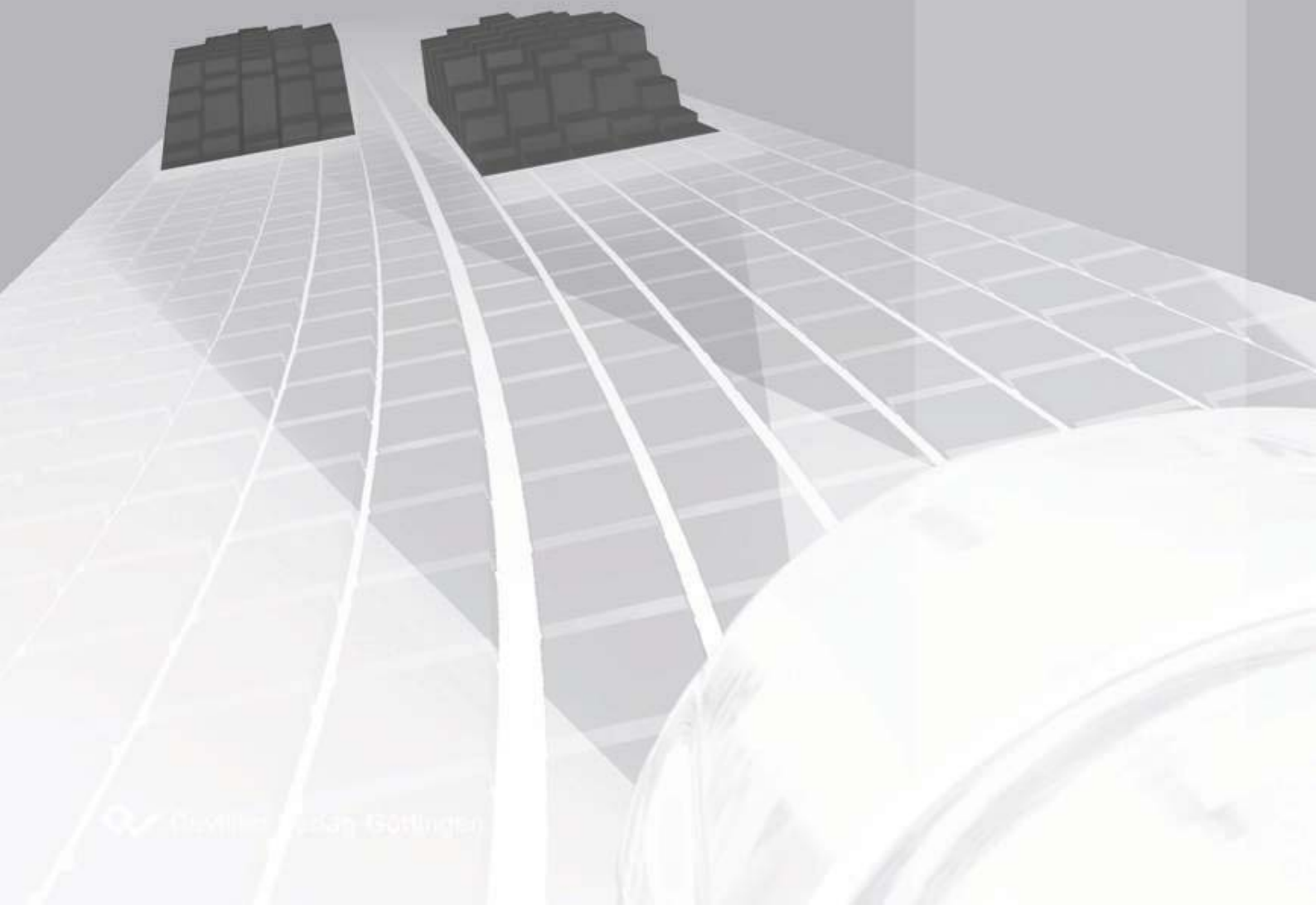


Audi
Dissertationsreihe



Blendfreies LED-Fernlicht

Benjamin Hummel



Blendfreies LED-Fernlicht

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

an der Fakultät für

Elektro- und Informationstechnik

der Universität Karlsruhe (TH)

anerkannte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Benjamin Hummel

aus Öhringen

Tag der mündlichen Prüfung: 24. November 2009

Tag der Einreichung: 26. Oktober 2009

Hauptreferent: Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2010
Zugl.: (TH) Karlsruhe, Univ., Diss., 2009
978-3-86955-386-3

Audi Dissertationsreihe, Band 30

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2010
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2010
Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-386-3

I Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung Licht und Sicht der AUDI AG in Ingolstadt. Die wissenschaftliche Betreuung übernahm das Lichttechnische Institut der Universität Karlsruhe (TH).

Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer, der als Hauptreferent die Arbeit betreute und durch seine Anregungen maßgeblich beeinflusste. Meinem Korreferenten Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller möchte ich ebenfalls für seine Anregungen danken. Den Herren Dr. Karl Manz, Dr. Dieter Kooß und Dr. Karsten Köth möchte ich meinen Dank für die zahlreichen fachlichen Diskussionen aussprechen.

Auf Seiten der AUDI AG möchte ich namentlich die Herren Dr. Wolfgang Huhn und Stephan Berlitz nennen. Sie haben während der letzten drei Jahre sowohl auf das Gelingen des Promotionsvorhabens als auch auf meine persönliche Weiterentwicklung geachtet. So hatte ich zum einen die Möglichkeit, zwei Versuchsträger mit einem Matrix-Beam-System auszurüsten. Zum anderen wurde es mir ermöglicht, zahlreiche Praktika und Diplomarbeiten zu betreuen. Diese haben maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen, wofür ich mich bei meinen Studenten in aller Form bedanken möchte.

Der gesamten Abteilung Licht und Sicht möchte ich meinen Dank aussprechen. Durch die herzliche Aufnahme in ihrem Team hatte ich sehr viel Spaß an meiner Arbeit, was mich zusätzlich motivierte. Als Schwabe jedoch sollte ich allerdings das äußerst gute Arbeitsklima anders beschreiben: „Net schlecht“ (höchstes schwäbisches Lob)!

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie und meinen Freunden danken, die mich durch Höhen und Tiefen der letzten Jahre begleitet haben. Ohne deren Hilfe und Rückhalt hätte ich mich nicht so auf das Promotionsvorhaben konzentrieren können!

Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben: herzlichen Dank!

Benjamin Hummel

II Inhaltsverzeichnis

I	DANKSAGUNG	I
II	INHALTSVERZEICHNIS	III
1	EINLEITUNG	1
1.1	DIE ROLLE VON ABBLENDLICHT UND FERNLICHT	1
1.2	DAS BLENDFREIE FERNLICHT	2
2	AUFGABENSTELLUNG	4
2.1	HINTERGRUND	4
2.2	ZIEL DIESER ARBEIT	4
2.3	ÜBERBLICK ÜBER DIE ARBEIT	5
3	UNFALLANALYSE: POTENZIAL UNTER IDEALEN LICHTBEDINGUNGEN	6
3.1	DATENGRUNDLAGE	6
3.2	ABSCHÄTZUNGSVERFAHREN	8
3.3	ERGEBNISSE	11
4	STAND DER TECHNIK	14
4.1	SCHEINWERFER	14
4.1.1	<i>Die LED im Scheinwerfer</i>	14
4.1.2	<i>Der LED-Scheinwerfer</i>	18
4.2	BLENDFREIE FERNLICHTSYSTEME	19
4.2.1	<i>Ältere Ansätze</i>	19
4.2.2	<i>Aktuelle Konzepte</i>	20
4.2.3	<i>Bewertung von blendfreien Fernlichtsystemen</i>	24
4.3	STAND DER WISSENSCHAFT	24
4.3.1	<i>Erkennbarkeitsentfernung</i>	24
4.3.2	<i>Lichtverteilung von Abblendlicht und Fernlicht</i>	28
4.3.3	<i>Blendung</i>	29
4.3.4	<i>Nachtsichtsysteme</i>	31
5	TECHNISCHE BESCHREIBUNG DES BLENDFREIEN LED-FERNLICHTES	32
5.1	DER NANOLUX-SCHEINWERFER	32
5.1.1	<i>Aufbau des Nanolux-Scheinwerfers</i>	32
5.1.2	<i>Lichtverteilung des Nanolux-Scheinwerfers</i>	34
5.1.3	<i>Ansteuerung des LED-Arrays</i>	36
5.2	KAMERA UND BILDVERARBEITUNG	37
5.2.1	<i>Aufbau und Funktionsweise des Kamerasystems</i>	38
5.2.2	<i>Bildverarbeitung</i>	39
5.2.3	<i>Untersuchung des Kamerasystems</i>	41

5.3	THEORETISCHE SYSTEMAUSLEGUNG	44
5.3.1	<i>Objektgleich</i>	44
5.3.2	<i>Parallaxenfehler</i>	45
5.3.3	<i>Objektgleich unter Berücksichtigung des Parallaxenfehlers</i>	45
5.3.4	<i>Neue Möglichkeiten aufgrund der optischen Kopplung</i>	47
5.4	TOPOLOGIE DES GESAMTSYSTEMS	49
5.4.1	<i>Integration und Funktionsweise</i>	49
5.4.2	<i>Infrastruktur</i>	51
5.4.3	<i>Latenzzeitmessung Gesamtsystem</i>	51
5.4.4	<i>Bedienkonzept</i>	53
6	VERKEHRSRAUMANALYSE	56
6.1	THEORETISCHE VERKEHRSRAUMANALYSE	56
6.1.1	<i>Verfügbare Daten</i>	56
6.1.2	<i>Zusammenführung der Daten</i>	57
6.1.3	<i>Analyse des Verkehrsgeschehens</i>	59
6.2	VERKEHRSRAUMMODELLIERUNG	60
6.2.1	<i>Simulationsmodell</i>	61
6.2.2	<i>Einbindung der Streckengeometrie</i>	62
6.2.3	<i>Einbindung des Verkehrsgeschehens</i>	63
6.2.4	<i>Objektlistensammlung durch die virtuelle Kamera</i>	63
6.2.5	<i>Ergebnis der Verkehrsraummodellierung</i>	64
6.3	REALE VERKEHRSRAUMANALYSE	66
6.3.1	<i>Bisherige Untersuchungen</i>	66
6.3.2	<i>Messaufbau und Auswertung</i>	67
6.3.3	<i>Wahl des Streckenprofils und Durchführung</i>	69
6.3.4	<i>Ergebnisse der realen Verkehrsraumanalyse</i>	70
6.4	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	73
6.4.1	<i>Vergleich der Verkehrsraummodellierung mit der Praxis</i>	74
6.4.2	<i>Bedeutung der Ergebnisse für die weitere Arbeit</i>	78
7	BERECHNUNG DES NUTZUNGSGRADES VON FERNLICHTSYSTEMEN	79
7.1	BEWERTUNGSVERFAHREN	79
7.1.1	<i>Gewichtung durch Lichtstrom</i>	79
7.1.2	<i>Simulation</i>	81
7.2	METHODEN ZUR SEGMENTIERUNG EINER FERNLICHTVERTEILUNG	83
7.2.1	<i>Objekthäufigkeitsbasierte Segmentierung</i>	83
7.2.2	<i>Methode baugleicher Optikmodule</i>	87
7.2.3	<i>Methode zum gleichmäßigen Schalten von Lichtsegmenten</i>	89
7.2.4	<i>Bewertung des gesamten Matrix-Beam-Scheinwerfers</i>	89
7.2.5	<i>Diskussion der Methoden zur Segmentierung</i>	90
7.2.6	<i>Vorschlag einer Segmentierung</i>	91
7.3	SICHERHEITSBEREICHE	94
7.3.1	<i>Statische Sicherheitsbereiche</i>	95

7.3.2	<i>Parallaxenfehler</i>	96
7.3.3	<i>Größe dynamischer Sicherheitsbereiche</i>	98
7.3.4	<i>Zusammenfassung der Sicherheitsbereiche</i>	106
7.4	BLENDFREIE FERNLICHTSYSTEME IM VERGLEICH	107
7.4.1	<i>Vergleich auf Basis der Referenzstrecke</i>	107
7.4.2	<i>Vergleich auf Basis unterschiedlicher Verkehrsdichten</i>	108
7.4.3	<i>Vergleich auf Basis unterschiedlicher Streckenprofile</i>	108
7.4.4	<i>Kritische Betrachtung des Bewertungsverfahrens</i>	109
7.4.5	<i>Abschließende Bewertung blendfreier Fernlichtsysteme</i>	111
8	PSYCHOPHYSIOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN	112
8.1	ABBLENDENTFERNUNGEN MIT LED UND XENON	112
8.1.1	<i>Versuchsbeschreibung</i>	113
8.1.2	<i>Versuchsaufbau</i>	113
8.1.3	<i>Durchführung</i>	114
8.1.4	<i>Analyse der Messergebnisse</i>	115
8.1.5	<i>Diskussion</i>	123
8.2	ERKENNBARKEITSENTFERNUNGEN MIT ADAPTIVEN FERNLICHTSYSTEMEN	126
8.2.1	<i>Versuchsbeschreibung</i>	126
8.2.2	<i>Versuchsaufbau</i>	126
8.2.3	<i>Durchführung</i>	130
8.2.4	<i>Analyse der Messergebnisse</i>	131
8.2.5	<i>Diskussion</i>	138
9	SICHERHEITSGEWINN MIT BLENDFREIEM FERNLICHT	142
9.1.1	<i>Risikokompensation</i>	142
9.1.2	<i>Quantifizierung des Sicherheitsgewinns und der Risikokompensation</i>	142
9.1.3	<i>Abschließende Betrachtung des erwarteten Netto-Sicherheitsgewinnes</i>	143
10	ZUSAMMENFASSUNG	144
10.1	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE	144
10.2	AUSBLICK	148
11	ANHANG	149
11.1	TABELLEN UND ABBILDUNGEN	149
11.1.1	<i>Unfallanalyse</i>	149
11.1.2	<i>Kamerasystem</i>	149
11.1.3	<i>Daten zur Modellierung des Verkehrsraumes</i>	150
11.1.4	<i>Dauerzählstellen in Bayern</i>	152
11.2	VERZEICHNISSE	155
11.2.1	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	155
11.2.2	<i>Tabellenverzeichnis</i>	157
11.2.3	<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	158
11.3	LITERATUR	160
11.4	BETREUTE ARBEITEN	168

11.5	IM RAHMEN DER ARBEIT ENTSTANDENE VERÖFFENTLICHUNGEN	169
11.5.1	<i>Konferenzbeiträge mit Vortrag</i>	169
11.5.2	<i>Konferenzbeiträge mit Poster</i>	169
11.5.3	<i>Weitere Veröffentlichungen</i>	169
11.5.4	<i>Patentanmeldungen</i>	170
11.6	LEBENS LAUF	171

1 Einleitung

Die visuelle Wahrnehmung spielt im Straßenverkehr eine gravierende Rolle. Nach Trotter [Trot78] werden rund 90 % aller Informationen unserem Gehirn über die Augen bereitgestellt. Wenn sich die Sicht verschlechtert, so geht das zur Lasten der Sicherheit. Es ist daher nicht verwunderlich, dass sich jeder zweite Unfall auf die Defizite der visuellen Wahrnehmung zurückführen lässt [Cohe87].

Besonders nachts, wenn die Sicht beeinträchtigt ist, steigt das Unfallrisiko deutlich an. Zu dieser Tageszeit ereignen sich 47 % aller tödlichen Unfälle [Lang97]. Dabei wird nur knapp ein Viertel der gesamten Fahrleistung nachts erbracht [Schw03]. Besonders für Fußgänger ist die Unfallwahrscheinlichkeit nachts auf unbeleuchteten Landstraßen fast siebenmal höher als tagsüber [Flan03]. Um dem Fahrer eine bessere Sicht zu ermöglichen und so das Unfallrisiko für alle zu senken, ist die Erforschung und Entwicklung besserer Scheinwerfersysteme notwendig.

1.1 Die Rolle von Abblendlicht und Fernlicht

Das Fernlicht ist historisch gesehen das eigentliche Fahrlicht. Das Abblendlicht soll hingegen „nur“ im Falle einer möglichen Blendung anderer eingesetzt werden. Die niedrige Verkehrsdichte in den Anfängen des Automobils ermöglichte eine häufige Verwendung des Fernlichtes, das somit zu Recht als Fahrlicht bezeichnet wurde. Nicht umsonst wird das Fernlicht im englischsprachigen Raum auch „driving beam“ oder „main beam“ genannt. Mit der steigenden Verkehrsdichte nahmen jedoch die Verwendung und so auch die Bedeutung des Abblendlichtes zu.

Das Abblendlicht soll dem Fahrer eine bestmögliche Ausleuchtung gewährleisten und gleichzeitig eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer verhindern. Eine bessere Ausleuchtung kann mit mehr Licht erzielt werden, allerdings wird damit in der Regel auch die Blendung erhöht und stellt somit den zentralen Zielkonflikt in der automobilen Lichttechnik dar [Manz97]. Mehr Licht oberhalb des Abblendlichtes bietet einen erheblichen Mehrnutzen [Völk06]. Bereits eine geringe Erhöhung der Beleuchtungsstärke in diesem Bereich führt bei Abblendlicht zu einem erheblichen Anstieg der Erkennbarkeitsentfernung. Das Fernlicht weist in diesem Bereich deutlich höhere Beleuchtungsstärken und so auch größere Erkennbarkeitsentfernungen auf.

Da mit Fernlicht dem Fahrer eine bessere Sicht als mit Abblendlicht ermöglicht wird, stellt sich somit die Frage, warum stets an adaptiven Abblendlichtsystemen und nicht an adaptiven Fernlichtsystemen gearbeitet wird. Die Ursache dafür ist die seltene Verwendung des Fernlichtes, wodurch die Wichtigkeit des Abblendlichtes anstieg. Daher wurde hauptsächlich das Abblendlicht mit neuen Lichtfunktionen optimiert, anstatt die Fernlichtverwendung zu erhöhen.

Nach einer amerikanischen Studie wird das Fernlicht heutzutage nur in ca. 3 % aller Fälle verwendet, in den restlichen 97 % ist das Abblendlicht mit seiner deutlich geringeren Erkennbarkeitsentfernung eingeschaltet [Meff07]. Für Europa ist dieses Verhältnis mit 95 % Abblendlichtverwendung ähnlich gewichtet [Hamm00]. Die geringe Fernlichtverwendung wird nicht nur alleine durch die gestiegene Verkehrsbelastung, sondern auch durch menschliche Schwächen verursacht. Viele Leute sind zu bequem oder vergessen schlichtweg wieder aufzublenden [Rosl05]. Zudem blenden viele Fahrer früher ab als notwendig und besonders ältere Personen haben Angst, nicht rechtzeitig abblenden zu können.

Als einen ersten Schritt in Richtung adaptive Fernlichtsysteme ist der Fernlichtassistent¹ (FLA) zu sehen, der das Auf- und Abblenden automatisiert. Der Fernlichtassistent soll gerade durch seine Automatisierung die menschlichen Schwächen kompensieren und so die Fernlichtverwendung um einen Faktor von vier erhöhen [Meff07].

1.2 Das blendfreie Fernlicht

Der Fernlichtassistent ist ein erster und sehr wichtiger Schritt. Er hat aber immer noch den Nachteil, dass im Begegnungsprozess die eigene Sicht durch das Abblenden minimiert wird². Um die Sicherheit bei Fahrten in Dunkelheit zu erhöhen, wird ein System benötigt, das folgende Herausforderungen löst:

- die Erhöhung der geringen Fernlichtverwendung,
- die Kompensierung der menschlichen Schwächen,
- die Kompensierung der gestiegenen Verkehrsdichte sowie
- den Zielkonflikt zwischen
 1. der bestmöglichen Sicht für den Fahrer und
 2. keiner Blendung anderer Verkehrsteilnehmer.

Das blendfreie Fernlicht löst diese teils sehr kontroversen Anforderungen. Es ermöglicht dem Fahrer eine optimale Sicht bei Fernlichtniveau. Gleichzeitig vermeidet es die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer durch eine automatische selektive Entblendung.

Technisch kann dies mit einem LED-Scheinwerfer umgesetzt werden, dessen Lichtverteilung in verschiedene Sektoren unterteilt ist. Jede LED-Einheit leuchtet hierbei ein anderes Segment aus und ist einzeln ansteuerbar. Über ein Kamerasystem werden andere Verkehrsteilnehmer erkannt und nur die Segmente entblendet, die auch tatsächlich blenden können. Der Rest des Lichtes bleibt dem Fahrer erhalten (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2).

¹ Cadillac bot bereits in den 60ern einen Fernlichtassistenten „Autronic Eye“ an. Allerdings brachte dieser einen erheblichen Justageaufwand mit sich. Daher konnte sich der FLA damals nicht durchsetzen.

² Bereits 1970 stellte Rumar gerade diesen Kompromiss zwischen bestmöglicher Ausleuchtung und der Entblendung anderer in Frage [Ruma70]. Er untersuchte später, welchen Einfluss unterschiedliche Intensitäten des Fernlichtes auf die Blendung haben [Ruma01a]. Erstaunlich ist, dass sich bei einer Begegnung zweier Fahrzeuge mit je eingeschaltetem Fernlicht für beide Fahrer im Mittel höhere Erkennbarkeitsentfernungen ergeben.

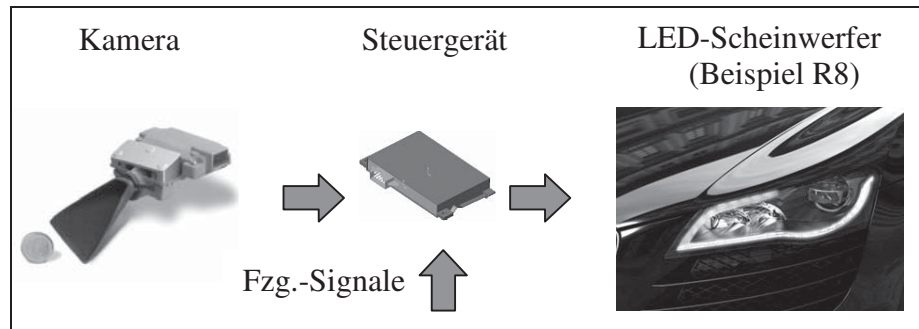


Abbildung 1 Funktionsprinzip eines blendfreien LED-Fernlichtes (Matrix-Beam)

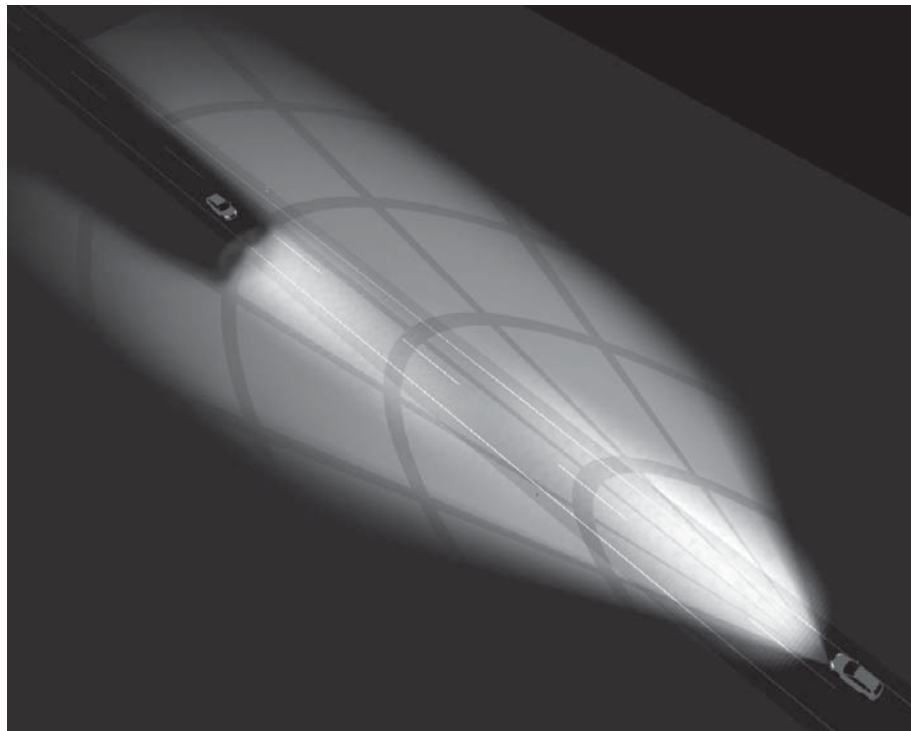


Abbildung 2 Visualisierung des blendfreien LED-Fernlichtes aus der Vogelperspektive

Mit der LED-Technologie gibt es nun eine reelle Chance, das blendfreie Fernlicht ohne Blenden oder ähnliche Licht subtrahierende Methoden sinnvoll umzusetzen. Für die LED als Lichtquelle bietet sich nun mit dem blendfreien LED-Fernlicht (Matrix-Beam) die Möglichkeit, sich von ihrer Rolle als reine Substitutionslichtquelle mit Designvorteilen und sich auch von herkömmlichen Lichtquellen durch eine technisch einzigartige Lösung abzuheben.

2 Aufgabenstellung

2.1 Hintergrund

Das blendfreie LED-Fernlicht, Matrix-Beam, beschreibt ein automobiles Scheinwerfersystem, das in der konsequenten Weiterentwicklung des Fernlichtassistenten seinen Ursprung hat. Seine wesentlichen Bestandteile sind:

- LED-Scheinwerfer,
- Kamerasensorik und
- Ansteuerelektronik.

Die Lichtverteilung des LED-Scheinwerfers ist in Lichtsegmente unterteilt. Jedes Lichtsegment wird von einer oder mehreren LEDs ausgeleuchtet, die wiederum individuell ansteuerbar sind.

Die Kamerasensorik detektiert Verkehrsteilnehmer, die entblendet werden sollen, und leitet die Position dieser Objekte an die Ansteuerelektronik weiter.

Die Ansteuerelektronik vergleicht diese übermittelte Position der erkannten Objekte mit der der Lichtsegmente. Sie schaltet gezielt nur die LEDs aus, in deren Lichtsegmenten sich Objekte befinden und so blenden würden. Die restlichen Lichtsegmente des Fernlichts bleiben dem Fahrer erhalten und erhöhen so dessen Sicht ohne Blendung anderer.

2.2 Ziel dieser Arbeit

Durch Bauraum, Thermomanagement und Designanforderungen ist die Anzahl der LEDs und so auch die der Lichtsegmente eines blendfreien LED-Fernlichtes (Matrix-Beam) begrenzt. Ebenso ist die Wirkung des Systems auf den Fahrer und andere Verkehrsteilnehmer unbekannt.

Es soll erarbeitet werden, inwiefern sich die Anzahl der Lichtsegmente auf den Nutzungsgrad eines Matrix-Beam-Scheinwerfers auswirkt. Dazu muss zunächst der Nutzungsgrad eines solchen Systems definiert werden. Zudem sollen notwendige Sicherheitsbereiche im Entblendungsbereich quantifiziert werden.

Die Funktion Matrix-Beam wird in einem Versuchsträger umgesetzt. Dies hat zwei Gründe. Zum einen wird damit die Machbarkeit einer solchen Funktion geklärt. Zum anderen wird die Wirkung von Matrix-Beam in psychophysiologischen Probandenstudien untersucht.

2.3 Überblick über die Arbeit

Zunächst wird mittels einer Unfallanalyse auf das Potenzial, bei Nacht unter Tageslichtbedingungen fahren zu können, eingegangen. Diese Potenzialabschätzung dient gleichzeitig als Motivation, blendfreie Fernlichtsysteme zu entwickeln.

Im nächsten Kapitel wird der Stand der Technik aufgezeigt. Darin enthalten sind aktuelle LED-Scheinwerfersysteme, weitere Möglichkeiten, mit denen ein blendfreies Fernlicht umgesetzt werden kann, und eine Betrachtung des aktuellen wissenschaftlichen Standes.

Im fünften Kapitel wird der Gesamtaufbau des Versuchsträgers „Nanolux“ beschrieben. Dieser wurde im Rahmen des gleichnamigen Verbundprojektes des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) mit einem Matrix-Beam-Scheinwerfer ausgestattet. Zudem wird auf Herausforderungen und neue Möglichkeiten eingegangen, die durch die Interaktion zwischen Scheinwerfer und Kamera entstehen.

Die in dem Versuchsträger applizierte Kamera dient zur Erstellung einer Verkehrsraumanalyse (siehe Kapitel 6). Die Verkehrsraumanalyse ergänzt die vorangegangene Verkehrsraummodellierung mit für Deutschland typischen Verkehrs- und Straßengeometriebedingungen um die reale Komponente.

Basierend auf der Verkehrsraummodellierung wird in Kapitel 7 ein Computerprogramm zur Untersuchung des Nutzungsgrades verschiedener Fernlichtunterteilungen entwickelt und angewendet. Verursacht durch die Eigenschaften des Gesamtsystems ist es notwendig, Lichtsegmente nicht nur anhand ihrer Beleuchtungsstärke anzusteuern. Die Lichtsegmente müssen daher um sogenannte Sicherheitsbereiche ergänzt werden, die die Eigenschaften des Gesamtsystems berücksichtigen und so eine sichere Entblendung gewährleisten. Es gibt sowohl statische als auch dynamische Sicherheitsbereiche, deren Größen an dieser Stelle bestimmt werden. Zudem werden die Auswirkungen der statischen Sicherheitsbereiche und die der Berücksichtigung des Parallaxenfehlers auf den Nutzungsgrad aufgezeigt. Abschließend wird die Definition sowie das Bewertungsverfahren zur Erlangung des Nutzungsgrads kritisch betrachtet.

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse zweier psychophysiologischer Untersuchungen vorgestellt. In der ersten wird die Auswirkung der höheren Farbtemperatur der LED auf die damit erwartungsgemäß erhöhte psychologische Blendung ermittelt. Mit diesen Ergebnissen werden Aussagen für notwendige Abblenddistanzen bzw. Detektionsentfernungen mit LED-Systemen getroffen. In der zweiten werden tatsächliche Erkennbarkeitsentfernungen in Begegnungssituationen zwischen konventionellen und blendfreien Systemen evaluiert.

Im neunten Kapitel wird auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse eine Abschätzung des Netto-Sicherheitsgewinnes unter Berücksichtigung der Risikokompensation vorgenommen. Im letzten operativen Kapitel wird daraufhin die Arbeit mit der Zusammenfassung sowie mit dem Ausblick abgeschlossen.

3 Unfallanalyse: Potenzial unter idealen Lichtbedingungen

Es gibt viele Einflussfaktoren bei Unfällen: überhöhte Geschwindigkeit, Müdigkeit, Alkohol und Drogen, Sichtbedingungen oder Ablenkung, um nur einige zu nennen. Bei vielen Unfällen spielen gleichzeitig mehrere Einflussfaktoren eine Rolle. Das erschwert es, den Anteil der Unfälle herauszuarbeiten, die durch schlechte Sicht bei Dunkelheit oder durch Blendung bedingt sind. Daher kann ohne weiteres die folgende Frage nicht beantwortet werden:

- Wie viele Unfälle können mit einem blendfreien Fernlicht verhindert werden?

Die folgende Frage, die Ähnlichkeiten mit der ersten hat und daher weiterhilft, kann jedoch erörtert werden:

- Wie viele Unfälle könnten vermieden werden, wenn nachts unter Tageslichtbedingungen gefahren werden könnte?

Mit einem blendfreien Fernlicht können zwar keine Tageslichtbedingungen hergestellt werden, aber dennoch wird die Sicht nachts erhöht. Im Folgenden soll gezeigt werden, welchen Einfluss Tageslichtverhältnisse auf das Unfallgeschehen in der Nacht hätten. Mit Hilfe dessen werden die Chancen für ein blendfreies Fernlicht aufgezeigt.

Ideale Lichtbedingungen

Das ideale System, das nachts die Sicht perfektioniert, ist ein System, das jedem Verkehrsteilnehmer Sichtverhältnisse wie am Tag ermöglicht. Eine durchgängige Straßenbeleuchtung auf allen Straßen wäre ein Weg dahin. Untersuchungen haben gezeigt, dass dadurch theoretisch 80 % der Nachtunfälle vermieden werden. In der Praxis reduzieren sich diese aber nur um 30 % [Pete06]. Ursache dafür ist die Risikoüberkompensation, die sich in einer Geschwindigkeitserhöhung und in einer gleichzeitigen Steigerung der Verkehrsdichte äußert.

3.1 Datengrundlage

Die GIDAS³-Unfalldatenbank beinhaltet Unfälle mit Personenschäden der Land- und Stadtkreise Hannover ab 1985 und Dresden seit 1999. Tenzer schlüsselte 22.944 Unfälle mit einem MAIS⁴ von eins bis sechs nach Unfalltyp und Unfallzeit auf [Tenz07], was als Grundlage der folgenden Abschätzung dient. Bei den tödlich verunglückten Personen wird die 30-Tage Regel angewendet⁵.

³ GIDAS: German In-Depth Accident Study (Unfalldatenbank).

⁴ MAIS: Maximum Abbreviated Injury Scale; Skala reicht von 0 bis 6. 1 - einfacher Knochenbruch, 6 – tödlich (siehe Tabelle 33 auf Seite 149).

⁵ 30-Tage Regel: Diese besagt, dass schwer verletzte Personen, die nicht innerhalb der ersten 30 Tage nach dem Unfall sterben, nicht infolge des Unfalls gestorben sind.

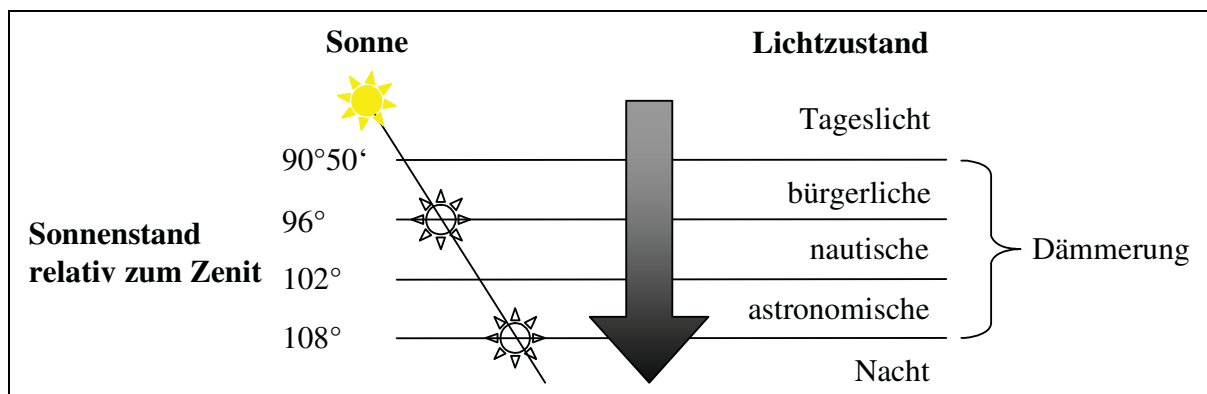


Abbildung 3 Dämmerungsarten (schematische Darstellung)

Zur Einteilung der Unfälle in verschiedene Tageszeiten werden der Beginn der bürgerlichen und das Ende der astronomischen Dämmerung herangezogen [Bock87] (siehe Abbildung 3). Die Aufteilung in innerörtliche und außerörtliche Unfälle je Tageszeit kann Tabelle 1 weiter unten entnommen werden. Dabei geschehen 70,5 % aller Unfälle innerorts und 29,5 % außerorts.

