen die spezifizierten Klassifikationsraten sowie die zeitlichen oder räumlichen Anforderungen bei einer Anwendung für das Egofahrzeug. Die Leistungsfähigkeit bei der Erkennung von Manövern anderer Verkehrsteilnehmer erreicht die geforderten Grenzen nicht, allerdings ist dies den Messfehlern der Fahrzeugsensorik zuzuschreiben.

Die Trajektorienprädiktion bildet die Fähigkeit ab, die innerhalb der Verarbeitungskette des Situationsbewusstseins als Vorausschau bezeichnet wird. Für die Prädiktion wird ein Kalman Filter mit einem entsprechenden Bewegungsmodell verwendet. Die Auswertung mittels realer Fahrdaten, die mit einem Versuchsfahrzeug aufgenommen wurden, zeigt eine ausreichende Genauigkeit innerhalb des Prädiktionszeitraums. Ein Vergleich der einzelnen Bewegungsmodelle zeigt keine erheblichen Unterschiede hinsichtlich der Trajektorienprädiktion.

Auch die Hinzunahme von Informationen über die Straßengeometrie mithilfe einer digitalen Karte bringt in diesem Zusammenhang keine Verbesserung.

Aufbauend auf der Vorverarbeitung durch die Manöverdetektion und die Trajektorienprädiktion werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit die spezifizierten Lichtfunktionen entwickelt. Das blendfreie Fernlicht mit adaptiven Sicherheitsbereichen wird anhand der Aufblendzeiten des Fernlichts und einer Gegenüberstellung mit einer konventionellen Ansteuerung verglichen. Dabei zeigt sich eine Erhöhung des Wirkungsgrads um bis zu 20%. Des Weiteren werden die situationsadaptiven Lichtassistentzfunktionen anhand einer Probandenstudie bewertet, die den Fahrer vor der Durchführung eines Manövers anhand der Projektion einer Handlungsempfehlung unterstützen sollen. Innerhalb der Probandenstudie wird die Anwendung einer empfehlenden oder warnenden Lichtfunktion vor einem Spurwechsel mittels eines adaptiven Scheinwerfersystems verifiziert. Beide Lichtfunktionen zeigen eine Signifikanz hinsichtlich des Blickverhaltens des Probanden, sowohl die Anzahl der Blickfixationen als auch deren Dauer werden positiv beeinflusst. Einen geringeren Effekt erzielen die getesteten Lichtfunktionen hinsichtlich des Fahrverhaltens, lediglich der Startzeitpunkt eines Spurwechsels oder die Maximalgeschwindigkeit bei einem Abbruch des Manövers erzielen eine Signifikanz.

In zukünftigen Untersuchungen, die auf den Ergebnissen dieser Arbeit aufbauen, werden die Bereiche der Fahrzeugsensoren, der Scheinwerfer und der Ansteuerung weiterführend betrachtet.

Das Gesamtsystem kann seitens der Fahrzeugwahrnehmung durch die Weiterentwicklung von bestehenden Sensoren und den Einsatz neuartiger Technologien verbessert werden. Vor allem die Anwendung der Manöverdetektion und der Trajektorienprädiktion auf andere Verkehrsteilnehmer profitiert von einer höheren Genauigkeit und einem erweiterten Gehalt der Umfeldinformationen. Die Erkennung

des Gierwinkels oder des Fahrtrichtungsanzeigers eines vorausfahrenden Verkehrsteilnehmer könnte beispielsweise genutzt werden, um die Erkennung eines bevorstehenden Abbiegemanövers oder eines Spurwechsels verlässlicher zu erkennen. Eine erhöhte Genauigkeit von Beschleunigungswerten kann die Trajektorienprädiktion anreichern, um die Sicherheitsbereiche eines blendfreien Fernlichts weiter zu verringern. Ein großes Potential bietet der Informationsaustausch zwischen Verkehrsteilnehmern, der in Kapitel 2 beschrieben ist, da die Daten eine hohe Genauigkeit bieten. Des Weiteren erlaubt die Übertragung von Informationen über das Funknetz eine erhöhte Reichweite ohne die Notwendigkeit einer direkten Sichtverbindung. Dadurch kann ein entgegenkommendes Fahrzeug frühzeitig erkannt und die Projektion einer Handlungsempfehlung zum Fahrspurwechsel nicht auf Fahrbahnen mit baulicher Trennung beschränkt werden. Allerdings erfordert dies einen flächendeckenden Einsatz der Technologie, der noch einige Zeit in Anspruch nehmen wird. Trotzdem werden die in dieser Arbeit angewendeten Ansätze in naher Zukunft mit prototypischen Sensoren validiert, um den Einfluss auf die Leistungsfähigkeit einordnen zu können.

Für eine weitergehende Untersuchung der vorgestellten Lichtfunktionen ist der Einsatz von hochauflösenden Scheinwerfersystemen notwendig. Dies ist vor allem für eine Beurteilung der situationsadaptiven Lichtfunktionen sinnvoll, da durch diese Scheinwerfersysteme eine intuitive Darstellung der Handlungsempfehlungen für den Fahrer realisiert werden kann. Des Weiteren ist ein Vergleich der konventionellen und der adaptiven Ansteuerung der Sicherheitsbereiche für das blendfreie Fernlicht mittels hochauflösender Scheinwerfer notwendig. Dabei liegt der Schwerpunkt auf Untersuchungen, die es erlauben, die Blendung der prädiktiven Ansteuerung zu bewerten.

Den wichtigsten Bestandteil zukünftiger Untersuchungen bilden die Bereiche der Manöverdetektion und der Trajektorienprädiktion. Die in

dieser Arbeit vorgestellten Ansätze zur Erkennung von Abbiege- oder Spurwechselvorgängen berücksichtigen jeweils nur die Informationen des letzten Messzeitpunkts. Deshalb wird die Manöverdetektion künftig erweitert, um die Vergangenheit der Fahrzeugbewegung einzubeziehen. Ein gängiges Verfahren zur Verarbeitung sequentieller Daten bilden dabei Dynamische Bayes'sche Netze, welche die gesamte Historie an Messdaten zur Mustererkennung heranziehen. In der Praxis ist die Nutzung von Hidden Markov Models üblich, die eine Vereinfachung von Dynamischen Bayes'schen Netzen darstellen und die Anzahl an Messzeitpunkten auf eine bestimmte Anzahl beschränken. [108] Dadurch können sequentielle Bewegungsmuster erkannt werden, die eine leistungsfähigere Detektionsrate versprechen. Diese Vorgehensweise wurde erfolgreich durch *Berndt et al.* für die Erkennung von Abbiegemanövern oder durch *Firl et al.*, *Meyer-Delius et al.* und *Oliver und Pentland* in Bezug auf Spurwechsel angewendet. [17][41][94][101] Für weitere Betrachtungen der Trajektorienprädiktion werden zukünftig Interacting Multiple Models eingesetzt. Dabei werden dem System verschiedene Bewegungsmodellen zur Verfügung gestellt und situationsabhängig anhand der Kovarianz das optimale Modell ausgewählt. Die Anwendung von Interacting Multiple Models wurde in Untersuchungen von *Bar-Shalom und Blair* oder *Huang und Leung* für ähnliche Problemstellungen genutzt. [8][62] Des Weiteren werden Ansätze zur Langzeittrajektorienprädiktion integriert, die über einen Abgleich der aktuellen Fahrzeugbewegung mit bereits erfassten Trajektorien in einer Datenbank eine situationsabhängige Voraussage treffen. Diese Vorgehensweise wurde durch *Omerbegovic und Firl* oder *Käfer et al.* für die Prädiktion von Spurwechsel- und Abbiegetrajektorien beschrieben. [40][70][102][103]

A ZUGEHÖRIGKEITSFUNKTIONEN FÜR FUZZYLOGIK

In diesem Abschnitt werden die Fuzzy-Mengen, die im Rahmen der Manöverdetektion für das Fuzzysystem genutzt wurden, dargestellt. Diese sind nach Verkehrssituation und dem entsprechenden Indikator wie im Folgenden beschrieben aufgeteilt:

- Manöverdetektion an Kreuzungen
 - Indikator Relative Bewegung
 - Indikator Fahrer
 - Gesamt

- Manöverdetektion bei Spurwechseln
 - Indikator Relative Bewegung
 - Indikator Fahrer
 - Gesamt

A.1. MANÖVERDETEKTION AN KREUZUNGEN

INDIKATOR RELATIVE BEWEGUNG

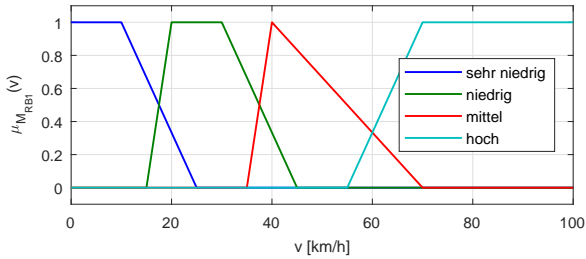


Abbildung A.1.: Fuzzy-Menge der Geschwindigkeit v

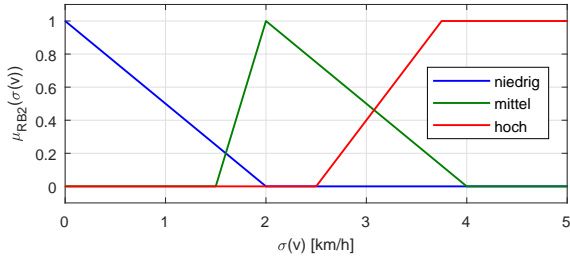


Abbildung A.2.: Fuzzy-Menge der Standardabweichung der Geschwindigkeit $\sigma(v)$