Zur Einbeziehung des Verkehrsaufkommens werden stündlich aufgelöste Verkehrsdaten von über 200 bayrischen Zählstellen auf Autobahnen, Bundes-, Staats- und Kreisstraßen im Juni 2007 und Dezember 2006 herangezogen (siehe Abbildung 4) [ADB07]. Das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen (DTV) dieser Zählstellen Bayerns mit ca. 50.700⁶ Fahrzeugen auf Autobahnen ist vergleichbar mit dem DTV Gesamtdeutschlands mit 49.400 Kfz pro Tag von 2004. Wird die Verkehrssteigerung der letzten Jahrzehnte berücksichtigt (vgl. [VIZ06], [ADB05]), so liegt nur eine geringe Abweichung des bayrischen Verkehrsaufkommens zu dem durchschnittlich erwarteten in Gesamtdeutschland 2007 vor. Das erlaubt es, die stündlich aufgelösten Zählstellendaten aus Bayern, die für Gesamtdeutschland nicht zu erhalten sind, auf das Verkehrsgeschehen in Gesamtdeutschland zu übertragen. Im Weiteren werden die Unfalldaten aus Hannover und Dresden mit den Verkehrsdaten aus Bayern zusammengefasst.

Bei der Unterteilung dieser Daten nach Verkehrsaufkommen je Tageszeit zeigt sich, dass sich 12,4 % des gesamten Verkehrsaufkommens in der Nacht, 16,2 % bei Dämmerung und 71,4 % am Tage abspielen (siehe Tabelle 1). Besonders nachts, wenn die Sicht beeinträchtigt ist, steigen das Unfallrisiko und auch die Unfallschwere deutlich an [Tenz06]. Wenn die außerörtlichen Unfälle bei Tag und Nacht unter Berücksichtigung des niedrigeren Verkehrsaufkommens bei Nacht verglichen werden, so ergibt das eine erhöhte Unfallgefahr mit einem Faktor von 2,62.

⁶ Mittelwert Juni 2007 und Dezember 2006.

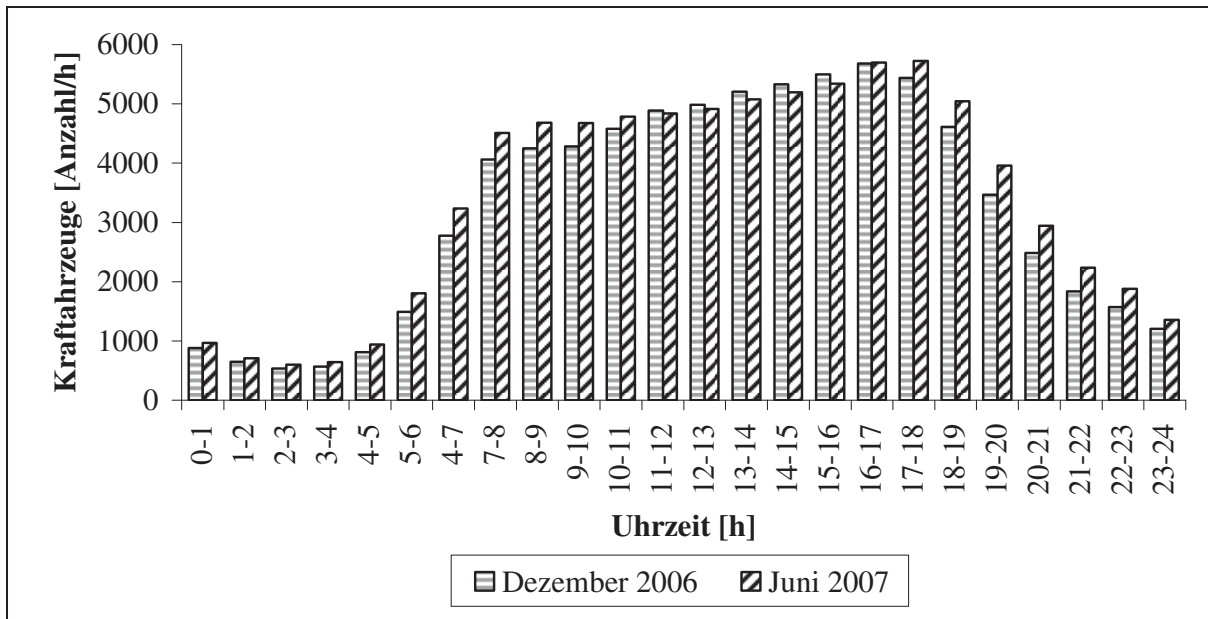


Abbildung 4 Durchschnittliches Verkehrsaufkommen pro Stunde in Bayern im Juni 2007 und Dezember 2006; das Verkehrsaufkommen der verschiedenen Straßenklassen ist zusammengefasst [ABD07].

Tabelle 1 Verhältnis der Unfalldaten nach Tenzer [Tenz07] von Unfallort und Unfallzeitpunkt; Verkehrsdichte berechnet nach bayrischen Zählstellendaten (vgl. Abbildung 4)

	Tag	Dämmerung	Nacht	Gesamt
Unfälle innerorts	72,6 %	7,1 %	20,3 %	70,5 %
Unfälle außerorts	64,5 %	8,2 %	27,3 %	29,5 %
Verkehrsaufkommen	71,4 %	16,2 %	12,4 %	100 %

3.2 Abschätzungsverfahren

Als Grundlage für das hier verwendete Abschätzungsverfahren dient die Tatsache, dass der Unfalltyp „Abkommen von der Straße“ unabhängig von Lichtverhältnissen ist [Sull02]. Sullivan kumulierte Unfälle zwischen 17 Uhr und 18 Uhr neun Wochen vor und nach der Zeitumstellung über elf Jahre hinweg. Hierbei ereignen sich die Unfälle in den neun Wochen vor der Zeitumstellung unter Tageslichtverhältnissen. Die Unfälle nach der Zeitumstellung geschehen in dunkleren Verhältnissen siehe (Abbildung 5).

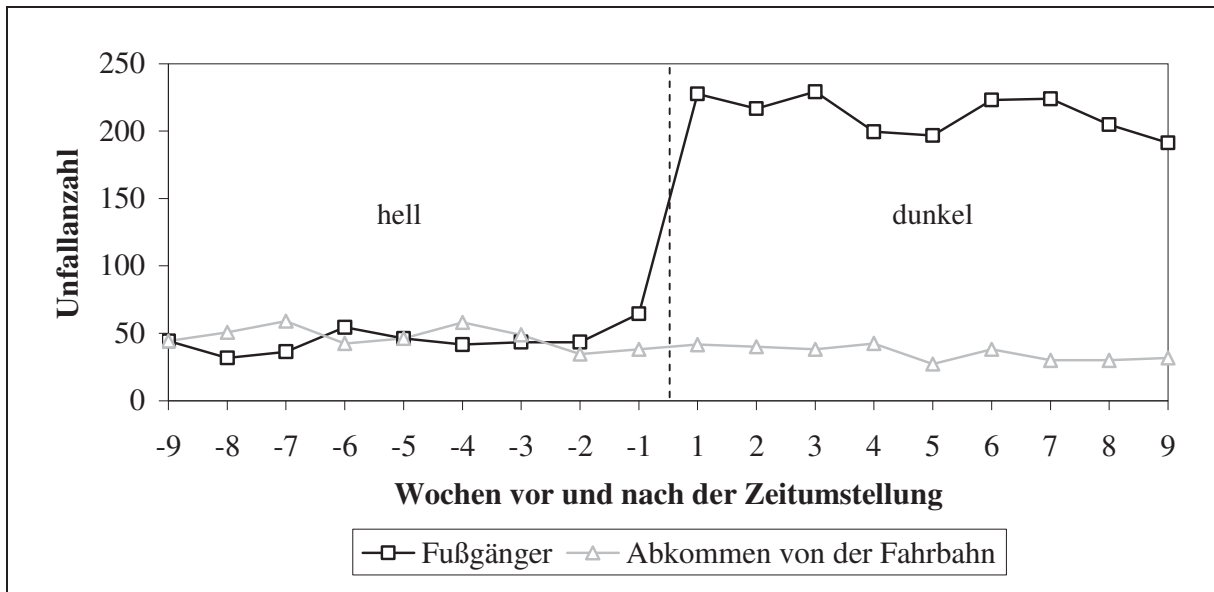


Abbildung 5 Unfallanalyse nach Sullivan [Sull02]; Grundlage: Unfalldatenbank Fatality Analysis Reporting System (FARS) der National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)

In dieser Untersuchung wird der Lichteinfluss für verschiedene Unfalltypen evaluiert. Dabei werden die Verkehrsdichte sowie alle anderen Einflussfaktoren konstant gehalten, da es sich stets um den gleichen Feierabendverkehr handelt. Auch der Müdigkeitseinfluss aufgrund der Zeitumstellung ist mit nur einer Stunde vernachlässigbar und wirkt sich höchstens innerhalb der ersten Woche noch aus.

In Abbildung 5 ist die Invarianz des Unfalltyps „Abkommen“ (von der Straße) gegenüber Lichtverhältnissen zu erkennen. Durch diese Lichtunabhängigkeit und unter der Annahme, dass sich dieser Unfalltyp proportional zum Verkehrsaufkommen verhält, ergibt sich der in Abbildung 6 folgende Ansatz.

Über die Unfallanzahl $U_{\text{tagsüber}}(\text{Abkommen})$ des Unfalltyps „Abkommen“ aus der GIDAS-Datenbank wird unter Berücksichtigung der gesunkenen Verkehrsdichte auf eine erwartete Unfallanzahl nachts $E_{\text{VKD}}(\text{Abkommen})$ geschlossen (siehe Formel 3.1). Der Faktor $F_{\text{Verkehrsdichte}}$ beschreibt dabei, wie stark die Verkehrsdichte sinkt. Dieser wird aus den bayrischen Zählstellendaten gewonnen und beträgt 0,174 (vgl. Abbildung 6).

$$E_{\text{VKD}}(\text{Abkommen}) = U_{\text{tagsüber}}(\text{Abkommen}) \cdot F_{\text{Verkehrsdichte}} \quad (3.1)$$

Dieser Erwartungswert $E_{\text{VKD}}(\text{Abkommen})$ enthält nur Unfälle, die aufgrund des geringeren Verkehrsaufkommens bei Nacht zu erwarten sind. Allerdings steigt zur Nacht hin der Einfluss vieler Unfallursachen wie z.B. der Müdigkeit und Drogen an. Der Unterschied zur tatsächlichen Unfallanzahl nachts lässt sich dadurch erklären. Im Gegensatz zur Untersuchung von Sullivan haben sich hier nicht nur die Lichtverhältnisse geändert, sondern neben der Verkehrsdichte, der hier bereits Rechnung getragen worden ist, auch alle anderen Einflüsse.

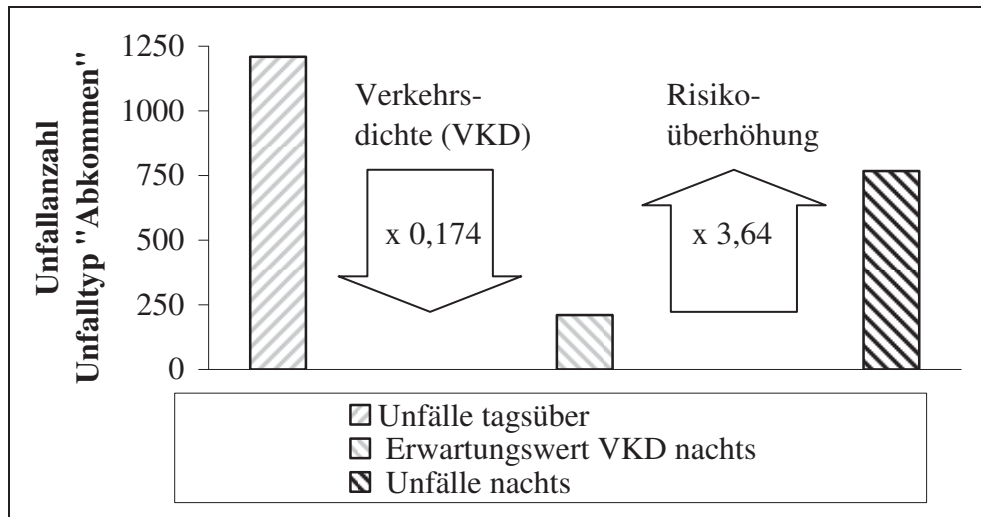


Abbildung 6 Berechnung des Risiko-Überhöhungsfaktors anhand des Unfalltyps „Abkommen“ (von der Straße außerorts)⁷

Der Risikoüberhöhungsfaktor $F_{\text{Risikoüberhöhung}}(\text{Abkommen})$ errechnet sich aus dem Quotienten von den tatsächlichen $U_{\text{nachts}}(\text{Abkommen})$ und den erwarteten Unfällen $E_{\text{VKD}}(\text{Abkommen})$ nachts unter Berücksichtigung der Verkehrsdichte und beträgt 3,64.

$$F_{\text{Risikoüberhöhung}}(\text{Abkommen}) = \frac{U_{\text{nachts}}(\text{Abkommen})}{E_{\text{VKD}}(\text{Abkommen})} = 3,64 \quad (3.2)$$

Dieser Faktor beschreibt die Änderung aller anderen Einflussfaktoren von Tag zu Nacht außer der des Lichts und des Verkehrsaufkommens.

$$S_{\text{nachts}}(\text{Unfalltyp}) = U_{\text{tagsüber}}(\text{Unfalltyp}) \cdot F_{\text{Verkehrsdichte}} \cdot F_{\text{Risikoüberhöhung}}(\text{Abkommen}) \quad (3.3)$$

Unter den zwei nachfolgenden Annahmen darf Formel 3.3 auf andere Unfalltypen außerorts angewendet werden. Mit ihr kann berechnet werden, wie viele Unfälle nachts unter Tageslichtverhältnissen geschehen würden. Der erhaltene Schätzwert S_{nachts} wird schließlich mit der jeweiligen tatsächlichen Unfallanzahl U_{nachts} verglichen (siehe Formel 3.4).

$$\text{Veränderung}(\text{Unfalltyp}) = \frac{S_{\text{nachts}}(\text{Unfalltyp}) - U_{\text{nachts}}(\text{Unfalltyp})}{U_{\text{nachts}}(\text{Unfalltyp})} \quad (3.4)$$

- Annahme 1: Jeder Unfalltyp verhält sich proportional zur Verkehrsdichte.
- Annahme 2: Jeder Unfalltyp ist mit dem gleichen Faktor $F_{\text{Risikoüberhöhung}}$ behaftet.

⁷ Basis dafür ist eine weitere Aufschlüsselung der ursprünglichen Daten von [Tenz07] durch [Zobe08] und die bayrischen Zählstellendaten (siehe Abbildung 4).

3.3 Ergebnisse

Bei der Anwendung der Formeln 3.3 und 3.4 auf andere Unfalltypen der GIDAS-Datenbank außerorts ergibt sich in Abbildung 7 folgendes Ergebnis: Zu erkennen ist, dass bei den Unfalltypen „Kreuzen/Einbiegen“, „Anfahrend/Stehend“, „gleiche Richtung“ sowie „Auffahrunfälle“ laut dieser Abschätzung mehr Unfälle nachts unter Tageslichtbedingungen geschehen würden, als sie sich tatsächlich in Dunkelheit ereignen. Eine deutliche Verbesserung wird hingegen gerade bei „Fußgänger“ und „Hindernis auf Straße“ erwartet. Die Unfallvermeidung beziffert sich hier auf ca. 55 % bzw. 72 % bei Hindernissen! Tabelle 2 fasst die einzelnen Ergebnisse zusammen. Es bilden sich somit zwei Klassen von Unfalltypen. Die erste besitzt einen höheren Schätzwert nachts als die zugehörige und tatsächliche Unfallanzahl nachts, was eine Verschlechterung darstellt. Bei der zweiten Klasse, deren Unfalltypen in Tabelle 2 grau hinterlegt sind, ist es umgekehrt. Sonstige Unfälle werden hier nicht weiter betrachtet.

Bei der ersten Klasse von Unfalltypen fällt auf, dass sich hier unter Tageslichtbedingungen bei Nacht eine deutliche Verschlechterung einstellen würde. Zudem handelt es sich bei diesen um Unfälle mit nachts beleuchteten Unfallgegnern. Bei Tageslicht sind diese Unfallgegner jedoch wiederum nicht bzw. nur schlecht im Gegensatz zur Nacht beleuchtet. Dadurch sinkt gerade bei Tageslicht deren Kontrast zur Umgebung und so auch deren Wahrnehmbarkeit. Dies spiegelt sich letztendlich in höheren Unfallzahlen wider.

Paradoxerweise ist es nachts unwahrscheinlicher in einen solchen Unfalltyp verwickelt zu werden. Nachts ist mit der Beleuchtung ein höherer Kontrast zur Umgebung und somit eine deutlich bessere Erkennbarkeit gewährleistet. Dies unterstreicht auch die Wichtigkeit der Erkennung tagsüber und ist somit das Argument für Tagfahrleuchten (DRL).

Tabelle 2 Potenzialabschätzung außerorts, nachts unter Tageslichtbedingungen; eine positive Veränderung bedeutet eine erwartete Zunahme der Unfallzahlen, eine negative einen Rückgang der Unfallanzahl (grau) (siehe Formel 3.4.).

Unfalltyp	genaue Bezeichnung	Veränderung
sonstige	sonstige Unfälle	- 2,6 %
Hindernis auf Straße	Kollisionen mit einem Hindernis auf der Straße	- 55,5 %
Fußgänger	Fußgängerunfälle	- 72,1 %
gleiche Richtung	Unfälle zwischen Fahrzeugen in gleicher Fahr- richtung	+ 174,6 %
Entgegenkommende	Unfälle zwischen entgegenkomm. Fahrzeugen	+ 76,4 %
Einbiegen/Kreuzen	Unfälle beim Einbiegen oder Kreuzen	+ 287,5 %
Anfahrend/Stehend	Unfälle mit stehenden und anfahrenden Fahrzeugen	+ 86,3 %
Auffahrunfälle	Auffahren	+ 88,2 %
Abkommen	Abkommen von der Fahrbahn	+/- 0 %

Bei der zweiten Klasse mit Fußgängerunfällen und Hindernissen handelt es sich hingegen stets um nachts unbeleuchtete Objekte, deren Erkennbarkeit unter der Dunkelheit leidet. Bei diesen ist ein großes Potenzial vorhanden. Als Datengrundlage dienen hier Unfälle mit einem MAIS-Wert von eins und mehr. Dadurch werden Unfälle mit Blechschäden und mit nur leichten Verletzungen, z.B. ein typischer Wildunfall, nicht berücksichtigt. Dies führt dazu, dass gerade diese Unfälle in dieser Erhebung unterrepräsentiert sind (vgl. Abbildung 7).

Tageslichtverhältnisse können mit einem blendfreien Fernlicht nicht erreicht werden. Nach dieser Abschätzung mit den gefundenen Nebenwirkungen der Kontrastverringerung für die erste „beleuchtete“ Unfallklasse sind Tageslichtverhältnisse aber auch nicht zielführend! Das blendfreie Fernlicht erhöht hingegen die Erkennbarkeit unbeleuchteter Fußgänger und das, ohne (wie unter Tageslichtverhältnissen) den Kontrast für beleuchtete Objekte zu verschlechtern, da diese entblendet werden.

Erhebung von Unfalldaten hinsichtlich Blendung

Besonders für die Betrachtung eines blendfreien Fernlichtes ist es interessant, wie viele Unfälle durch Blendung verursacht werden. Diese könnten nahezu vollständig vermieden werden. Jedoch nur bei sechs dieser über 20.000 Unfälle wird Blendung als Unfallursache angegeben.

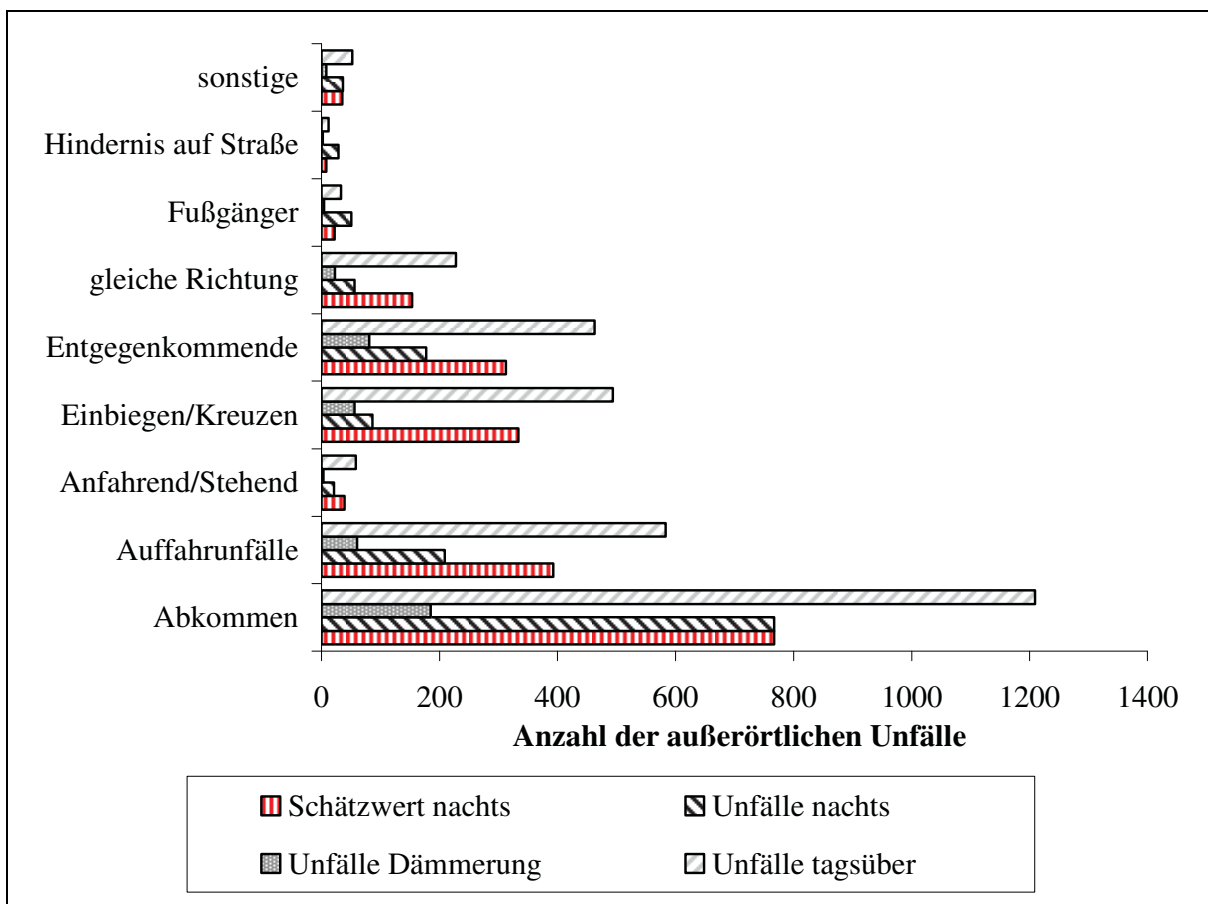


Abbildung 7 Gesamtergebnis der Potenzialabschätzung außerorts, nachts unter Tageslichtbedingungen; Datengrundlage von [Zobe08]; Erklärung der Unfallarten siehe Tabelle 2

Ursachen können dafür sein, dass zum einen das blendende Fahrzeug nicht unbedingt in den Unfall verwickelt sein muss. Zum anderen wird in einigen Fällen eine Aussage eines scheinbaren Unfallverursachers, dass Blendung durch einen Dritten Schuld gewesen sei, als Schutzbehauptung vom Polizeibeamten verworfen und taucht auch folglich nicht im Polizeibericht auf. Das macht es nahezu unmöglich, durch Blendung bedingte Unfälle herauszuheben [Tenz07].

4 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird zunächst auf die aktuelle Entwicklung bei Scheinwerfern eingegangen. Dabei gilt die Aufmerksamkeit hauptsächlich LED-Systemen. Es werden verschiedene Realisierungsmöglichkeiten eines blendfreien Fernlichtes und der aktuelle wissenschaftliche Stand der automobilen Lichttechnik hinsichtlich Erkennbarkeitsentfernungen, Blendung und Fernlicht behandelt.

4.1 Scheinwerfer

Die LED-Entwicklung im Scheinwerfer weist vom ersten Tagfahrlicht im Audi A8 W12 im Jahr 2004 bis hin zum ersten Voll-LED-Scheinwerfer im R8 im Jahr 2008 eine enorme Geschwindigkeit auf. Die LED besticht dabei vor allem durch ihre große Designfreiheit. Jedoch führt die geringe Leuchtdichte der LEDs dazu, dass erste LED-Scheinwerfer nicht mit kleineren Reflektoren oder Linsen als bisherige Systeme auskommen [Hamm05].

4.1.1 Die LED im Scheinwerfer

Abbildung 8 zeigt den Aufbau einer Hochleistungs-LED mit Vorsatzoptik. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein wesentlicher Anteil des Bauraumes für die Kühlung der LEDs verwendet wird (Thermal Heatsink). Das Weißlicht der LEDs im Scheinwerfer wird in der Regel per Konversion erzeugt. Dabei wird auf eine blaue LED ein gelber Phosphor aufgebracht, der einen Teil des blauen Lichtes in langwelligere Strahlung konvertiert. Die Superposition des nicht absorbierten blauen LED-Lichtes mit dem konvertierten gelblichen Licht ergibt die Farbe weiß.

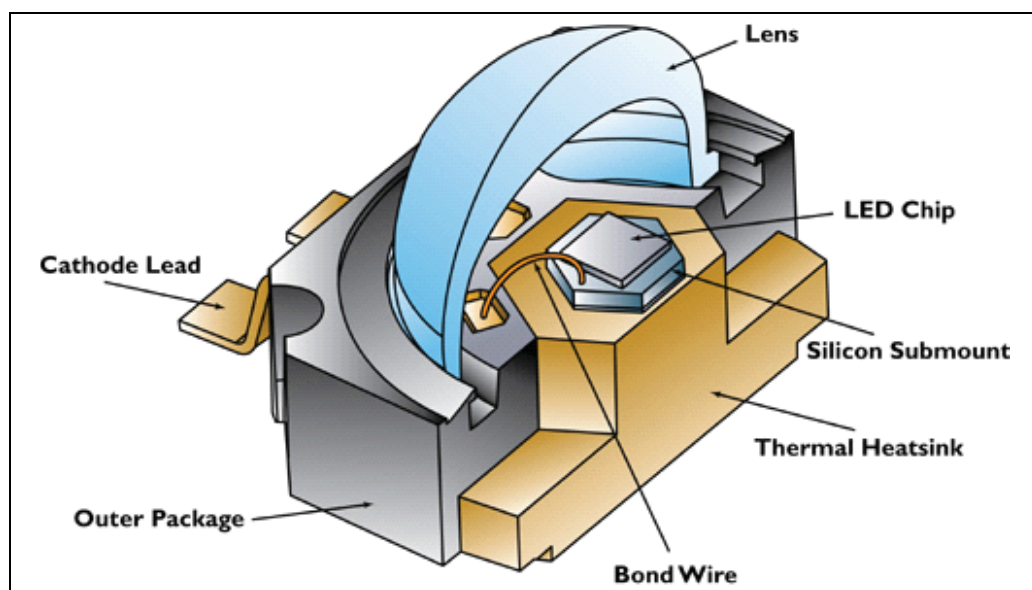


Abbildung 8 Aufbau einer Hochleistungs-LED (Philips Lumileds: Luxeon K2)[Phil08]

Die entscheidenden Vorteile der LED-Technologie sind:

- Designfreiheit aufgrund der kompakten Bauform,
- sehr lange Lebensdauer ($\gg 5000$ h),
- sehr geringer Wartungsaufwand und Robustheit,
- höherer Wirkungsgrad als Halogenlampen,
- UV-freie Strahlungsquelle,
- niedrige Betriebsspannung und
- problemlose Dimmung des Lichtstroms per Pulsweiten-Modulation.

Als nachteilig sind an LEDs folgende Eigenschaften zu sehen:

- geringe Leuchtdichte,
- sinkende Effizienz und Lebensdauer bei steigender Temperatur,
- sinkende Effizienz und Lebensdauer bei steigendem Strom,
- aufwendige elektronische Ansteuerung sowie
- gegenwärtig hohe Kosten.

LEDs sind, je nach Betriebsbedingungen, einer Degradation unterworfen. Damit kein Lichtquellenwechsel über die gesamte Fahrzeuglebensdauer notwendig ist, müssen die LEDs im Scheinwerfer eine Dauer von 5000 Stunden überstehen und nach dieser Zeit zumindest die gesetzlichen Minimalanforderungen noch erfüllen [Acke05]. Um das zu erreichen, müssen LEDs ausreichend aktiv oder passiv gekühlt werden.

Die Funktionalität von LED-Scheinwerfern reicht noch nicht an die von konventionellen Scheinwerfern mit Adaptive-Frontlighting-Systemen (AFS) heran. Gründe dafür sind gegenwärtig die Mehrkosten in Verbindung mit der LED und die Tatsache, dass die LED im Hochstrombetrieb 45 lm/W^8 noch nicht die Gasentladungslampe mit 91 lm/W (D2) eingeholt hat [Fles05]. Eine Halogenglühlampe H7 erreicht einen optischen Wirkungsgrad von 28 lm/W [Berl08] (siehe Abbildung 9). Dazu kommt die somit höhere Verlustwärme, wodurch zusätzlich thermische Herausforderungen gelöst werden müssen.

Als aktuelle Ein-Chip-Hochleistungs-LEDs sind die Diamond Dragon und die Luxeon Rebel zu nennen (siehe Abbildung 10). Die Diamond Dragon ist die hellste auf dem Markt verfügbare Einzelchip-LED. Durch ihre größeren Kantenlänge von $1,5 \text{ mm}$ wird eine höhere Bestromung von $1,4 \text{ A}$ ermöglicht. Die Luxeon Rebel besticht dagegen durch einen höheren optischen Wirkungsgrad. Ihr maximaler Betriebsstrom ist geringer und beträgt 1 A (siehe Tabelle 3). Die maximal erreichbare Effizienz von LEDs liegt nach früheren Schätzungen bei ungefähr 200 lm/W^9 [Acke07]. Die theoretische Obergrenze einer verlustfreien weißen LED liegt bei ca. 308 lm/W . Diese Obergrenze ist abhängig von der spektralen Abstrahlcharakteristik der jeweiligen LED und der spektralen Empfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ des menschlichen Auges [Koko03].

⁸ lm/W : Lumen pro Watt, beschreibt den optischen Wirkungsgrad von Lichtsystemen, hier der Lichtquelle. 4-Chip-LED der Fa. Lumileds, verbaut im Voll-LED-Scheinwerfer Audi R8, betrieben mit einem Strom von 1 A .

⁹ Die Effizienz von LEDs wird hier bei einem Strom von 350 mA und bei Raumtemperatur angegeben.



Abbildung 9 Halogenglühlampe Philips Premium H7 Lampe (links) [Phil09a], Gasentladungslampe Osram Xenarc D2 Cool Blue [Osra09a]

Im Rahmen des Nanolux-Projektes wird das Maximum unter der Berücksichtigung von wahrscheinlich zurückbleibenden Einzelverlusten auf 177 lm/W bei einem Strom von 350 mA und Raumtemperatur geschätzt [Stat08]. Abbildung 11 zeigt diese Abschätzung im Detail. Des Weiteren wurde im Nanolux-Projekt gerade die Linearität, d.h. gleichbleibende Effizienzen bei steigenden Strömen, unter anderem durch verschiedene Strominjektionswege verbessert. Daraus resultiert ein höherer Lichtstrom, der gerade bei begrenztem Bauraum zum Vorteil gereicht.

Tabelle 3 Aktuelle Ein-Chip-Hochleistungs-LEDs [Osra09b], [Phil09b]

LED	Luxeon Rebel	Diamond Dragon
Hersteller	Philips Lumileds Lighting Company	Osram Opto Semiconductor
Bezeichnung	LXML-PW 11	LW W5AP
Kantenlänge LED-Chip	1 mm	1,5 mm
Bestromung 1,4 A	-	280 lm bei 54 lm/W
Bestromung 1,0 A	236 lm mit 70 lm/W	210 lm mit 62 lm/W
Bestromung 0,35 A	105 lm mit 94 lm/W	88 lm mit 81 lm/W

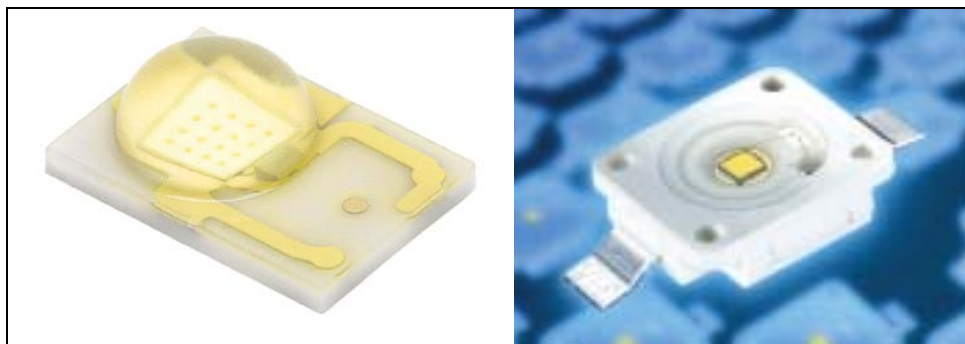


Abbildung 10 Hochleistungs-LEDs: Lumileds Luxeon Rebel (links) [Phil09b] und Osram OS Diamond Dragon [Osra09b]

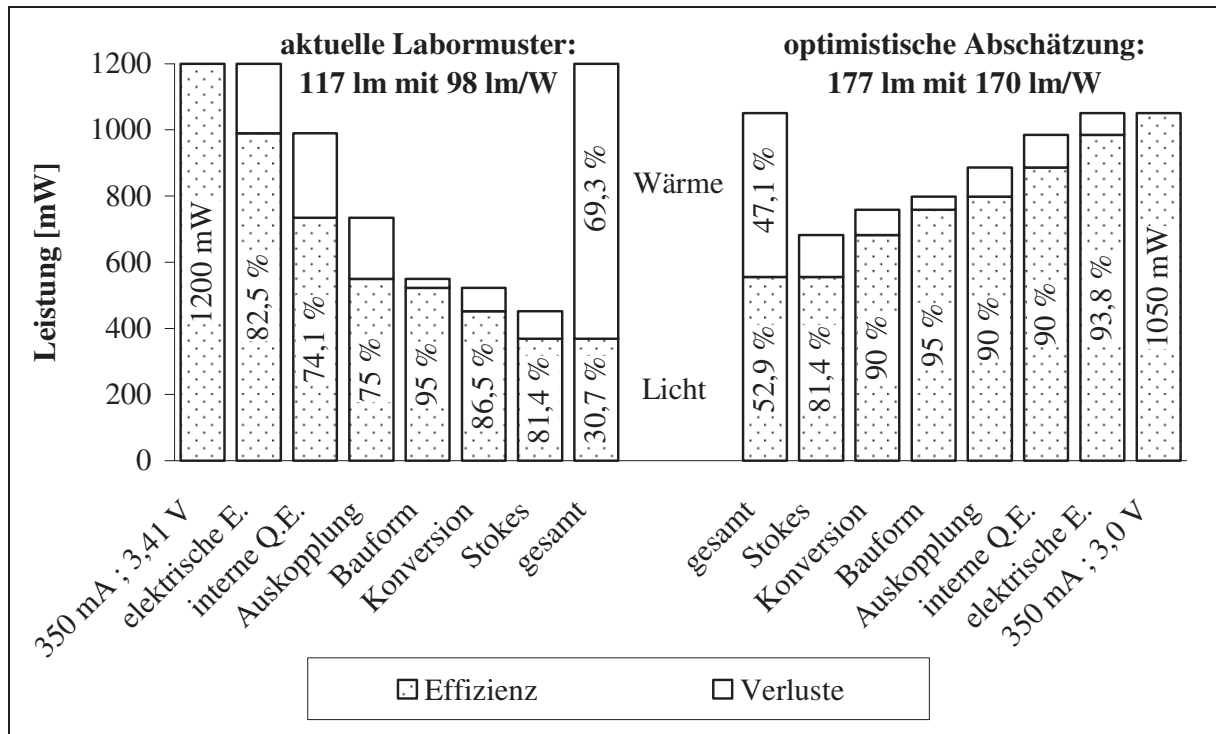


Abbildung 11 Effizienz eines 1-Watt-Labormusters und optimistische Leistungsgrenze für weiße LEDs [Stat08] (Osram OS); Q.E.: Quanteneffizienz

Das Gesamtfahrzeug betreffend können mehr als 73 % der Energie für Beleuchtung eingespart werden, wenn sämtliche Licht- und Beleuchtungsfunktionen in einem Fahrzeug mit zukünftigen LEDs von 2012 anstatt mit Halogenlampen umgesetzt werden [Huhn08]. Der Verbrauch wird sich dadurch von 618 W auf 168 W reduzieren und zu einem um 2,4 g pro 100 km verringerten CO₂-Ausstoß führen. Bereits heutzutage werden LEDs eingesetzt, um den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren. So benötigt ein LED-Tagfahrlicht nur 14 W pro Fahrzeug und ist als eine sinnvolle Alternative zu „Licht an“¹⁰ mit 204 W zu sehen.

Erkennung von Verkehrsschildern

Um die Erkennung roter, sicherheitsrelevanter Straßenverkehrsschilder zu gewährleisten, ist bei Gasentladungslampen für den Straßenverkehr regelungsseitig ein Mindestrotanteil vorgeschrieben [ECE-R99]. Bei Halogenlampen und bei weißen LEDs ist das nicht notwendig. Halogenlampen weisen als Planck'sche Strahler ohnehin einen sehr hohen Rotanteil auf (vgl. [Lemm04]). Sofern die Weißlichterzeugung durch die Farbmischung einer blauen LED in Kombination mit einem gelben Phosphor realisiert wird, ist die Farbwiedergabe im roten Spektralbereich aufgrund der breiten Abstrahlcharakteristik des gelben Phosphors sichergestellt.

¹⁰ „Licht an“ bedeutet Lichtdreheschalter auf Abblendlicht, dadurch sind Abblendlicht, Standlicht, Schlusslicht, Kennzeichenbeleuchtung und die Instrumentenbeleuchtung eingeschaltet.

4.1.2 Der LED-Scheinwerfer

Seit 2008 sind zwei Fahrzeuge mit LED-Scheinwerfern auf dem Markt zu erhalten: Der Lexus LS 600h und der Audi R8. Im Audi R8 handelt es sich um einen Voll-LED-Scheinwerfer. Der Lexus-Scheinwerfer stellt hingegen nur eine Hybrid-Lösung dar.

Der Hybrid-LED-Scheinwerfer im Lexus LS 600h

Der Lexus-Scheinwerfer verfügt über ein Halogen-Fernlicht und über ein schwenkbares LED-Projektionsmodul. Dieses ermöglicht ein mechanisches Kurvenlicht und somit eine AFS¹¹-Funktionalität [Wata07]. Die 20 LEDs sind in fünf LED-Modulen zusammengefasst und werden ausschließlich passiv gekühlt.

Die Passivkühlung hilft den Energieverbrauch im Scheinwerfer zu senken. Aber gleichzeitig ruft die Passivkühlung bei der Scheinwerferenteisung und -enttauung neue Herausforderungen hervor. Aufgrund der mangelnden Wärmestrahlung der LEDs nach vorne und der geringen Konvektion im Scheinwerfer fehlt benötigte Wärme an der Abschlusscheibe des Scheinwerfers. Koito stellte einen Ansatz vor, bei dem das Spritzwasser der Scheinwerferreinigungsanlage mit 50 % Frostschutzmittel gemischt wird. So kann eine Enteisung bis minus 3 °C gewährleistet werden [Inab08].

Der Voll-LED-Scheinwerfer im Audi R8

Im R8-LED-Scheinwerfer werden mit insgesamt 54 LEDs pro Scheinwerfer sämtliche Hauptlicht- und Signallichtfunktionen realisiert (siehe Abbildung 12). Die Kühlung sowie auch die Enteisung bis minus 40 °C des Scheinwerfers werden mit zwei Lüftern sichergestellt.

Das Abblendlichtmodul nimmt mit seinen insgesamt 14 LEDs eine Leistung von 49 W auf¹². Die LEDs sind in zwei 4er-LED-Module und in drei 2er-Module aufgeteilt. Die zwei 4er-LED-Module leuchten über einen unten und oben ausgeführten Freiformreflektor das Vorfeld aus. Der Bereich um die Hell-Dunkel-Grenze wird aus den drei von vorne gut sichtbaren 2er-LED-Modulen hinter der Projektionslinse erzeugt. Aufgrund der geringen Wärmeentwicklung und der geringen UV-Anteile im Spektrum der LED ist hier der Einsatz einer Kunststoffanstatt einer schweren Pressglaslinse möglich. Nachteilig ist die geringe Erkennbarkeitsentfernung bei Abblendlicht. Nur bis 52 m wird die Straße ausgeleuchtet, was nicht an der LED, sondern ausschließlich an der vorgeschriebenen Grundneigung von 1 %, verbunden mit der für Sportwagen typischen sehr niedrigen Anbauhöhe, liegt.

Das Fernlicht besteht aus acht LEDs und verbraucht eine Leistung von ca. 28 W. Die LEDs sind in zwei 4er-LED-Modulen zusammengefasst. Je ein 4er-LED-Modul leuchtet in einem Freiformreflektor.

¹¹ Adaptive Frontlighting System.

¹² Zum Vergleich eine H7-Lampe benötigt bei einer Betriebsspannung von 13,2 V eine Leistung von 68 W, eine Gasentladungslampe eine Leistung von 35 W.

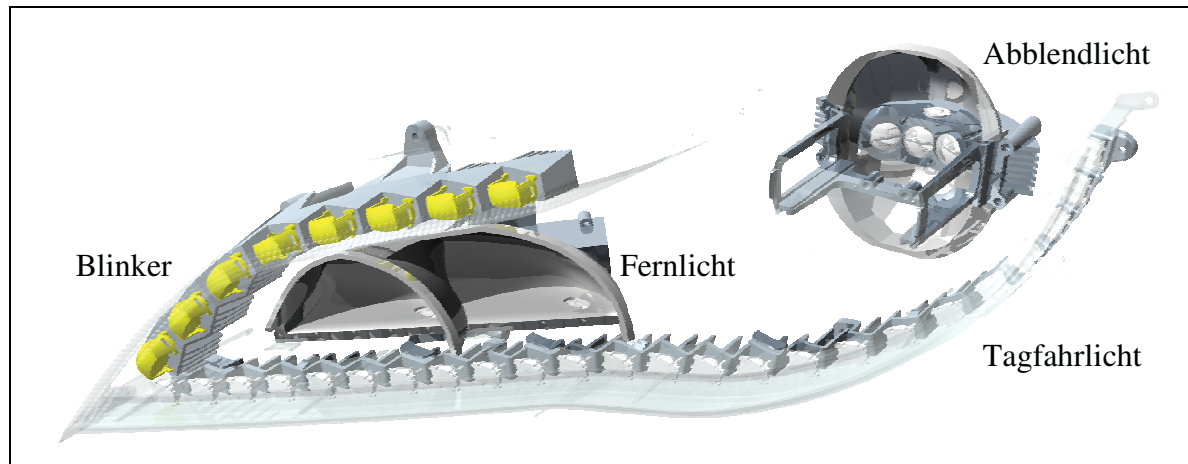


Abbildung 12

Aufbau des R8 LED-Scheinwerfers

4.2 Blendfreie Fernlichtsysteme

Blendfreie Fernlichtsysteme lösen den Zielkonflikt zwischen eigener Sicht und Blendung. Bereits in den 30er Jahren wurde ein erstes System angedacht, das dies ermöglichte.

4.2.1 Ältere Ansätze

Polarisationsansatz

Die wohl berühmteste und auch älteste Idee, die Sicht bei Nacht ohne Blendung zu erhöhen, ist der Polarisationsansatz. Dabei werden das Licht der Scheinwerfer in eine Richtung und die Windschutzscheiben mit Hilfe von Filtern polarisiert. Die Polarisationsfilter der Scheinwerfer und der Windschutzscheiben sind dabei senkrecht zueinander ausgerichtet, sodass kein direktes Licht der Scheinwerfer mehr in die Augen von Entgegenkommenden gelangt. Seit den 30ern beschäftigt sich die automobilen Lichttechnik bereits mit dieser Idee und deren Umsetzung (Christie, Jehu, Karlsson, Rumar in [Schw03]). So gut der Ansatz auch ist, birgt er gravierende Nachteile.

Durch die Polarisierung gehen mehr als 50 % des Scheinwerferlichtes verloren. Zudem vermindert die notwendige Polarisierung der Frontscheibe die Sicht um weitere 50 %. Um die eigene Sicht zu gewährleisten, wären somit viermal so helle Scheinwerfer notwendig. Diese helleren und stets aktivierten Fernscheinwerfer führten gerade bei Fußgängern und Radfahrern zu deutlich erhöhter Blendung.

Der Einführung des Polarisationsansatzes steht noch ein organisatorisches bzw. logistisches Problem entgegen. Würde nur ein Fahrzeug mit polarisiertem Fernlicht bewegt werden, so müssten die Windschutzscheiben aller Fahrzeuge mit einem Polarisationsfilter versehen werden.

Three Beam

Ein weiterer Ansatz kam Anfang der 70er mit dem „Three Beam“. Der Three Beam ist ein drittes Lichtbündel neben dem Abblend- und Fernlicht, das nur die eigene Fahrspur

ausleuchtet [Ade73]. Im Fall eines entgegenkommenden Fahrzeuges muss manuell das Fernlicht deaktiviert und der Three Beam aktiviert werden.

Aufgrund der manuellen Bedienung wurden zulassungsseitig Fehlbedienungen befürchtet. Diese hätten eine erhebliche Blendung des restlichen Verkehrs als Folge, woraufhin das System nicht erlaubt wurde.

Kontinuierliches Abblenden

Eine dem blendfreien Fernlicht verwandte Idee ist das kontinuierliche Abblenden des Fernlichtes [Schm79]. Beim Deaktivieren des Fernlichtes durch den Fernlichthebel wird dieses nicht hart ausgeschaltet, sondern kontinuierlich gedimmt.

Die Dimmggeschwindigkeit wird dabei durch eine fest vorgegebene erwartete Geschwindigkeit des Entgegenkommenden in Bezug auf die Blendbeleuchtungsstärke an dessen Auge berechnet. Die zulässige Blendbeleuchtungsstärke wird dabei nie überschritten. Dadurch verbessert sich die Sicht in größeren Distanzen beider Fahrzeuge.

Das kontinuierliche Abblenden ist zulassungsfähig. Allerdings waren die Kosten für die technische Umsetzung zum damaligen Zeitpunkt zu hoch und dem System wurde somit keine weitere Beachtung mehr geschenkt.

Pixellicht und aktives Licht

BMW stellte 2001 das Pixellicht vor, das auf einem DMD (Digital Micromirror Device) und auf einer äußerst leistungsstarken Lichtquelle beruht [Ende01]. Durch die individuelle Ansteuerung der 600 x 800 Pixel lässt sich das Lichtbild völlig frei gestalten (siehe Abbildung 13).

Roslak setzte diese Idee im Rahmen seiner Dissertation in einem System, genannt „Active Light/aktives Licht, um [Rosl05]. Das System erreicht einen hohen Kontrastwert von 1 : 100. Allerdings benötigt es aufgrund der unzureichenden Reflexionseigenschaften des DMDs eine 200 W starke Ultra-High-Pressure-Lampe (UHP).

Momentan steht einem Einsatz in der Serie der hohe Energieverbrauch zusammen mit der entstehenden Wärmeentwicklung entgegen. Durch DMDs mit besseren Reflexionseigenschaften sollte in Zukunft diese Herausforderung gelöst werden, sofern diese nicht zu hohe Mehrkosten mit sich bringen.

4.2.2 Aktuelle Konzepte

Der Vollständigkeit halber sei hier kurz der Fernlichtassistent erwähnt. Durch diesen wird erstmalig eine Kamerasensorik verwendet, um das Fern- und Abblendlicht automatisch zu schalten. Er stellt somit die Basis für die nachfolgenden Konzepte wie auch für das Pixellicht dar. Abbildung 13 zeigt eine Übersicht aktueller Konzepte. Das Abblendlicht verfügt in der Realität nach wie vor über einen Asymmetriezweig. Aus Darstellungsgründen wird er jedoch in dieser Abbildung nicht eingezeichnet.

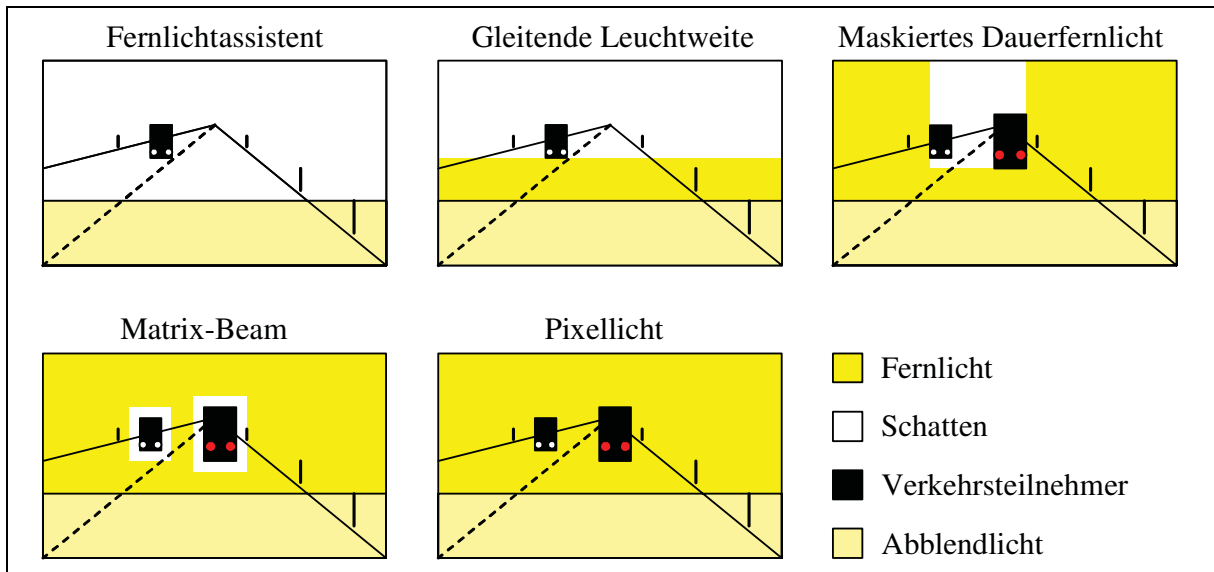


Abbildung 13 Übersicht verschiedener Konzepte mit blendfreiem Fernlicht; zum Vergleich sind zusätzlich der Fernlichtassistent und das Pixellicht ebenfalls beschrieben. Das Abblendlicht ist aus Gründen der Erklärbarkeit ohne Asymmetriezweig eingezeichnet.

Gleitende Leuchtweite

Die gleitende Leuchtweite (GLW) beschreibt ein Konzept, bei dem die Hell-Dunkel-Grenze vom Abblendlicht bis hin zum vollen Fernlicht kontinuierlich vertikal verschoben werden kann (siehe Abbildung 14). Kamerabasiert werden andere Verkehrsteilnehmer erkannt und die Stellung der Hell-Dunkel-Grenze so angepasst, dass diese sich unterhalb der Scheinwerfer von entgegenkommenden bzw. unterhalb der Heckleuchten von vorausfahrenden Fahrzeugen befindet.

Die gleitende Leuchtweite basiert auf einem Bi-Xenon-Projektionsmodul. Anstelle der Blende im Strahlengang, mit der hart zwischen Fernlicht und Abblendlicht umgeschaltet wird, wird eine Walze verwendet [Kalz07] (siehe Abbildung 15). Durch unterschiedliche Konturen auf der Mantelfläche dieser Walze und durch Rotieren derselbigen ändert sich je nach Stellung die Blendenform im Strahlengang.

Die niedrigste Position bei herannahendem Verkehr ist die Abblendlichtstellung, die dem Fahrer immer erhalten bleibt. Ursprünglich wurde dieses Walzen-Prinzip für die Erzeugung der AFS-Lichtverteilungen herangezogen [Hend01, Spru07].

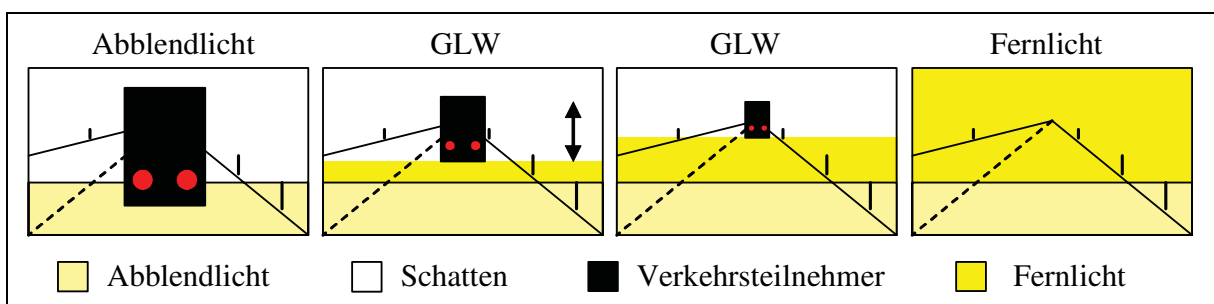


Abbildung 14 Ausleuchtstrategie gleitende Leuchtweite GLW

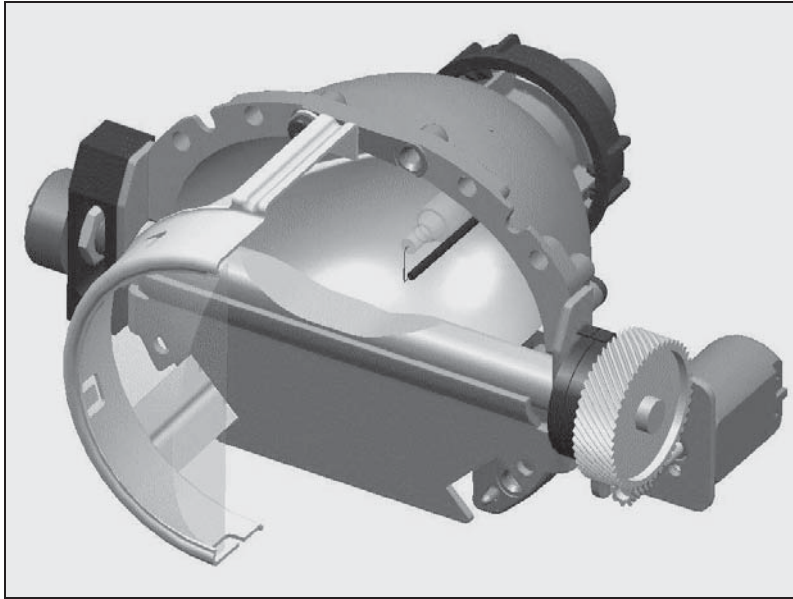


Abbildung 15 VarioX-Modul der Fa. Hella, ein Xenon-Projektionsmodul mit konturierter Walze als Blende [Koen07]

Das maskierte Dauerfernlicht

Das maskierte Dauerfernlicht kann inmitten seiner Lichtverteilung ein variables Schattenrechteck bilden (siehe Abbildung 13 und Abbildung 16). Kamerabasiert wird über alle erkannten Verkehrsteilnehmer ein gemeinsames Schattenrechteck gelegt. Das System stellt somit eine Erweiterung der gleitenden Leuchtweite dar, bei dem zusätzlich links und rechts von Objekten das Fernlicht von zumindest einem Scheinwerfer erhalten bleibt. Es kann nicht zwischen Verkehrsteilnehmer hindurch oder oberhalb dieser leuchten [Wegw08]. Das Abblendlicht dient wie bei allen blendfreien Fernlichtsystemen auch hier als Rückfallebene bei zu viel Verkehr. Es gibt zwei mögliche Konzepte, das maskierte Dauerfernlicht zu realisieren.

Die erste Möglichkeit beruht wie die gleitende Leuchtweite auf einem BiXenon-Projektionsmodul und einer Walze. Im Unterschied dazu besitzt die Walze hier zusätzlich eine vertikale Kante, die zu einer vertikalen Hell-Dunkel-Grenze in der Lichtverteilung führt. Die Walzen des linken und des rechten Scheinwerfers sind spiegelverkehrt ausgeführt. Das Schattenrechteck wird durch das Schwenken der Scheinwerfer nach außen variabel geöffnet (siehe Abbildung 16).

Es muss dabei auf eine besonders breite und lateral homogene Lichtverteilung im Vorfeld geachtet werden. Bei dem Schwenken wird das gesamte Xenon-Projektionsmodul bewegt. Dadurch verändert sich neben dem Fernlicht auch die Lichtverteilung des Abblendlichtes. Eine zu inhomogene Lichtverteilung kann gerade im Vorfeld zu erheblichen Irritationen des Fahrers führen. Zudem müssen in jedem Schwenkzustand die gesetzlichen Anforderungen an das Abblendlicht erfüllt werden (siehe [ECE-R123]). Ein Ausweg wäre das Abblendlicht und das Fernlicht aus verschiedenen Modulen zu generieren. Dies führt bei der konventionellen Scheinwerfertechnik mit Gasentladungslampen und Halogenlampen zu einem deutlich höheren Energieverbrauch und Kostenaufwand. Abgesehen davon muss für den Scheinwerfer mehr Bauraum zur Verfügung gestellt werden.

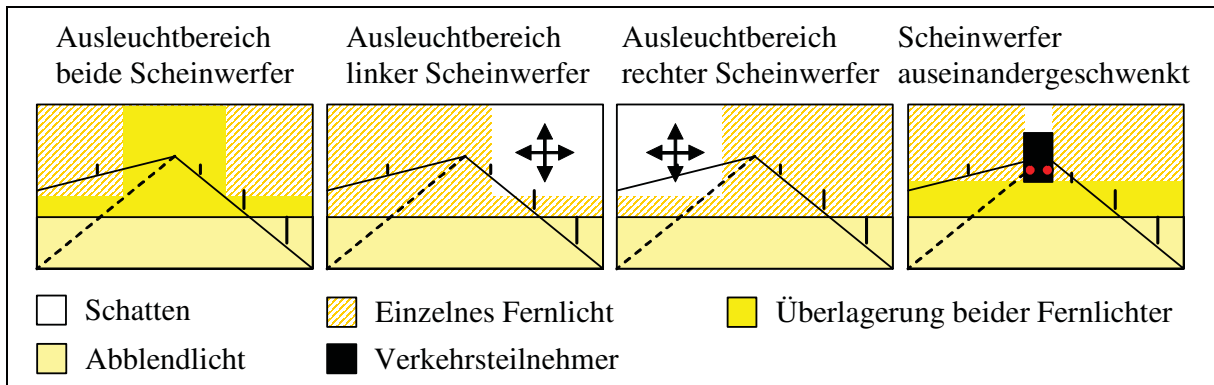


Abbildung 16 Ausleuchtstrategie maskiertes Dauerfernlicht

Die zweite und elegantere Möglichkeit besteht darin, das Projektionsmodul nicht zu schwenken. Stattdessen wird eine rechteckige Blende in den Strahlengang eingebracht. Abbildung 16 zeigt, wie dadurch ein Schattenrechteck - beim rechten Scheinwerfer von der Ecke links oben, beim linken Scheinwerfer von der Ecke rechts oben aus - aufgespannt wird. Um einen Entblendungsbereich zu erhalten, müssen sich die Schattenbereiche der beiden Scheinwerfer überlappen.

In beiden Fällen ist die Erzeugung des Schattenrechteckes als nachteilig anzusehen. In einem Entblendungszustand verbleibt links und rechts von Objekten je nur der Lichtstrom eines einzelnen Fernlichtes. An dieser Stelle sei angemerkt, dass für die vergleichenden Untersuchungen in Kapitel 7 bei maskiertem Dauerfernlicht auf die zweite Möglichkeit mit Blenden zurückgegriffen wird. Diese kommt ohne ein möglicherweise irritierendes Schwenken aus.

Matrix-Beam

Das blendfreie LED-Fernlicht Matrix-Beam ist unterteilt in mehrere Lichtsegmente. Die Lichtsegmente werden von LEDs ausgeleuchtet, die wiederum einzeln adressierbar sind. Kamerabasiert können die einzelnen LEDs bzw. die zugehörigen Fernlichtsegmente gezielt angesteuert werden. So können diskrete Bereiche inmitten der Fernlichtverteilung entblendet werden. Das Abblendlicht wird durch das Schalten der Fernlichtsegmente nicht beeinflusst.

Mit Matrix-Beam kann zwischen Verkehrsteilnehmer und theoretisch auch über diese geleuchtet werden. Allerdings bleibt bei der Entblendung eines Objektes ein Schattenrand zwischen Objekt und dem restlichen Fernlicht übrig (vgl. Abbildung 13). Aufgrund der diskreten und starren Fernlichtunterteilung in Segmente kann nicht wie mit der gleitenden Leuchtweite, dem maskierten Dauerfernlicht oder dem Pixellicht als Ideallösung exakt an den Objekten vorbeigeleuchtet werden.

Im Vergleich zu den anderen Systemen werden bei Matrix-Beam dunkle Bereiche nicht durch eine Abschattung per variabler Blende oder DMD erreicht. Unabhängig von der Blendenstellung bleibt deren Energieverbrauch konstant. Auch wenn nur Abblendlicht eingeschaltet ist, wird dennoch so viel Energie benötigt wie mit vollem Fernlicht. Eine LED-Lösung ist deutlich energieeffizienter: Dunkle Lichtsegmente tragen nicht zum Energieverbrauch bei, da die zugehörigen LEDs ausgeschaltet werden.

4.2.3 Bewertung von blendfreien Fernlichtsystemen

Die einzige bekannte Arbeit zur Bestimmung eines Nutzungsgrades bei blendfreiem Fernlicht stammt von Roslak [Rosl05]. Darin wurden verschiedene Ausleuchtstrategien des sogenannten aktiven Lichtes untersucht. Der Nutzungsgrad der Fernlichtsysteme wird durch die durchschnittliche Anzahl der Mikrospiegel berechnet, die während eines simulierten Begegnungsprozesses im Mittel aktiv sind. Diese werden durch die Anzahl aller Mikrospiegel geteilt. Als weitere Größen werden die zeitliche Konstanz und die Änderungsrate herangezogen.

Der simulierte Begegnungsprozess findet auf einer Geraden ohne Kuppen und Wannen statt. Entgegenkommende Fahrzeuge nähern sich auf einer mehrspurigen Straße mittig auf der jeweiligen Spur an. Dabei sind keine Spurwechsel vorgesehen. Roslak weist in seiner Arbeit auf diese Schwächen seiner Simulation hin. Als Fernlicht wird der Bereich oberhalb eines symmetrischen Abblendlichtes ohne Asymmetriezweig betrachtet. Das Abblendlicht trägt somit nicht zur Ermittlung des Nutzungsgrades bei. Die untersuchten Ausleuchtstrategien sind:

- Fernlichtassistent (8 %),
- spurweise Entblendung (91 %),
- Mittelentblendung (89 %) und
- individuelle Entblendung (92 %).

Im Detail wird herausgefunden, dass eine Veränderung der Verkehrsdichte sich auf den jeweiligen Nutzungsgrad auswirkt. Allerdings bleibt davon die Reihenfolge unter den Ausleuchtstrategien erhalten. Der Fernlichtassistent schneidet im Vergleich immer am schlechtesten und die individuelle Entblendung immer am besten ab.

Es handelt sich bei den untersuchten blendfreien Fernlichtsystemen teilweise um andere Systeme als die, die im obigen Abschnitt 4.2.2 beschrieben sind. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden ebenfalls der Fernlichtassistent und die individuelle Entblendung auf eine andere Weise bewertet. Dafür wird der Begriff des Nutzungsgrades in Kapitel 7 neu definiert. Die obigen Nutzungsgrade sind daher nicht direkt vergleichbar. Eine Umrechnung dieser Nutzungsgrade ist in Tabelle 10 auf Seite 81 zu finden.

4.3 Stand der Wissenschaft

4.3.1 Erkennbarkeitsentfernung

Um zu beschreiben, bis zu welcher Entfernung Objekte zu erkennen sind, werden häufig die zwei Begriffe Sichtweite und Reichweite verwendet. Allerdings sind Sichtweite und Reichweite irreführende Begriffe [Völk06]. Die Sichtweite ist eine meteorologische Bezeichnung. Mit Reichweite wird meist die Entfernung eines Fahrzeuges verbunden, die mit einer Tankfüllung zurückgelegt werden kann. Völker führt daher systematisch den Begriff der Erkennbarkeitsentfernung ein, der im Folgenden verwendet wird.

Anhalteweg und Erkennbarkeitsentfernung

Die Hell-Dunkel-Grenze des Abblendlichts trifft bei einer Grundneigung von -1 % und einer gängigen Anbauhöhe von 65 cm nach 65 m auf der Straße auf. Diese Entfernung der Fahrbahnausleuchtung ist nicht mit der Erkennbarkeitsentfernung zu verwechseln, welche deutlich geringer bei ca. 53 m liegt [Völk06]. Der Grund für diese geringere Distanz ist, dass Objekte erst erkannt werden können, sofern sie zumindest teilweise beleuchtet werden. Diese ausreichende Beleuchtung ist erst unterhalb von 53 m sichergestellt. Der Anhalteweg beträgt bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h und einer Reaktionszeit von 1 s mit neueren Fahrzeugen (Verzögerung von 7,2 m/s²) ca. 80 m (siehe Formel 4.1)¹³. Trotz der geringen Erkennbarkeitsentfernung von nur 53 m mit Abblendlicht wird erheblich zu schnell gefahren. In einem solchen Fall ist eine maximale Geschwindigkeit von höchstens 70 km/h erlaubt, um noch innerhalb der Erkennbarkeitsentfernung anhalten zu können!

$$s_{\text{Bremsweg}} = \frac{1}{2} \left(\frac{v}{10 \text{ km/h}} \right)^2 m \quad (4.1)$$

Bestimmung der Erkennbarkeitsentfernung

Es gibt viele experimentelle und theoretische Methoden, die Erkennbarkeitsentfernung eines Scheinwerfers zu bestimmen. An dieser Stelle werden daher nur je zwei erwähnt. Zu beachten ist, dass ein Scheinwerfer je nach Objektbeschaffenheit und Umgebungsbedingungen unterschiedliche Erkennbarkeitsentfernungen besitzt.

Theoretisch wird häufig der Schnittpunkt der 2 lx-Linie mit dem rechten Fahrbahnrand als Erkennbarkeitsentfernung angegeben. Zur Visualisierung sind in Abbildung 17 verschiedene Isolux-Linien schematisch eingezeichnet. Bei einem neuartigen und realitätsnäheren Verfahren wird die Erkennbarkeitsentfernung über die Leuchtdichte und über die Kante mit dem größten Kontrast berechnet [Völk06]. Es gibt noch weitere meist auf der Beleuchtungsstärke basierende Methoden. Jedoch gelten alle bisher aufgestellte Formeln nur unter den Rahmenbedingungen, die ebenfalls vorherrschten, als die jeweilige zu Grunde liegende Untersuchung durchgeführt wurde.

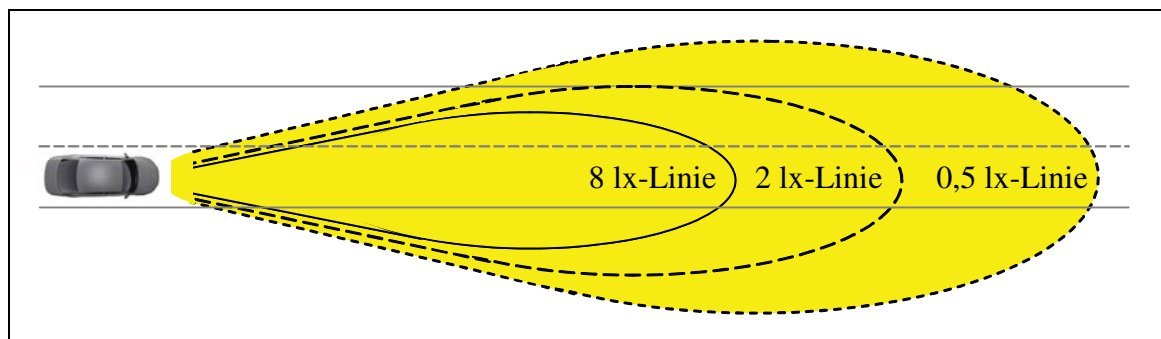


Abbildung 17 Schematische Darstellung von Isolux-Linien des Fernlichtes aus der Vogelperspektive

¹³ Formel 4.1 entspricht nach Köth einer zeitgemäßen Faustformel zur Berechnung des Bremsweges [Köth08]. Nach der alten Faustregel ergibt sich bei 100 km/h ein Anhalteweg von 130 m (Verzögerung von 3,6 m/s²).