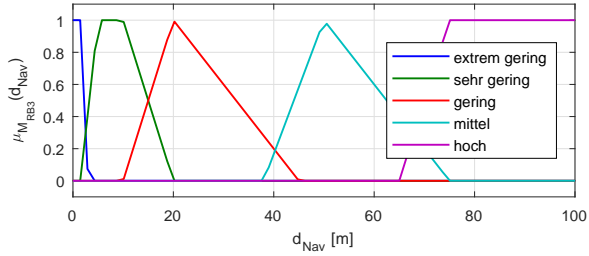


Abbildung A.3.: Fuzzy-Menge der Abzweigungsdistanz d_{Nav}

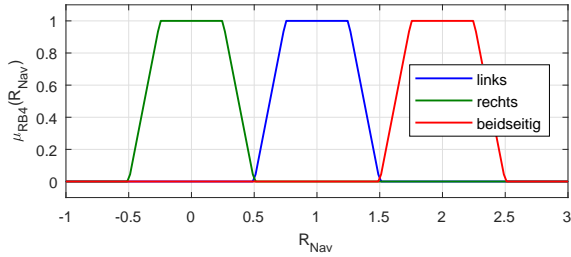


Abbildung A.4.: Fuzzy-Menge der Abzweigerichtung R_{Nav}

INDIKATOR FAHRER

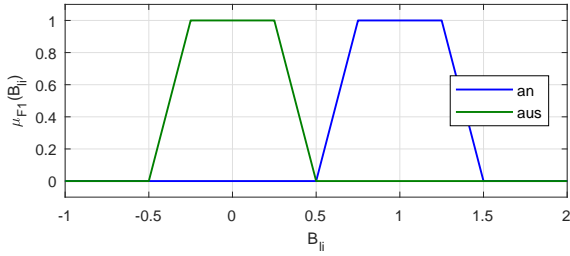


Abbildung A.5.: Fuzzy-Menge des linken Fahrtrichtungsanzeigers B_{li}

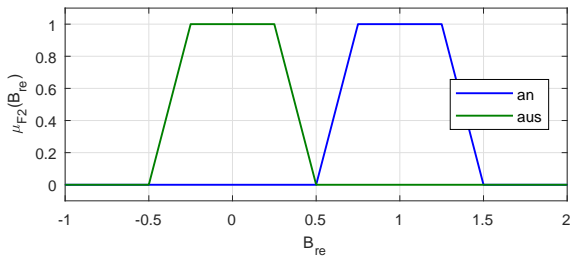


Abbildung A.6.: Fuzzy-Menge des rechten Fahrtrichtungsanzeigers B_{re}

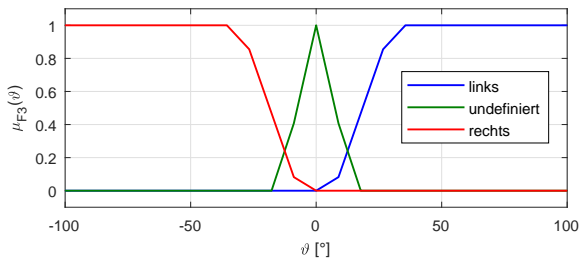


Abbildung A.7.: Fuzzy-Menge des Lenkwinkels ϑ

GESAMT

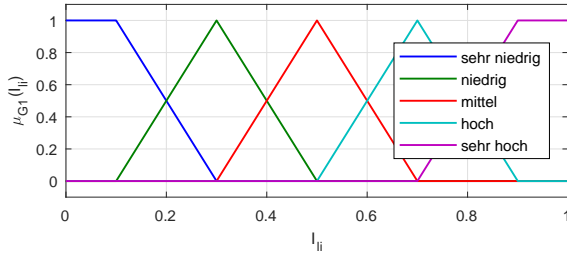


Abbildung A.8.: Fuzzy-Menge einer linken Abbiegeintention I_{li}

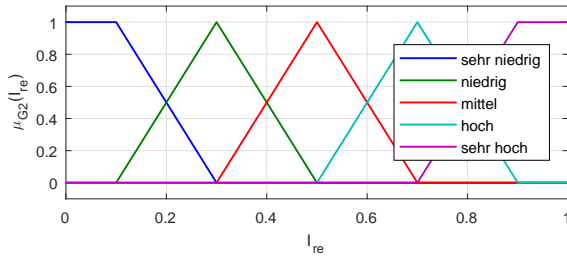


Abbildung A.9.: Fuzzy-Menge einer rechten Abbiegeintention I_{re}

A.2. MANÖVERDETEKTION BEI SPURWECHSELN

INDIKATOR RELATIVE BEWEGUNG

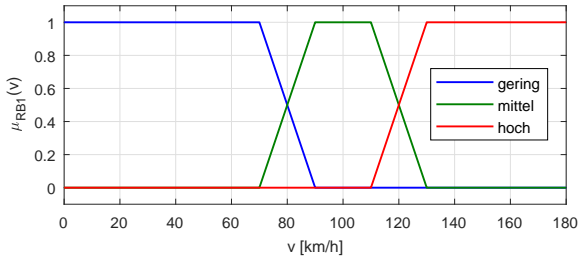


Abbildung A.10.: Fuzzy-Menge der Geschwindigkeit v

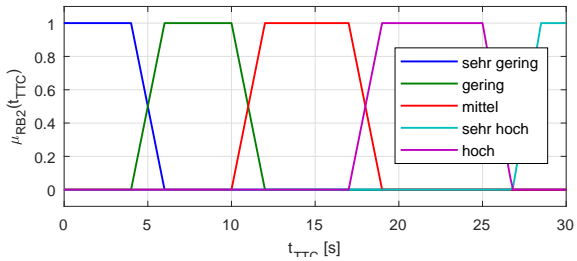


Abbildung A.11.: Fuzzy-Menge der Time to Collision t_{TTC}

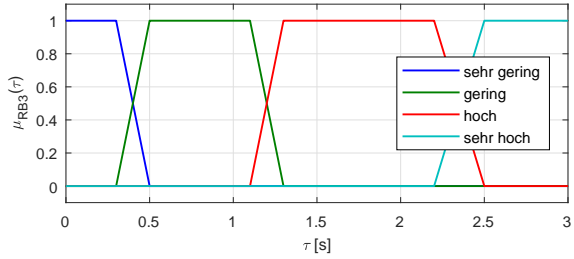


Abbildung A.12.: Fuzzy-Menge der Zeitlücke τ

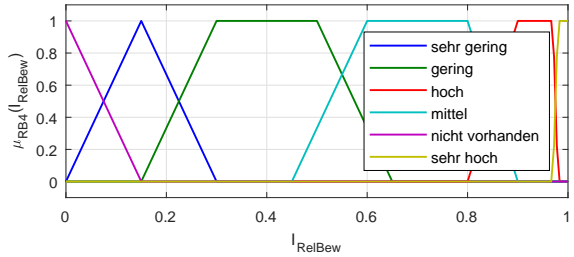


Abbildung A.13.: Fuzzy-Menge des Indikators Relative Bewegung I_{RelBew}

INDIKATOR FAHRER

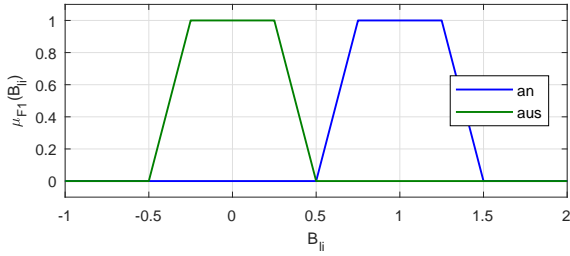


Abbildung A.14.: Fuzzy-Menge des linken Fahrtrichtungsanzeigers B_{li}

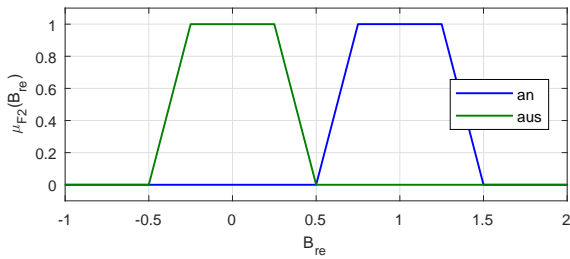


Abbildung A.15.: Fuzzy-Menge des rechten Fahrtrichtungsanzeigers B_{re}

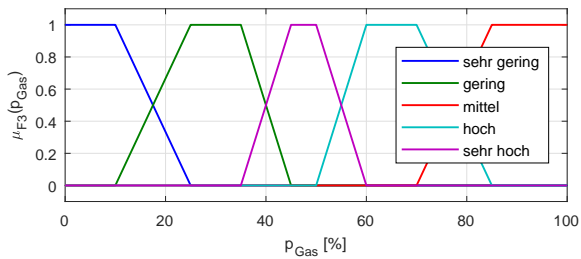


Abbildung A.16.: Fuzzy-Menge der Gaspedalstellung p_{Gas}

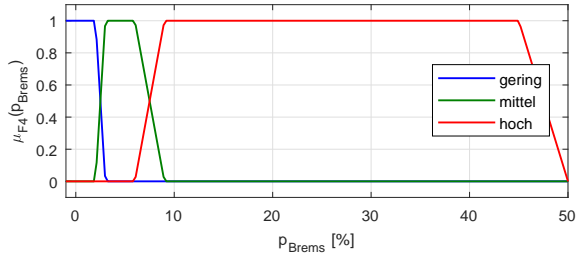


Abbildung A.17.: Fuzzy-Menge der Bremspedalstellung p_{Brems}

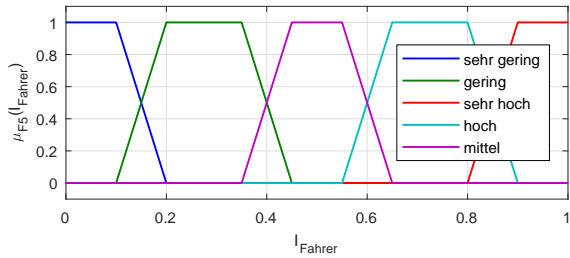


Abbildung A.18.: Fuzzy-Menge des Indikators Fahrer I_{Fahrer}

GESAMT

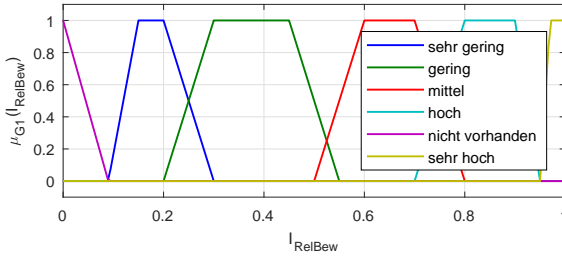


Abbildung A.19.: Fuzzy-Menge des Indikators Relative Bewegung I_{RelBew}

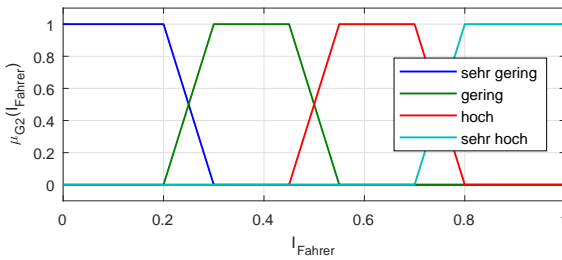


Abbildung A.20.: Fuzzy-Menge des Indikators Fahrer I_{Fahrer}

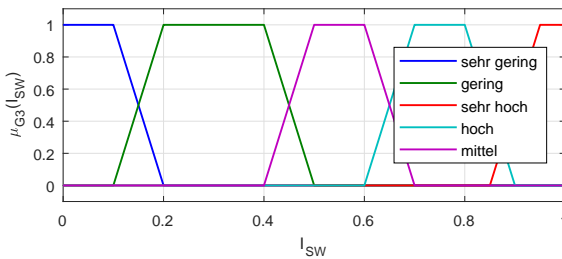


Abbildung A.21.: Fuzzy-Menge einer Spurwechselintention I_{SW}

B LICHTVERTEILUNGEN DES VERSUCHSSCHEINWERFERS

Die Lichtverteilungen des Versuchsscheinwerfers, der für die experimentellen Untersuchungen in Kapitel 5 genutzt wurde, sind in diesem Abschnitt detailliert. Dies umfasst die Darstellung der einzelnen Module des linken Scheinwerfers für Abblendlicht, Abbiegelicht und Fernlicht.

Das Abblendlicht besteht aus vier Segmenten. Dabei überlagern sich die inneren Segmente, um das Vorfeld des Fahrzeugs auszuleuchten, während die äußeren Segment durch eine individuelle Ansteuerung für die Schwerpunktverschiebung eines synthetischen Kurvenlichts genutzt werden können.

Das Abbiegelicht schließt an das äußere Segment des Abblendlichts an und ist ebenfalls in vier Segmente unterteilt. Dies ermöglicht eine bedarfsgerechte Ansteuerung des statischen Kurvenlichts oder eine gezielte Ausleuchtung einer Kreuzung.

Ein Modul des Fernlichts besteht aus einer Lichtverteilung, die in vier Zeilen und vier Spalten unterteilt ist. Ein Segment hat eine horizontale Auflösung von 2° , in vertikaler Richtung sind die unteren Segmente mit einer Auflösung von 1° höher aufgelöst. Das gesamte Fernlicht eines Scheinwerfers wird durch vier dieser Module realisiert. Dabei sind die inneren Module mit einer Abweichung von 1° überlagert, um die Auflösung im zentralen Bereich der Lichtverteilung zu erhöhen.