Die gängigste experimentelle Methode beruht auf der Erkennung von Objekten. Eine graue, quadratische Sehtafel wird in den meisten Fällen verwendet (z.B. [Jeba06], [Böhm07], [Schw03] und viele mehr). Bei der Erkennung von Objekten fließen nicht nur die Objektbeschaffenheit und die Umgebungsbedingungen sondern auch der Visus und die Verfassung der Versuchspersonen mit in das Ergebnis ein. Zudem verringert sich die Erkennbarkeitsentfernung auf die Hälfte, wenn ein Objekt erwartet wird [Völk06]. Als weitere experimentelle Methode ist die mittlere Fixationsentfernung zu nennen. Diese wird mit einem aufwändigen und nur begrenzt genauen Eye-Tracking-Systemen ermittelt [Diem04].

Untersuchungen zu Erkennbarkeitsentfernungen mit Abblendlicht

Bei Untersuchungen zum Abblendlicht wurden Probanden verschiedene sich auf Schienen annähernde Sehzeichen präsentiert. Sobald die Probanden das Sehzeichen „sicher erkannt“ hatten, betätigten sie einen Taster. Bei den Versuchen wurde die Beleuchtungsstärke unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze variiert [Klie07].

Abblendscheinwerfer, die mit einer Neigung von -1% bis 65 m die Straße ausleuchten, weisen demnach eine Erkennbarkeitsentfernung von maximal ca. 53 m auf, sofern die Beleuchtungsstärke unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze deutlich erhöht wird. Bei minimal erlaubter Neigung von $-0,7\%$ und folglich einer Straßenausleuchtung bis 75 m , führt eine deutliche Erhöhung der Beleuchtungsstärke unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze zu einer maximalen Erkennbarkeitsentfernung von 65 m .

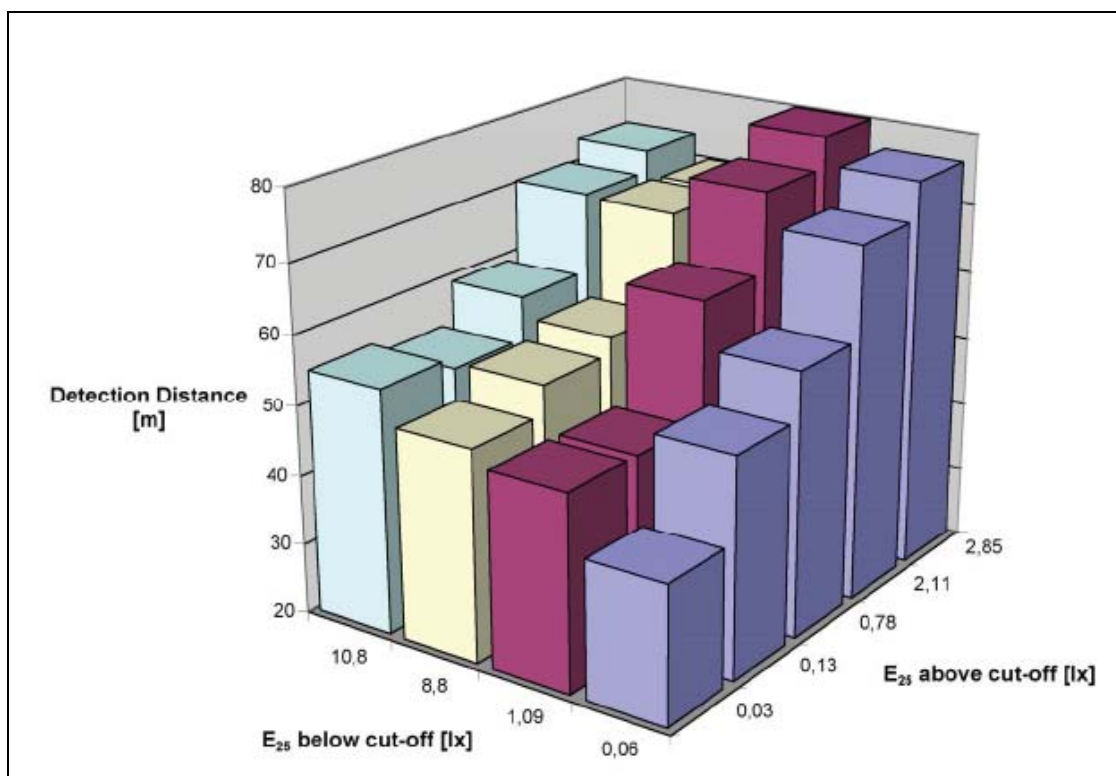


Abbildung 18 Auswirkungen von Beleuchtungsstärken unter- und oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze [Klie07]

Hohe Beleuchtungsstärken unterhalb der Hell-Dunkel-Grenze helfen somit nur bedingt. Eine höhere Beleuchtungsstärke oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze besitzt hingegen einen deutlich größeren Einfluss auf die Erkennbarkeitsentfernung. Eine geringe, aber gerade noch zulässige Erhöhung der Beleuchtungsstärkewerte oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze führt zu größeren Erkennbarkeitsentfernungen. Dabei genügen bereits nur 0,78 lx, um diese auf über 70 m zu erhöhen (siehe Abbildung 18).

Untersuchungen zu Erkennbarkeitsentfernungen mit Fernlicht

Angaben in der Literatur über Erkennbarkeitsentfernungen mit Fernlicht sind sehr rar. Aufgrund der hohen Abblendlichtbenutzung von 97 % stand bisher das Fernlicht im Hintergrund. Nach Rumar liegen Erkennbarkeitsentfernungen für dunkle Objekte bei bis zu 300 m [Ruma01b].

Im Rahmen der Entwicklung eines Bewertungsverfahrens für Scheinwerfer¹⁴ wurden Erkennbarkeitsentfernungen von Abblendlicht und Fernlicht auf dem Testgelände von Fiat in Balocco (Italien) untersucht [CIE07]. Für die Fernlichtuntersuchung saßen die Probanden im jeweiligen Fahrzeug und mussten die Anzahl der Sehtafeln nennen, die abwechselnd links und rechts am Straßenrand aufgestellt waren¹⁵. Die durchschnittliche Erkennbarkeitsentfernung beträgt 145 m bei einer Standardabweichung von 15 m. Tendenziell sind bei Scheinwerfern mit Gasentladungslampen minimal höhere Entfernungen zu beobachten, allerdings unterscheiden sich die Ergebnisse nicht signifikant von denen mit Halogenscheinwerfern.

Untersuchungen zu Erkennbarkeitsentfernungen mit blendfreiem Fernlicht

Mehr Licht oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze verhilft dem kontinuierlichen Abblenden zu höheren Erkennbarkeitsentfernungen¹⁶ [Schm79]. Bei dem kontinuierlichen Abblenden wird das Fernlicht nicht hart ausgeschaltet, sondern bei Gegenverkehr so gedimmt, dass keine Blendung für den Gegenverkehr hervorgerufen wird. Dadurch wird die Erkennbarkeitsentfernung auf der rechten Straßenseite um bis zu 20 m und auf der linken um bis zu 40 m verbessert. Dies bezieht sich allerdings auf eine Fahrtstrecke von 50 m nach dem Beginn des Abblendendvorganges bzw. des Dimmens des Fernlichtes. Nach einer Fahrtstrecke von 150 m ist das Fernlicht bereits deutlich dunkler. Ebenso steigt auch der Blendeinfluss der entgegenkommenden Abblendlichtscheinwerfer und so verringern sich die Zugewinne bereits auf 5 m rechts bzw. 25 m links.

Bei einem statischen Versuch mit dem maskierten Dauerfernlicht wurden den Probanden in 100 m Entfernung Abblendlichtscheinwerfer präsentiert. Ein dunkel gekleideter Mann mit schwarzen Schuhen und einer Jeans mit 16 % Reflexion lief vom Ende des Lichtkanals am rechten Straßenrand auf die Probanden zu und stoppte jeden Meter. Jedes Mal wurden die

¹⁴ Name der Arbeitsgruppe: CIE-TC4-45. Das Bewertungsverfahren soll später einmal in das New Car Assessment Program (NCAP) einfließen.

¹⁵ Sehtafel: graue Quadrate mit einer Kantenlänge von 40 cm, Reflexionsgrad 4,6 %; acht Halogen-, vier Gasentladungsscheinwerfer; 24 Probanden; der Autor unterstützte die Untersuchungen als Proband.

¹⁶ Sehtafel: graue Quadrate mit einer Kantenlänge von 40 cm und einem Reflexionsgrad von 8 %, 7 Zoll Halogenreflektorsystem.

Probanden gefragt, ob sie den Mann erkannt haben. Für den Fall eines vorausfahrenden Fahrzeuges stand dieses 150 m entfernt und der Mann näherte sich am linken Straßenrand an. Tabelle 4 fasst die Ergebnisse zusammen. Durch die Verwendung des maskierten Dauerfernlichtes hat sich die Erkennbarkeit bei entgegenkommendem Verkehr von 104 m um ca. 30 m verbessert [Böhm07].

Entfernungen, die über mittlere Fixationsentfernung bestimmt wurden, liegen tagsüber bei 120 m und $1,7^\circ$ nach rechts zum Fahrbahnrand hin verschoben [Diem04]. Nachts verkürzt sich die mittlere Fixationsentfernung auf 100 m und wandert zur Mitte der eigenen Fahrspur. Unter Berücksichtigung der Messfehler relativieren sich jedoch die Ergebnisse. Im Idealfall liegt die Abweichung des Messsystems bei $0,1^\circ$, in der Regel aber bei $0,2^\circ$. Bei einer Augenhöhe von 1,13 m bedeutet das für die Ergebnisse bei Nacht einen Spielraum von 76 m bis hin zu 144 m.

Tabelle 4 Statische Erkennbarkeitsentfernung mit maskiertem Dauerfernlicht (MDF) [Böhm07]

entgegenkommender Verkehr (100 m)		vorausfahrender Verkehr (150 m)	
Abblendlicht	MDF	Abblendlicht	MDF
104,2 m	134,6 m	94,8 m	124,8 m

4.3.2 Lichtverteilung von Abblendlicht und Fernlicht

Nach Diem soll ein idealer Scheinwerfer zu einem tagesähnlichen Blickverhalten führen. Nach seinen Untersuchungen erfüllen Scheinwerfer mit Gasentladungslampen dieses Kriterium am ehesten [Diem04].

Aktuelle Scheinwerfer mit Gasentladungslampen sind als Benchmark für LED-Systeme zu nennen. Scheinwerfer mit Gasentladungslampen weisen im Abblendlicht eine maximale Beleuchtungsstärke von bis zu 65 lx, eine Breite von $\pm 45^\circ$ und einen Lichtstrom von 1100 lm auf. Im Fernlicht sind 2000 lm an Lichtstrom und eine maximale Beleuchtungsstärke von 120 lx zu finden [Hamm05].

Im Gegensatz dazu empfiehlt Schmidt-Claussen die maximale Beleuchtungsstärke im Abblendlicht auf 60 lx zu begrenzen. Weiterhin geht er auf das Leuchtdichteverhältnis innerhalb der Lichtverteilung ein [Schm92]. Das Leuchtdichteverhältnis soll zwischen Vorfeld und Fernfeld¹⁷ 1 : 4 und zwischen dem zentralen Nahbereich und der Seitenausleuchtung¹⁸ 1 : 10 betragen. Zu hohe Leuchtdichten im Vorfeld führen zu einer Fixation derer und so auch zu einer Verminderung der Erkennbarkeitsentfernung (u.a. [Völk06]).

Auf Basis einer Verkehrsraumanalyse werden neue Lichtverteilungen für AFS-Scheinwerfer bzw. deren zugehörigen Regelungen ECE R123 vorgeschlagen. Das Fernlicht betreffend wird unter Berücksichtigung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Leitpfosten ein horizontaler Öffnungswinkel von ca. $\pm 13^\circ$ mit einer Beleuchtungsstärke zwischen 25 lx und 80 lx

¹⁷ Das Vorfeld entspricht hier einer Entfernung von bis zu 15 m, das Fernfeld einer Entfernung von 50 m.

¹⁸ Die Seitenausleuchtung wird hier durch einen Winkel mit $\pm 14^\circ$ horizontal beschrieben.

erarbeitet. Zudem soll ein weiteres zentrales Lichtbündel mit einem horizontalen Öffnungswinkel von ca. $\pm 4,5^\circ$ die Beleuchtungsstärke auf Geraden auf bis zu 150 lx anheben. Für das Abblendlicht wird eine neue Form der Hell-Dunkel-Grenze vorgestellt, die gerade auf der linken Seite die Sicht erhöhen soll. Auf nasser Straße wird vorgesehen das Vorfeld von 10 m bis 25 m in seiner maximalen Beleuchtungsstärke zu begrenzen. Dieser Bereich trägt durch die Reflexion des Scheinwerferlichtes auf der Fahrbahn maßgeblich zu einer erhöhten Blendung bei [Dama95].

Spätere Messungen belegen und quantifizieren diesen Sachverhalt. So ist die sogenannte indirekte Blendung bei nasser Straße bis zu zehnmal höher als die direkte [vHof03]. Allerdings ist dieser Vorschlag, der als Schlechtwetterlicht später in der AFS-Regelung ECE-R 123 Platz fand, umstritten. Das fehlende Licht im eigenen Vorfeld suggeriert dem Fahrer in ein „schwarzes Loch“ zu fahren und verunsichert diesen.

Um diesen Effekt des „schwarzen Loches“ beim Schlechtwetterlicht zu kompensieren, soll die Seitenausleuchtung gerade bei nasser Straße breiter gestaltet werden. Durch eine breitere Seitenausleuchtung wird das Sicherheitsgefühl des Fahrers erhöht. Des Weiteren wird eine adaptive Seitenausleuchtung in Erwägung gezogen. Diese verschmälert sich bei zunehmender Geschwindigkeit. Dadurch werden ablenkende Blickzuwendungen im Seitenbereich minimiert und der Fahrer wird weniger stark beansprucht [Huhn99].

Eine breitere Ausleuchtung mit LED-Licht führt ebenfalls zu einer Steigerung des Sicherheitsgefühls. Untersuchungen mit dem LED-Versuchsscheinwerfer „Voxellight“ bestätigen das [Jeba06].

4.3.3 Blendung

Die Blendung spielt im Straßenverkehr eine wesentliche Rolle. Wird der Fahrer geblendet, kann er sich zum einen gestört fühlen. Zum anderen kann sich durch die Blendung auch seine Sehleistung verringern.

Physiologische und psychologische Blendung

Es wird im Allgemeinen zwischen zwei Blendarten unterschieden: die psychologische und die physiologische Blendung. Der Unterschied zwischen beiden ist, dass die physiologische Blendung eine tatsächliche und auch technisch messbare Verschlechterung der visuellen Wahrnehmung hervorruft. Durch Streulicht im Auge wird das Kontrastsehvermögen verschlechtert. Daher wird der Einfluss der physiologischen Blendung über das Kontrastsehvermögen bestimmt [Trot78].

Die psychologische Blendung beschreibt hingegen die subjektive Wahrnehmung. Sie gibt an, wie stark sich der- oder diejenige geblendet bzw. gestört fühlt. Der Grad dieses Blendgefühls wird dabei in neun Stufen angegeben (siehe Tabelle 5). Von zentraler Bedeutung ist, dass eine psychologische Blendung nicht zwangsläufig bedeutet, dass sich das Kontrastsehvermögen verringert und somit auch eine physiologische Blendung eintritt [deBo71].

Tabelle 5 9-stufige De Boer-Skala: Blendwert W bei psychologischer Blendung

Blendwert W	Blendeindruck
1	Blendung unerträglich
3	Blendung störend
5	Blendung erträglich
7	geringe Blendung
9	keine Blendung

Einfluss der Farbtemperatur auf die psychologische Blendung

Anfang der 90er kamen die ersten Scheinwerfer mit Gasentladungsscheinwerfern auf den Markt. Zu dieser Zeit gab es vermehrt Beschwerden, dass diese neuen Scheinwerfer blenden. Ursachen sind sowohl die höhere und ungewohnte Farbtemperatur des Lichtes als auch die deutlich gestiegene Leuchtdichte.

Aufgrund der damals typischen kleinen Projektionslinsen mit einem Durchmesser von 50 mm ist die Leuchtdichte zwölfmal höher als mit Halogenscheinwerfern¹⁹. Zudem führt die höhere Farbtemperatur von ca. 4200 K²⁰ im Gegensatz zu Halogen mit ca. 2800 K zu einer höheren psychologischen Blendung. Bläulicheres Licht wird somit als störender empfunden. Im Gegensatz dazu besitzt die Farbtemperatur keinerlei Einfluss auf die physiologische Blendung, die üblicherweise über das Kontrastsehvermögen gemessen wird ([Fran06] und [Kasp07]). Entscheidend sind hier ausschließlich die Blendbeleuchtungsstärke und die Umgebungsleuchtdichte. Die Farbunabhängigkeit der physiologischen Blendung wird in neuesten Untersuchungen für Halogen-, Gasentladungs- und LED-Scheinwerfer ebenfalls bestätigt [Spru09].

Das Japan Automotive Research Institute (JARI) führte Probandentests zur psychologischen Blendempfindung verschiedener Lichtquellen durch. Demnach ist das Blendempfinden hauptsächlich von der Empfindlichkeit der blauen Zapfen im Auge abhängig. Das Ergebnis ist allerdings umstritten, so dass dieser Sachverhalt von anderer Stelle in einem ähnlichen Test wiederholt wurde. Abbildung 19 zeigt das Ergebnis der zweiten Untersuchung. Dabei wird die Abhängigkeit der Blendung von den blauen Zapfen im Auge bestätigt [Siva05].

Neueste Untersuchungen von Sprute zweifeln diese Ergebnisse an. Im Gegensatz zu den soeben vorgestellten Erkenntnissen führen dabei gerade Halogenscheinwerfer teilweise zu Nachteilen bei der psychologischen Blendung, obwohl sie den kleinsten Blauanteil im Vergleich zu den anderen untersuchten LED- und Xenon-Scheinwerfern aufweisen [Spru09].

¹⁹ Es werden hier ein Reflektordurchmesser von 100 mm und der dreifache Lichtstrom angenommen.

²⁰ K: Kelvin, gibt die Temperatur eines Schwarzkörpers an, der denselben Farbeindruck erweckt. Je nach verwendeter LED liegt die Farbtemperatur typischerweise zwischen 5000 K und 6500 K. Aufgrund ihrer Konversion und Mischung von blauem und gelblichem Licht besitzen LEDs einen höheren Blauanteil als Gasentladungslampen.

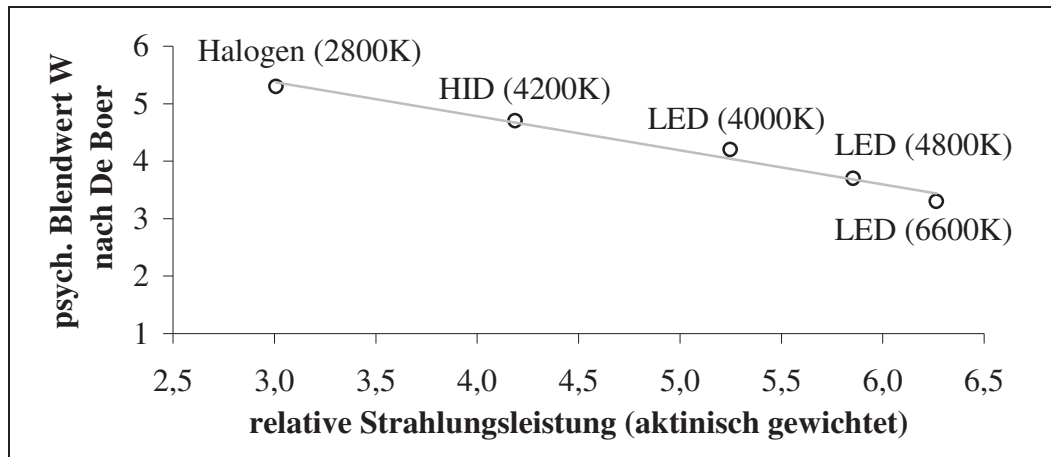


Abbildung 19 Einfluss der blauen Zapfen auf den psychologischen Blendwert [Siva05]; Als Bewertungsskala wird eine 9-stufige De Boer-Skala verwendet. Die Strahlungsleistung der Lichtquellen ist mit der Empfindlichkeit der blauen Zapfen aktinisch bewertet.

4.3.4 Nachtsichtsysteme

Nachtsichtsysteme ermöglichen es, in Dunkelheit sehen zu können. Sie basieren auf der Infrarotstrahlung und lassen sich in passive und aktive Systeme unterteilen. Bei passiven Systemen wird mit einer Wärmebildkamera die Umgebung aufgenommen. Bei aktiven Systemen wird das Vorfeld mit einem Infrarotscheinwerfer bestrahlt und dessen Reflexionen mit einer Kamera erfasst, die im spektralen Bereich des Infrarotscheinwerfers empfindlich ist. In beiden Fällen müssen die gewonnenen Informationen bzw. das erleuchtete Vorfeld dem Fahrer auf einer Art Bildschirm visualisiert werden.

Das bedeutet, dass der Fahrer seinen Blick weg von der Straße und hin zum Bildschirm wenden muss, um die Zusatzinformationen nutzen zu können. Daher wird der Beitrag von Nachtsichtsystemen zur Straßenverkehrssicherheit in Frage gestellt [Berl07].

Untersuchungen zur Wirksamkeit von aktiven und passiven Nachtsichtsystemen mit verschiedenen Visualisierungsorten²¹ bestätigen dies [Tane07a], [Tane07b]. Bei Testfahrten mit Probanden wurden 42 % aller hell erschienenen Objekte im Bildschirm nicht wahrgenommen. Der Fahrer ist zu stark in die eigentliche Fahraufgabe eingebunden und besitzt nicht die Zeit längere Blickabwendungen zum Bildschirm hin zu riskieren. Eine Markierung der Gefahrenpotenziale wie in einem Head-Up-Display oder durch ein optisches Signal erachteten die Probanden für sinnvoll. Diese Markierung muss sich nicht auf ein akustisches Signal oder optisches Signal auf einem Bildschirm beschränken. Denkbar ist auch ein Markierungslicht, eine Art Zielsuchscheinwerfer, mit dem Gefahrenpotenziale gezielt angeleuchtet werden können [Wegw08]. Jedoch gestaltet sich z.B. das Anleuchten eines dunkel gekleideten Fußgängers zulassungsseitig als schwierig, da diese dabei aktiv geblendet werden.

Es sind hier weitere Untersuchungen notwendig, um zu beurteilen, inwiefern die Wirksamkeit von Nachtsichtsystemen mittels der unterschiedlichen Gefahrenmarkierungen verbessert werden kann.

²¹ Kombi-Instrument, Multi-Media-Interface (MMI), Head-Up Display (HUD)

5 Technische Beschreibung des blendfreien LED-Fernlichtes

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Versuchsträger mit blendfreiem LED-Fernlicht aufgebaut. Die technische Beschreibung des Gesamtsystems wird anhand nur eines Versuchsträgers, dem Versuchsträger „Nanolux“, vorgestellt. Dieser Versuchsträger wurde im Rahmen des gleichnamigen Verbundprojektes „Nanolux – Tausend Lumen Weiß“ mit einem LED-Scheinwerfer ausgestattet. Das Verbundprojekt an sich wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. In diesem Kapitel wird zunächst auf den LED-Scheinwerfer, das Kamerasystem sowie auf die theoretische Systemauslegung eingegangen, bevor das Gesamtsystem betrachtet wird.

5.1 Der Nanolux-Scheinwerfer

Im Folgenden wird auf den Aufbau und auf die Lichtverteilung des Nanolux-Scheinwerfers eingegangen, der in Abbildung 20 zu sehen ist.

5.1.1 Aufbau des Nanolux-Scheinwerfers

Der Aufbau des Nanolux-Scheinwerfers ist in Abbildung 21 graphisch dargestellt. Er besteht aus 79 LEDs. Der Blinker an der Oberkante des Scheinwerfers wird aus neun Hochleistungs-LEDs (Golden DRAGON) der Fa. Osram OS gebildet und schließt den Scheinwerfer zur Motorhaube hin ab. Das Tagfahrlicht besteht aus acht Golden DRAGONs und rahmt das Abblendlicht zusammen mit dem Blinker ein. Gedimmt auf 10 % wird das Tagfahrlicht ebenfalls als Positionsleuchte genutzt.



Abbildung 20 Nanolux-Scheinwerfer und das integrierte Osram Multichip-LED-Array für die Matrix-Beam-Funktion

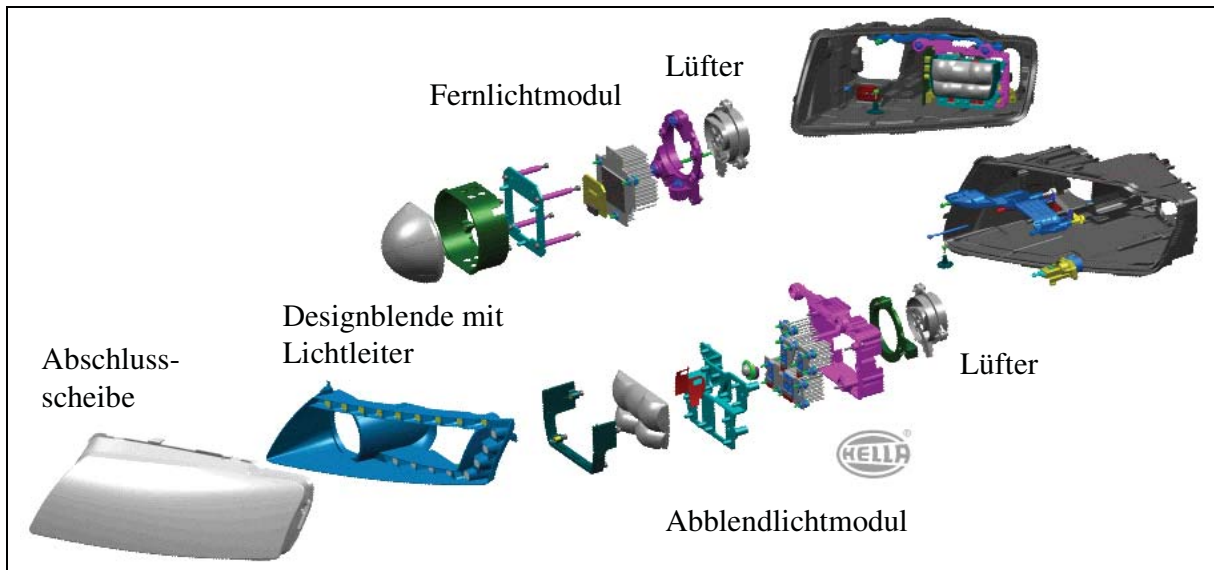


Abbildung 21 Explosionszeichnung Nanolux-Scheinwerfer [Hell08]

Das Abblendlicht wird hinter dem Linsenarray erzeugt. Fünf Multichip-LEDs mit je fünf Chips bilden die Grundlichtverteilung. Abbildung 22 zeigt eine Headlamp LED, die mit dem verbauten LED-Typ vergleichbar ist. Der Asymmetriezweig des Abblendlichtes wird allein aus einer weiteren Multichip-LED erzeugt. Die Multichip-LEDs wurden vor dem Einbau in die Scheinwerfer vermessen. Zu diesem Zeitpunkt wiesen sie je einen Lichtstrom von etwa 310 lm auf.

Das Fernlicht ermöglicht mit einem sehr leistungsfähigen Multichip-Array in Kombination mit einer Freiform-Linse die Funktion des blendfreien LED-Fernlichtes (Abbildung 20, rechts). Das Multichip-Array besteht aus insgesamt 32 Chips mit zwei Zeilen à 16 Chips. Die 32 Chips erzielen bei einem Strom von 700 mA einen Lichtstrom von ca. 3100 lm. Multichip-Arrays, die zu Ende des Nanolux-Projektes aufgebaut worden sind, erreichen sogar einen Lichtstrom von 4200 lm. Wie auch bei den anderen Funktionen werden hier THINGaN-Chips mit Chip-Level-Converting (CLC) verwendet.



Abbildung 22 OSTAR Headlamp LED (Osram OS) [Engl07]

5.1.2 Lichtverteilung des Nanolux-Scheinwerfers

Die nachfolgenden Messungen wurden nach einer Erprobungsdauer im Fahrzeug von 13 Monaten durchgeführt. Aufgrund höherer Temperaturen im Scheinwerfer ist der Lichtstrom der LED-Module im Scheinwerfer geringer als zum Zeitpunkt der Vermessung außerhalb des Scheinwerfers. Dazu kommen die Verluste durch das optische System (siehe Tabelle 6).

Eine Degradation der LED-Module während der Erprobungsdauer ist nicht erkennbar. Die Fa. Hella führte eine Vermessung des Abblendlichtes nach Fertigstellung der Scheinwerfer durch. Der Lichtstrom dieser Abblendlichtvermessung beträgt 500 lm. Die geringe negative Abweichung zur Messung zum Zeitpunkt nach der Erprobung mit 505 lm ist durch Messungenauigkeiten erklärbar und kann vernachlässigt werden.

Abblendlicht

Das Abblendlicht weist eine homogene Basisausleuchtung auf. In der Stadt distanziert es sich mit seiner höheren Farbtemperatur deutlich von dem Umgebungslicht. Der Lichtstrom beläuft sich im Abblendlicht auf 505 lm, die maximale Beleuchtungsstärke liegt hier bei 41 lx (siehe Abbildung 23). Der Asymmetriezweig wird nur durch eine Multichip-LED erzeugt. Rechts des Asymmetriezweiges fehlt daher Licht, was somit zu einer geringeren Erkennbarkeitse Entfernung auf der rechten Straßenseite führt.

Tabelle 6 Kennwerte des Nanolux-Scheinwerfers; der Lichtstrom der LED-Module wurde vor der 13-monatigen Erprobung und vor dem Einbau in den Scheinwerfer (SW) gemessen. Die Bestimmung der Lichtwerte des Abblend- und Fernlichtes wurde nach der Erprobung durchgeführt. Vgl. Abbildung 23 und Abbildung 24; Beleuchtungsstärke vertikal in 25 m Entfernung gemessen

	LED-Modul	Lichtstrom [lm]	Lichtstrom im SW [lm]	max. Beleuchtungsstärke im SW [lx]
Abblendlicht	6 Multichip-LEDs	1860 lm	505 lm	41 lx
Fernlicht	1 Multichip-Array	3100 lm	882 lm	135 lx

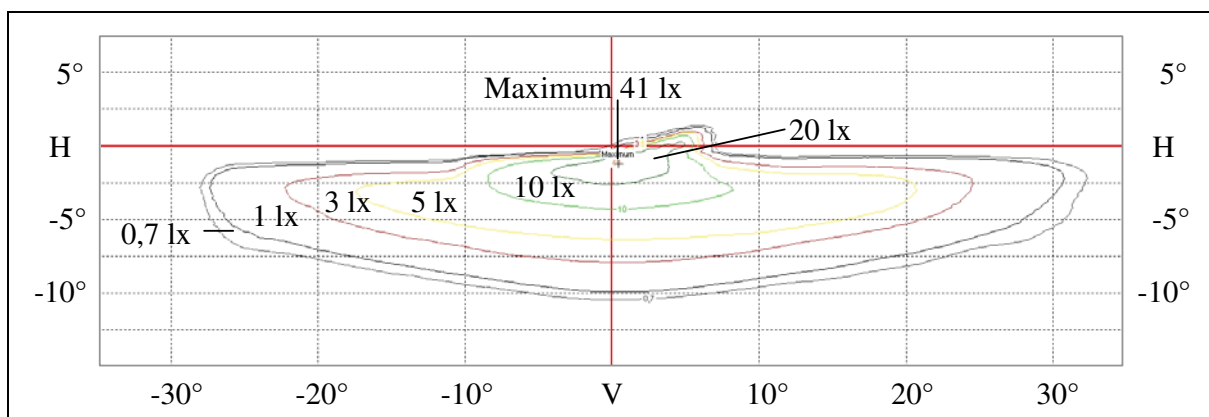


Abbildung 23 Goniophotometermessung des rechten Abblendlichtes; Beleuchtungsstärke vertikal in 25 m Entfernung gemessen

Fernlicht

Abbildung 24 zeigt die Goniophotometermessung des rechten Fernlichtes. Der Lichtstrom des Fernlichts beträgt 882 lm. Dabei wird eine maximale Beleuchtungsstärke von 135 lx erreicht (siehe Tabelle 6). Dadurch zeichnet sich das Fernlicht auf Geraden und ebenen Strecken mit einer sehr guten Sicht für den Fahrer aus.

Allerdings ist die Lichtverteilung des Fernlichtes mit $\pm 12^\circ$ horizontal schmal und auch niedrig. Bereits in leichten Kurven und Steigungen wird dadurch nicht mehr der gesamte Straßenverlauf ausgeleuchtet. Um mit beiden Scheinwerfern eine breitere Lichtverteilung zu erreichen, wurden beide Fernlichtmodule etwas nach außen geschwenkt. Deswegen ist die Lichtverteilung des Fernlichtes nicht mittig ausgerichtet. Zudem bildet sich das Chipmuster störend ab (vgl. Abbildung 25 rechts).

Segmentabgrenzung und Homogenität im Fernlicht

Zur Veranschaulichung der Funktion blendfreies Fernlicht wurden vier LEDs bei der Aufnahme in Abbildung 25 ausgeschaltet. Zu sehen ist, wie einfach mit Hilfe der LEDs ein dunkler Bereich inmitten der Lichtverteilung generiert werden kann. Gerade das prädestiniert die LED für die Funktion des blendfreien Fernlichtes. Allerdings bildet sich das Chipmuster des Multichip-Arrays deutlich und störend ab.