ABBLENDLICHT

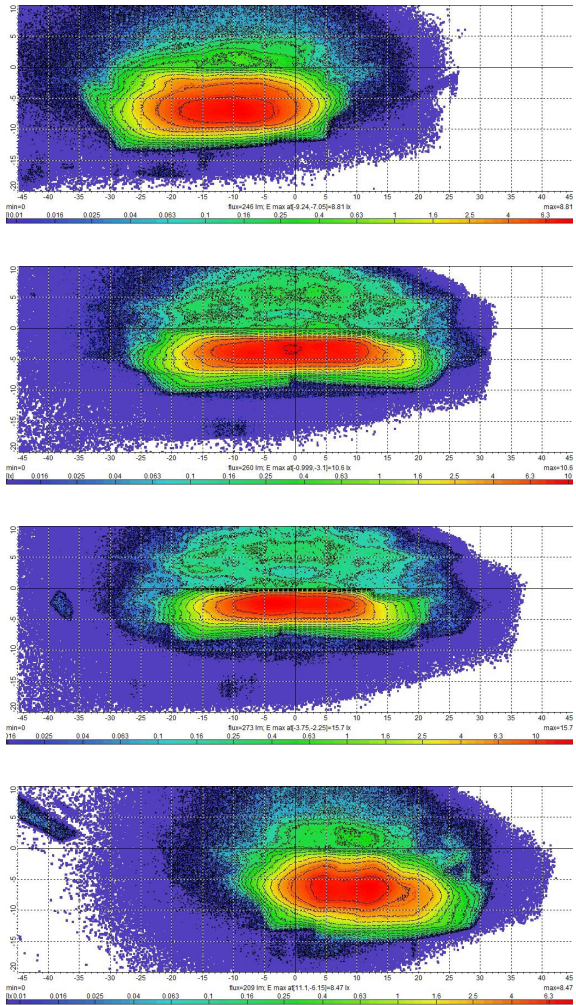


Abbildung B.1.: Abblendlichtverteilung des linken Scheinwerfers

ABBIEGELICHT

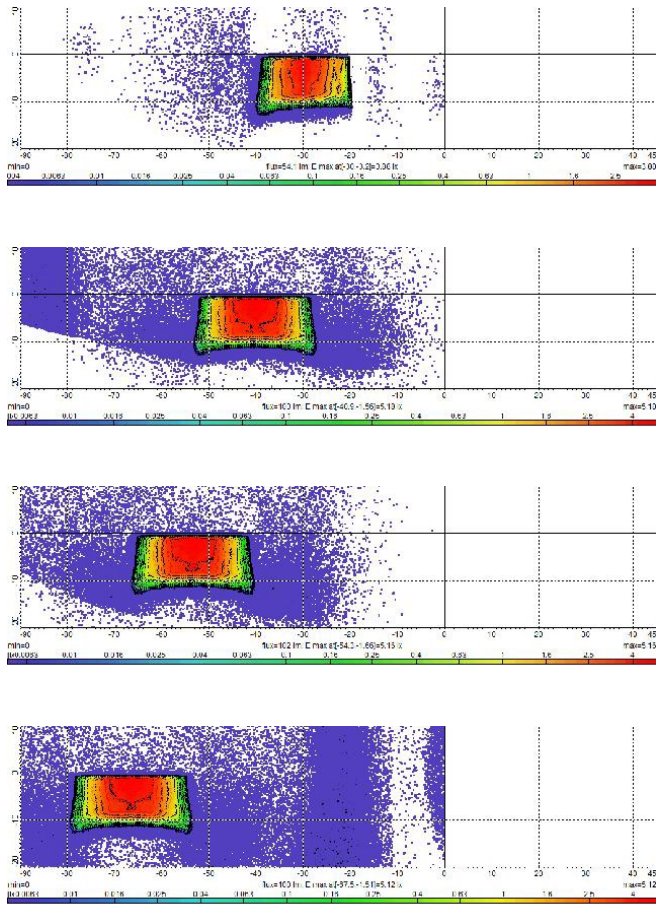


Abbildung B.2.: Abbiegelichtverteilung des linken Scheinwerfers

FERNLICHT

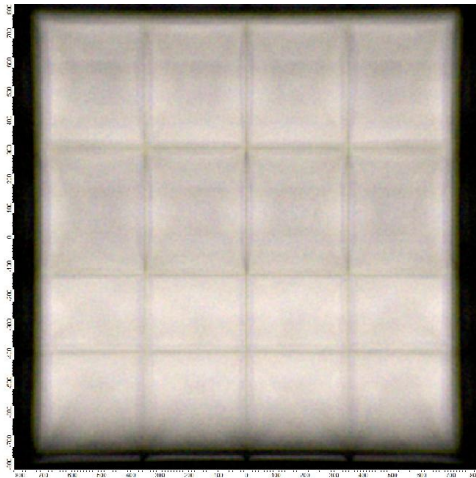
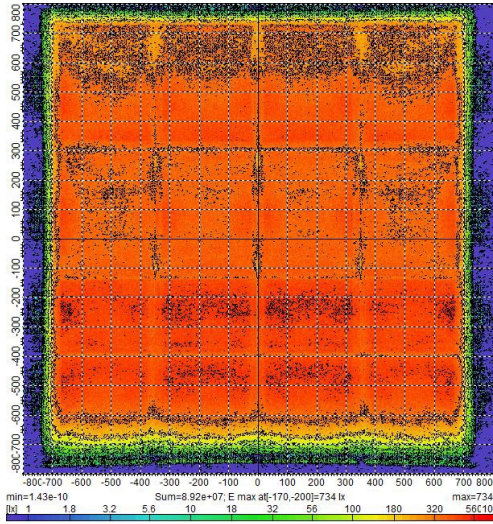


Abbildung B.3.: Lichtverteilung eines Fernlichtmoduls

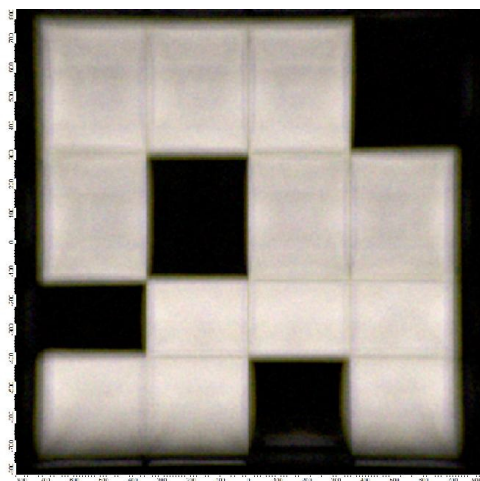
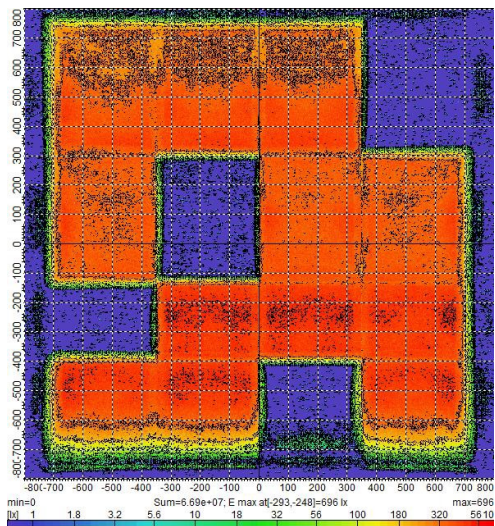


Abbildung B.4.: Lichtverteilung eines Fernlichtmoduls mit ausgeschalteten Segmenten

C FRAGEBÖGEN DER PROBANDENSTUDIE

Im Folgenden werden die Fragebögen, die die Versuchspersonen im Rahmen der Probandenstudie aus Kapitel 5 vor, während und nach den Fahrversuchen ausgefüllt haben, abgebildet. Für die Durchführung und Auswertung der Probandenstudie wurden die folgenden vier Fragebögen genutzt:

- Demographie und Instruktionen
- Baseline
- Innovative Lichtfunktionen
- Abschlussbefragung

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Demographie und Instruktionen



Datum: _____	Int.-Kürzel: _____	Abholung: _____
Probanden-ID: _____	Empfang-Kürzel: _____	Fahrer V: _____
Matrix-Zelle: _____	Audi-Kürzel: _____	Fahrer H: _____
	Uhrzeit: _____	

A. Begrüßung am Tor

„Guten Tag, mein Name ist ..., wir werden heute gemeinsam einen Fahrversuch zum Thema „Lichtfunktionen“ durchführen. Nochmals vielen Dank, dass Sie für eine Teilnahme bereit erklärt haben.

Bevor es mit dem Fahrzeug auf die Teststrecke geht, gehen wir zunächst in unseren Empfangsraum. Dort bekommen Sie einen Fragebogen zu Ihrer Person sowie eine kurze Einweisung bzgl. des Versuchsfahrzeugs und der Teststrecke (*Karte von Strecke zeigen*). Anschließend übergebe ich Sie an meine Kollegin, die Sie bei den Testfahrten auf der Strecke begleiten wird.

Die gesamte Versuchszeit dauert maximal 90 Minuten.“

B. Empfangsraum

- Empfangsraum zeigen, anwesende Personen vorstellen
- Getränke anbieten
- Abgleich mit Probandenliste, Führerschein zeigen lassen
- anonymisierte Auswertung
- Erklären und Ausfüllen der Einverständnis- und Geheimhaltungserklärung

AUDI Probandenstudie
Innovative Lichtfunktionen
Demographie und Instruktionen



C. Demographischer Fragebogen

A. IHRE PERSON

1. Geschlecht

männlich weiblich

2. Wie alt sind sie?

_____ Jahre

3. Benötigen Sie eine Sehhilfe?

ja nein k. A.

Wenn ja: Welche Art von Sehhilfe benutzen Sie?

Einstärkenbrille Gleitsichtbrille Lesebrille Kontaktlinsen
 Sonstiges: _____ k. A.

Wenn ja: Tragen Sie diese gerade?

ja nein k. A.

Wenn ja: Wie oft tragen Sie diese Sehhilfe?

nie nur beim Autofahren nur beim Arbeiten am PC
 immer Sonstiges: _____ k. A.

Wenn ja: Welche Art von Sehschwäche haben Sie? (Mehrfachnennungen möglich)

Kurzsichtigkeit (rechts: ___ dpt; links: ___ dpt)
 Weitsichtigkeit (rechts: ___ dpt; links: ___ dpt)
 Hornhautverkrümmung (rechts: ___ dpt; links: ___ dpt)
 Rot/Grün-Blindheit Nachtblindheit grüner Star grauer Star
 Sonstiges: _____ k. A.

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Demographie und Instruktionen



4. Seit wie vielen Jahren sind Sie im Besitz Ihres Führerscheins?

_____ Jahre k. A.

5. Welchen Beruf üben Sie derzeit aus (Branche, Tätigkeit)?

_____ k. A.

B. IHRE FAHRGEWOHNHEITEN

6. Wie viele Kilometer fahren Sie durchschnittlich pro Jahr?

circa _____ km k. A.

7. Wie verteilt sich die Kilometerleistung pro Jahr auf die verschiedenen Straßentypen? (Bitte achten Sie drauf, dass die Summe 100% ergibt)

Stadtverkehr _____ %

Land- und Bundesstraße _____ %

Autobahn _____ %

8. Wie oft fahren Sie bei Dunkelheit?

- täglich mehrmals pro Woche ca. einmal pro Woche
 ca. einmal pro Monat weniger als einmal pro Monat nie k. A.

9. Wie gern fahren Sie bei Dunkelheit?

Bitte ankreuzen.

sehr ungern	eher ungern	weder noch	eher gern	sehr gern
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Demographie und Instruktionen



10. Wie sicher fühlen Sie sich beim Fahren in der Dunkelheit?

Bitte ankreuzen.

gar nicht sicher	eher unsicher	teils/ teils	eher sich	sehr sicher
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

11. Wie oft fühlen Sie sich bei Dunkelheit durch andere Verkehrsteilnehmer geblendet?

Bitte ankreuzen.

sehr oft	eher oft	teils/ teils	eher weniger	gar nicht
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

12. Welches Fahrzeug nutzen Sie momentan hauptsächlich (Marke, Modell, Baujahr)?

13. Beschreiben Sie bitte mit Hilfe der folgenden Adjektivpaare Ihren persönlichen Fahrstil im Vergleich zu anderen Autofahrern.

Markieren Sie die Position zwischen den Wortpaaren, die Ihrem Fahrstil am besten entspricht. Machen Sie in jeder Zeile ein Kreuz.

<i>Im Vergleich zu anderen Autofahrern fahre ich überwiegend...</i>					
schnell	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	langsam
mutig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	ängstlich
offensiv	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	defensiv
vorsichtig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	risikobereit
sportlich	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	gemütlich

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Demographie und Instruktionen



C. IHRE ERFAHRUNG MIT FAHRERASSISTENZSYSTEMEN

14. Welche Art von Frontscheinwerfer ist in Ihrem derzeitigen Fahrzeug vorhanden?

- Halogen
 Xenon
 LED
 k. A.

15. Welche Fahrerassistenzsysteme besitzt Ihr derzeitiges Fahrzeug und wie oft nutzen Sie diese?

Machen Sie bitte in jeder Zeile zwei Kreuze.

System	System vorhanden?			Falls vorhanden, wie häufig nutzen Sie dieses System?				
	ja	nein	weiß nicht	nie	selten	gelegentlich	oft	immer
Tempomat	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Abstandsregeltempomat (ACC)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Spurhalteassistent	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Spurwechsellassistent (Audi Side Assist)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Head-Up Display	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kurvenlicht	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
adaptives Fernlicht	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Markierungslicht	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sonstiges:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Demographie und Instruktionen



Bevor der Proband an die Versuchsleiterin übergeben wird, wird das Blickerfassungssystem kurz beschrieben:

„Wir werden Sie im Fahrzeug mit einem Blickerfassungssystem ausstatten, um im Nachhinein Ihre Blickbewegungen ermitteln zu können. Dies dient als Möglichkeit zur Dokumentation Ihrer Wahrnehmung und Aufmerksamkeitsausrichtung während der Versuchsfahrten.“

Bitte versuchen Sie sich von dieser Brille nicht ablenken zu lassen und fahren Sie so, wie sie es ohne auch tun würden.“

D. Übergabe der Probanden an die Versuchsleiterin

„Guten Tag, mein Name ist Tanja Kammann, ich werde Sie heute bei den Fahrversuchen auf der Teststrecke begleiten. Wir werden uns in der nächsten Stunde mit verschiedenen lichtbasierten Fahrerassistenzsystemen beschäftigen. Dazu gehen wir nun direkt auf die Strecke und ich erkläre Ihnen alles Weitere direkt im Versuchsfahrzeug.“

E. Instruktionen vor der Fahrt im Fahrzeug

„Das Auto, mit dem Sie die Versuchsfahrten durchführen, ist ein Audi A7 mit einem Automatikgetriebe. Sie regeln dabei Ihre Geschwindigkeit manuell. Stellen Sie bitte zuerst den Sitz so ein, dass Sie problemlos das Gaspedal, die Bremse sowie das Lenkrad erreichen.“

Ich werde Ihnen zunächst beide Lichtfunktionen sowie den Audi Side Assist im Stand zeigen. Dabei handelt es sich zum einen um visuelle Veränderungen im direkten Scheinwerferlicht, welche Sie bei der Ausführung eines geplanten Spurwechsels unterstützen sollen und zum anderen um ein Aufleuchten im linken Seitenspiegel, was vor einem kritischen Spurwechsel warnen soll.

Funktion 1: Hier sehen Sie einen Lichtstrahl links neben dem vorausfahrenden Fahrzeug, welcher mit Hilfe eines sog. Theatereffekts an eine wischende Bewegung des Lichts nach außen gekoppelt wird. Der Bereich rechts neben dem vorausfahrenden Fahrzeug wird gleichzeitig etwas gedimmt. Diese Lichtfunktion signalisiert Ihnen, dass sich kein Fahrzeug hinter Ihnen auf der linken Spur befindet, welches Sie an einem Ausscheren hindern könnte und somit ein Überholvorgang möglich ist.