Für Matrix-Beam wird das Ziel verfolgt, dass Lichtsegmente je einen möglichst scharf definierten Bereich ausleuchten, wobei Überlagerungen mehrerer Lichtsegmente erlaubt sind. Gleichzeitig erfordert der Fahrkomfort mit Fernlicht eine Mindesthomogenität. Eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass eine mangelnde Homogenität in der Lichtverteilung von einer Irritation bis hin zur Übelkeit des Fahrers führen kann. Die Konsequenz ist, dass das Fernlicht nicht verwendet wird.

Die Lichtverteilung eines Lichtsegmentes kann in Wirkfeld und Blendfeld unterschieden werden (siehe Abbildung 26). Das Wirkfeld beschreibt den Ausleuchtungsbereich mit einer Beleuchtungsstärke, die dem Fahrer genügt, um unbeleuchtete Objekte zu erkennen. Diese Mindestbeleuchtungsstärke ist abhängig von den jeweiligen Umgebungsbedingungen.

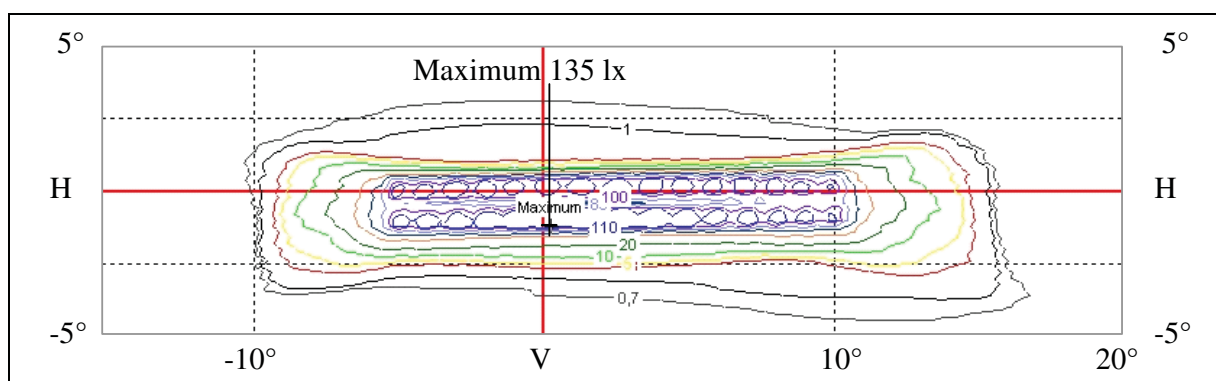


Abbildung 24 Goniophotometermessung des rechten Fernlichtes; Beleuchtungsstärke vertikal in 25 m Entfernung gemessen

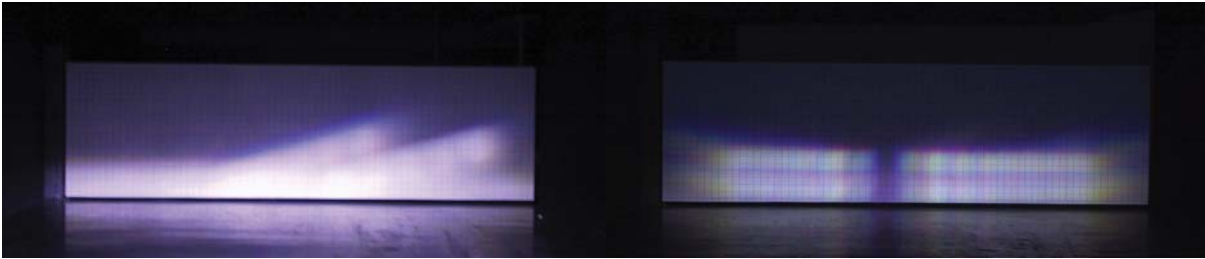


Abbildung 25 Photos der Lichtverteilungen: linkes und rechtes Abblendlicht in einer Entfernung von 25 m (links); linkes FL-Array (Chip 7+8 in jeder Zeile sind aus) (rechts)



Abbildung 26 Wirk- und Blendfeld eines Lichtsegmentes

An dieser Stelle wird der Messpunkt 50 R im Abblendlicht herangezogen. Dieser steht für die Position des rechten Straßenrandes in einer Entfernung von 50 m. Um hier eine ausreichende Erkennung zu gewährleisten, wird eine Beleuchtungsstärke von mindestens 20 lx, bezogen auf 25 m, vorgeschrieben [ECE-R98]. Im Abblendlicht beschreibt der Messpunkt B 50 L die Augenposition entgegenkommender Fahrer. In diesem Messpunkt wird eine zulässige Blendbeleuchtungsstärke am Auge eines entgegenkommenden Fahrers bis maximal 0,5 lx erlaubt, bezogen auf eine Entfernung von 25 m [ECE-R98]. Bei größeren Beleuchtungsstärken kommt es zur Blendung.

Für eine hohe Wirksamkeit des Matrix-Beam-Systems ist es notwendig, dass Wirk- und Blendfeld möglichst denselben Bereich umfassen. Streulicht und ein zu geringer Gradient innerhalb der Beleuchtungsstärkeverteilung eines Lichtsegmentes können dazu führen, dass das Blendfeld deutlich größer ausfällt als das Wirkfeld. Wenn allerdings Lichtsegmente einen zu hohen Gradienten aufweisen, so erschwert das die Bildung einer homogenen Lichtverteilung. Dieser Zielkonflikt stellt die größte optische Herausforderung des Matrix-Beam-Scheinwerfers dar. Ein möglicher Ausweg kann eine intelligente Superposition mehrerer Lichtsegmente sein. Dabei weist jedes Lichtsegment eine für sich scharf abgegrenzte Lichtverteilung auf.

5.1.3 Ansteuerung des LED-Arrays

Die pulsweitenmodulierte Ansteuerung sowie die Einzel-Adressierbarkeit der Fernlicht-LEDs beruht auf einem Bypass-Prinzip [Deci08]. Dabei werden mehrere LEDs in Reihe über eine Konstantstromquelle versorgt. Zum Ausschalten einer LED wird die zugehörige Bypass-Leitung über einen Schalter geschlossen. Der Strom fließt dann über die Bypass-Leitung an der LED vorbei. Ist diese geöffnet, so leuchtet die LED (siehe Abbildung 27).

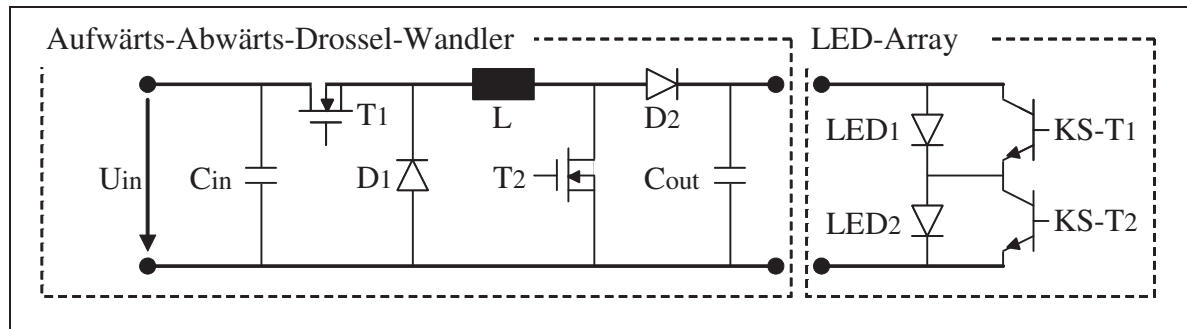


Abbildung 27 Ansteuerungsprinzip eines LED-Arrays mit einem Aufwärts-Abwärts-Drossel-Wandler und Kurzschlusstransistoren (KS-T)

In diesem Fall sind je vier LEDs in Reihe geschaltet. Als Schalter fungieren insgesamt 16 Dualtype SMD²²-Transistoren. Diese werden über vier Schieberegister angesteuert. Beide Komponenten sind auf der Platine der Fernlicht-LEDs integriert (siehe Abbildung 20). Als Konstantstromquelle wird hier ein Hoch- und Tiefsetzsteller benötigt. Je nachdem wie viele LEDs aktiv sind, liegt die Spannung oberhalb oder auch unterhalb der Bordnetzspannung. Die Konstantstromquelle ist an diese angeschlossen.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die LEDs gegen die Bordnetzspannung und nicht gegen Masse zu verschalten (siehe Abbildung 28). In diesem Fall genügt zur Speisung ein Aufwärtswandler mit geringerem Bauteileaufwand [Wern08]. Der Vorteil der Bypass-Schaltung liegt darin, dass sich dadurch die Anzahl der Leistungstreiber erheblich verringert. Zudem sind Komponenten der Ansteuerlogik direkt auf der Platine der Fernlicht-LEDs platziert. Dadurch verringert sich der Verkabelungsaufwand im Scheinwerfer.

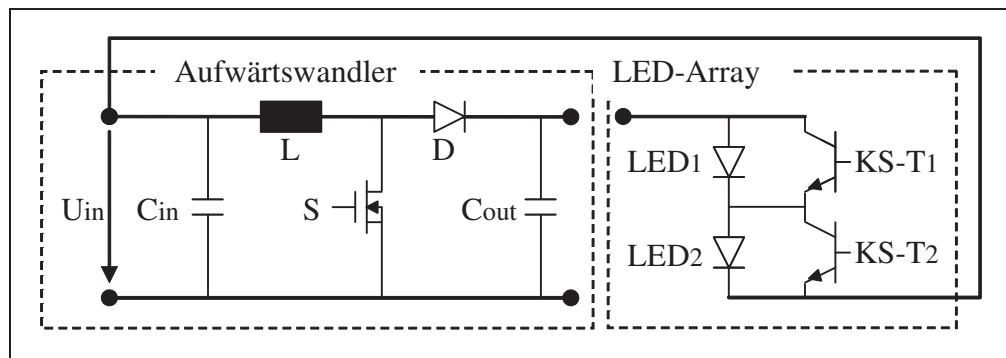


Abbildung 28 Aufwärtswandler als Konstantstromquelle; wesentlicher Unterschied: LEDs gegen Versorgungsspannung und nicht gegen Masse verschaltet

5.2 Kamera und Bildverarbeitung

In diesem Abschnitt wird auf das integrierte Kamerasystem und dessen Bildverarbeitung eingegangen. Weiter wird das Kamerasystem auf die Verwendbarkeit für das blendfreie LED-Fernlicht und für die in Kapitel 6 folgende Verkehrsraumanalyse untersucht.

²² SMD: Surface Mounted Device.

5.2.1 Aufbau und Funktionsweise des Kamerasystems

Das Kamerasystem verfügt über zwei Kameras. Das Kamerasystem kann entweder mit beiden Kameras im Stereo-Modus oder nur mit einer Kamera im Mono-Modus betrieben werden. Die Kameras verfügen je über einen monochromatischen CMOS-Bildsensor²³ mit einer WVGA²⁴-Auflösung von 768 x 488 Pixel.

Durch die Optik der Kamera sind jedoch nur 744 x 480 Pixel eines Kamerachips nutzbar. Abbildung 29 zeigt die spektrale Empfindlichkeit des Bildsensors. Die Kameras sind auf der Frontscheibe in Höhe des Rückspiegels 20 cm voneinander entfernt angebracht.

Das Kamerasystem im Mono-Modus

Mit einer einzigen Kamera ist es Punkt-bedingt möglich, die Entfernung zu einem Objekt zu schätzen. Ursache dafür ist, dass Objekte, die sich auf einer Geraden zur Kamera bewegen, stets auf denselben Punkt bzw. Bereich auf dem Bildsensor abgebildet werden. Das Einzige, das sich ändert, ist die Abbildungsgröße des Objektes auf dem Bildsensor. Nähert das Objekt sich an, so erscheint es größer.

Diese Größenänderung in der Bildebene kann verwendet werden, um dennoch die Entfernung schätzen zu können. Grundbedingungen sind, dass ein Objekt erkannt wird und zudem dessen Größe bekannt ist. Die Berechnung der Entfernung wird hauptsächlich durch den Lichtquellenabstand eines erkannten Leuchten- oder Scheinwerferpaares realisiert. Da der Abstand eines Leuchtenpaares fahrzeugspezifischen Schwankungen unterliegt, kann die Entfernung zu einem solchen Objekt nur geschätzt werden.

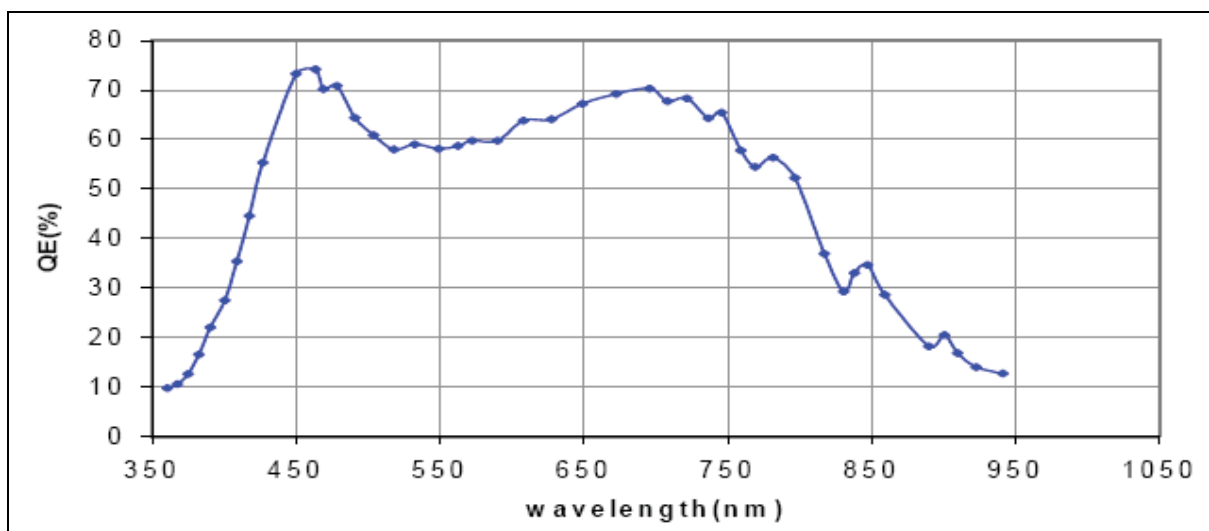


Abbildung 29 Empfindlichkeitskurve des Bildsensors KAC-00400 CMOS

²³ CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor.

²⁴ WVGA: Ein Wide Video Graphics Array beinhaltet Arrays, die horizontal mehr als 640 Pixel besitzen.

Das Kamerasystem im Stereo-Modus

Mit einer zweiten Kamera lässt sich ausgehend von einem Punkt auf der Bildebene die Entfernung bzw. die Position eines Punktes im Weltkoordinatensystem (reale Objektebene) rekonstruieren. Dazu wird der Bezug zwischen der Position eines Punktes in der Bildebene der linken und rechten Kamera hergestellt. Dabei wird von einer Korrespondenzsuche gesprochen [Bart98]. Über den Abstand der Bildpunkte der beiden Kameras kann über Triangulation der Abstand des Objektes bestimmt werden.

Die Kalibrierung des Kamerasystems im Stereo-Modus

Voraussetzung für eine exakte Entfernungsmessung ist, dass die Lage und Orientierung der beiden Kameras zueinander genau kalibriert ist. Sind die Kameras nicht exakt zueinander ausgerichtet, so ist zunächst die Entfernungsbestimmung fehlerbehaftet. Schreitet die Dekalibrierung voran, so kann das sogar dazu führen, dass die Bildverarbeitung nicht mehr in der Lage ist den notwendigen Bezug zwischen einem Objekt in der linken und rechten Kamera herzustellen.

Die Lage der Kameras unterliegt dem Einfluss mechanischer Einwirkungen während des Fahrbetriebes sowie der thermischen Ausdehnung der Frontscheibe. Um diesen Einfluss zu kompensieren, sind die Kameras mit einer hochdynamischen Auto-Kalibrier-Funktion ausgestattet und gekoppelt. Hierbei werden die Aufnahmen beider Kameras nach markanten und eindeutig zuzuordnenden Punkten in den Bildebenen durchsucht. Ist die Qualität mehrerer Punkte innerhalb eines Kalibrier-Zyklus ausreichend hoch, dann werden die vorherigen Kalibrier-Daten überschrieben und die beiden Kameras erneut aufeinander abgeglichen (sogenanntes „Pixel-Matching“).

5.2.2 Bildverarbeitung

Das Ziel der Bildverarbeitung ist es, zu entblendende Objekte zu detektieren und deren Position festzustellen. Die Bildverarbeitung basiert dabei ausschließlich auf der Erkennung von Lichtquellen.

Die Lichtquellen werden anhand ihrer Form, geometrischen Lage im Kamerabild, Bewegungsrichtung und Größe mit hinterlegten Algorithmen verglichen. Bei Übereinstimmung werden diese entsprechend klassifiziert. In Tabelle 34 auf Seite 149 sind sämtliche Objektklassen aufgeführt, die im Kamerabild farblich markiert werden, sofern sie erkannt wurden.

Die Klassifizierung einzelner Lichtquellen zu einem Lichtquellenpaar erfolgt anhand der gleichen horizontalen Achse, gleicher Lichtquellengröße und folglich gleichem Abstand. Werden mehrere Lichtquellen wie ein Scheinwerferpaar einem gemeinsamen Objekt zugeordnet, so wird ein virtueller Rahmen um sämtliche zugeordnete Lichtquellen erzeugt (siehe Abbildung 30). Die Position eines Objektes wird anhand von horizontalen und vertikalen Winkelangaben sowie anhand dessen Abstand zur Kamera bestimmt. Für eine eindeutige Bestimmung genügen die Winkelangaben von zwei diagonal gegenüberliegenden Eckpunkten des virtuellen Rahmens aus.

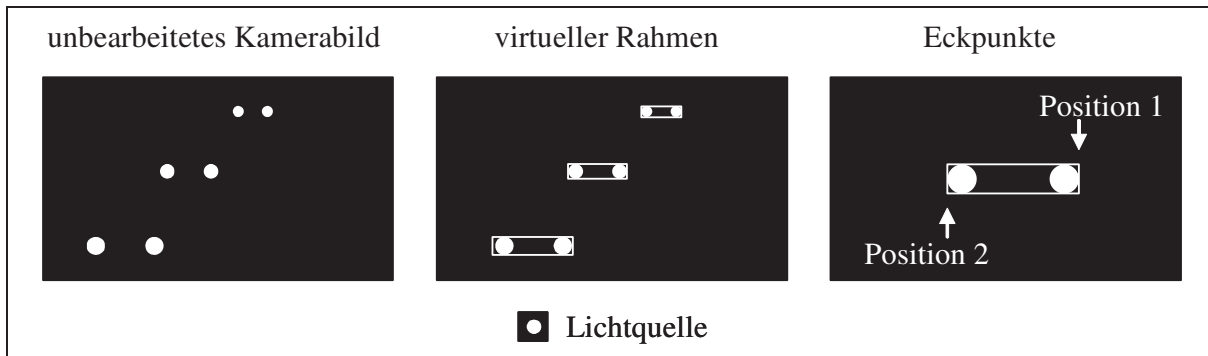


Abbildung 30 Erzeugung eines virtuellen Rahmens um erkannte Objekte

Es sei hier angemerkt, dass bei einem entgegenkommenden Lastkraftwagen eine zuverlässige Zuordnung der Positionsleuchten und der Scheinwerfer zu einem Objekt aufgrund der deutlich dunkleren und kleineren Positionsleuchten nicht immer gewährleistet ist. In der Praxis kann daher nie sicher auf die Höhe eines Objektes geschlossen werden. Dies hat zur Folge, dass bei der adaptiven Entblendung von PKWs stets von einem LKW ausgegangen werden muss.

Die Positionen aller relevanten Objekte werden in einer Objektliste festgehalten. Diese Objektliste wird weiter benötigt, um gezielt die einzelnen LEDs des Scheinwerfers ansteuern zu können. Die Objektliste wird per virtuellen CAN-Bus weitergeleitet. Um die Buslast minimal zu halten, werden nur relevante Objekten gesendet, d.h. nur Objekte, die entblendet werden müssen. Konkret handelt es sich dabei um:

- beleuchtete entgegenkommende und vorausfahrende Verkehrsteilnehmer sowie
- beleuchtete, jedoch nicht klassifizierte Objekte.

Letztere könnten ebenfalls ein zu entblendendes Objekt darstellen und werden in jedem Fall berücksichtigt. Fahrradfahrer werden erkannt, sofern sie eine ausreichende Beleuchtung aufweisen. Genauer betrachtet, sind vorausfahrende Fahrradfahrer von den relevanten Objekten ausgenommen. Für diese besteht keine Blendgefahr. Allerdings kann nicht zwischen einem Motorrad, einem Fahrzeug mit einer defekten Heckleuchte oder einem Fahrrad unterschieden werden. Vorausfahrende Fahrräder werden daher ebenfalls berücksichtigt.

Datenaufzeichnung und Datenauswertung im Offline-Modus

Während der Nutzung der Bildverarbeitungssoftware können Videosequenzen bei Bedarf als *.avi-Videodatei abgespeichert werden. Dabei werden sowohl im Mono- als auch im Stereo-Modus die Sequenzen beider Kameras gespeichert.

Zusätzlich werden in separaten *.rec-Dateien die Kalibrierdaten, Abtastrate, Zeitstempel sowie relevante Daten des Antriebs- und des virtuellen CAN-Busses gespeichert. Dies ermöglicht eine spätere Überprüfung der Bildverarbeitung. Die Daten können auf diese Weise offline - also ohne Fahrzeug - an einem externen PC abgespielt werden. Die Bildverarbeitung analysiert im Offline-Modus die gespeicherten Kamerabilder von neuem. Das bedeutet, dass das Kamerasystem mit derselben Videosequenz unter reproduzierbaren Bedingungen erneut getestet werden kann. Damit können die Detektionsleistungen im Mono- und im Stereo-

Modus miteinander verglichen und der Einfluss von unterschiedlichen Kalibrierdaten im Stereo-Modus bewertet werden.

5.2.3 Untersuchung des Kamerasystems

Das Kamerasystem dient in dieser Arbeit als Messsystem zur Erstellung einer Verkehrsraumanalyse. Hier wird die Tauglichkeit des Kamerasystems sowohl für den Betrieb mit einem Matrix-Beam-Scheinwerfer als auch für die Verkehrsraumanalyse untersucht und bewertet. Dafür wird zunächst eine halbdynamische Untersuchung durchgeführt. Diese Ergebnisse werden anschließend um Erfahrungen aus realen Fahrszenen ergänzt.

Versuchsbeschreibung

Ziel des halbdynamischen Versuches ist es, die Abstandsangaben in verschiedenen Modi des Kamerasystems zu validieren. Dafür werden während der Annäherung an ein Fahrzeug Daten aufgenommen, um diese später offline in den verschiedenen Modi zu analysieren und mit dem Sollabstand zu vergleichen.

Versuchsaufbau und Durchführung

Zur Durchführung wird eine Referenzstrecke am Ortsrand von Ingolstadt ausgewählt, da hier kontrollierbare Umgebungsbedingungen vorherrschen:

- keine Straßenbeleuchtung am Fahrbahnrand,
- vorhandene Reflektoren im Abstand von 50 m, um so den realen Abstand der Fahrzeuge vergleichen zu können sowie
- eine gerade, nahezu ebene Fahrbahnoberfläche auf einer Strecke von ca. 500 m.

Ein Referenzfahrzeug (Audi A5 mit Xenon-Abblendlicht) wird am linken Fahrbahnrand in entgegengesetzter Fahrtrichtung im Stillstand positioniert. So treten bei diesem Fahrzeug keine Nick- und Lenkbewegungen auf, wodurch die Angaben der Bildverarbeitung hätten verfälscht werden können. Der Versuchsträger mit dem Kamerasystem wird in einem Abstand von 450 m am rechten Fahrbahnrand positioniert.

Nach Aktivierung der Aufnahme wird der Versuchsträger mit einer konstanten Geschwindigkeit von 40 km/h auf die stehende Blendquelle zubewegt. Nach Passieren des Fahrzeugs wird die Aufnahme beendet.

Analyse der Messergebnisse

Im Offline-Modus werden die aufgenommenen Daten erneut abgespielt und in drei verschiedenen Modi der Bildverarbeitung analysiert:

- Mono-Modus,
- Stereo-Modus mit zueinander kalibrierten Kameras und
- Stereo-Modus mit zueinander dekalibrierten Kameras.

Im Stereo-Modus werden die Abstandsangaben eines kalibrierten Systems mit den Angaben eines dekalibrierten Systems verglichen. Im ersten Fall werden zum Aufnahmezeitpunkt aktuelle Kalibrierdaten verwendet. Diese wurden beim Lieferanten erzeugt. Im zweiten Fall wird die gleiche Videosequenz mit selbstgenerierten Kalibrierdaten analysiert. Nach Erhalt

der aktuellen Vergleichskalibrierdaten wurden diese zweiten Kalibrierdaten innerhalb von 5 Tagen und nach einer Fahrleistung von ca. 1100 km bei Tage durch die Autokalibrierfunktion des Stereo-Systems im Fahrzeug erzeugt. Die Abstandsangaben werden anhand der Objektliste gewonnen und sind in Abbildung 31 dargestellt. Zu sehen sind die Ergebnisse der drei unterschiedlichen Modi sowie der Sollabstand.

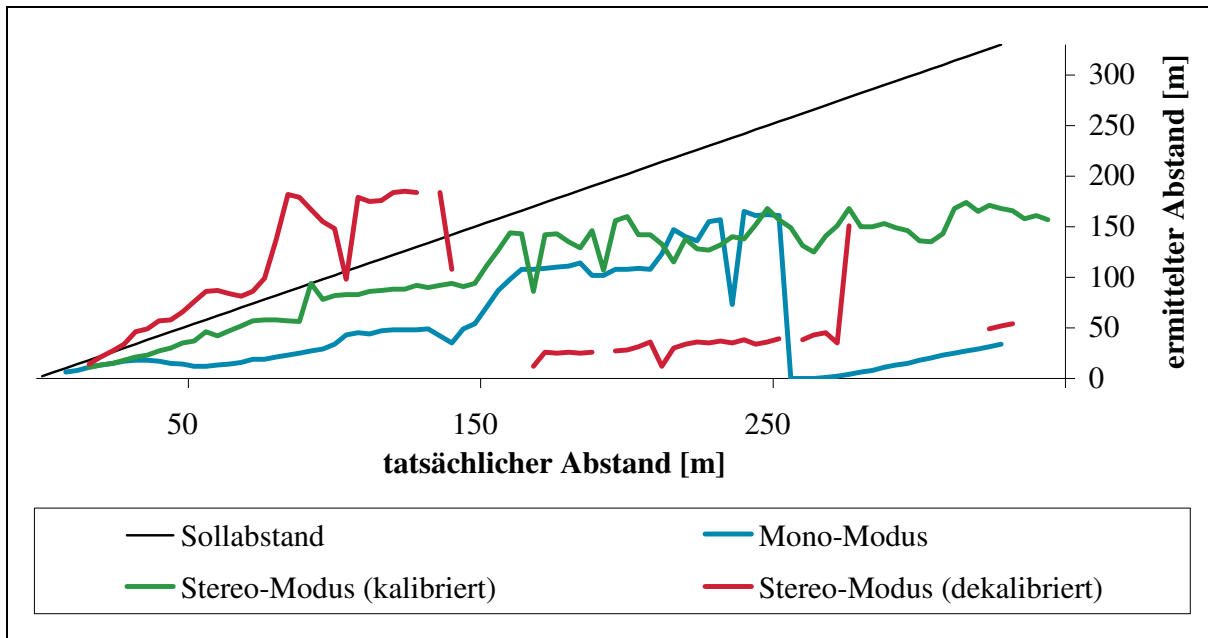


Abbildung 31 Validierung der Abstandsschätzung im Mono-Betrieb und Stereo-Betrieb

Diskussion der Ergebnisse des Kamerasystems im Mono-Modus

Die im Mono-Modus geschätzten Abstandsangaben sind grundsätzlich kleiner als der tatsächliche Abstand. Oberhalb von 250 m sind die Abweichungen gravierend. Zudem werden Objekte, bei denen nur eine Lichtquelle erkannt wird, mit einer Entfernung von 0 m angegeben. Weiter wird die Position dieser Objekte exakt im Mittelpunkt des Kamerabildes bei $(0^\circ, 0^\circ)$ angegeben.

Versuchsfahrten im realen Straßenverkehr haben gezeigt, dass das Kamerasystem im Mono-Betrieb über eine hohe Detektionsleistung verfügt. So werden entgegenkommende Fahrzeuge in einer Entfernung von bis zu 800 m und vorausfahrende bis zu einer Entfernung von 400 m erkannt.

Diskussion der Ergebnisse des Kamerasystems im Stereo-Modus

Das Kamerasystem mit aktuellen Kalibrierdaten liefert in dem halbdynamischen Test bis zu einer Entfernung von ca. 200 m ausreichend genaue Daten. Oberhalb dieser Entfernung weichen die ermittelten Abstände umso mehr ab, je größer die tatsächliche Entfernung ist. Ursache ist, dass nie eine Entfernung größer als 200 m ermittelt wird.

Für den Fall, dass beide Kameras nicht korrekt aufeinander kalibriert sind, sind Abstandsinformationen nur teilweise verfügbar. Hierbei erscheinen Objekte trotz Vorhandensein im Kamerabild nicht in der Objektliste. Ursache dafür ist eine misslungene Zuordnung des

jeweiligen Objektes von dem linken zum rechten Kamerabild. In einem solchen Fall ist keine Abstandsschätzung möglich und das Objekt wird daher nicht zur Objektliste hinzugefügt.

Während Versuchsfahrten im realen Straßenverkehr wird bestätigt, dass nie Abstände über 200 m ermittelt werden. Maximale Detektionsentfernungen sind mit 800 m und 400 m ähnlich dem Mono-Modus. Allerdings ist zu beobachten, dass auch mit zueinander kalibrierten Kameras etliche Objekte nicht per Objektliste übermittelt werden.

Eine zügig voranschreitende mechanische Dekalibrierung verschärft diese Thematik. Mit steigender Dekalibrierung misslingt die Zuordnung zunehmend häufiger. Dabei fällt auf, dass die hochdynamische (und hochempfindliche) Autokalibrierungsfunktion nicht in der Lage ist, die Einwirkungen von wenigen Kilometern Fahrt zu kompensieren²⁵. Bei einer derartigen Dekalibrierung ist eine erneute Kalibrierung durch den Hersteller notwendig.

Weitere Erkenntnisse im realen Straßenverkehr

Die hohe Empfindlichkeit des monochromatischen Bildsensors führt unabhängig vom Betriebs-Modus des Kamerasystems dazu, dass lichtstarke Heckleuchten fälschlicherweise als Scheinwerfer klassifiziert werden.

Des Weiteren führen Reflexionen des eigenen Fernlichts zu Fehlinterpretationen als Scheinwerfer und als Heckleuchten. An Schildern und besonders an Leitpfosten kommt es zu diesen. Die Folge ist eine flackernde Entblendung. Wird eine Reflexion als relevantes Objekt übermittelt, so wird das entsprechende Lichtsegment ausgeschaltet. Ab diesem Moment gibt es keine Reflexion mehr und das Lichtsegment wird wieder eingeschaltet. Dadurch entsteht erneut eine Reflexion, die wiederum als relevantes Objekt gewertet wird. In Abbildung 29 weiter oben ist das Empfindlichkeitsspektrum des verwendeten Bildsensors dargestellt. Deutlich ist das Maximum der Empfindlichkeit im Blauen zu erkennen. Dies führt zu einer Verschärfung dieser Fehlinterpretationen gerade in Verbindung mit einem LED-Licht, das einen ähnlichen Verlauf in seinem Emissionsspektrum aufweist.

Bedeutung der Ergebnisse für die weitere Arbeit

Das Kamerasystem darf im Stereo-Modus für die weitere Arbeit nicht weiter verwendet werden. Hauptsächlich aufgrund der Dekalibrierungsthematik sind weder eine durchgängige Abstandsbestimmung noch eine sichere Übermittlung aller relevanten Objekte möglich. Die Tatsache, dass nicht alle relevante Objekte erkannt werden, ist für dessen Verwendung für das Matrix-Beam-System, aber auch für die Verkehrsraumanalyse, als Ausschlusskriterium zu werten.

Im Mono-Modus überliefert das Kamerasystem ebenfalls nicht alle relevanten Objekte, was zur Blendung anderer führen könnte. Das Kamerasystem darf daher nicht als Sensorik für die Funktion Matrix-Beam dienen. Sofern beide Lichtquellen eines Objektes erkannt werden, zeichnet sich das Kamerasystem im Mono-Modus durch eine sehr zuverlässige und rechtzeitige Erkennung relevanter Objekte aus. Aus diesem Grund wird dieser Betriebs-

²⁵ Die erneut notwendige Basiskalibrierung kann nur beim Hersteller durchgeführt werden.

Modus für die anstehende Verkehrsraumanalyse gewählt. Für den Informationsgehalt der Verkehrsraumanalyse bedeutet das folgende Abstriche:

- keine Abstandsangaben, da die Abstandsschätzung nicht zuverlässig ist,
- keine Unterscheidung zwischen entgegenkommendem und vorausfahrendem Verkehr aufgrund der Fehlinterpretation lichtstarker Heckleuchten als Scheinwerfer und
- Verwerfung von Objekten mit einer Abstandsangabe von 0 m, da deren Position immer im Mittelpunkt des Kamerabildes angegeben wird.

Durch letztere steht die Auftrittswahrscheinlichkeit für Objekte in diesem Punkt in keiner Relation zur tatsächlichen Objekterkennung und würde somit die Auswertung verfälschen.

Persönliche Anmerkung des Autors zur Untersuchung des Kamerasystems

Dieser Abschnitt soll keinesfalls zu einem Misstrauen in die Bilderkennung führen. Bei dem unersuchten Kamerasystem handelt es sich um kein vollständig entwickeltes oder seriennahes Kamerasystem. Das erklärt seine Schwächen. Gegenwärtig sind Systeme mit einer deutlich besseren Performance auf dem Markt zu finden. Eine etwaige Verbesserung des vorgestellten Kamerasystems war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Es sei hier vorweggenommen, dass zum Ende der Arbeit, ein anderes leistungsfähigeres Kamerasystem implementiert wurde. Mit diesem ist eine zuverlässige Erkennung und Übermittlung aller relevanten Objekte gewährleistet, wodurch die Funktion Matrix-Beam in dem fahrbaren Versuchsträger Nanolux umgesetzt werden konnte.

5.3 Theoretische Systemauslegung

Die optische Kopplung von Kamera und Scheinwerfer ist der wesentliche Bestandteil der theoretischen Systemauslegung. Mit der Kamera werden andere Verkehrsteilnehmer erkannt und über einen sogenannten Objektgleich wird daraufhin entschieden, welche LED im Scheinwerfer ausgeschaltet werden muss, um Blendung zu vermeiden. Aufgrund dieser Kopplung entstehen neue Herausforderungen sowie auch neue Möglichkeiten, die nachfolgend betrachtet werden.