Funktion 2: Bei dieser Funktion sehen Sie, dass Ihr Licht auf der linken Fahrbahn mit Hilfe eines Theatereffekts gedimmt wird. Dies signalisiert Ihnen, dass sich ein anderes Fahrzeug in einem für Sie kritischen Abstand auf der linken Spur nähert, sodass ein Überholvorgang als nicht sicher eingestuft werden kann.

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Demographie und Instruktionen



Audi Side Assist: Bei dieser Spurwechselunterstützung handelt es sich um ein orange aufleuchtendes Signal im linken Außenspiegel. Dieses signalisiert Ihnen, dass sich ein Fahrzeug hinter Ihnen auf der linken Spur (bzw. im Toten Winkel) befindet, sodass ein Überholvorgang ebenfalls als nicht sicher eingestuft werden kann.

Bitte vergessen Sie während der gesamten Fahrt nie, dass Sie der verantwortliche Fahrer sind und alle Entscheidungen selbst zu treffen haben. Sollten sie daher bestimmte Aufgaben oder Fahrmanöver als zu gefährlich einschätzen, äußern Sie bitte Ihre Bedenken, dann besteht zu jeder Zeit die Möglichkeit die Fahrt abbrechen.

Autofahren ist zu jeder Zeit mit einem entsprechenden Risiko verbunden – auch auf dieser Teststrecke. Sie sind jedoch keiner größeren Gefahr ausgesetzt, als bei einer normalen Autofahrt. Ihre persönliche Sicherheit steht während des gesamten Versuchs an erster Stelle.

Beide Lichtfunktionen erscheinen nur, wenn Ihr Fahrzeug eine Überholabsicht erkennt. Halten Sie sich daher bitte unbedingt an meine Instruktionen. Seien Sie sich bewusst, dass das sichere Führen des Fahrzeugs oberste Priorität hat und entsprechende Reaktionen auf die Lichtfunktionen nur durchgeführt werden, wenn Sie eine Verletzung der Verkehrssicherheit ausschließen können.

Der Fahrversuch setzt sich aus 5 einzelnen Blöcken und einer Eingewöhnungsfahrt zusammen. Der erste Block entspricht dabei einer Fahrt von 4 Runden, in welcher Sie ohne die Unterstützung durch ein Assistenzsystem Überholvorgänge tätigen. Die 3 darauf folgenden Blöcke bestehen jeweils aus 4 Runden, in denen die bereits beschriebenen Systeme zur Spurwechselunterstützung getestet werden. Der letzte Block entspricht erneut 4 zusammenhängenden Runden, welche ohne Assistenzsystem gefahren werden. In jeder Runde sollen Sie Ihr Vorderfahrzeug auf einer Geraden überholen, sollte es die aktuelle Verkehrssituation zulassen. Unterstützt werden Sie dabei durch die vorher beschriebenen Systeme. Nach jedem Block halten wir in der Haltebucht am Kopf der Strecke und Sie bekommen mehrere Fragebögen, welche Sie bitte in Bezug auf die gerade gesehene Assistenzfunktion ausfüllen.

Bitte beachten Sie, dass immer ein Fahrzeug vor Ihnen und eines hinter Ihnen fährt. Halten Sie zu Ihrem Vorderfahrzeug möglichst einen konstanten Sicherheitsabstand von etwa 30 m (ausgenommen der Überholvorgang). Abschätzen können Sie diesen anhand der gefahrenen Proberunde sowie meinen Anweisungen.

Da die Kurven sehr eng sind, fahren Sie dort bitte nicht schneller als 30 km/h. Auf der ersten Geraden folgen Sie bitte Ihrem Vorderfahrzeug mit 60 km/h und bremsen in der Kurve erneut auf 30 km/h ab. Auf der zweiten Geraden beschleunigen Sie bitte und überholen Ihr Vorderfahrzeug, sollte es die Verkehrssituation zulassen. Beachten Sie daher

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Demographie und Instruktionen



bitte zu jedem Zeitpunkt dem umliegenden Verkehr. Die Lichtfunktionen und der Audi Side Assist werden Sie dabei unterstützen. Ob Sie überholen, oder sich dagegen entscheiden, liegt dennoch weiterhin in Ihrem eigenen Ermessen. Insgesamt werden Sie 20 Runden fahren, welche etwa 50 min dauern werden.

Sollte Ihnen zu irgendeinem Zeitpunkt übel werden, sagen Sie mir bitte rechtzeitig Bescheid, dann machen wir eine Pause und entscheiden, ob wir den Versuch weiterführen können.

Falls Sie Fragen zum Fahrzeug oder zur Versuchsfahrt haben, besteht zu jeder Zeit die Möglichkeit diese an mich zu stellen, da ich die gesamte Fahrt über neben Ihnen sitzen werde.

Wichtig ist, dass Sie sich ganz natürlich verhalten (wie in Ihrem eigenen Fahrzeug auch) und sich bewusst sind, dass Sie während der gesamten Fahrt Ihre Umgebung im Auge behalten und kein zu großes Risiko eingehen.

Wir starten nun die Probefahrt. In der ersten Runde werden Sie ausschließlich beschleunigen, bremsen und den ein oder anderen Spurwechsel durchführen, damit Sie sich an das Fahrzeug und dessen Verhalten gewöhnen können. In der zweiten Runde folgen Sie zunächst Ihrem Vorderfahrzeug in einem Abstand von 30 m und überholen es auf der zweiten Geraden, um sich auch an diesen Vorgang gewöhnen zu können. Bitte denken Sie daran, bei einem Überholvorgang wie gewohnt den Blinker zu betätigen und beschleunigen Sie bei diesem Vorgang nicht höher als auf 100 km/h.

Sie können bei unserem Versuch nichts falsch machen, daher verhalten Sie sich bitte möglichst natürlich. Haben Sie bis hier hin Fragen?"

(Probefahrt)

F. Versuchsstart

„Nun starten wir den ersten Block von 4 Runden, in dem Sie ohne eine unterstützende Assistenzfunktion fahren. Folgen Sie bitte auf der ersten Geraden mit 60 km/h Ihrem Vorderfahrzeug, dann bremsen Sie vor der Kurve auf 30 km/h ab und beschleunigen auf der zweiten Geraden, um Ihr Vorderfahrzeug zu überholen. Denken Sie zu jeder Zeit daran, dass Ihre Sicherheit am wichtigsten ist und überholen Sie nur dann, wenn es die aktuelle Verkehrssituation zulässt.

Nach den 6 Runden halten wir wieder dort, wo wir gestartet sind, und Sie bekommen den ersten Fragebogen.“

(Block 1 – in randomisierter Reihenfolge)

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Demographie und Instruktionen



„In den folgenden 4 Runden werden Sie durch eines der Assistenzsysteme unterstützt, welches ich Ihnen im Voraus gezeigt habe. Bitte folgen Sie auf der ersten Geraden erneut Ihrem Vorderfahrzeug mit 60 km/h, bremsen dann vor der Kurve auf 30 km/h ab und beschleunigen, sobald Sie auf der zweiten Geraden sind, um Ihr Vorderfahrzeug zu überholen. Denken Sie wieder zu jeder Zeit daran, dass Ihre Sicherheit am wichtigsten ist und Sie nur dann überholen, wenn es die aktuelle Verkehrssituation zulässt.

Nach den 3 Runden halten wir wieder dort, wo wir gestartet sind, und Sie bekommen die nächsten Fragebögen.“

(Block 2, Block 3 und Block 4 – in randomisierter Reihenfolge)

„Nun starten wir den letzten Block. Sie fahren hierbei wieder 4 Runden ohne unterstützende Assistenzfunktion. Bitte folgen Sie auf der ersten Geraden erneut Ihrem Vorderfahrzeug mit 60 km/h, bremsen dann vor der Kurve auf 30 km/h ab und beschleunigen, sobald Sie auf der zweiten Geraden sind, um Ihr Vorderfahrzeug zu überholen. Denken Sie wieder zu jeder Zeit daran, dass Ihre Sicherheit am wichtigsten ist und Sie nur dann überholen, wenn es die aktuelle Verkehrssituation zulässt.

Nach diesen 4 Runden bekommen Sie hier den letzten Fragebogen und gehen anschließend mit einem Mitarbeiter des Spiegel Instituts zur Nachbefragung in den Empfangsraum.“

(Block 5 – in randomisierter Reihenfolge)

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Baseline



Datum: _____	Int.-Kürzel: _____	Abholung: _____
Probanden-ID: _____	Empfang-Kürzel: _____	Fahrer V: _____
Matrix-Zeile: _____	Audi-Kürzel: _____	Fahrer H: _____
	Uhrzeit: _____	

B. Baseline

Haben Sie während der letzten vier Runden das vorausfahrende Fahrzeug überholt oder nicht überholt?

- immer überholt
 nie überholt
 beides

Wenn überholt: Wie oft haben Sie überholt?

- einmal
 mehrmals
 immer

Wenn überholt: Welches war der häufigste Grund für Ihre Überholentscheidung?

Bitte machen Sie in jeder Zeile ein Kreuz.

Grund	Überholt?		
	ja	nein	weiß nicht
Es war kein anderes Fahrzeug dabei mich zu überholen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich sollte überholen. (Anweisung)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mich hat eine Assistenzfunktion dazu aufgefordert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich fahre eher offensiv.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die linke Spur war frei.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sonstiges:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Baseline



Wenn nicht überholt: **Welches war der häufigste Grund für Sie, nicht zu überholen?**

Bitte machen Sie in jeder Zeile ein Kreuz.

Grund	Überholt?		
	ja	nein	weiß nicht
Ein anderes Fahrzeug war dabei mich zu überholen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich habe mich nicht getraut.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Assistenzfunktion hat mich verwirrt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich fahre eher defensiv.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Assistenzfunktion hat mich vor rückwärtigem Verkehr gewarnt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sonstiges:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Wahrnehmung der Assistenzfunktion



Datum: _____	Int.-Kürzel: _____	Abholung: _____
Probanden-ID: _____	Empfang-Kürzel: _____	Fahrer V: _____
Matrix-Zeile: _____	Audi-Kürzel: _____	Fahrer H: _____
	Uhrzeit: _____	

1. Welche Elemente haben Sie gerade bei den gefahrenen drei Runden wahrgenommen?

Bitte machen Sie in jeder Zeile ein Kreuz.

Element	Wahrgenommen?		
	ja	nein	weiß nicht
voraus fahrendes Fahrzeug	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
hinterher fahrendes Fahrzeug	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lichtfunktion	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
aktiver Audi Side Assist	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sonstiges:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Wahrnehmung der Assistenzfunktion



2. Sollte Ihnen eine Lichtfunktion aufgefallen sein, welche konkreten Veränderungen im Scheinwerferlicht konnten Sie erkennen?

Nur ausfüllen, wenn Lichtfunktion aktiv – ansonsten weiter zu Frage 3.

Bitte machen Sie in jeder Zeile ein Kreuz.

Veränderung	Aufgefallen?		
	ja	nein	weiß nicht
Theatereffekt (nach rechts laufend)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Theatereffekt (nach links laufend)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Lichtstrahl links neben voraus fahrendem Fahrzeug	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Abdimmen des linken Bereichs neben voraus fahrendem Fahrzeug	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Wischbewegung im linken unteren Sichtfeld (nach links laufend)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Abdimmen rechts neben voraus fahrendem Fahrzeug	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Aufleuchten des Abbiegelichts	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sonstiges:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

3. Sollte Ihnen der Audi Side Assist aufgefallen sein, inwiefern hat sich dieser zu erkennen gegeben?

Nur ausfüllen, wenn Audi Side Assist aktiv - Bitte machen Sie in jeder Zeile ein Kreuz.

Signal	Aufgefallen?		
	ja	nein	weiß nicht
Aufleuchten des Fernlichts	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Warnsignal im Kombidisplay	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Aufleuchten im Seitenspiegel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Blinken im Seitenspiegel	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sonstiges:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Wahrnehmung der Assistenzfunktion



4. Haben Sie während der letzten Runden das vorausfahrende Fahrzeug überholt?

- ja nein

Wenn ja: Wie oft haben Sie überholt?

- gar nicht einmal mehrmals immer

Wenn ja: Welches war der häufigste Grund für Ihre Überholentscheidung?

Bitte machen Sie in jeder Zeile ein Kreuz.

Grund	Überholt?		
	ja	nein	weiß nicht
Es war kein anderes Fahrzeug dabei mich zu überholen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich sollte überholen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mich hat eine Assistenzfunktion dazu aufgefordert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich fahre eher offensiv.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die linke Spur war frei.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sonstiges:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Wahrnehmung der Assistenzfunktion



Wenn nein: Welches war der häufigste Grund für Sie, nicht zu überholen?

Bitte machen Sie in jeder Zeile ein Kreuz.

Grund	Überholt?		
	ja	nein	weiß nicht
Ein anderes Fahrzeug war dabei mich zu überholen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich habe mich nicht getraut.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Assistenzfunktion hat mich verwirrt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ich fahre eher defensiv.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Die Assistenzfunktion hat mich vor rückwärtigem Verkehr gewarnt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sonstiges:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

5. Haben Sie sich bei Ihrem Verhalten durch die Assistenzfunktion unterstützt gefühlt?

Bitte machen Sie in jeder Zeile ein Kreuz.

Die Assistenzfunktion hat ...	ja	nein	weiß nicht
... mir die Entscheidung zum Überholen abgenommen.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
... mich beim Überholen behindert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
... mich beim Überholen unterstützt.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
... mich nicht interessiert.	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sonstiges:	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Abschlussbefragung



Datum: _____	Int.-Kürzel: _____	Abholung: _____
Probanden-ID: _____	Empfang-Kürzel: _____	Fahrer V: _____
Matrix-Zeile: _____	Audi-Kürzel: _____	Fahrer H: _____
	Uhrzeit: _____	

E. Abschlussbefragung

1. Was fanden Sie bzgl. der Lichtfunktionen besonders positiv?

2. Was fanden Sie bzgl. der Lichtfunktionen besonders negativ?

3. Hatten Sie zu einem bestimmten Zeitpunkt irgendwelche Schwierigkeiten?

Wenn ja, welche?

4. Haben Sie konkrete Verbesserungsvorschläge?

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Abschlussbefragung



5. Wie empfanden Sie den Audi Side Assist während der Überholabsicht?

<i>Den Audi Side Assist empfand ich als...</i>						
gut	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	schlecht
nutzlos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	nützlich
angenehm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	unangenehm
unwichtig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	wichtig
nachteilig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	vorteilhaft

6. Wie empfanden Sie die empfehlende Lichtfunktion während der Überholabsicht?

<i>Die empfehlende Lichtfunktion empfand ich als...</i>						
gut	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	schlecht
nutzlos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	nützlich
angenehm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	unangenehm
unwichtig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	wichtig
nachteilig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	vorteilhaft

7. Wie empfanden Sie die warnende Lichtfunktion während der Überholabsicht?

<i>Die warnende Lichtfunktion empfand ich als...</i>						
gut	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	schlecht
nutzlos	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	nützlich
angenehm	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	unangenehm
unwichtig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	wichtig
nachteilig	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	vorteilhaft

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Abschlussbefragung



8. Wenn Sie sich vorstellen, Sie konfigurieren gerade Ihr zukünftiges Auto – würden Sie den Audi Side Assist kaufen?

- ja nein unentschlossen

Wenn ja: Wie viel würden Sie für den Audi Side Assist ausgeben?

bis _____ €

9. Wenn Sie sich vorstellen, Sie konfigurieren gerade Ihr zukünftiges Auto – würden Sie die empfehlende Lichtfunktion kaufen?

- ja nein unentschlossen

Wenn ja: Wie viel würden Sie für die empfehlende Lichtfunktion ausgeben?

bis _____ €

10. Wenn Sie sich vorstellen, Sie konfigurieren gerade Ihr zukünftiges Auto – würden Sie die warnende Lichtfunktion kaufen?

- ja nein unentschlossen

Wenn ja: Wie viel würden Sie für die warnende Lichtfunktion ausgeben?

bis _____ €

11. Wenn Sie sich vorstellen, Sie konfigurieren gerade Ihr zukünftiges Auto – würden Sie die empfehlende und die warnende Lichtfunktion in einem Paket kaufen?

- ja nein unentschlossen

Wenn ja: Wie viel würden Sie für dieses Lichtsystem ausgeben?

bis _____ €

AUDI Probandenstudie

Innovative Lichtfunktionen

Abschlussbefragung



12. Wie wichtig ist es Ihnen, folgende Systeme in Ihrem Auto zu haben?

Bitte vergeben Sie die Plätze 1 bis 10 (Platz 1 = wichtigstes System; Platz 10 = unwichtigstes System). Vergeben Sie jeden Platz nur einmal.

System	Funktion	Platz
Tempomat	Hält eine vom Fahrer eingestellte Geschwindigkeit.	
Abstandsregeltempomat (ACC)	Hält eine vom Fahrer eingestellte Geschwindigkeit sowie einen eingestellten Abstand zum Vorderfahrzeug.	
Spurhalteassistent	Warnt den Fahrer, wenn er von der Spur abzukommen droht.	
Spurwechselassistent (Audi Side Assist)	Unterstützt den Fahrer beim Wechseln der Spur durch Signalleuchten im Seitenspiegel.	
empfehlende Lichtfunktion	Unterstützt den Fahrer beim Wechseln der Spur durch empfehlende Geste im Scheinwerferlicht.	
warnende Lichtfunktion	Warnt den Fahrer vor Wechseln der Spur durch warnende Geste im Scheinwerferlicht.	
Head-Up Display	Projiziert wichtige Fahrinformationen (z.B. km/h) als farbiges Bild auf die Frontscheibe und damit in das Sichtfeld des Fahrers.	
Kurvenlicht	Leuchtet die Kurven für mehr Weitsicht gezielt aus.	
adaptives Fernlicht	Reguliert das Fernlicht automatisch.	
Markierungslicht	Lichtsystem erkennt Fußgänger auf und neben der Straße und blinkt diese mehrfach kurz mit einem Spotlicht an.	

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

FAS	Fahrerassistenzsysteme
LBAS	Lichtbasierte Assistenzsysteme
GIDAS	German In-Depth Accident Study
AFS	Adaptives Frontbeleuchtungssystem
LED	Leuchtdiode
FPGA	Field Programmable Gate Array
LCD	Liquid Crystal Display
MOEMS	Mikro-opto-elektromechanisches System
DMD	Digital Micromirror Device
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
Radar	Radio Detection and Ranging
ToF	Time of Flight
RCS	Radar Cross Section
SRR	Short-Range-Radar
LRR	Long-Range-Radar
Lidar	Light Detection and Ranging
GPS	Global Positioning System
ADASIS	Advanced Map-Enhanced Driver Assistance Systems
V2X	Vehicle-to-X

V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
ITS	Intelligent Transport Systems
CAM	Cooperative Awareness Message
DENM	Decentralized Environment Notification Message
vHDG	Vertikale Hell-Dunkel-Grenze
ECE	Economic Commission for Europe
MLE	Maximum Likelihood Estimation
KF	Kalman Filter
EKF	Extended Kalman Filter
TTC	Time to Collision
BV	Bildverarbeitung
CTRV	Constant Turn Rate and Velocity
CTRA	Constant Turn Rate and Acceleration
CV	Constant Velocity
CA	Constant Acceleration
LVDS	Low Voltage Differential Signaling
CAN	Controller Area Network
AOI	Area of Interest
ADTF	Automotive Data and Time-Triggered Framework

FORMELZEICHEN

d_x	Distanz in longitudinaler Richtung
c	Lichtgeschwindigkeit
t_{ToF}	Laufzeit
f_D	Doppler-Frequenz
f_0	Trägerfrequenz
τ	Zeitlücke
M_k	Linguistischer Term
M	Fuzzy-Menge
$\mu_{M_k}(x)$	Zugehörigkeitsfunktion
$\mu_M(x)$	Fuzzyfunktion
G	Graph
V	Knoten
E	Kante
$P(A)$	Wahrscheinlichkeit
$P(A B)$	Bedingte Wahrscheinlichkeit
\mathbf{x}_k	Zustandsvektor
k	Zeitpunkt
\mathbf{v}_k	Systemrauschen
\mathbf{Q}	Kovarianz des Systemrauschens
\mathbf{y}_k	Beobachtungsvektor

\mathbf{w}_k	Beobachtungsrauschen
\mathbf{R}	Kovarianz des Beobachtungsrauschens
\mathbf{F}	Systemmatrix
\mathbf{H}	Messmatrix
\mathbf{P}_k	Kovarianz
\mathbf{K}_k	Kalman-Matrix
\mathbf{J}	Jacobimatrix
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit
t_{Latenz}	Latenzzeit
x_{Latenz}	Wegstrecke innerhalb der Latenzzeit
δ_{Latenz}	Winkeländerung innerhalb der Latenzzeit
t_{TP}	Prädiktionszeit der Trajektorienprädiktion
ϵ_{TP}	Prädiktionsfehler der Trajektorienprädiktion
t_{TTC}	Time to Collision
t_{MD}	Voraussagezeit der Manöverdetektion
$R_{MD_{RP}}$	Richtig-positiv-Rate der Manöverdetektion
$R_{MD_{FP}}$	Falsch-positiv-Rate der Manöverdetektion
v	Geschwindigkeit des Egofahrzeugs
a	Beschleunigung des Egofahrzeugs
$\dot{\gamma}$	Gierrate des Egofahrzeugs
ϑ	Lenkwinkel des Egofahrzeugs
B_{li}	Linker Fahrtrichtungsanzeiger des Egofahrzeugs
B_{re}	Rechter Fahrtrichtungsanzeiger des Egofahrzeugs

p_{Gas}	Gaspedalstellung des Egofahrzeugs
p_{Brems}	Bremspedalstellung des Egofahrzeugs
$d_x^{(j)}$	Entfernung eines Objekts j in longitudinaler Richtung
$d_y^{(j)}$	Entfernung eines Objekts j in lateraler Richtung
$v_x^{(j)}$	Relativgeschwindigkeit eines Objekts j in longitudinaler Richtung
$v_y^{(j)}$	Relativgeschwindigkeit eines Objekts j in lateraler Richtung
$b^{(j)}$	Breite eines Objekts j
$h^{(j)}$	Höhe eines Objekts j
d_{Nav}	Entfernung zur Kreuzung
R_{Nav}	Abzweigerichtung
φ_{Nav}	Abzweigewinkel
Z_{Nav}	Abzweigezwang
S_{Nav}	Straßenart
F_{Nav}	Anzahl Fahrspuren
T_{Nav}	Bauliche Trennung
G_{Nav}	Geschwindigkeitsbegrenzung
V_{Nav}	Überholverbot
c_{0Nav}	Anfangskrümmung des Straßensegments
c_{1Nav}	Krümmungsänderung des Straßensegments
A_{BV}	Art der Fahrbahnmarkierung
d_{xBV}	Vorausschau der Erkennung einer Fahrbahnmarkierung

$d_{y_{BV}}$	Distanz zu einer Fahrbahnmarkierung in lateraler Richtung
γ_{BV}	Winkeldifferenz einer Fahrbahnmarkierung zum Fahrzeug
$c_{0_{BV}}$	Anfangskrümmung einer Fahrbahnmarkierung
$c_{1_{BV}}$	Krümmungsänderung einer Fahrbahnmarkierung
\mathbf{X}_K	Trajektorie
$\hat{\mathbf{X}}_{K+N}$	Prädizierte Trajektorie
p_x	Position des Egofahrzeugs in longitudinaler Richtung
p_y	Position des Egofahrzeugs in lateraler Richtung
N	Anzahl an Zeitpunkten
T	Schrittweite
$c(l)$	Krümmung einer Wegstrecke am Punkt l
α_{li}	Linke Grenze eines Objekts
α_{re}	Rechte Grenze eines Objekts
β_{li}	Linke Objektgrenze für Ausblendung
β_{re}	Rechte Objektgrenze für Ausblendung
τ_{Dist}	Schwellwert für Kollisionserkennung
N_{Prob}	Anzahl an Probanden

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] ADASIS FORUM. URL: <http://www.adasis.org/>.
- [2] AMSEL, C.; FLORISSEN, G.; PIETZONKA, S.: “Die nächste Generation lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme”. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 112 (10 2010), S. 758–763.
- [3] ARMBRUSTER, T.: “Car-to-X-based Lighting Systems”. In: *10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*. Hrsg. von PROF. DR.-ING. HABIL. KHAHN, T. Q. 2013.
- [4] AUDI MEDIACENTER. URL: <https://www.audi-mediacenter.com/de/>.
- [5] AUSTERSCHULTE, A.; DREIER, B.; ROSENHAHN, E.-O.: “Analysis of Safety Aspects for LED Matrix High Beam Functions”. In: *10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*. Hrsg. von PROF. DR.-ING. HABIL. KHAHN, T. Q. 2013.
- [6] AZIZ, A. M.; TUMMALA, M.; CRISTI, R.: “Fuzzy logic data correlation approach in multisensor-multitarget tracking systems”. In: *Signal Processing* 76 (2 1999), S. 195–209.
- [7] BAR-SHALOM, Y.: “On the track-to-track correlation problem”. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 26 (2 1981), S. 571–572.
- [8] BAR-SHALOM, Y.; BLAIR, W. D.: *Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances*. Artech House, 2000.
- [9] BAR-SHALOM, Y.; LI, X. R.; KIRUBARAJAN, T.: *Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms and Software*. Wiley, 2001.