5.3.1 Objektgleich

Auf Basis des Objektgleiches wird ermittelt, welche LED an- und welche ausgeschaltet wird. Dabei wird der Winkelbereich, unter dem ein Objekt erscheint, mit den Winkelbereichen verglichen, die die einzelnen LEDs ausleuchten (siehe Abbildung 32). Im Folgenden wird zwischen Lichtsegment und Kamerasegment unterschieden. Diese sind folgendermaßen definiert:

- Lichtsegment: umfasst den Bereich, der von einer LED ausgeleuchtet wird.
- Kamerasegment: umfasst den Bereich eines Lichtsegmentes aus Sicht der Kamera.

Die Winkelbereiche der erkannten Objekte werden aus Sicht der Kamera bestimmt. Die Winkelangaben der Lichtsegmente beziehen sich auf den Scheinwerfer. Dadurch entsteht eine Parallaxe, aufgrund derer nicht beide Angaben direkt miteinander verglichen werden dürfen.

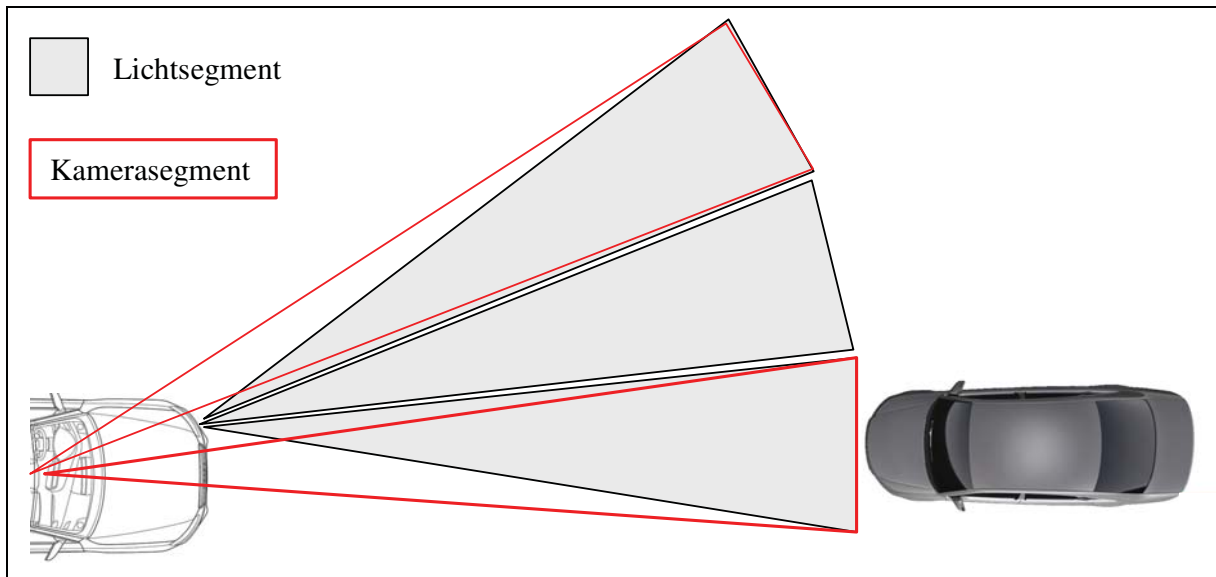


Abbildung 32 Objektabgleich (nicht maßstabsgetreu)

Um trotz Parallaxe den Objektabgleich durchführen zu können, ist es notwendig, beide Angaben entweder aus Sicht der Kamera oder aus Sicht der Scheinwerfer zu verwenden.

5.3.2 Parallaxenfehler

Als Parallaxe wird die scheinbare Positionsänderung eines Objektes aus unterschiedlichen Blickwinkeln bezeichnet. Ausgangssituation dieses Abschnittes ist, dass sich die Anbau- position der Kamera und des Scheinwerfers unterscheiden. Der Kamerawinkel α_K , unter dem ein Objekt aus Sicht der Kamera erkannt wird, stimmt daher nicht mit dem Scheinwerferwinkel α_{SW} überein, unter dem der Scheinwerfer das gleiche Objekt anleuchtet (siehe Abbildung 33). Als Parallaxenfehler wird der Differenzwinkel $\Delta\alpha$ aus den beiden unterschiedlichen Blickwinkeln von Kamera und Scheinwerfer definiert. Er berechnet sich auf folgende Weise:

$$\Delta\alpha(\alpha_{SW}, \alpha_K) = \alpha_{SW} - \alpha_K \quad (5.1)$$

5.3.3 Objektabgleich unter Berücksichtigung des Parallaxenfehlers

Vollständige Informationsdichte

Im Idealfall sind über die Kamera der Abstand d_K und der Winkel α_K zum Objekt bekannt (siehe Abbildung 33). In einem solchen Fall kann der Objektabgleich sowohl aus Sicht des Scheinwerfers wie auch aus Sicht der Kamera exakt durchgeführt werden und nur Lichtsegmente, die blenden würden, werden deaktiviert (siehe Abbildung 34). An dieser Stelle wird nur der Objektabgleich aus Sicht des Scheinwerfers vorgestellt. Der Unterschied zur zweiten Methode ist, dass hier die Kamerawinkel, unter denen die Objekte erscheinen, anstatt der Scheinwerferwinkel der Lichtsegmente transformiert werden.

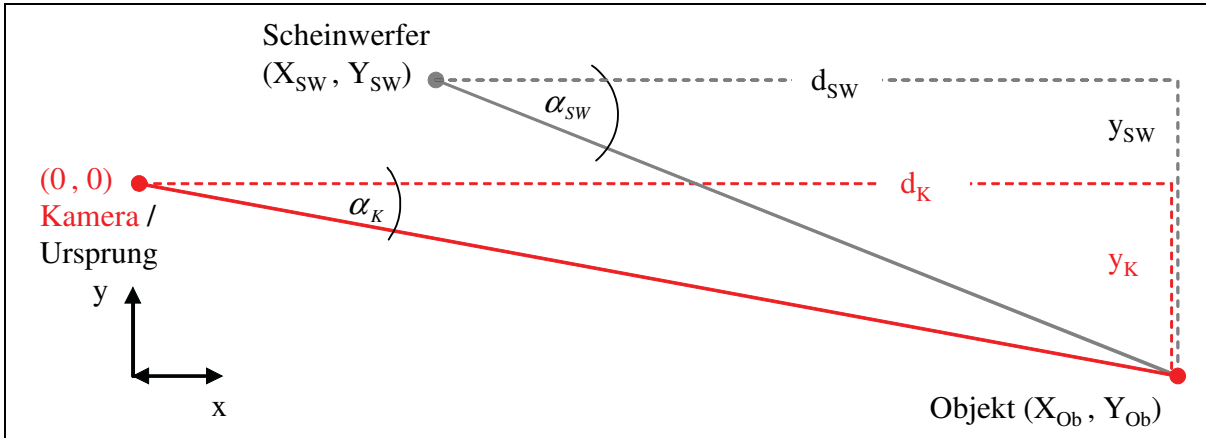


Abbildung 33 Parallaxenfehler zwischen Kamera und dem linken Scheinwerfer (Skizze)

Zum Objektgleich muss die Winkelposition des Objektes aus Sicht des Scheinwerfers ermittelt werden. Ist diese bekannt, kann dieser Winkelbereich des Objektes mit den Segmentgrenzen eines jeden Lichtsegmentes verglichen werden. Zu beachten ist, dass die nachfolgende Umwandlung für beide Scheinwerfer getrennt durchzuführen ist.

Mit Hilfe der Abstandes d_K und des Kamerawinkels α_K kann der räumliche Versatz zwischen Kamera und Scheinwerfer berücksichtigt werden. Über $y_K = d_K \cdot \tan(\alpha_K)$ lässt sich der laterale Abstand zum Objekt aus Sicht der Kamera bestimmen. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Anbaupositionen von Kamera und Scheinwerfer, die ebenfalls bekannt sind, ergibt sich in Formel 5.2 der Winkel aus Sicht des Scheinwerfers. Aufgrund der symmetrischen Anbaulage beider Scheinwerfer zur X-Achse und so zur Kamera gilt die Formel für beide Scheinwerfer. Die Y-Koordinate des rechten Scheinwerfers ist negativ, was in einem anderen Scheinwerferwinkel resultiert.

$$\alpha_{SW}(d_K, \alpha_K) = \arctan\left(\frac{y_K - Y_{SW}}{d_K - X_{SW}}\right) = \arctan\left(\frac{d_K \cdot \tan(\alpha_K) - Y_{SW}}{d_K - X_{SW}}\right) \quad (5.2)$$

Unvollständige Informationsdichte

Wenn Abstandsangaben teilweise inkorrekt vorliegen, darf die soeben beschriebene Umwandlung der Winkel nicht angewendet werden. Die Folge ist, dass der Objektgleich nicht durchgeführt werden kann und somit keine Entscheidung getroffen werden kann, wie die einzelnen LEDs anzusteuern sind.

Um dennoch die LED-Ansteuerung realisieren zu können, stellt es einen Ausweg dar, die Objektbereiche mit künstlich vergrößerten Kamerasegmenten zu vergleichen. Diese künstliche Vergrößerung ist notwendig, um den Parallaxenfehler zu berücksichtigen, so dass eine Blendung unabhängig von der Abstandsangabe vermieden wird (siehe Abbildung 34). Entfernung A beschreibt die Entfernung, unterhalb der ein Entgegenkommender nicht mehr durch ein Fernlicht geblendet werden kann. Die Beleuchtungsstärke muss dabei unterhalb von 0,5 lx liegen. Oberhalb der Entfernung B weist das Fernlicht ebenfalls eine Beleuchtungsstärke unterhalb von 0,5 lx auf. Die horizontalen Winkelangaben der Punkte P1-H und P2-H aus

Sicht der Kamera werden zur Beschreibung des Parallaxenfehler kompensierenden Kamera-segmentes verwendet.

Die künstliche Kamerasegmentvergrößerung führt zu einer früheren Abschaltung sämtlicher Lichtsegmente als eigentlich notwendig und somit zu Verlusten im Nutzungsgrad. Dafür wird gleichzeitig eine Blendung, unabhängig vom Abstand, vermieden. Auf Seite 98 werden die Auswirkungen des Parallaxenfehlers bei unterschiedlichen Informationsdichten quantifiziert. Die in Abschnitt 5.2.3 durchgeführte Untersuchung des zur Verfügung stehenden Kamerasystems zeigt, dass Abstandsangaben teilweise nicht korrekt ermittelt werden. Daher ist die Verwendung dieser Methode des Objektgleiches unumgänglich. Nur mit dieser ist im Versuchsträger jederzeit eine sichere Entblendung garantiert.

5.3.4 Neue Möglichkeiten aufgrund der optischen Kopplung

Durch die optische Kopplung von Scheinwerfer und Kamera werden neue Wege ermöglicht. Die Kamera ist in der Lage, das Scheinwerferlicht zu messen. Auf Basis einer laufenden automatischen Messung des Scheinwerferlichtes (Eingangsgröße) kann gezielt auf dasselbige als Ausgangsgröße Einfluss genommen werden, wodurch ein Regelkreislauf entsteht.

Automatische Scheinwerferjustage mit sichtbarer Markierung

Die automatische Scheinwerferjustage kontrolliert über eine sichtbare Schattenmarkierung die Einstellung des Scheinwerfers. Bei Bedarf wird der Scheinwerfer automatisch neu eingestellt [Hilg08]. Dazu wird die Position der Schattenmarkierung, die sich im Vorfeld des Scheinwerfers befindet, überwacht. Verändert sich deren Position, so kann auf eine Verstellung des Scheinwerfers geschlossen werden.

Über Schrittmotoren, die bereits heute das Projektionsmodul für das Kurvenlicht und für die Leuchtweitenregulierung horizontal bzw. vertikal schwenken, ist es möglich, die Scheinwerfereinstellung wieder zurück in die Sollstellung zu fahren.

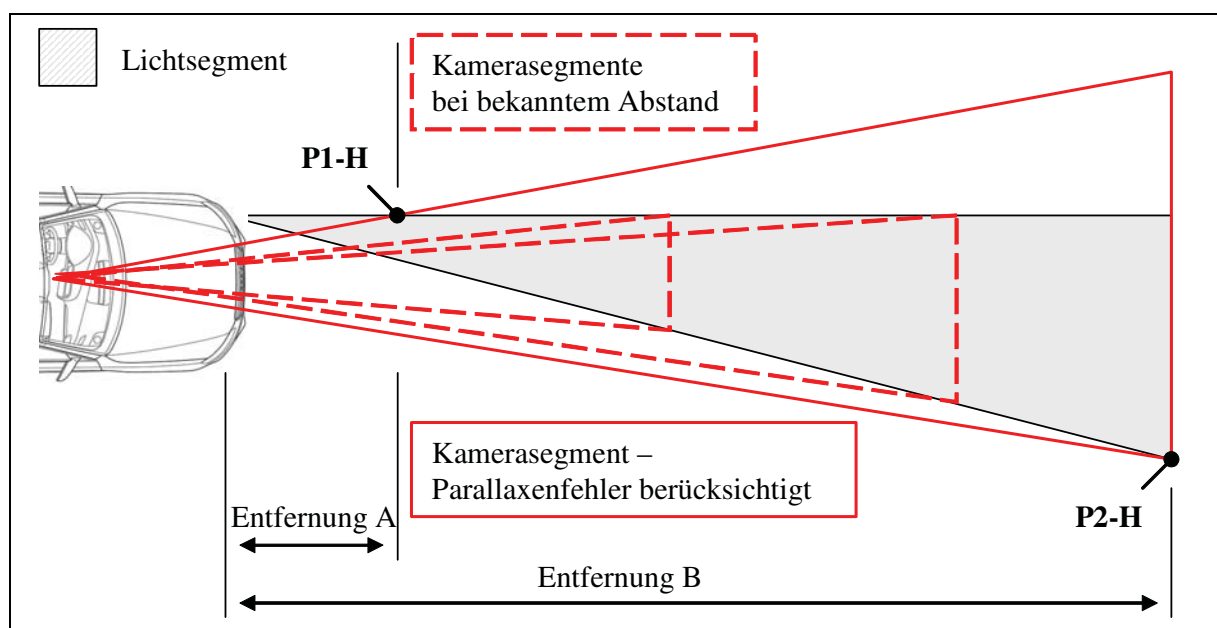


Abbildung 34 Lichtsegment und Vergrößerung des Kamerasegments

Eine Fehlstellung z.B. eines Lichtsegments kann zu Blendung führen, da die Winkelangaben des zugehörigen Kamerasegments nicht mehr korrekt sind. Ein Ausweg ist, die Kamerasegmente um einen zusätzlichen statischen Sicherheitsbereich zu vergrößern - ähnlich der Berücksichtigung des Parallaxenfehlers. Dieses Verfahren beruht auf einer gut sichtbaren Schattenmarkierung im Vorfeld der Lichtverteilung. Diese Inhomogenität des Lichtbildes kann jedoch vom Fahrer als störend empfunden werden.

Automatische Scheinwerferjustage mit unsichtbarer Markierung

Ein Verfahren mit sogenannten „unsichtbaren Markierungen“, die nur für die Kamera oder einen Sensor sichtbar sind, ist in [Humm09b] zu finden. Dabei wird eine sichtbare Schattenmarkierung für den Großteil der Zeit mit einem zusätzlichen Lichtstrahl überdeckt. Dem Fahrer wird so eine homogene Lichtverteilung zur Verfügung gestellt.

Nur im Moment der Kameramessung wird dieser zusätzliche Lichtstrahl für wenige Millisekunden gedimmt. Aufgrund der Trägheit des Auges soll diese kurze Präsentation der Schattenmarkierung nicht auffallen. Ein anderer Weg, eine unsichtbare Markierung zu erreichen, ist mit einer Markierung außerhalb des sichtbaren Wellenlängenbereiches möglich.

Diagnose per Kamera

Mit Hilfe einer Kamera wird der Zustand der Lichtquellen im Scheinwerfer ermittelt. Durch Messung von Rückreflexionen in definierten Zuständen kann nicht nur auf deren Ausfall, sondern auch auf deren verbliebenen Lichtleistung zurückgeschlossen werden. Gegenwärtig wird ausschließlich der Zustand bzw. der Ausfall einer Lichtquelle über einen Mindeststrom diagnostiziert. Mit der neuen Methode ist es zudem denkbar, die aufgrund von Degradation gesunkene Lichtleistung konstant zu regeln [Humm09d].

Ein alternatives Diagnoseverfahren stellt die Überwachung der Leuchtmittel mit Photodioden dar. Die Photodioden kontrollieren dazu entweder direkt oder indirekt über Reflexionen an der Abschlusscheibe des Scheinwerfers die vorhandene Lichtleistung [Hopp01], [Gist90].

Reflexminimierung und Kontrasterhöhung

Reflexionen des Fernlichts an Schildern und Leitpfosten führen zu einer Fehlinterpretation derer als zu entblendende Lichtquelle. Wird der Scheinwerfer während der Belichtungszeit der Kamera ausreichend stark gedimmt, können störende Reflexionen vermieden werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Eigenblendung der Kamera, die das Scheinwerferlicht hervorruft, minimiert wird. Das erhöht den Kontrast und somit die Erkennungsleistung der Kamera [Humm09e].

5.4 Topologie des Gesamtsystems

Nachdem auf die wesentlichen Komponenten, den LED-Scheinwerfer und das Kamerasystem, sowie auf die theoretische Systemauslegung eingegangen wurde, wird an dieser Stelle das Gesamtsystem anhand des Versuchsträgers Nanolux beschrieben. Dabei wird auf die Topologie, auf die Infrastruktur und auf die Funktionsweise des Gesamtsystems eingegangen. Abgeschlossen wird dieser Abschnitt durch eine Messung zur Latenzzeit und durch die Vorstellung des Bedienkonzeptes.

5.4.1 Integration und Funktionsweise

Um die einzelnen Komponenten bzw. das Gesamtsystem mit der Funktion blendfreies LED-Fernlicht in dem Versuchsträger, einen Audi A8, zu integrieren, war es notwendig, zuvor eine entsprechende Infrastruktur bereitzustellen. In Abbildung 35 ist die Topologie des Versuchsträgeraufbaus dargestellt. Das Kamerasystem zur Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer ist an der Frontscheibe in der Nähe des Spiegelfußes angebracht. Die erhaltenen Kamera-Bilder werden von der Bildverarbeitung auf dem Fahrzeugrechner analysiert. Es wird dabei das Kamerasystem im Mono-Modus verwendet, da dieser Betriebs-Modus eine bessere Erkennungsleistung garantiert als der Stereo-Modus (vgl. Untersuchung des Kamerasystems auf Seite 41).

Die Ergebnisse der Bildverarbeitung werden in einer Objektliste hinterlegt, die die Position und die Ausdehnung der erkannten Verkehrsteilnehmer beinhaltet. Die Objektliste wird über den virtuellen CAN (Controller Area Network) im Fahrzeugrechner an die Entwicklungsumgebung ADTF (Automotive Data and Time triggered Framework) überliefert. Virtueller CAN bedeutet, dass dieser CAN nicht physikalisch existiert. Er wird als Fahrzeugrechner interne Schnittstelle zwischen ADTF und der Bildverarbeitung genutzt. Würde die Bildverarbeitung nicht auf dem Fahrzeugrechner, sondern extern laufen, so könnte die Schnittstelle zu einem physikalischen CAN abgeändert werden.

Ein spezieller Filter in der Entwicklungsumgebung wertet die Objektliste zusammen mit weiteren Fahrzeugsignalen aus. Es werden dabei die Stellung des Lichtdreh Schalters und des Fernlichthebels sowie die Fahrzeuggeschwindigkeit vom Komfort-CAN ausgelesen. Der Filter entscheidet auf Basis dieser Informationen, ob sich das System im adaptiven Fernlichtmodus befindet. Das ist der Fall, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Bildverarbeitung aktiv,
- Lichtdreh Schalter in Automatik-Stellung,
- Mindestgeschwindigkeit erreicht (> 60 km/h) und
- Fernlichthebel ein.

Der Filter hat Kenntnis über die Ausdehnung und Position der einzelnen Lichtsegmente bzw. Kamerasegmente. Zusammen mit den Informationen aus der Objektliste führt er den Objektgleich durch. Das bedeutet, dass er entscheidet, welche Lichtsegmente blenden und welche nicht. Daraufhin werden die zugehörigen LEDs entsprechend über den Sub-CAN angesteuert. Der Objektgleich an sich findet auf Basis der künstlich erweiterten Kamerasegmente statt. Es kann so auch bei teilweise unvollständigen Abstandsinformationen der

Parallaxenfehler kompensiert und so jederzeit eine sichere Entblendung gewährleistet werden (siehe Seite 45). Die Grundlichtfunktionen wie Abblendlicht, Fahrtrichtungsanzeiger (Blinker) und Tagfahrlicht (DRL) werden stets über ein CANlog3 realisiert [CAN106]. Das CANlog3 ist ein frei programmierbarer Busteilnehmer der Firma G.I.N., mit dem die obigen Befehle schnell und einfach umgesetzt werden können. Sofern sich der Lichtdrehesalter nicht in Automatik-Stellung befindet, wird das Fernlicht ebenfalls über das CANlog3 angesteuert. Bei Lichthupe befindet sich der Fernlichthebel in einer anderen Stellung als bei Fernlicht und wird so ebenfalls über das CANlog3 bedient.

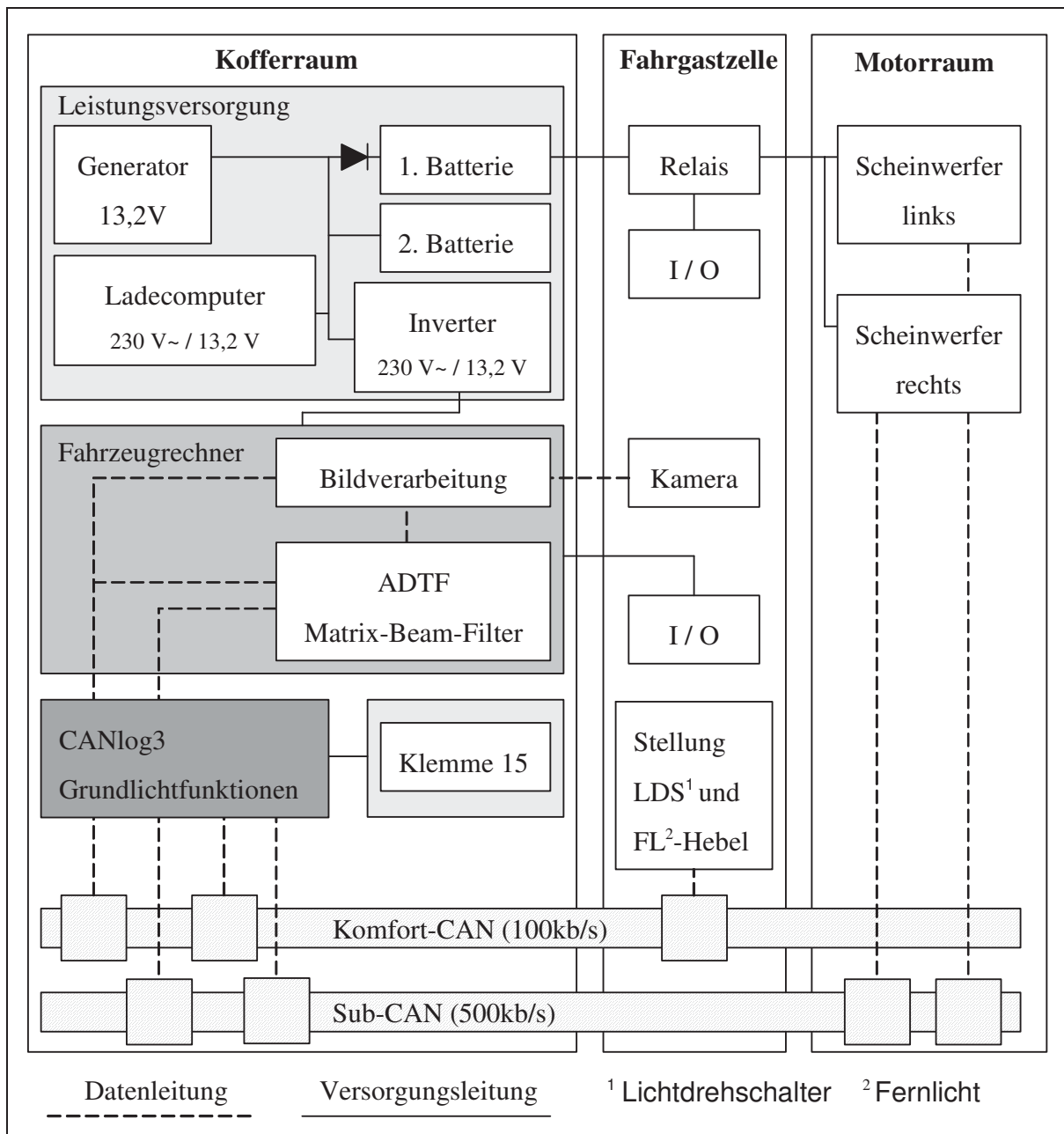


Abbildung 35 Topologie Nanolux-Versuchsträger; ADTF Automotive Data and Time-triggered Framework, eine Entwicklungsumgebung der Audi Elektronik Venture AEV

Diese Aufteilung der Lichtfunktionen auf den Fahrzeugrechner und auf das CANlog3 bietet den Vorteil, dass die Ansteuerung sämtlicher herkömmlicher Grundlichtfunktionen auch bei ausgeschaltetem Fahrzeugrechner über das CANlog3 sichergestellt werden kann.

5.4.2 Infrastruktur

Zur Kommunikation der einzelnen Systeme wird auf mehrere CANs zurückgegriffen. Die Vorgaben des Fahrers werden über den Komfort-CAN ausgelesen. Die Schnittstelle zwischen Bildverarbeitung und ADTF ist über einen virtuellen Hochgeschwindigkeits-CAN im Fahrzeugrechner realisiert. Als Sub-CAN wird ein physikalischer Hochgeschwindigkeits-CAN verwendet, der ausschließlich zur Ansteuerung der Scheinwerfer dient.

Über die zweite Batterie werden der Rechner und die Kamera mit Leistung versorgt. Eine Trenndiode hin zur ersten und eigentlichen Fahrzeugbatterie verhindert eine Entladung derer durch das System. Der Ladecomputer wird mit einer Wechselspannung von 230 V gespeist und versorgt beide Batterien mit einer Gleichspannung von 13,2 V. Ein laufender Motor ist für Tests, besonders im Lichtkanal, nicht notwendig und eher hinderlich. Über den Ladecomputer gespeist, kann der Versuchsträger auch ohne laufenden Motor benutzt werden. Der Fahrzeugrechner sowie die Scheinwerfer können über Schalter in der Mittelkonsole geschaltet werden. Das CANlog3 wird automatisch bei Einschalten der Zündung aktiviert.

Fahrzeugdiagnose

Die Nanolux-Scheinwerfer werden nicht durch die bestehenden 13,2 V-Fahrzeugsignale angesteuert. Die Fahrzeugdiagnose registriert daher den Ausfall sämtlicher Scheinwerferlichtfunktionen, weil deren Diagnose auf einer Mindeststromüberwachung beruht. Es besteht somit die Möglichkeit, Lastwiderstände anstelle der Lichtfunktionen einzusetzen. Diese verheizen sprichwörtlich die Energie und liefern so den benötigten Mindeststrom.

Eine andere und elegantere Alternative konnte hier gewählt werden. Das für die Diagnose verantwortliche Steuergerät verfügt über einen EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory), einen wiederbeschreibbaren Digitalspeicher. Eine Änderung der Programmierung ist somit möglich. Die Diagnose wird daher durch eine Umcodierung deaktiviert.

5.4.3 Latenzzeitmessung Gesamtsystem

Unter Latenzzeit versteht man im Allgemeinen die Zeitspanne von Beginn einer Anforderung bis die Anforderung erfüllt wurde [Schü97]. In diesem Fall bedeutet das die Dauer, die das System nach Darbietung einer Lichtquelle benötigt, um die entsprechenden LEDs auszuschalten.

Die folgende Messung wurde im Lichtkanal durchgeführt. Aufgrund der sehr geringen Anstiegszeit von LEDs von wenigen Nanosekunden [Köth08] dient hier eine LED-Heckleuchte als Signalgeber. Je eine Photodiode wird an die Abschlusscheibe des Nanolux-Scheinwerfers und an die LED-Heckleuchte angebracht. Die Photodioden werden dabei im Sperrbetrieb an eine Spannungsversorgung angeschlossen (siehe Abbildung 36).

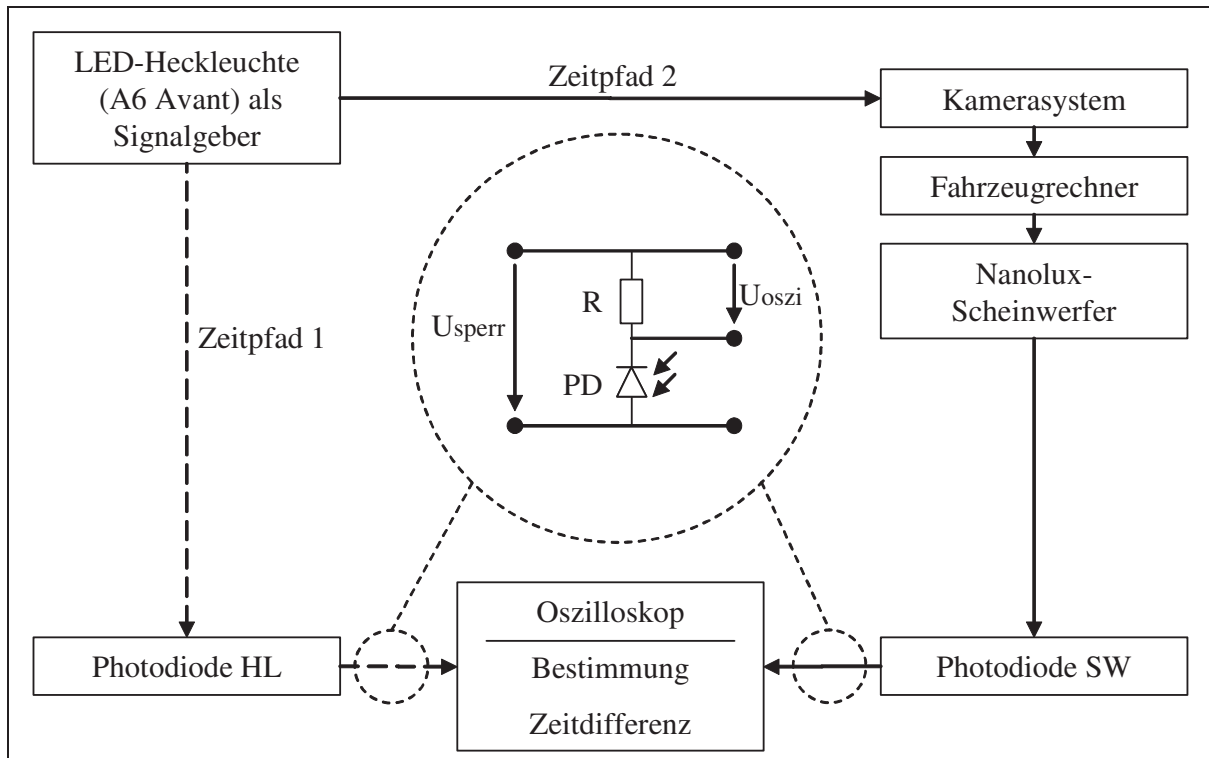


Abbildung 36 Messaufbau Latenzzeit

Die Sperrspannung führt zu einer kleineren Sperrschichtkapazität und so zu einer schnelleren Antwort. Bei Lichteinfall werden die Photodioden leitend. Das entstehende Spannungspotenzial über dem Vorwiderstand wird mit einem Oszilloskop abgegriffen²⁶. Zu Beginn der Messung ist die LED-Heckleuchte ausgeschaltet, das Fernlicht des Nanolux-Scheinwerfers ist an. Bei Aktivierung des Bremslichtes wird dessen Photodiode leitend. Sobald das System auf dieses Reizsignal reagiert, geht das Fernlicht aus und dessen Photodiode sperrt. Als Latenzzeit wird die Dauer zwischen dem Spannungsanstieg (50 %) an dem Vorwiderstand der LED-Heckleuchte und dem Spannungsabfall (50 %) an dem Vorwiderstand des Fernlichtes herangezogen.

Eine Messreihe von 40 Messungen ergibt eine mittlere Latenzzeit von 196 ms mit einer Standardabweichung von +/- 21 ms. Die Gesamtdauer setzt sich aus mehreren aufeinander folgenden und deterministischen Verarbeitungsschritten zusammen:

- der Bildaufnahme und Bildverarbeitung inkl. Plausibilisierung,
- der Übertragung der Objektliste per CAN-Bus zum Fahrzeugrechner,
- der Auswertung der Objektliste und Generierung der Ansteuerbefehle im ADTF,
- der Übertragung der Ansteuerbefehle an die Leistungsmodule des Scheinwerfers und
- der Verarbeitungsdauer der Leistungsmodule bis zur LED-Ansteuerung.

Der Hauptanteil an der Latenzzeit wird durch die Plausibilisierung eines neuen Objektes im Kamerabild verursacht. Erscheint ein neues Objekt im Kamerabild, so wird dessen Echtheit

²⁶ Messmittel: Audi A6 Avant Heckleuchte, BWP-Photodioden Fa. Vishay Semiconductors, Fluke 199C Scopemeter Color (Oszilloskop), Vorwiderstand 1 M Ω , Sperrspannung 15 V.

und Relevanz über zwei bis vier Bilder hinweg überprüft und bestätigt. Die Zykluszeit der Bildaufnahme beträgt zusammen mit der Analyse der Bildverarbeitung 45 ms. Die Standardabweichung ergibt sich aufgrund der deterministischen Arbeitsschritte, die nicht zeitlich synchronisiert sind. Den größten Einfluss besitzt dabei der Moment, in dem die Lichtquelle erscheint, in Kombination mit dem Zustand der Bildaufnahme, die nur jede 45 ms für eine Dauer von je 10 bis 15 ms durchgeführt wird.

$$t_L = T_{PD-SW, Abstieg} - T_{PD-HL, Anstieg} = 196 \text{ ms} \pm 21 \text{ ms} \quad (5.3)$$

Sofern sich Objekte innerhalb des Detektionsbereiches der Kamera befinden, blendet das System fünfmal schneller ab als ein Mensch. Nachts erhöht sich die menschliche Reaktionszeit auf eine Sekunde. Zudem herrschen während der Messung im Lichtkanal künstliche Bedingungen vor, die den Plausibilisierungsvorgang verlängern. In der Realität sind Objekte meist zuerst am Bildrand oder in einer großen Entfernung mit einer entsprechend niedrigen Lichtintensität zu sehen. Bei der Messung hingegen erscheinen die Objekte plötzlich und wie aus dem Nichts. Zudem beträgt die Fahrzeuggeschwindigkeit, die in die Bildverarbeitung mit eingeht, 0 km/h.