- [10] BARTELS, A.; STEINMEYER, S.; BROSIG, S.; SPICHALSKY, C.: "Fahrstreifenwechselassistentz". In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. Vieweg+Teubner, 2009, S. 562–571.
- [11] BATZ, T.; WATSON, K.; BEYERER, J.: "Recognition of dangerous situations within a cooperative group of vehicles". In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 2009.
- [12] BAUER, C.: "A Driver-Specific Maneuver Prediction Model Based on Fuzzy Logic". Dissertation. Freie Universität Berlin, 2011.
- [13] BÄUMLER, H.: "Rekonstruktion von nächtlichen Fußgängerunfällen". In: *1. VKU-Fachkonferenz: Fußgängerunfälle und Fußgängerschutz*. 2007.
- [14] BENDER, E.; DARMS, M.; SCHORN, M.; STÄHLIN, U.; ISERMANN, R.: "Antikollisionssystem PRORETA - Teil 1: Grundlagen des Systems". In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 109 (4 2007), S. 337–341.
- [15] BERLITZ, S.; HAMM, M.; FUNK, C.: "Matrix-LED-Scheinwerfer von Audi". In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 116 (3 März 2014), S. 10–15.
- [16] BERLITZ, S.; KRSTAJIC, V.: "Future of lighting: Aesthetic, Dynamic and Interaction". In: *11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*. Hrsg. von PROF. DR.-ING. HABIL. KHAHN, T. Q. 2015.
- [17] BERNDT, H.; EMMERT, J.; DIETMAYER, K.: "Continuous Driver Intention Recognition with Hidden Markov Models". In: *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. 2008, S. 1189–1194.

- [18] BHAKTA, V. R.; BALLARD, B.: "High resolution adaptive headlight using Texas Instruments DLP® technology". In: *11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*. Hrsg. von PROF. DR.-ING. HABIL. KHAHN, T. Q. 2015.
- [19] BLANDFORD, A.; WONG, W.: "Situation awareness in emergency medical dispatch". In: *International Journal of Human-Computer Studies* 61 (4 2004), S. 421–452.
- [20] BLUM, R. S.; KASSAM, S. A.; POOR, H. V.: "Distributed detection with multiple sensors: I. Advanced topics". In: *Proceedings of the IEEE* 85 (1 1997), S. 64–79.
- [21] BOSSE, E.; SIMARD, M.-A.: "Managing evidential reasoning for identity information fusion". In: *Optical Engineering* 37 (2 1997), S. 391–400.
- [22] BROWN, I. D.: *Review of the 'Looked-but-Failed-to-See' Accident Causation Factor*. Road Safety Research Report 60. Department for Transport, London, 2005.
- [23] COHEN, A. S.; HIRSIG, R.: "The Role of Foveal Vision in the Process of Information Input". In: *Vision in Vehicles – III*. Hrsg. von GALE, A. G.; BROWN, I. D.; MOORHEAD, I.; HASLEGRAVE, C. M. Elsevier, 1991.
- [24] COHEN, A. S.; HIRSIG, R.: "Zur Bedeutung des fovealen Sehens für die Informationsaufnahme bei hoher Beanspruchung". In: *Sicht und Sicherheit im Straßenverkehr: Beiträge zur interdisziplinären Diskussion*. Hrsg. von DERKUM, H. Verlag TÜV Rheinland GmbH, 1990, S. 47–58.
- [25] COHEN, J.: *Statistical power analysis for the behavioral science*. Hillsdale, 1988.

- [26] COSTANTINI, M.; FARINA, A.; ZIRILLI, F.: "The fusion of different resolution SAR images". In: *Proceedings of the IEEE* 85 (1 1997), S. 139–146.
- [27] DANIEL, M. M.; WILLSKY, A. S.: "A multiresolution methodology for signal-level fusion and data assimilation with applications to remote sensing". In: *Proceedings of the IEEE* 85 (1 1997), S. 164–180.
- [28] DARMS, M.: "Eine Basis-Systemarchitektur zur Sensordatenfusion von Umfeldsensoren für Fahrerassistenzsysteme". Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2007.
- [29] DARMS, M.: "Fusion umfelderfassender Sensoren". In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. Vieweg+Teubner, 2009, S. 237–248.
- [30] DASARATHY, B. V.: "Fuzzy evidential reasoning approach to target identity and state fusion in multisensor environments". In: *Optical Engineering* 36 (3 1997), S. 669–683.
- [31] DEZERT, J.: "Improvement of strapdown inertial navigation using PDAF". In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 35 (3 1999), S. 835–856.
- [32] DONGES, E.: "Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern bei simulierter Straßenfahrt". Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt, 1977.
- [33] ECKERT, M.: *Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr*. Verlag Technik GmbH Berlin, 1993.
- [34] ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE: *Regulation No. 123: Uniform provisions concerning the approval of adaptive front-lighting systems (AFS) for motor vehicles*. 2006.

- [35] ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE: *Regulation No. 48: Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices*. 2011.
- [36] ENDSLEY, M. R.: "Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems". In: *Human Factors* 37 (1 1995), S. 32–64.
- [37] ENDSLEY, M. R.; GARLAND, D. J.: *Situation Awareness: Analysis and Measurement*. CRC Press, 2000.
- [38] ENKE, K.: "Possibilities for improving safety within the driver-vehicle-environment control loop". In: *7th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicle*. 1979.
- [39] FASTENMEIER, W.; HINDERER, J.; LEHNIG, U.; GSTALTER, H.: "Analyse von Spurwechselforgängen im Verkehr". In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 55 (1 2001), S. 15–23.
- [40] FIRL, J.: "Probabilistic Maneuver Recognition in Traffic Scenarios". Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- [41] FIRL, J.; STÜBING, H.; HUSS, S. A.; STILLER, C.: "Predictive Maneuver Evaluation for Enhancement of Car-to-X Mobility Data". In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 2012, S. 558–564.
- [42] FLANNAGAN, M. J.; FLANIGAN, C.: "Development of an Headlight Rating System". In: *5th International Symposium on Progress in Automobile Lighting (PAL)*. Hrsg. von PROF. DR.-ING. SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J. 2003.
- [43] FUNK, C.: "Heterogene Sensordatenfusion für eine prädiktive Lichtsteuerung". Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2013.
- [44] FUNK, C.; BERLITZ, S.; HUHN, W.: "Software & Funktionsentwicklung für Audi Matrix LED-Scheinwerfer als weltweit erste Serienanwendung". In: *16. Internationaler Kongress Elektronik im Fahrzeug (ELIV)*. Hrsg. von VDI WISSENSFORUM GMBH. 2013.

- [45] GEDULD, G.: "Lidarsensorik". In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. Vieweg+Teubner, 2009, S. 172–186.
- [46] GORDON, N. J.; SALMOND, D. J.; SMITH, A. F. M.: "Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation". In: *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)* 140 (2 1993), S. 107–113.
- [47] GORMAN, J. C.; COOKE, N. J.; WINNER, J. L.: "Measuring team situation awareness in decentralized command and control environments". In: *Ergonomics* 49 (12-13 2006), S. 1312–1325.
- [48] GRÜNDL, M.: "Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen". Dissertation. Universität Regensburg, 2005.
- [49] GRUNERT, C.: "Markierungslicht und Lichtsperrung - Unterstützung des Fahrers bei Wahrnehmung und Handlungsauswahl in kritischen Situationen". Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2013.
- [50] GUT, C.; PETERSEN, A.; SEITZ, M.; JAHN, P.; NEUMANN, C.; BERLITZ, S.: "Das ideale Licht: Mikromechanischer Matrix Laser Scheinwerfer". In: *17. Internationaler Kongress Elektronik im Fahrzeug (ELIV)*. Hrsg. von VDI WISSENSFORUM GMBH. 2015.
- [51] GUT, C.; VARGAS RIVERO, J. R.; BERLITZ, S.; NEUMANN, C.: "Neuartige Lichtfunktionen auf Basis hochaufgelöster Scheinwerfersysteme". In: *7. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. Hrsg. von VDI WISSENSFORUM GMBH. 2016.
- [52] HALL, D. L.; LLINAS, J.: "An introduction to multisensor data fusion". In: 85 (1 1997), S. 6–23.

- [53] HAMM, M.: "LED-Revolution in Headlamp Optics, Mechanics, Thermomanagement and Styling". In: *6th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*. Hrsg. von PROF. DR.-ING. SCHLAAK, H. F. 2005.
- [54] HAMM, M.: "System Strategies for Adaptive Lighting Systems". In: *4th International Symposium on Progress in Automobile Lighting (PAL)*. Hrsg. von PROF. DR.-ING. SCHMIDT-CLAUSEN, H.-J. 2001.
- [55] HÄRTEL, C. E. J.; SMITH, K.; PRINCE, C.: "Defining aircrew coordination: Searching mishaps for meaning". In: *5th International Symposium on Aviation Psychology*. Hrsg. von JENSEN, R. S. 1989.
- [56] HERRMANN, S.; SCHROVEN, F.: "Fahrerabsichtserkennung für städtische Fahrerassistenzsysteme zur Kollisionsvermeidung im Kreuzungsbereich". In: *13. Braunschweiger Symposium Automatisierungs-, Assistenz- und eingebettete Systeme für Transportmittel*. 2012.
- [57] HESSE, H.: "LCD-Scheinwerfer für eine volladaptive Beleuchtung". In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 117 (11 2015), S. 50–55.
- [58] HESSE, T.; SHADEED, H.; GÖTZ, M.; STRAUSS, S.; WALLASCHEK, J.: "Concept of an active Front-Lighting Driver Assistance System". In: *4th IFAC Symposium on Mechatronic Systems*. 2006.
- [59] HOFFMAN, J. E.; SUBRAMANIAM, B.: "The role of visual attention in saccadic eye movements". In: *Perception and Psychophysics* 57 (6 1995), S. 787–795.
- [60] HOLT, V.: "Integrale multisensorielle Fahrumgebungserfassung nach dem 4D-Ansatz". Dissertation. Universität der Bundeswehr München, 2004.

- [61] HÖRTER, M. H.: "Entwicklung und vergleichende Bewertung einer bildbasierten Markierungslichtsteuerung für Kraftfahrzeuge". Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, 2013.
- [62] HUANG, D.; LEUNG, H.: "An expectation-maximization-based interacting multiple model approach for cooperative driving systems". In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 6 (2 2005), S. 206–228.
- [63] HUHN, W.: "Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen". Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 1999.
- [64] HUMMEL, B.: "Blendfreies LED-Fernlicht". Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, 2010.
- [65] ISERMANN, R.; MANNALE, R.; SCHMITT, K.: "Ein Fahrerassistenzsystem für Überholsituationen - Situationsanalyse, Warnung, Bremsengriff". In: *Autoreg 2011 - VDI Berichte Nr. 2135*. 2011.
- [66] JAHN, P.: "Auflösungskriterien adaptiver Scheinwerfersysteme". In: *7. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. Hrsg. von VDI WISSENSFORUM GMBH. 2016.
- [67] JEBAS, C.: "Physiologische Bewertung aktiver und passiver Lichtsysteme im Automobil". Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, 2012.
- [68] JENSEN, F; NIELSEN, T.: *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Springer, 2007.
- [69] JOHNSON, N. L.; KOTZ, S.; BALAKRISHNAN, N.: *Continuous univariate distributions Vol.1*. Wiley, 1994.

- [70] KÄFER, E.; HERMES, C.; WÖHLER, C.; RITTER, H.; KUMMERT, F.: "Recognition of Situation Classes at Road Intersections". In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2010, S. 3960–3965.
- [71] KALMAN, R. E.: "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems". In: *Journal of Basic Engineering* 82 (1 1960), S. 35–45.
- [72] KAM, M.; ZHU, X.; KALATA, P.: "Sensor fusion for mobile robot navigation". In: *Proceedings of the IEEE* 85 (1 1997), S. 108–119.
- [73] KASPER, D.; WEIDL, G.; DANG, T.; BREUEL, G.; TAMKE, A.; WEDEL, A.; ROSENSTIEL, W.: "Object-Oriented Bayesian Networks for Detection of Lane Change Maneuvers". In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 4 (3 2012), S. 19–31.
- [74] KAUSCHKE, R.: "Systematik zur lichttechnischen Gestaltung von aktiven Scheinwerfern". Dissertation. Universität Paderborn, 2007.
- [75] KHAHN, T. Q.; HUHN, W.: "Sichtverbesserungssysteme". In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. Vieweg+Teubner, 2009, S. 448–470.
- [76] KLANNER, F.: "Entwicklung eines kommunikationsbasierten Querverkehrsassistenten im Fahrzeug". Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2008.
- [77] KLAUS, F.: "Einführung in Techniken und Methoden der Multisensor-Datenfusion". Habilitation. Universität Siegen, 1999.
- [78] KLEIN, L. A.: *Sensor and Data Fusion Concepts and Applications*. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), 1999.