Sobald im Fahrbetrieb ein Objekt erkannt und plausibilisiert ist, wird die Latenzzeit drastisch gesenkt. Durch den wegfallenden Plausibilisierungsvorgang wird eine Latenzzeit von unter 100 ms sichergestellt.

5.4.4 Bedienkonzept

Das Bedienkonzept beschreibt die Schnittstelle zwischen dem Fahrer und dem blendfreien Fernlichtsystem. Im Wesentlichen orientiert sich das Bedienkonzept an dem des Fernlichtassistenten (FLA) [Scha07], [Brod05]. Abbildung 37 zeigt das Bedienkonzept und dessen Zustände in Form eines Petrinetzes.

Das System befindet sich im Automatik-Modus, sofern der Lichtdrehshalter in Automatik-Stellung ist. Wenn dieser nicht in Automatik-Stellung ist, so ist das Fernlicht ausschließlich und wie gewohnt manuell per Fernlichthebel zu bedienen. Wenn im Automatik-Modus der Fernlichthebel betätigt und eine Mindestgeschwindigkeit von 60 km/h erreicht wird, wird das Fernlicht adaptiv angesteuert. Unterhalb von 30 km/h wird das Fernlicht deaktiviert. Bevor das Fernlicht erneut adaptiv angesteuert werden kann, muss zuerst wieder die Mindestgeschwindigkeit von 60 km/h überschritten werden.

Der Fahrer hat jederzeit die Möglichkeit, das Fernlicht manuell und intuitiv per Fernlichthebel zu deaktivieren. Unbeleuchtete Objekte wie Fußgänger oder Wild werden von der Kamerasensorik nicht erkannt. Sofern der Fahrer diese sieht, muss er das adaptive Fernlicht manuell per Fernlichthebel als Bestätigung „Gefahr erkannt“ ausschalten und so eine Entblendung sicherstellen. Das ist der Grund für dieses Bedienkonzept.

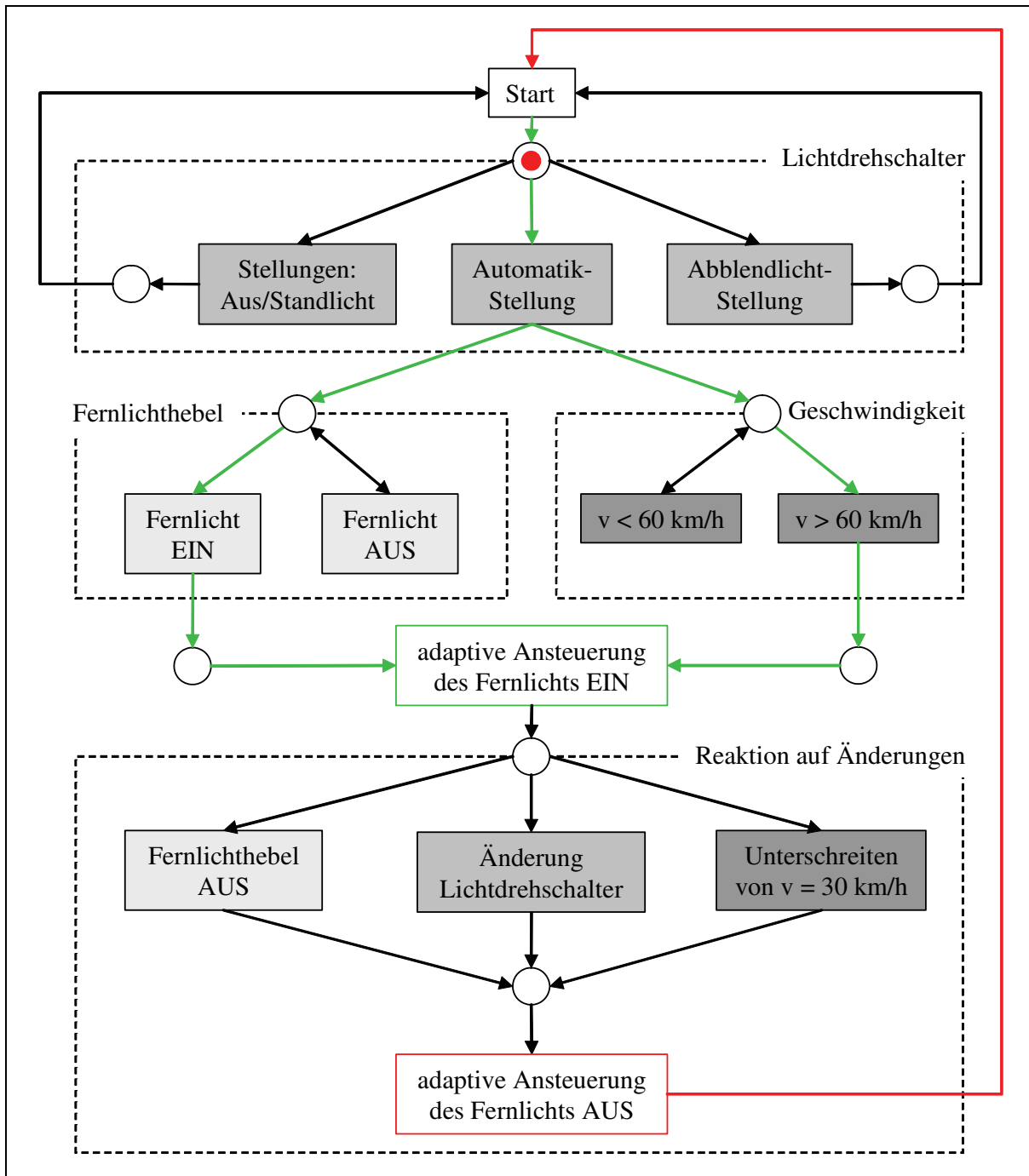


Abbildung 37 Beschreibung des Bedienkonzeptes anhand eines Petrinetzes; Grün: Pfade zur Aktivierung des adaptiven Fernlichtes; Rot: Pfad zur Rückführung einer Änderung zum Start

Fragliche automatische Entblendung unbeleuchteter Objekte

Unbeleuchtete Objekte wie Fußgänger oder Wild werden demnach auch trotz blendfreiem Fernlicht so lange geblendet, bis der Fahrer diese erkannt hat und infolge dessen das Fernlicht manuell deaktiviert hat. Das Bedienkonzept nimmt so kurzzeitig eine Blendung von unbeleuchteten Objekten in Kauf.

Es ist möglich, diese kurzzeitige Blendung von Fußgängern oder Wild zu vermeiden. Über eine Infrarotsensorik können diese unbeleuchteten Objekte erkannt und so auch adaptiv ent-

blendet werden. Allerdings ist eine solche automatische Entblendung nicht vertretbar, weil damit dem Fahrer die Chance genommen wird, den Fußgänger rechtzeitig zu sehen und entsprechend reagieren zu können.

Wäre der Fußgänger stets entblendet und somit im Dunkeln, könnte der Fahrer den Fußgänger frühestens innerhalb der Erkennbarkeitsentfernung seines Abblendlichtes erkennen. Der Fahrer könnte dadurch erst deutlich später reagieren. Diese verspätete Reaktion würde in Verbindung mit einer Geschwindigkeit von mehr als 70 km/h einen Unfall wohl unvermeidbar gestalten.

Ein blendfreies Fernlicht nimmt den Fahrer in die Pflicht, auf Fußgänger und auf Wild besonders zu achten und daraufhin manuell abzublenden. So wird zwar eine kurzzeitige Blendung in Kauf genommen, aber gerade dadurch werden eine frühzeitigere Erkennung und so eine frühzeitigere Reaktionseinleitung des Fahrers gewährleistet. Vergleicht man das Abblenden bei Fußgängern und Wild von einem blendfreien Fernlicht mit dem eines herkömmlichen Fernlichtes, so besteht kein Unterschied.

6 Verkehrsraumanalyse

Ausgangspunkt für die Verkehrsraumanalyse ist die Überlegung, dass das Wissen über das Auftretensverhalten von Verkehrsteilnehmern die Grundlage zur Erarbeitung einer effizienten Fernlichtsegmentierung eines Scheinwerfers mit blendfreiem LED-Fernlicht bildet.

In diesem Kapitel wird daher ein Modell entwickelt, das den für Deutschland typischen Straßenverkehr simulativ nachbildet. Als Ergebnisse werden eine Objektliste sowie eine Objekthäufigkeitsverteilung erzielt. Zum Vergleich dieses Simulationsmodells mit der Wirklichkeit wird zudem eine reale Verkehrsraumanalyse durchgeführt.

Der größte Nutzen eines blendfreien LED-Fernlichtes wird auf zweispurigen Straßen erwartet. Bei Begegnungsverkehr wird gerade hier eine bessere Sicht benötigt, um Unfälle zu vermeiden. Folglich muss auch die Fernlichtsegmentierung auf diesen Fall hin optimiert werden. Im Folgenden werden daher Straßen mit je einer Fahrspur in beide Richtungen untersucht.

6.1 Theoretische Verkehrsraumanalyse

Im Rahmen dieses Abschnittes werden die Grundlagen für die Modellierung des Verkehrsraumes dargestellt. Geometrische Straßendaten wie auch das Verkehrsgeschehen an sich stellen wichtige Informationen dafür dar.

6.1.1 Verfügbare Daten

In den Richtlinien zur Anlage von Straßen [RAS-L], [RAS-Q] sowie in der [DIN70000] werden die Linienführung, notwendige Straßenbreiten, Höchstgeschwindigkeiten und vieles Weitere vorgeschrieben. Allerdings ist der Bau des Straßennetzes, der auf diesen Vorgaben beruht, nur bedingt dokumentiert.

Informationen des statistischen Bundesamtes über die Streckenlänge, Jahresfahrleistung und das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen (DTV) der unterschiedlichen Straßenklassen sind in diversen Quellen veröffentlicht [GENE08], [VIZ06], [ADB05]. Eine Übersicht der Zulassungszahlen von Fahrzeugen in Deutschland bietet das Kraftfahrt Bundesamt [KBA08].

Elsner befuhr mit dem von der Bundesanstalt für Straßenwesen aufgebauten Messsystem GERDA (Gyro Equipped Road Data Analyzer) das deutsche Straßennetz. Ermittelt wurden die Streckenlänge, Längsneigung, Krümmungen und die Straßenbreite, um einige Parameter zu nennen [Elsn90].

Damasky ermittelte die Objekthäufigkeit von verschiedenen Objektarten (Verkehrsschilder, Fußgänger, Außenspiegel etc.). Die Objekthäufigkeit beschreibt den Ort und die Häufigkeit des Auftretens von Objekten. Als Ergebnisse stehen Graphiken mit 10 %-, 50 %- und 90 %-Bereichen der einzelnen Objekthäufigkeiten in bestimmten Abständen zum Messfahrzeug zur

Verfügung. Daneben ermittelte er auch die Fahrspurbreite und die Krümmungen der Straßen [Dama95].

Schwab las alle 10 bis 20 ms neben einer Videoaufzeichnung mehrere Fahrdynamiksignale ein. Er transformierte dieses Zeitraster in ein geschwindigkeitsunabhängiges Wegraster. Ausgelesene Fahrzeugsignale sind der Lenkradwinkel, die Gierrate, die die Drehrate eines Fahrzeuges um seine Hochachse bezeichnet, die Querschleunigung und die Geschwindigkeit. Über diese Signale bestimmte er das Vorkommen von horizontalen Krümmungen [Schw03].

Kuhl liefert detaillierte Daten zum Vorkommen von vertikalen Krümmungen. Er wertet dazu ausschließlich Fahrzeugsignale aus. Hierbei werden alle Nickbewegungen um die Querachse herausgefiltert, die nicht von einer Kuppe oder Wanne herrühren. Dafür berücksichtigt er neben der Gierrate und Querschleunigung auch die Höhenstände der Achsen [Kuhl06].

6.1.2 Zusammenführung der Daten

Die Daten von Elsner bieten einen guten Überblick. Allerdings befasst er sich nur mit dem Straßennetz des Bundes. Zudem handelt es sich dabei um die ältesten der verfügbaren Daten. Für horizontale Krümmungen wird auf die Daten von Schwab zurückgegriffen. Die Fahrspurbreiten werden von Damasky entnommen. Damasky untersuchte zwar auch das Vorkommen von vertikalen Krümmungen, jedoch sind die Daten von Kuhl detaillierter.

Horizontale Krümmungen

Schwab untersuchte das Vorkommen von Kurven auf verschiedenen Straßenklassen: Stadtstraße, Landstraße und Autobahn. Stadt- und Landstraßen weisen ein ähnliches Vorkommen auf. Stadtstraßen besitzen dabei einen höheren Anteil kleinerer Radien. Die Autobahn weist typischerweise große Radien auf. Durch Ein- und Ausfahrten steigt zudem der Kurvenanteil mit Radien von 50 m bis 75 m sprunghaft an. Abbildung 38 zeigt das Kurvenvorkommen auf Landstraßen, das für die Verkehrsraummodellierung von Interesse ist.

Die Sensorungenauigkeit und das verwendete Krümmungsmodell führen oberhalb eines Radius von 1000 m nur zu unzuverlässigen Werten. Schwab definiert deshalb einen Grenzzadius von 1000 m. Oberhalb dieses Grenzzadius werden Krümmungen als Gerade gewertet. Der Anteil an Krümmungen an der Gesamtstrecke beläuft sich in diesem Sinne auf 37 %.

Vertikale Krümmungen

In Abbildung 39 ist die relative Häufigkeit von Kuppen- und Wannenzuständen auf Landstraßen nach Kuhl zu sehen [Kuhl06]. Die Häufigkeiten sind dabei in Klassen zusammengefasst. So schließt eine Klasse sämtliche Radien bis zur nächstkleineren Klasse ein.

Das befahrene Streckenprofil beinhaltet auf Landstraßen 40 % ebene Streckenabschnitte. Bei Autobahnen liegt dieser Wert mit ca. 70 % weit über dem Wert der Stadtstraßen mit ca. 33 %. Kuppen- und Wannenzustände unterhalb von 1000 m treten sehr selten auf. Diese werden daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

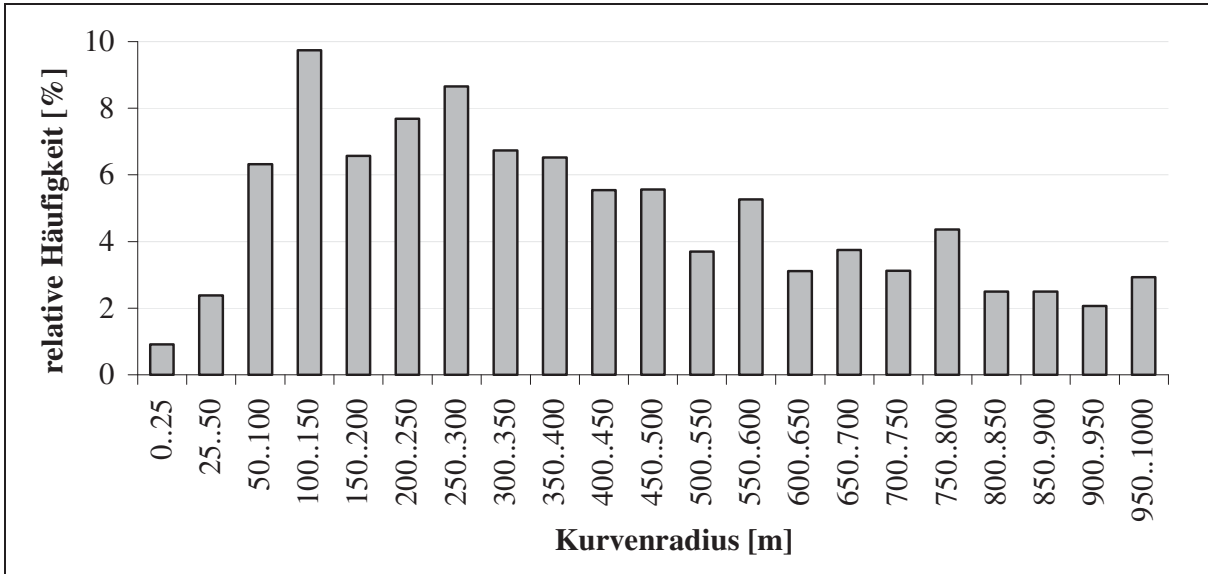


Abbildung 38 Vorkommen horizontaler Krümmungen auf Landstraßen nach Schwab [Schw03]; Werte Tabelle 35 auf Seite 150

Fahrbahnbreite

Zur Bestimmung der Fahrbahnbreite werden die Daten von Damasky herangezogen [Dama95]. In Abbildung 40 ist die Häufigkeit von Bundes- und Landstraßen mit verschiedenen Fahrbahnbreiten dargestellt. Dabei gilt als Fahrbahnbreite der Abstand zwischen den äußeren Fahrspurmarkierungen ohne Seitenstreifen, falls vorhanden.

Allerdings wird bei dieser Untersuchung nicht die Anzahl der Fahrspuren unterschieden. Grundsätzlich wird zwar von einer zweispurigen Straße ausgegangen, es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass es sich bei Landstraßen mit einer Breite von acht Metern oder mehr um dreispurige Straßen handelt. Diese stellen aber nur 0,6 % der Landstraßen dar. Entstehende Abweichungen werden somit vernachlässigt. Die durchschnittliche Fahrspurbreite für Landstraßen beträgt 2,81 m, für Bundesstraßen 3,42 m.

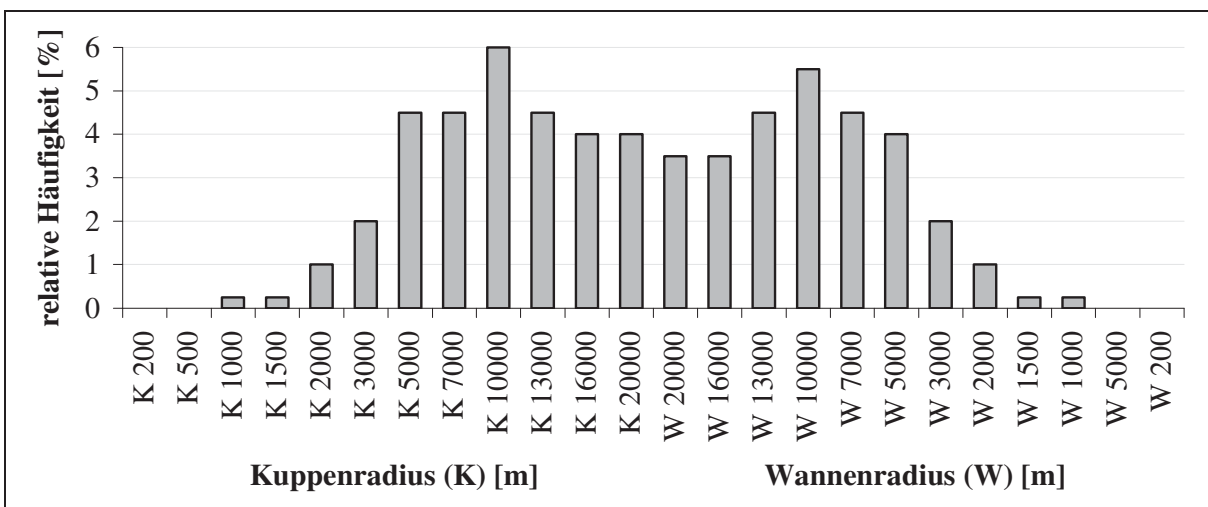


Abbildung 39 Relative Häufigkeit von Kuppen und Wannen auf Landstraßen nach Kuhl [Kuhl06]; Werte Tabelle 36 auf Seite 150

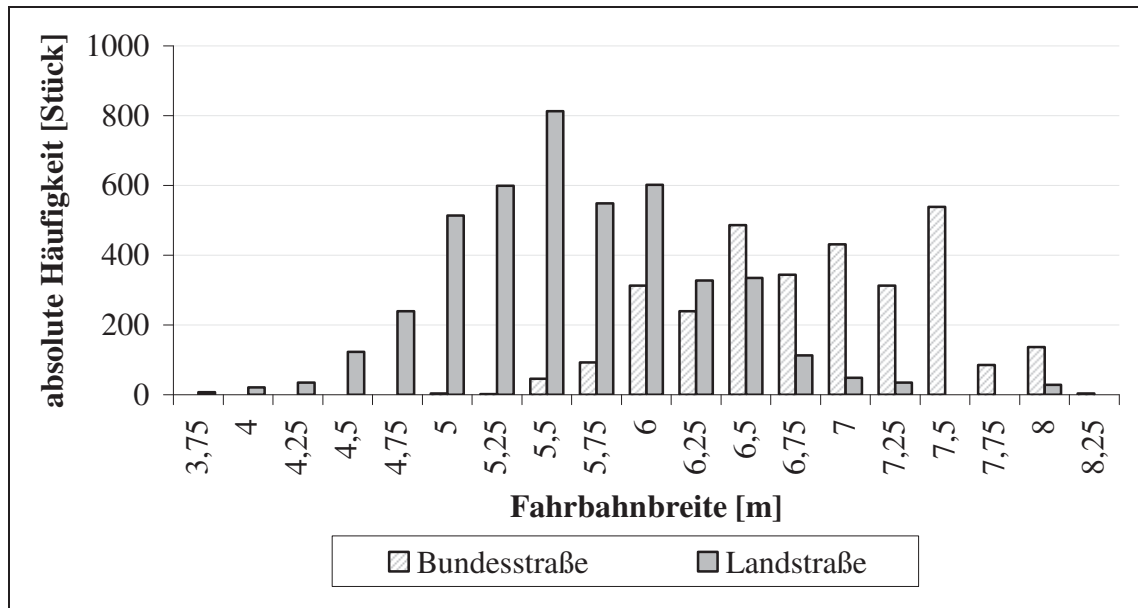


Abbildung 40 Vorkommen von Fahrbahnbreiten von Bundesstraßen und Landstraßen nach Damasky [Dama95]; Werte in Tabelle 37 auf Seite 151

6.1.3 Analyse des Verkehrsgeschehens

Verkehrsdichte und Fahrleistung

Deutschland besitzt nach den USA und der Volksrepublik China²⁷ das drittlängste Autobahnnetz mit einer Länge von 12.531 km. Hinzu kommen 40.711 km Bundesstraßen, 86.597 km Landesstraßen und 91.520 km Kreisstraßen. Für das überörtliche Straßennetz ergibt sich somit eine Gesamtlänge²⁸ von 231.359 km [GENE08].

Die Jahresfahrleistung für Personenkraftwagen (PKW) betrug im Jahr 2006 insgesamt 586,3 Mrd. km, davon 218,7 Mrd. km auf Autobahnen und 107,4 Mrd. km auf außerörtlichen Bundesstraßen. Das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen (DTV) erreichte 48.100 Kfz/24h auf Autobahnen, 9160 Kfz/24h auf außerörtlichen Bundesstraßen und 3797 Kfz/24h auf Landesstraßen (Wert von 2005). Für Kreisstraßen kann lediglich eine Schätzung von 2156 Kfz/24h herangezogen werden [VIZ06]. Des Weiteren stehen stündlich aufgelöste Zählstellendaten der Autobahndirektion Südbayern zur Verfügung. Diese dienen bereits als Grundlage für die Unfallanalyse in Kapitel 3 [ADB07].

Kolonnenbildung und Lage auf der Spur

Die Anordnung der einzelnen Verkehrsteilnehmer besitzt einen erheblichen Einfluss auf die Verwendung des Fernlichtes und somit auch auf den Nutzungsgrad blendfreier Fernlichtsysteme. Es ist leicht verständlich, dass das Fernlicht häufiger verwendet werden kann, wenn der Verkehr kompakt, wie im Fall einer Kolonnenbildung, dargestellt wird. Ist der Verkehr

²⁷ USA: 75.376 km; Volksrepublik China: 45.500 km.

²⁸ Stand 01.01.2007.

hingegen gleichmäßig verteilt, so kann das dazu führen, dass das Fernlicht bei gleicher Verkehrsdichte seltener zum Einsatz kommt.

Neubert untersuchte Kolonnenbildungen. Er stellte fest, dass bei einem geringen Verkehrsaufkommen sich der Verkehr nicht normal verteilt. Es bilden sich hingegen vermehrt kleine Kolonnen [Neub00].

Die stundenweise aggregierten Daten der bayrischen Zählstellen lassen keinen Rückschluss auf Kolonnenbildung zu, weil die Auflösung zu grob ist. Mit den bayrischen Zählstellen ist technisch eine höher aufgelöste Messung bis hin zu Fahrzeugen pro Minute möglich. Allerdings genügt auch diese Auflösung nicht, um eine Aussage über die Kolonnenbildung treffen zu können.

Informationen über die Lage von Fahrzeugen auf der Spur konnten ebenfalls nicht ermittelt werden. Damasky untersuchte zwar im Rahmen seiner Videoaufzeichnungen die Verteilung verschiedener Objekte wie Außenspiegel und Schilder, allerdings teilt er die Verteilung nur in drei Häufigkeitsbereiche auf und unterscheidet nicht zwischen zwei- und dreispurigen Straßen.

Maße von Kraftfahrzeugen

Zur Ermittlung von durchschnittlichen Maßen von Personenkraftwagen wird auf Daten des Kraftfahrt Bundesamtes zurückgegriffen [KBA08]. In Tabelle 38 auf Seite 151 sind die Maße der am meisten zugelassenen PKWs deutschlandweit zu finden.

Der Durchschnitt der PKW-Maße wird über das arithmetische Mittel aller Fahrzeuge unter Berücksichtigung der jeweiligen Zulassungsanzahl gebildet (siehe Tabelle 7). Des Weiteren sind die Maße des Lastkraftwagens (LKW) MAN TGX XL angegeben. Er weist nach Rabel mit 2,85 m die maximale vorkommende Augenhöhe von LKWs auf [Rabe08b]. Da die Kamerasensorik ausschließlich auf Lichtquellen reagiert, kann nicht auf die Höhe des erkannten Objektes geschlossen werden. Um Entgegenkommende nicht zu blenden, muss immer davon ausgegangen werden, dass es sich um einen LKW handelt.

Tabelle 7 Durchschnittliche Maße von PKWs in Deutschland und die Maße eines LKW; in Klammer: die maximale Augenhöhe

	Höhe [m]	Breite [m]	Länge [m]
PKW Durchschnitt	1,51	1,75	4,27
LKW (MAN TGX XL)	4 (2,85)	2,44	Führerhaus: 2,28

6.2 Verkehrsraummodellierung

Das Ergebnis der Verkehrsraummodellierung ist eine Objektliste. Diese Objektliste beinhaltet die Positionen von entgegenkommenden und vorausfahrenden Fahrzeugen, die auf Basis der oben gefundenen Erkenntnisse simuliert werden. Die Objektliste wird in Form einer Objekthäufigkeitsverteilung visualisiert und soll Aufschluss über das statistische Auftretensverhalten von Verkehrsteilnehmern geben. Die softwareseitige Umsetzung der Verkehrsraummodellierung wird in MATLAB/Simulink realisiert.

6.2.1 Simulationsmodell

Abbildung 41 visualisiert den Aufbau des Simulationsmodells. Es basiert auf den gewonnenen Informationen, die im Rahmen der theoretischen Verkehrsraumanalyse erarbeitet wurden. Die Generierung eines Streckenprofils unterteilt sich in zwei Schritte. Zuerst wird das Streckenprofil erstellt, danach wird das Verkehrsgeschehen berechnet. Simulationsprofile können gespeichert und wieder geladen werden. Dadurch ist eine schlichte Neuberechnung einer bestehenden Objektliste möglich. Im Rahmen dieser Funktion kann aber auch das Streckenprofil als Referenzstrecke beibehalten werden und das Verkehrsgeschehen variiert werden.

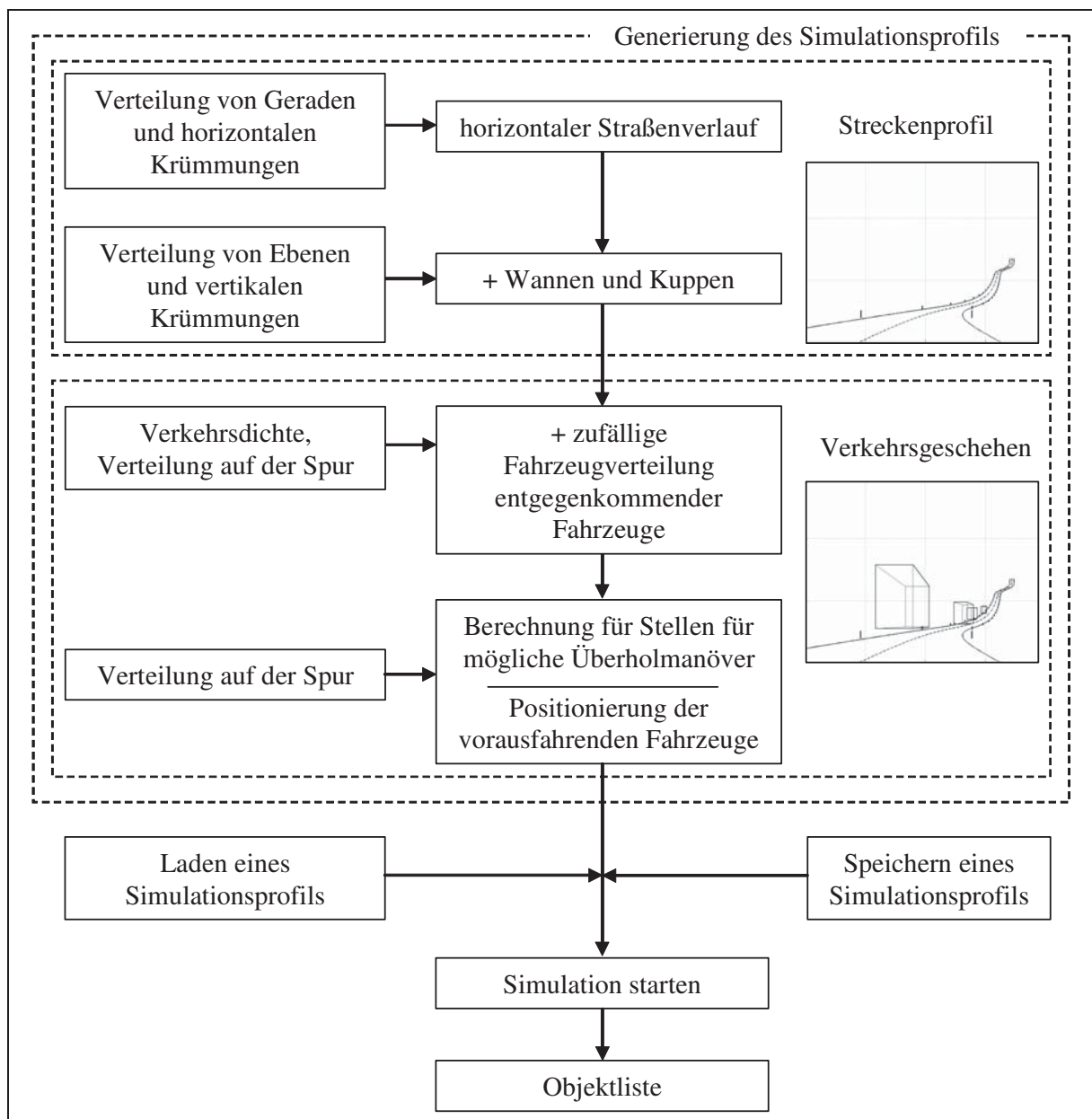


Abbildung 41 Schematischer Simulationsablauf

Simulationsparameter

In der Simulationsplattform können zahlreiche Parameter direkt verändert werden. Sowohl die Parameter als auch Bemerkungen dazu sind in Tabelle 8 aufgelistet. Weitere Erläuterungen zu den Parametern folgen in den kommenden Abschnitten.

6.2.2 Einbindung der Streckengeometrie

Das Vorkommen von Geraden und Kurven nach Schwab wird herangezogen, um zunächst einen ebenen Straßenverlauf zu generieren. Diesem ebenen Straßenverlauf werden anschließend vertikale Krümmungen überlagert, indem deren Häufigkeitsverteilung in Deutschland berücksichtigt wird (siehe Abbildung 39 weiter oben).

Die Verteilung von vertikalen und horizontalen Krümmungen beruht auf deren relativer Häufigkeit. Theoretisch sind für den deutschen Straßenraum typische „Normstraßen“ generierbar. Allerdings muss dazu die Gesamtstrecke der Simulation eine gewisse Länge aufweisen. Andererseits kann nicht jeder Radius entsprechend seines Auftretensverhaltens berücksichtigt werden. In der Realität weisen kurze Strecken ebenfalls nicht sämtliche Kurvenradien auf. Als Klothoiden werden im Straßenbau gestaffelte Radien in Kurvnein- und ausfahrten bezeichnet, bei denen sich die Krümmung kontinuierlich ändert. Bei der Integrierung von vertikalen Kurven wird auf die Nachbildung dieser Klothoiden verzichtet. Kurvnein- und ausfahrten lassen sich zwar mit Klothoiden besser befahren, allerdings ist dies in der Simulation nicht notwendig. Die vertikalen Kurven werden entsprechend ihrer Häufigkeit berücksichtigt. Da diese Häufigkeit bereits die gestaffelten Radien der Klothoiden beinhaltet, ist nur eine geringe Abweichung zur Realität zu erwarten.

Tabelle 8 *Simulationsparameter*

Parameter	Wert	Bemerkung
Fahrspurbreite	3,42 m	Mittelwert für Bundesstraßen
Streckenlänge	100 km	Defaultwert
Fahrzeugbreite	1,8 m	Mittelwert aufgerundet
Fahrzeuglänge	5 m	Mittelwert aufgerundet
Zusätzlicher Augenbereich	2,2 m	Dieser beschreibt die maximale Augenhöhe oberhalb der Scheinwerferanbauhöhe von 0,65 m.
Mindestabstand	50 m	„halber Tacho“ bei 100 km/h
Verkehrsdichte	242 Kfz/h	mittlere Fahrzeuganzahl im Winter 6 Uhr - 7 Uhr
Kameraöffnungswinkel	20°	entsprechend gängiger Fernlichtöffnungswinkeln
Detektionsentfernung	500 m	Fahrzeuge, die weiter weg sind, werden in der Objektliste nicht berücksichtigt.
Scheinwerferhöhe/ virtuelle Kamerahöhe	0,65 m	gängige Anbauhöhe für Scheinwerfer; die Position: mittig auf der eigenen Fahrspur

6.2.3 Einbindung des Verkehrsgeschehens

Das eigene Fahrzeug befindet sich mittig auf der eigenen Spur und fährt konstant mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h. Auf Basis der Verkehrsdichte und der Streckenlänge wird bei einer angenommenen Geschwindigkeit von 100 km/h die Fahrzeuganzahl der entgegenkommenden Verkehrsteilnehmer berechnet. Die Streckenlänge wird zu 100 km gewählt.

In der Simulationsplattform können die Stunde und der Wochentag angegeben werden, für welche die mittlere Verkehrsdichte aus den bayrischen Zählstellendaten herangezogen werden soll. Darüber hinaus kann zwischen der Verkehrsdichte auf Land- und Bundesstraßen im Sommer und Winter unterschieden werden. Die Fahrzeuge werden zufällig auf der Strecke verteilt. Dabei wird auf den Mindestabstand geachtet. Die Lage auf der Spur unterliegt ebenfalls einer Zufallsverteilung. Dabei bleibt jedes Fahrzeug innerhalb seiner Spur. Das gilt auch für vorausfahrende Fahrzeuge.

Für eine realistische Simulation werden auch Überholvorgänge integriert. Daher werden für die Positionierung von Vorausfahrenden zunächst die Stellen ermittelt, an denen überholt werden kann. Die Strecke, ab der das Fahrzeug vor dem Überholmanöver vorausfährt, wird zufällig bestimmt. Diese kann durchaus einige Kilometer betragen. Es wird aber darauf geachtet, dass nur maximal 50 % der Fahrstrecke jemand vorausfährt. Wird die Simulation gestartet, steht zunächst der vorausfahrende Verkehr. Ab einer Entfernung zu diesem von 50 m fährt dieser bis zur Überholmöglichkeit konstant voraus. Wechselt das eigene Fahrzeug die Spur, so bleibt der Überholte ab diesem Moment stehen. Eine Aussage zu treffen, wie häufig und in welchem Abstand in der Realität ein Fahrzeug vorausfährt, ist beinahe unmöglich. Neben messbaren Größen hängt dies stark von dem Fahrstil und dem jeweiligen Gemütszustand des Fahrers ab.

Aufgrund des seltenen LKW-Auftretens²⁹ auf Bundes- und Landstraßen wird hier auf die mittlere Länge und Breite von PKWs zurückgegriffen. Die mittlere PKW-Höhe wird allerdings nicht übernommen. Die Kamerasensorik erkennt nur Lichtquellen und kann so nicht zwischen LKW und PKW unterscheiden. Daher wird der Augenbereich, der auf die Scheinwerferanbauhöhe von 65 cm addiert wird, auf 2,2 m gesetzt (siehe Tabelle 8 weiter oben).

6.2.4 Objektlistensammlung durch die virtuelle Kamera

Die Objektliste wird durch eine Art virtuelle Kamera aufgenommen. Dabei werden unabhängig von der Zeit und der Geschwindigkeit die Positionen anderer Verkehrsteilnehmer abgespeichert. Nach jedem virtuell gefahrenen Meter wird eine solche Momentaufnahme rein ortsabhängig durchgeführt.

Um den Zustand in der Realität widerzuspiegeln, kann diese virtuelle Kamera nur Fahrzeuge erkennen, die sich innerhalb ihres Öffnungswinkels und ihrer Detektionsentfernung befinden. In der Realität muss der Öffnungswinkel der Kamera größer sein als der des verwendeten Fernlichts. Die Detektionsentfernung muss ebenfalls weiter sein als der Blendbereich des

²⁹ Auswertung der bayrischen Dauerzählstellen für die B13, Mittelwert Dezember 2006 und Juni 2007: 5,2 % LKW zu 94,8 % PKW.

Fernlichts. Andernfalls wird geblendet. Von der Erkennung eines Objektes durch die Kamera bis zur Entblendung dessen durch den Scheinwerfer benötigt das System eine gewisse Zeit. Diese Zeit wird Latenzzeit genannt. Um trotz dieser Latenzzeit rechtzeitig entblenden zu können, müssen die Objekte mindestens um diese Zeitspanne früher erkannt werden. Als Öffnungswinkel werden hier 20° und als Detektionsentfernung³⁰ 500 m angenommen.

Fahrzeuge, die sich hinter Kuppen befinden oder von anderen Fahrzeugen verdeckt werden, können in der Realität nicht gesehen werden. In der Simulation ist jedoch deren Position bekannt. Neben den Objekten, die sich außerhalb der Detektionsentfernung oder des Öffnungswinkels befinden, finden diese Objekte ebenfalls keinen Eingang in die Objektliste.

Im Unterschied zur Realität sitzt die virtuelle Kamera mittig auf Höhe der Scheinwerfer in 65 cm Höhe und erfasst die Objekte dreidimensional in ihrer gesamten Größe und nicht nur deren Lichtquellen (vgl. Abbildung 30 auf Seite 40). Des Weiteren wird in der Simulation nicht zwischen Vorfahrenden und Entgegenkommenden unterschieden. Farbkameras und rot-monochrome Kameras sind zwar dazu in der Lage, aber die reale Verkehrsraumanalyse wird mit einer monochromatischen Kamera durchgeführt. Dieses Kamerasystem kann Heckleuchten und Scheinwerfer nicht zuverlässig voneinander unterscheiden (siehe Untersuchung des Kamerasystems auf Seite 41).

6.2.5 Ergebnis der Verkehrsraummodellierung

Um eine statistische Aussage über den Verkehrsraum treffen zu können, muss eine möglichst lange Strecke befahren werden. Erste Untersuchungen zeigen, dass eine Strecke von 100 km ausreichend lang ist. Die Verkehrsdichte wird analog dem mittleren Stundenwert bayrischer Bundesstraßen auf 242 Kfz/h gesetzt, was der Fahrzeugzahl im Winter zwischen 6 Uhr und 7 Uhr entspricht. Auf die Wahl der Verkehrsdichte und Streckenlänge wird später auf Seite 74 eingegangen.

Grund ist, dass in die Objektliste nur Objekte und nicht das Streckenprofil eingehen, dem die Objekte folgen. Eine geringe Verkehrsdichte kann dazu führen, dass sich in interessanten Streckenabschnitten kein Objekt befindet. Diese Streckenabschnitte werden somit nicht über die Detektion der Objekte darin dokumentiert. Bei interessanten Streckenabschnitten kann es sich um Kurven mit seltenen Radien oder eine Kombination von Kurven mit Kuppen oder Wannern handeln.

Abbildung 42 zeigt ein 100 km langes Streckenprofil aus der Vogelperspektive, das mit dem oben beschriebenen Simulationsmodell generiert wurde. Dieses Streckprofil wird im Weiteren als Referenzstrecke bezeichnet. Blaue Punkte im Streckenverlauf kennzeichnen die Position entgegenkommender, gelbe Punkte die Position vorausfahrender Fahrzeuge. Das eigene Fahrzeug (roter Punkt) befindet sich zu Beginn der Simulation im Ursprung der Übersichtskarte.

³⁰ Zum Vergleich: Der Blendbereich (0,5 lx-Bereich) eines Fernlichts hat eine maximale Weite von ca. 475 m. Angenommen ist ein Fernlicht an der oberen gesetzlichen Grenze, d.h. mit einer maximalen Beleuchtungsstärke von 180 lx in 25 m ([ECE-R48]: maximale Lichtstärke aller Fernlichtscheinwerfer 225.000 cd).

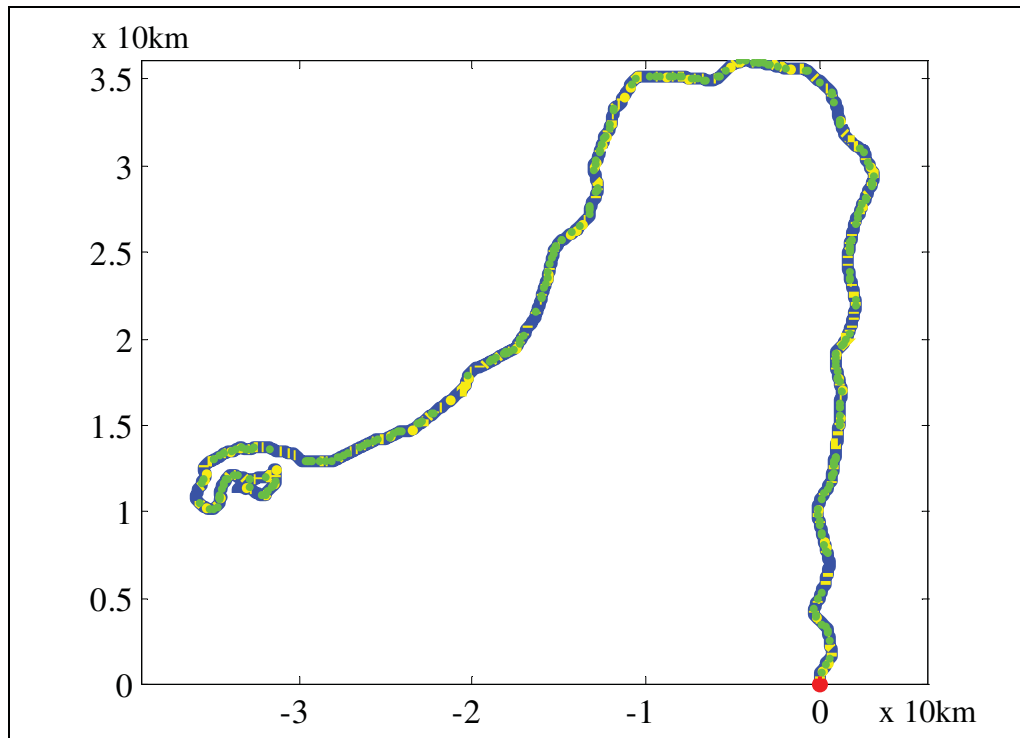


Abbildung 42 Referenzstrecke aus der Vogelperspektive; blaue Punkte: Entgegenkommende, gelbe Punkte: Vorausfahrende (Simulationsparameter siehe Tabelle 8)

Sobald die Simulation gestartet wird, wird virtuell die Strecke abgefahren und die Objektliste gesammelt. In Abbildung 43 ist die Visualisierung der Objektliste in Form einer Objekthäufigkeitsverteilung zu sehen. Zur Erzeugung der Objekthäufigkeitsverteilung werden die auftretenden Winkelbereiche der Objekte aus Sicht der Kamera (zweidimensional) über insgesamt 100.000 Bildern summiert (siehe Seite 61). Dabei wird nicht zwischen Vorausfahrenden und Entgegenkommenden unterschieden. Es wird allerdings die gesamte zweidimensionale Ausdehnung, inklusive dem zusätzlichen Augenbereich der Objekte, berücksichtigt. Blaue Bereiche beschreiben eine geringe, rote bis schwarze eine hohe bis sehr hohe Objekthäufigkeit.

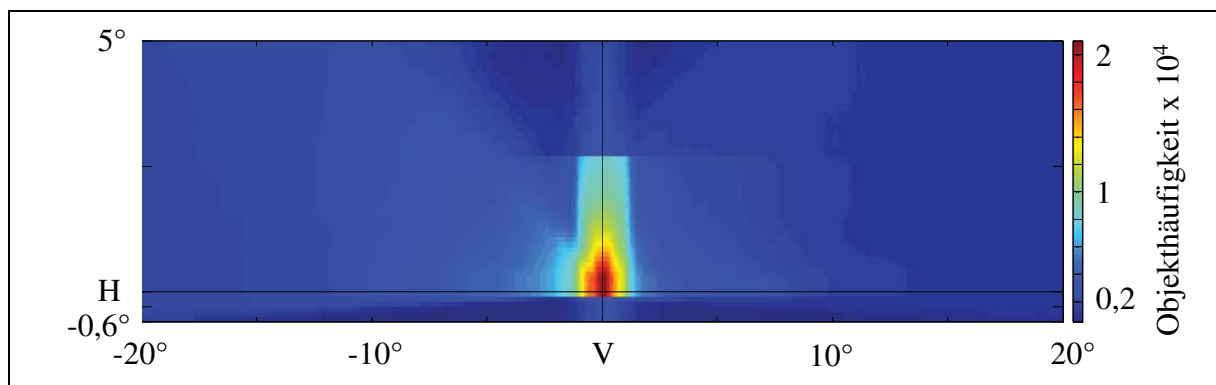


Abbildung 43 Objekthäufigkeit der Referenzstrecke auf Basis der gewonnenen Objektliste

In Abbildung 43 ist zu erkennen, dass sich im HV-Punkt³¹ die höchste Objekthäufigkeit befindet. Auf der linken Seite ist eine höhere Objekthäufigkeit als auf der rechten Seite zu erkennen. Demnach erscheinen mehr Entgegenkommende als Vorfahrende in der Simulation. Zudem ist schön die Trajektorie entgegenkommender Fahrzeuge zu erkennen (siehe Abbildung 44). Ein annäherndes Fahrzeug zeichnet sich durch eine Vergrößerung seines vertikalen und horizontalen Erscheinungswinkels aus und wandert aus der Kamera gesehen nach links.

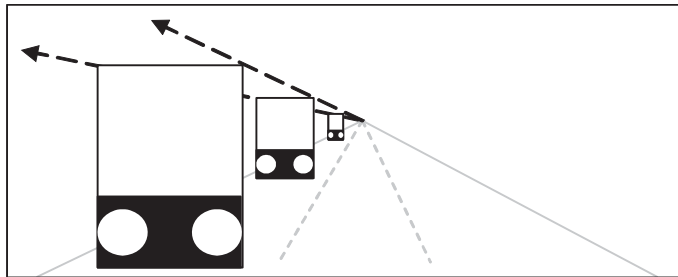


Abbildung 44 Trajektorie eines entgegenkommenden Fahrzeuges

6.3 Reale Verkehrsraumanalyse

Die reale Verkehrsraumanalyse soll in erster Linie Aufschluss über die Objekthäufigkeitsverteilung im wirklichen Straßenverkehr bringen. Im Weiteren liefern die gewonnenen Daten Erkenntnisse über die kumulierte Häufigkeit detektierter Objekte pro Bild und über das Streckenprofil an sich.

6.3.1 Bisherige Untersuchungen

Die einzig bekannte Arbeit zu Häufigkeitsverteilungen von Objekten im Straßenverkehr stammt aus dem Jahr 1995 [Dama95] (vgl. Seite 56). Die Positionen von Innenspiegel, Augen entgegenkommender Fahrer, Verkehrszeichen rechts und Leitpfosten sind einige dieser untersuchten Objekte (siehe Abbildung 45). In dieser Untersuchung wird des Weiteren zwischen drei Straßenklassen unterschieden: Stadtstraße, Landstraße und Autobahn.

Im Rahmen der durchzuführenden Untersuchung sind die Objektbereiche vorausfahrender und entgegenkommender Verkehrsteilnehmer von 0 m bis in einer Entfernung von 500 m auf Landstraßen interessant. Mit Hilfe der Positionen der Augen entgegenkommender Fahrer und der der Innenspiegel aus der obigen Arbeit können die Objektbereiche der gesamten Fahrzeuge abgeschätzt werden. Allerdings sind für Landstraßen nur die Objektbereiche der Augen entgegenkommender Fahrer in einer Entfernung von 50 m vorhanden. Für Innenspiegel sind ausschließlich Messergebnisse auf Autobahnen vorhanden und somit nicht von Interesse. Zudem lässt die dreistufige Auflösung der Häufigkeit (10 %, 50 %, 90 %) keinen wirklichen Rückschluss auf die tatsächliche Häufigkeitsverteilung zu.

³¹ HV-Punkt: Fluchtpunkt, Schnittpunkt zwischen der vertikalen und horizontalen Linie je durch 0°.

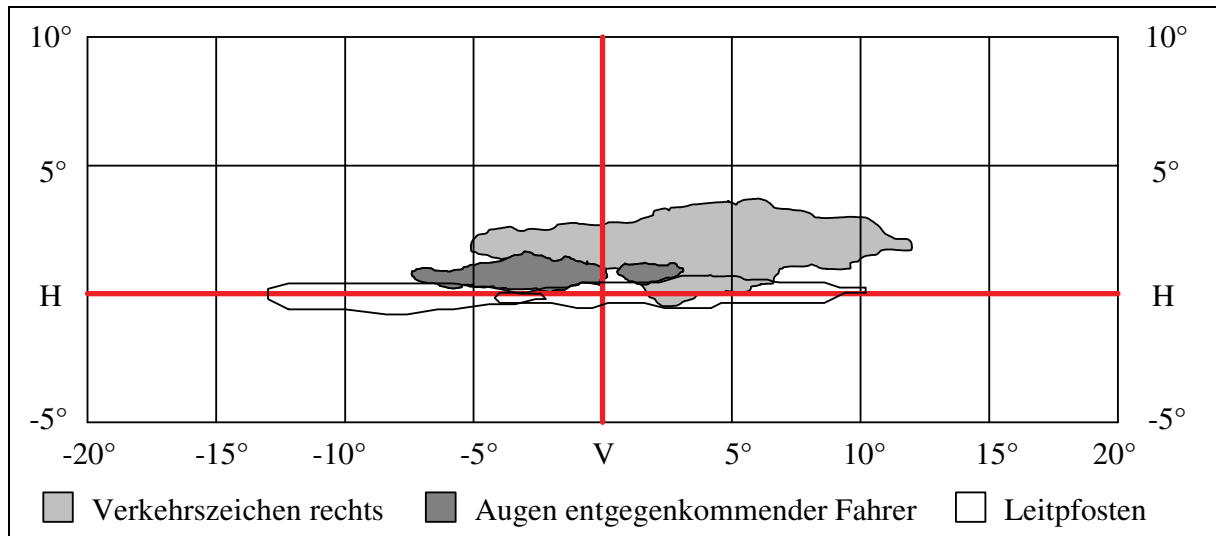


Abbildung 45 Zusammenfassung ausgewählter 90 %-Objektbereiche auf Landstraßen nach Damasky [Dama95]; Entfernung 50 m, Sicht mittig auf Fahrspur, Anbauhöhe 65 cm (nachgezeichnet)

Ein Vergleich der Ergebnisse Damaskys ist hier nicht zielführend. Er hat die Objekthäufigkeit in diskreten Entfernungen von 50 und 100 Metern quantisiert. Im Gegensatz dazu basiert die folgende Untersuchung auf einer Detektion der Objekte im gesamten Detektionsbereich der Sensorik. Die Daten werden jedoch später im Rahmen der Erarbeitung einer effizienten Fernlichtsegmentierung erneut aufgegriffen (siehe dazu Seite 91).

6.3.2 Messaufbau und Auswertung

Zur Durchführung der eigenen realen Verkehrsraumanalyse ist es notwendig, ein Messsystem zu entwickeln. Abbildung 46 zeigt dessen schematische Darstellung. Fahrzeug- sowie Kameradaten werden dabei zum Fahrzeugrechner übermittelt und abgespeichert. In Offline-Tests kann die Bildverarbeitung gespeicherte Videosequenzen erneut analysieren. Die Speicherung der Objektliste und der Fahrzeugdaten sowie deren Auswertung wird in der Entwicklungsumgebung ADTF (Automotive Data and Time triggered Framework) durchgeführt. Die gespeicherten Daten werden hinsichtlich dreier Punkte ausgewertet:

- Objekthäufigkeitsverteilung,
- Objekte pro Bild und
- Kurvenradien (horizontale Krümmungen).

Die Bestimmung der durchfahrenen Kurvenradien soll einem Vergleich zwischen dem befahrenen und dem simulierten Streckenprofil aus der Verkehrsraummodellierung dienen. Bei „Objekte pro Bild“ handelt es sich um die Ermittlung der kumulativen Häufigkeit der Objektanzahl pro Bild. Daraus kann die durchschnittliche Länge von Objektlisten abgeschätzt werden.

Objekthäufigkeitsverteilung

Da die Untersuchung des Kamerasystems gezeigt hat, dass das Kamerasystem im Mono-Modus eine bessere Erkennungsleistung aufweist, wird für die Messfahrten auf diese Konfiguration zurückgegriffen (siehe Seite 41 ff.).

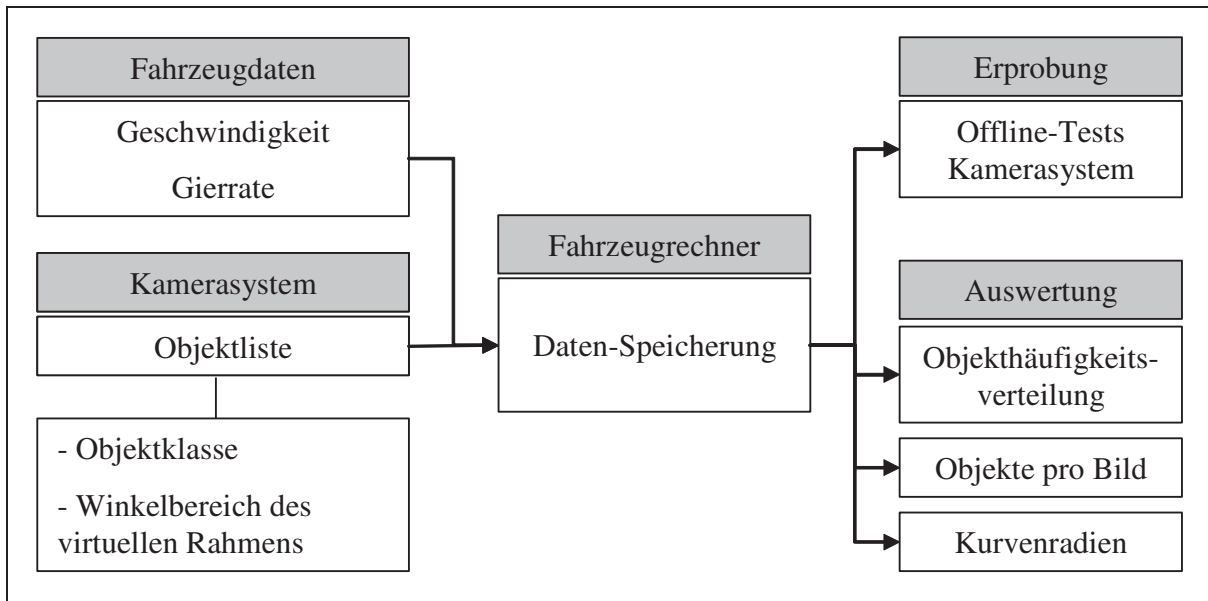


Abbildung 46 Schematische Darstellung des Messsystems und der Auswertung zur realen Verkehrsraumanalyse

In der Objekthäufigkeitsverteilung werden aufgrund der Eigenschaften des Kamerasystems im Mono-Modus ausschließlich folgende Objekte berücksichtigt:

- entgegenkommende und vorausfahrende Verkehrsteilnehmer (zusammengefasst) und
- Objekte mit einer Entfernungsangabe größer null Meter.

Lichtstarke Heckleuchten werden häufig als Scheinwerfer interpretiert, daher ist eine Unterscheidung zwischen Entgegenkommenden und Vorausfahrenden nicht sinnvoll. Objekte mit einer Entfernung von null Meter weisen sehr häufig keine Ausdehnung auf und liegen im Kameramittelpunkt. Sie würden zu einer fälschlichen Überbewertung dieses Winkels (0° ; 0°) führen.

Die Objekthäufigkeitsverteilung wird folgendermaßen erhalten: Jeder Objektbereich wird durch einen virtuellen Rahmen beschrieben. Alle Winkelkoordinaten innerhalb des virtuellen Rahmens werden um den Zählwert 1 erhöht und in einer entsprechenden Matrix zwischengespeichert. Dies wird für alle oben beschriebenen relevanten Objekte durchgeführt.

Kurvenradius

Funk führte praktische Untersuchungen zu verschiedenen Bestimmungsmethoden des Kurvenradius (horizontal) durch [Funk09]. Es zeigt sich, dass eine Berechnung der Krümmung κ über

$$\kappa = \frac{1}{v_{sp}} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (6.1)$$

mit der Längsgeschwindigkeit des Fahrzeugschwerpunktes v_{sp} und der Gierrate $\frac{\partial \psi}{\partial t}$ die besten Werte erzielt.

6.3.3 Wahl des Streckenprofils und Durchführung

Streckenprofil

In Tabelle 9 sind verschiedene Streckenprofile mit je einer Gesamtstreckenlänge von 10.000 km dargestellt. Die anteiligen Längen der einzelnen Straßenklassen sind auf diese Gesamtstreckenlänge normiert. Die Verwendung von blendfreiem Fernlicht auf Stadtstraßen ist als äußerst selten anzusehen.

Daher werden die zugehörigen Stadtstraßenlängen zwar aufgeführt, aber bei der Normierung auf 10.000 km nicht berücksichtigt³². Schwab unterscheidet bei seinen Messfahrten nur zwischen Bundesautobahnen, Landstraßen und Stadtstraßen. Damasky, der eine Gesamtstrecke von 5500 km in Deutschland befuhr, listet die Fahrleistungen nach Straßenklassen und Bundesländern auf. Allerdings sind dabei Straßen inner- und außerorts zusammengefasst. Die beiden anderen Streckenprofile ergeben sich unter Berücksichtigung der Anteile der jeweiligen Straßenklassen an der Gesamtlänge und an der Jahresfahrleistung in Deutschland im Jahr 2006.

Auf Stadtstraßen wird ein blendfreies Fernlicht nur selten zum Einsatz kommen. Grund ist die meist durchgängige Straßenbeleuchtung, die eine Verwendung des Fernlichts untersagt. Auf Autobahnen herrscht eine hohe Verkehrsdichte, die dazu führt, dass große Bereiche entblendet werden müssen. Zudem tragen sämtliche Verkehrsteilnehmer für eine hellere Umgebungshelligkeit bei und der Mittelstreifen mindert die Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge.

Tabelle 9 Übersicht der Längen unterschiedlicher Streckenprofile auf je 10.000 km bezogen; Stadtstraßenlängen sind aufgeführt, werden aber nicht berücksichtigt; [Dama95], [Schw03], [VIZ06], [GENE08]

Straßenklasse	Länge n. Schwab	Länge n. Damasky	Länge n. Gesamtlänge	Länge n. Jahresfahrleistung
Bundesautobahnen	1902 km	2816 km	697 km	4774 km
Bundesstraßen	-	2289 km	1787 km	2361 km
Landstraßen	8097 km	2777 km	3633 km	2090 km
Gemeindestraßen und Kreisstraßen	-	2118 km	3883 km ³³	774 km ³⁴
(Stadtstraße)	(2854 km)	-	(2874 km)	(2903 km)

³² Die Längenverhältnisse zwischen den einzelnen Straßenklassen stimmen bei einer Einbeziehung von Stadtstraßen nach wie vor. Es erhöht sich nur die Gesamtlänge, woraus sich die Anteile berechnen lassen.

³³ Die Gesamtlänge der Gemeindestraßen wird vom ADAC mit 413.000 km beziffert. Die Summe aller anderen Straßenklassen liegt bei 231.000 km. Gemeindestraßen werden hier nicht berücksichtigt, da ansonsten die Anteile der anderen Straßenklassen deutlich geringer ausfallen würden [ADAC08].

³⁴ Seit 1990 nur als Schätzwert vorhanden [GENE08].

Auf Straßen mit einer Fahrspur pro Richtung bietet ein blendfreies Fernlichtsystem den größten Nutzen. Es wird benötigt, um den Zielkonflikt zwischen eigener Sicht und der Blendung anderer zu lösen. Für die nachfolgende Untersuchung bedeutet das:

- Der Fokus der Untersuchung liegt auf Straßen mit einer Fahrspur pro Richtung. Diese sollen verstärkt befahren werden.
- Zu Straßen mit einer Fahrspur pro Richtung zählen Bundesstraßen und Landstraßen. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden diese unter dem Begriff Landstraße zusammengefasst.
- Bundesstraßen mit zwei oder mehr Fahrspuren pro Richtung werden aufgrund ihres Ausbauzustandes zu Autobahnen gezählt.

Durchführung

Insgesamt wurde eine Strecke von 2200 km entsprechend dem folgenden Verhältnis befahren:

- 30 % Autobahn (inkl. mehrspuriger Bundesstraßen) zu
- 70 % Landstraße (einspurige Bundes-, Landes-, Staats- und Kreisstraßen).

Die Gesamtfahrleistung ist dem erhöhten Umfang des Kamertests und den jahreszeitbedingt späten Dunkelphasen geschuldet. Jahreszeitbedingt fand ein Großteil der durchgeführten Messfahrten auf Bundes- und Landesstraßen zwischen 20 Uhr und 0 Uhr statt.

Geschwindigkeitsbegrenzungen wurden generell eingehalten. Auf Autobahnen wurde zudem auf das Rechtsfahrgebot sowie auf die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h geachtet. Sofern unter Beibehaltung der Richtgeschwindigkeit die rechte Fahrspur befahren werden konnte, wurde das Rechtsfahrgebot befolgt. Kurzzeitige Ausnahmen dieser Verhaltensregeln waren infolge von entsprechenden Verkehrssituationen nicht auszuschließen.

6.3.4 Ergebnisse der realen Verkehrsraumanalyse

Objekthäufigkeitsverteilung

Abbildung 47 zeigt die Objekthäufigkeitsverteilung auf Landstraßen. In der nachfolgenden Abbildung 48 ist die Objekthäufigkeitsverteilung auf Autobahnen zu sehen. Beide Objekthäufigkeitsverteilungen weisen eine geringe vertikale Ausdehnung auf. Das ist darauf zurückzuführen, dass nur die Lichtquellen und nicht die gesamte Fahrzeughöhe detektiert werden. Negative vertikale Winkel werden jeweils und besonders in den horizontal äußeren Bereichen erreicht. Die Kamera besitzt mit ihrer Anbringung in der Nähe des Innenspiegelfuß eine deutlich größere Anbauhöhe als die meisten Heckleuchten und liegt auch höher als sämtliche Scheinwerfer. Diese erhöhte Position, verbunden mit den Trajektorien³⁵ im Kamerabild bei Entgegenkommenden und Überholten, führt sowohl links als auch rechts zu negativen vertikalen Winkeln.

³⁵ Vergleiche Abbildung 44, allerdings wird hier der umgekehrte Fall erklärt: die Kamera ist niedriger angebracht als die Oberkante des herannahenden Fahrzeuges.

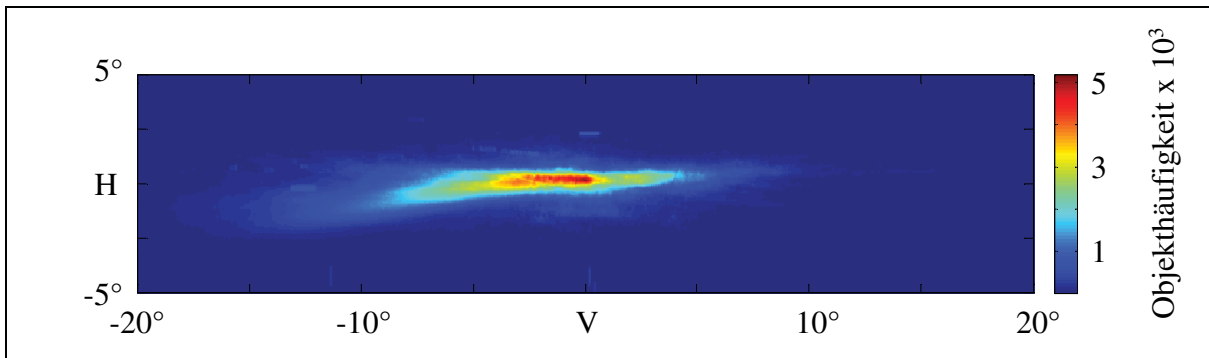


Abbildung 47 Reale Objekthäufigkeitsverteilung auf Landstraßen gemäß dem gewählten Streckenprofil

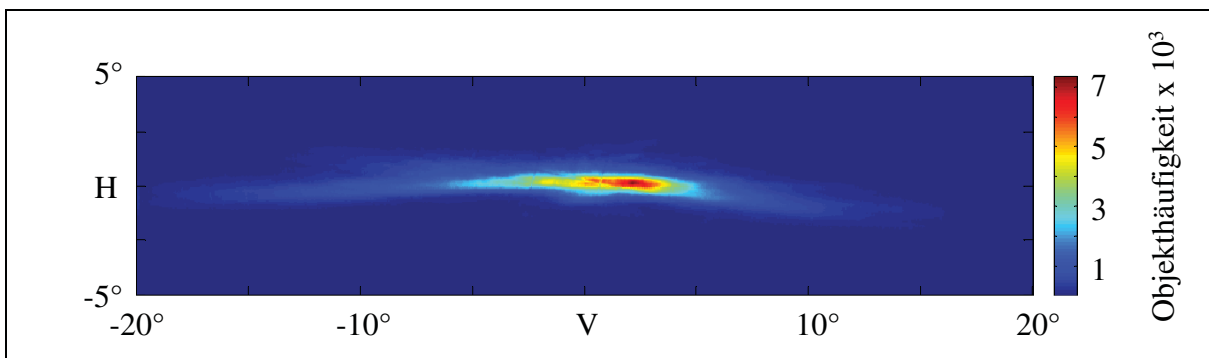


Abbildung 48 Reale Objekthäufigkeitsverteilung auf Autobahnen gemäß dem gewählten Streckenprofil

Unterschiede sind im Maximalwert der Objekthäufigkeitsverteilung zu beobachten. Auf der Landstraße liegt das Maximum mit einem Zählwert von 5189 nahe dem Koordinatenursprungspunkt³⁶. Das Maximum auf Autobahnen ist ca. 2° horizontal nach rechts verschoben und besitzt einen höheren Zählwert von 7360. Der höhere Zählwert trotz der geringeren Fahrleistung auf Autobahnen rührt von einer höheren Verkehrsdichte her. Auf Autobahnen ist diese um einen Faktor zwischen fünf und zwölf höher als auf Bundesstraßen und Landstraßen³⁷. Die Verschiebung nach rechts resultiert aus den Heckleuchten überholter Fahrzeuge. Diese treten rechts häufiger auf. Gleichzeitig werden aufgrund des ausgebauten und meist bepflanzten Mittelstreifens nicht alle Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge detektiert.

In Abbildung 49 und Abbildung 50 sind die Häufigkeitsbereiche der Objekthäufigkeitsverteilungen dargestellt. Es handelt sich hierbei um eine zweidimensionale Funktion. Es werden neben den Winkelkoordinaten an sich auch deren Zählwerte berücksichtigt. So beschreibt der 10 %-Bereich der Landstraßenuntersuchung eine