- [79] KLEINE-BESTEN, T.; KERSKEN, U.; PÖCHMÜLLER, W.; SCHEPERS, H.: "Navigation und Telematik". In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. Vieweg+Teubner, 2009, S. 599–624.
- [80] KNOBEL, C.; PÖLTENSTEIN, A.; KNOLLER, S.: "Vorausschauende EfficientDynamics-Funktionen". In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 118 (4 2016), S. 16–21.
- [81] KÖNIG, W.: "Nutzergerechte Entwicklung der Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen". In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. Vieweg+Teubner, 2009, S. 33–42.
- [82] KRAHNSTÖVER, A. Z.: "Licht führt!? Konzeption und Evaluation von Fahrmanöverunterstützung durch lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme". Dissertation. Technische Universität Braunschweig, 2017.
- [83] KRAUS, S. B.: "Fahrverhaltensanalyse zur Parametrierung situationsadaptiver Fahrzeugführungssysteme". Dissertation. Technische Universität München, 2012.
- [84] KUBITZA, B.; SCHÖNKE, K.: "Prädiktive Lichtsteuerung auf Basis hochgenauer digitaler Straßenvektordaten". In: *4. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. Hrsg. von VDI WISSENSFORUM GMBH. 2010.
- [85] LAMPROPOULOS, G. A.; ANASTASSOPOULOS, V.; BOULTER, J. F.: "Constant false alarm rate detection of point targets using distributed sensors". In: *Optical Engineering* 37 (2 1997), S. 401–416.
- [86] LEE, T.; KWAK, N.; PARK, D.; KIM, S.; MOON, I.; HAM, W.; LEE, S.: "Predictive AFS Control using Navigation Information". In: *10th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*. Hrsg. von PROF. DR.-ING. HABIL. KHAHN, T. Q. 2013.

- [87] LIDSTRÖM, K.; LARSSON, T.: "Model-based Estimation of Driver Intentions Using Particle Filtering". In: *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. 2008, S. 1177–1182.
- [88] LIEBETRAU, T.; POHLMANN, W.; MOISEL, J.; KÜRSCHNER, R.; PFEUFFER, A.: "Ein neuer Ansatz für hochauflösende LED-Pixel-Scheinwerfer". In: *17. Internationaler Kongress Electronics In Vehicles (ELIV)*. Hrsg. von VDI WISSENSFORUM GMBH. Baden-Baden, 2015.
- [89] LIEBNER, M.; KLANNER, F.; BAUMANN, M.; RUHHAMMER, C.; STILLER, C.: "Velocity-Based Driver Intent Inference at Urban Intersections in the Presence of Preceding Vehicles". In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine* 5 (2 2013), S. 10–21.
- [90] MAGES, M.; HOPSTOCK, M.; KLANNER, F.: "Kreuzungsassistenz". In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. Vieweg+Teubner, 2009, S. 572–581.
- [91] MARTINERIE, F.: "Data fusion and tracking using HMMs in a distributed sensor network". In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 33 (1 1997), S. 11–28.
- [92] MAURER, M.: "Entwurf und Test von Fahrerassistenzsystemen". In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. Vieweg+Teubner, 2009, S. 43–54.
- [93] MERKET, D. C.; BERGONDY, M.; CUEVAS-MESA, H.: "Making sense out of teamwork error in complex environments". In: *18th Annual Industrial/Organizational Behavior Conference*. 1997.
- [94] MEYER-DELIUS, D.; PLAGEMANN, C.; BURGARD, W.: "Probabilistic Situation Recognition for Vehicular Traffic Scenarios". In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2009, S. 459–464.

- [95] MICHENFELDER, S.: "Konzeption, Realisierung und Verifikation eines automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis von Digitalprojektoren". Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- [96] MICHENFELDER, S.; NEUMANN, C.: "Projektorbasiertes automobiles Pixellicht". In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 115 (11 2013), S. 922–927.
- [97] MIURA, T.: "Coping with situational demands: A study of eye movements and peripheral vision performance". In: *Vision in Vehicles*. Hrsg. von GALE, A. G.; BROWN, I. D.; MOORHEAD, I.; HASLEGRAVE, C. M. Elsevier, 1986.
- [98] NAGAYAMA, Y.: "Role of visual perception in driving". In: *IATSS Research* 2 (1 1978), S. 64–73.
- [99] NAUCK, D.; KRUSE, R.: "Obtaining interpretable fuzzy classification rules from medical data". In: *Artificial Intelligence in Medicine* 16 (2 1999), S. 149–169.
- [100] NULLMEYER, R. T.; STELLA, D.; MONTIJO, G. A.; HARDEN, S. W.: "Human factor in Air Force flight mishaps: Implications for change". In: *Proceedings of the 27th Annual Interservice/Industry Training, Simulation and Education Conference*. 2005.
- [101] OLIVER, N.; PENTLAND, A. P.: "Graphical Models for Driver Behavior Recognition in a SmartCar". In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 2000, S. 7–12.
- [102] OMERBEGOVIC, S.: "Situation-adaptive Vehicle Trajectory Prediction". Masterarbeit. Technische Universität Darmstadt, 2012.
- [103] OMERBEGOVIC, S.; FIRL, J.: "Situation-adaptive Vehicle Trajectory Prediction". In: *Automotive meets Electronics*. VDE Verlag GmbH, 2013, S. 47–52.

- [104] OPENROUTESERVICE. URL: <http://www.openrouteservice.org/>.
- [105] OSRAM GMBH. URL: <http://www.osram.de/>.
- [106] PREVOST, C. G.; DESBIENS, A.; GAGNON, E.: "Extended Kalman Filter for State Estimation and Trajectory Prediction of a Moving Object Detected by an Unmanned Aerial Vehicle". In: *American Control Conference*. 2007, S. 1805–1810.
- [107] RABEL, D.: "Basis der Automatisierung - Präzise, dynamische Echtzeitkarten und menschliches Fahrverhalten". In: *ATZelektronik* 11 (4 2016), S. 44–49.
- [108] RABINER, L. R.: "A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition". In: *Proceedings of the IEEE* 77 (2 1989), S. 257–286.
- [109] REISINGER, B.; WINTERER, N.; REINPRECHT, M.: "Auf der Suche nach der Auflösung - Überlegungen zu hochauflösenden Scheinwerfersystemen". In: *7. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. Hrsg. von VDI WISSENSFORUM GMBH. 2016.
- [110] RESS, C.; WIECKER, M.: "Potential der V2X-Kommunikation für Verkehrssicherheit und Effizienz". In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 118 (1 2016), S. 16–21.
- [111] RISTIC, B.; ARULAMPALAM, S.; GORDON, N.: *Beyond the Kalman Filter: Particle Filters for Tracking Applications*. Artech House Publishers, 2004.
- [112] RUSSO, F.: "Recent advances in fuzzy techniques for image enhancement". In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 47 (6 1998), S. 1428–1434.

- [113] SAHA, R. K.; CHANG, K. C.: "An efficient algorithm for multisensor track fusion". In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 34 (1 1998), S. 200–210.
- [114] SALMON, P. M.; REGAN, M. A.; JOHNSTON, I.: *Human Error and Road Transport: Phase One - Literature Review*. Monash University Accident Research Centre, Victoria, 2005.
- [115] SCHIMMELPFENNIG, K.-H.; NACKENHORST, U.: "Bedeutung der Querbeschleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion - Sicherheitsgrenze des Normalfahrers". In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 23 (4 1985), S. 94–96.
- [116] SCHLAG, B.; PETERMANN, I.; WELLER, G.; SCHULZE, C.: *Mehr Licht - mehr Sicht - mehr Sicherheit?* VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009.
- [117] SCHMITT, K.; HABENICHT, S.; ISERMANN, R.: "Odometrie und Manövererkennung für ein Fahrerassistenzsystem für Überhol-situationen". In: *1. Automobiltechnische Kolloquium*. 2008.
- [118] SCHNEIDER, D.: "Markierungslicht - Eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern". Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2011.
- [119] SCHNEIDER, D.: "Physiologische Betrachtung automobiler Markierungslichtsysteme - Konfigurationen und Einflüsse auf die Unfallzahlen". In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 48 (4 2010), S. 133–140.
- [120] SCHNEIDER, J.: "Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme". Dissertation. Technische Universität Chemnitz, 2009.

- [121] SCHUBERT, R.; SCHULZE, K.; WANIELIK, G.: "Situation Assessment for Automatic Lane-Change Maneuvers". In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 11 (3 2010), S. 607–616.
- [122] SCHULZ, C. M.; ENDSLEY, M. R.; KOCHS, E. F.; GELB, A. W.; WAGNER, K. J.: "Situation Awareness in Anesthesia: Concept and Research". In: *Anesthesiology* 118 (3 2013), S. 729–742.
- [123] SHINAR, D.; MCDOWELL, E. D.; ROCKWELL, T. H.: "Eye Movements in Curve Negotiation". In: *Human Factors* 19 (1 1977), S. 63–71.
- [124] SÖHNER, S.: "Entwicklung einer automatisierten Scheinwerfereinstellung mittels aktiver Triangulation". Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, 2015.
- [125] SPORRER, A.; PRELL, G.; BUCK, J.; SCHAIBLE, S.: "Realsimulation von Spurwechselforgängen im Straßenverkehr". In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 36 (3 1998), S. 69–76.
- [126] SPRUTE, J. H.: "Entwicklung lichttechnischer Kriterien zur Blendungsminimierung von adaptiven Fernlichtsystemen". Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2012.
- [127] STÄHLIN, U.: "Eingriffsentscheidung für ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung". Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2008.
- [128] STARKE, G.: *Effektive Softwarearchitekturen - Ein praktischer Leitfaden*. Hanser, 2005.
- [129] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Verkehrsunfälle 2014*. 2015.
- [130] STILLER, C.; BACHMANN, A.; DUCHOW, C.: "Maschinelles Sehen". In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. Vieweg+Teubner, 2009, S. 198–222.

- [131] TAN, H. S.; HUANG, J.: “DGPS-Based Vehicle-to-Vehicle Cooperative Collision Warning: Engineering Feasibility Viewpoints”. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 7 (4 2006), S. 415–428.
- [132] TANER, A.: “Vergleich verschiedener Systeme zur Sichtverbesserung bei Nacht in Personenkraftwagen”. Dissertation. Technische Universität München, 2007.
- [133] TEZUKA, S.; SOMA, H.; TANIFUJI, K.: “A Study of Driver Behavior Inference Model at Time of Lane Change using Bayesian Networks”. In: *IEEE International Conference on Industrial Technology*. 2006, S. 2308–2313.
- [134] THEMANN, P.; RAUDSZUS, D.; ZLOCKI, A.; ECKSTEIN, L.: “Ganzheitliche Bewertung des vernetzten und automatisierten Fahrens”. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 118 (1 2016), S. 26–31.
- [135] TOTZAUER, A.: “Kalibrierung und Wahrnehmung von blendfreiem LED-Fernlicht”. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, 2013.
- [136] TUPIN, F.; BLOCH, I.; MAITRE, H.: “A first step toward automatic interpretation of SAR images using evidential fusion of several structure detectors”. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37 (3 1999), S. 1327–1343.
- [137] VISWANATHAN, R.; VARSHNEY, P.K.: “Distributed detection with multiple sensors: I. Fundamentals”. In: *Proceedings of the IEEE* 85 (1 1997), S. 54–63.
- [138] VOGEL O. & Arnold, I.; CHUGHTAI, A.; IHLER, E.; MEHLIG, U.; NEUMANN, T.; ZDUN, U.: *Software-Architektur: Grundlagen - Konzepte - Praxis*. Spektrum Akademischer Verlag, 2005.

- [139] VOGT, C. C.; COTTRELL, G. W.: "Fusion via a linear combination of scores". In: *Information Retrieval* 1 (3 1999), S. 151–173.
- [140] VÖLKER, S.: "Hell- und Kontrastempfindung - Ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeug-Scheinwerfern". Habilitation. Universität Paderborn, 2006.
- [141] VOLLRATH, M.; BRIEST, S.; SCHIESSL, C.; DREWES, J.; BECKER, U.: *Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft F 60. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2006.
- [142] WADA, K.; MIJAZAWA, K.; YAGI, S.; TAKAHASHI, K.; SHIBATA, H.: "Steerable Forward Lighting System". In: *SAE Technical Paper 890682* (1989).
- [143] WALD, L.: "Some terms of reference in data fusion". In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37 (3 1999), S. 1190–1193.
- [144] WALD, L.; RANCHIN, T.; MANGOLINI, M.: "Fusion of satellite images of different spatial resolutions: Assessing the quality of resulting images". In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 63 (6 1997), S. 691–699.
- [145] WALLRABE, A.: *Nachtsichttechnik*. Vieweg+Teubner, 2001.
- [146] WICKENS, C. D.; HOLLANDS, J. G.: *Engineering Psychology and Human Performance*. Prentice Hall, 1999.
- [147] WINNER, H.: "Radarsensorik". In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. Vieweg+Teubner, 2009, S. 123–171.
- [148] WINNER, H.; DANNER, B.; STEINLE, J.: "Adaptive Cruise Control". In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. Vieweg+Teubner, 2009, S. 478–521.

- [149] YAGER, R. R.: "Fusion of ordinal information using weighted median aggregation". In: *International Journal of Approximate Reasoning* 18 (1 1998), S. 35–52.
- [150] YEDDANAPUDI, M.; BAR-SHALOM, Y.; PATTIPATI, K. R.: "IMM estimation for multitarget-multisensor air traffic surveillance". In: *Proceedings of the IEEE* 85 (1 1997), S. 80–96.
- [151] ZADEH, L. A.: "Fuzzy Sets". In: *Information and Control* 8 (1965), S. 338–353.
- [152] ZANTEN, A. van; KOST, F.: "Bremsenbasierte Assistenzfunktionen". In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S.; WOLF, G. Vieweg+Teubner, 2009, S. 356–394.
- [153] ZYDEK, B.; SCHILLER, C.; POLIN, D.; KHAHN, T. Q.: "Bewertung von Scheinwerfern mit blendfreiem Fernlicht". In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 116 (6 2014), S. 64–69.

PUBLIKATIONEN

- [154] FUNK, C.; REIM, J.; OMERBEGOVIC, S.: "New world of lighting based driver assistance systems - 'Good bye low beam'". In: *11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*. Hrsg. von PROF. DR.-ING. HABIL. KHAHN, T. Q. 30. Sep. 2015.
- [155] HUHNS, W.; GUT, C.; OMERBEGOVIC, S.; HAUG, T.; FUNK, C.: "The advanced ADB system of the new Audi Q7". In: *3rd International Forum on Automotive Lighting (IFAL)*. Hrsg. von FUDAN UNIVERSITY. 18. Juni 2015.
- [156] OMERBEGOVIC, S.: "Prädiktive Lichtfunktionen für volladaptive Scheinwerfersysteme". In: *11. Audi Doktorandentag Pro.Motion*. Hrsg. von AUDI AG. 9. Nov. 2015.
- [157] OMERBEGOVIC, S.; FUNK, C.: "Predictive lighting functions for next generation Matrix LED headlights". In: *Vehicle and Infrastructure Safety Improvement in Adverse Conditions and Night Driving (VISION) 2014*. Hrsg. von SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS DE L'AUTOMOBIL. 14. Okt. 2014.
- [158] OMERBEGOVIC, S.; FUNK, C.; NEUMANN, C.: "Dynamische Sicherheitsbereiche für hochauflösende Fernlichtsysteme". In: *7. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. Hrsg. von VDI WISSENSFORUM GMBH. 12. Mai 2016.
- [159] OMERBEGOVIC, S.; FUNK, C.; NEUMANN, C.: "Funktionsentwicklung eines Matrix LED-Scheinwerfers und Konzeptionierung von prädiktiven Lichtfunktionen". In: *6. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. Hrsg. von VDI WISSENSFORUM GMBH. 7. Mai 2014.

- [160] OMERBEGOVIC, S.; KAMMANN, T.; FUNK, C.; NEUMANN, C.:
“Artificial intelligence for future light-based assistance systems”.
In: *11th International Symposium on Automotive Lighting (ISAL)*.
Hrsg. von PROF. DR.-ING. HABIL. KHAHN, T. Q. 29. Sep. 2015.

OFFENLEGUNGSSCHRIFTEN

- [161] ARMBRUSTER, T.; BARMAYER, F.; REIM, J.; FUNK, C.; OMERBEGOVIC, S.: "Ansteuern einer Lichtquelle und Fahrzeug". DE 10 2015 011 024 A1. 2015.
- [162] ARMBRUSTER, T.; FUNK, C.; OMERBEGOVIC, S.: "Verfahren zum Betreiben eines Fahrerassistenzsystems eines Kraftfahrzeugs, Fahrerassistenzsystem sowie Kraftfahrzeug". DE 10 2014 006 598. 2014.
- [163] ARMBRUSTER, T.; OMERBEGOVIC, S.; BARMAYER, F.; FUNK, C.: "Fahrerassistenzeinrichtung für ein Kraftfahrzeug sowie Verfahren zum Betreiben einer solchen". DE 10 2014 019 246 A1. 2014.
- [164] BARMAYER, F.; FUNK, C.; ARMBRUSTER, T.; OMERBEGOVIC, S.: "Verfahren zum Betreiben eines Scheinwerfers eines Kraftfahrzeugs". DE 10 2015 013 600 A1. 2015.
- [165] BARMAYER, F.; FUNK, C.; ARMBRUSTER, T.; REIM, J.; OMERBEGOVIC, S.: "System und Verfahren zur objektbasierten Ansteuerung eines hochauflösenden Scheinwerfers für ein Kraftfahrzeug". DE 10 2015 016 375 A1. 2015.
- [166] BERLITZ, S.; FUNK, C.; OMERBEGOVIC, S.; ARMBRUSTER, T.: "Informieren eines Verkehrsteilnehmers über eine autopilotgesteuerte Fahrt". DE 10 2014 011 811 A1. 2014.
- [167] BERLITZ, S.; GUT, C.; OMERBEGOVIC, S.: "Verfahren zum Betreiben einer Projektionsvorrichtung eines Kraftfahrzeugs, Projektionssystem sowie Kraftfahrzeug". DE 10 2016 001 915 A1. 2017.

- [168] FUNK, C.; BARMAYER, F.; ARMBRUSTER, T.; GUT, C.; OMERBEGOVIC, S.: "Kraftfahrzeug mit wenigstens einem Scheinwerfer". DE 10 2016 003 296 A1. 2017.
- [169] FUNK, C.; BARMAYER, F.; ARMBRUSTER, T.; OMERBEGOVIC, S.: "Fahrerassistenzsystem zur Steuerung einer Lichtabstrahlung einer fahrzeugseitigen Scheinwerfereinrichtung". DE 10 2016 001 692 A1. 2017.
- [170] FUNK, C.; BARMAYER, F.; ARMBRUSTER, T.; REIM, J.; OMERBEGOVIC, S.: "Verfahren zum Betreiben einer Anordnung mit wenigstens einer Beleuchtungseinrichtung, zugehörige Anordnung und Kraftfahrzeug". DE 10 2015 012 808 A1. 2015.
- [171] FUNK, C.; BARMAYER, F.; ARMBRUSTER, T.; REIM, J.; OMERBEGOVIC, S.: "Verfahren zum Betreiben einer Beleuchtungseinrichtung eines Kraftfahrzeugs und Kraftfahrzeug". DE 10 2015 012 021. 2015.
- [172] FUNK, C.; BARMAYER, F.; ARMBRUSTER, T.; REIM, J.; OMERBEGOVIC, S.: "Verfahren zum Betreiben einer Beleuchtungseinrichtung eines Kraftfahrzeugs und zugehöriges Kraftfahrzeug". DE 10 2015 012 019 A1. 2015.
- [173] FUNK, C.; BARMAYER, F.; ARMBRUSTER, T.; REIM, J.; OMERBEGOVIC, S.: "Verfahren zum Betreiben einer Beleuchtungseinrichtung eines Kraftfahrzeugs und zugehöriges Kraftfahrzeug". DE 10 2015 012 023 A1. 2015.
- [174] FUNK, C.; BARMAYER, F.; ARMBRUSTERN, T.; REIM, J.; OMERBEGOVIC, S.: "Verfahren zum Betreiben eines Scheinwerfers eines Kraftfahrzeugs und Kraftfahrzeug". DE 10 2015 012 020 A1. 2015.
- [175] FUNK, C.; OMERBEGOVIC, S.: "Fahrzeug mit einem elektrischen Energiespeicher und Verfahren zum Betreiben eines Fahrzeugs". DE 10 2014 013 765 A1. 2014.

- [176] FUNK, C.; OMERBEGOVIC, S.: "Kraftfahrzeug und Verfahren zum Bereitstellen eines statischen Kreuzungslichts". DE 10 2014 009 252 A1. 2014.
- [177] FUNK, C.; OMERBEGOVIC, S.: "Verfahren zum Steuern einer Lichtverteilung eines Scheinwerfers eines Fahrzeugs". DE 10 2014 009 254 A1. 2014.
- [178] FUNK, C.; OMERBEGOVIC, S.: "Verfahren zum Steuern einer Lichtverteilung eines Scheinwerfers eines Kraftfahrzeugs". DE 10 2014 009 253 A1. 2014.
- [179] FUNK, C.; OMERBEGOVIC, S.; REIM, J.; VARGAS RIVERO, J. R.: "Verfahren zum Betreiben einer Projektionsvorrichtung eines Kraftfahrzeugs, Projektionssystem sowie Kraftfahrzeug". DE 10 2016 002 010 A1. 2017.
- [180] REIM, J.; FUNK, C.; BARMAYER, F.; ARMBRUSTER, T.; OMERBEGOVIC, S.: "Verfahren zur Beleuchtung eines vorderen Fahrzeugumfelds". DE 10 2015 012 022 A1. 2015.

BETREUTE ARBEITEN

- [181] BISSINGER, M.: "Spurwechselmodellierung für die Prädiktion von Fahrzeugtrajektorien". Bachelorarbeit. Hochschule München, 2014.
- [182] GSCHLÖSSL, S.: "Entwicklung und Absicherung eines adaptiven Ausblendebereichs für hochauflösende Scheinwerfer". Masterarbeit. Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, 2016.
- [183] HABERMAYR, M.: "Überholmanöverdetektion für die Entwicklung von prädiktiven Lichtfunktionen". Bachelorarbeit. Technische Hochschule Ingolstadt, 2014.
- [184] KAMMANN, T.: "Gestaltung und Evaluation einer neuartigen Lichtfunktion zur Fahrstreifenwechselunterstützung im Kraftfahrzeug". Masterarbeit. Technische Universität München, 2015.
- [185] REIM, J.: "Ansteuerungskonzept für hochauflösende Scheinwerfersysteme". Masterarbeit. Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 2016.
- [186] SCHIENER, D.: "Simulationsgestützte Funktionsentwicklung einer prädiktiven Manöverdetektion von Abbiegevorgängen". Masterarbeit. Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 2015.
- [187] STRICKER, J.: "Tracking und Trajektorienprädiktion von Ego- und Fremdfahrzeugen für prädiktive Lichtsysteme". Masterarbeit. Hochschule Ingolstadt, 2014.

SPEKTRUM DER LICHTTECHNIK

Lichttechnisches Institut Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

ISSN 2195-1152

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

- Band 9 Steffen Michenfelder
**Konzeption, Realisierung und Verifikation eines
automobilen Forschungsscheinwerfers auf Basis
von Digitalprojektoren.** 2015
ISBN 978-3-7315-0301-9
- Band 10 Celal Mohan Ögün
**Surface wave driven molecular low pressure plasmas
for general lighting.** 2016
ISBN 978-3-7315-0464-1
- Band 11 Theresa Bonenberger
LED Farbmischung mit chaotischen Lichtleitern. 2016
ISBN 978-3-7315-0480-1
- Band 12 Michael Schöne
**Diffraktive Optiken im Automobil:
Achromatisierung, Athermalisierung, Formung
von Scheinwerferlichtverteilungen.** 2017
ISBN 978-3-7315-0613-3
- Band 13 Tobias Werner
**Simulation, Aufbau und Charakterisierung
von autostereoskopischen Display-Systemen
im Fahrzeugbereich.** 2017
ISBN 978-3-7315-0617-1
- Band 14 Christian Herbold
**Entwicklung und Herstellung naturähnlich
verzweigter Kühlkörper für LED-Systeme.** 2017
ISBN 978-3-7315-0635-5
- Band 15 Carsten Gut
Laserbasierte hochauflösende Pixellichtsysteme. 2018
ISBN 978-3-7315-0710-9
- Band 16 Annie Shalom Samji Isaac Chandra
**Intelligent Freeform Deformation for LED
Illumination Optics.** 2018
ISBN 978-3-7315-0741-3

- Band 17 Ingo Rotscholl
**Spectral near field data of LED systems
for optical simulations.** 2018
ISBN 978-3-7315-0750-5
- Band 18 Inca Leopoldo Sayanca
**Sensorfusion zur Kompensation von Messfehlern bei
kamerabasierter Farbverteilungsmessung.** 2018
ISBN 978-3-7315-0830-4
- Band 19 Benjamin Schulz
**Weiterentwicklung der Beleuchtungseinheit
LED-basierter Projektionssysteme.** 2019
ISBN 978-3-7315-0865-6
- Band 20 Said Omerbegovic
**Prädiktive Lichtfunktionen für volladaptive
Scheinwerfersysteme.** 2019
ISBN 978-3-7315-0875-5



Lichttechnisches Institut
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hochauflösende Scheinwerfersysteme bieten das Potenzial die Leistungsfähigkeit lichtbasierter Assistenzsysteme zu verbessern. Weiterhin können neuartige Lichtfunktionen zur Unterstützung des Fahrers realisiert werden, die Handlungsempfehlungen bei der Quer- und Längsführung des Fahrzeugs auf der Fahrbahn darstellen.

Diese Arbeit untersucht eine Umsetzung des blendfreien Fernlichts, die auf der Voraussage der Bewegung des Egofahrzeugs und anderer Verkehrsteilnehmer beruht. Das Ziel ist die Kompensation der Latenzzeit und die optimale Ausnutzung der Auflösung für die darzustellende Lichtverteilung. Des Weiteren werden Lichtfunktionen entwickelt und auf ihre Wirksamkeit analysiert, die situationspezifische Handlungsempfehlungen bei Abbiege- oder Spurwechselintentionen des Fahrers auf die Fahrbahn vor das Fahrzeug projizieren.

ISSN 2195-1152
ISBN 978-3-7315-0875-5

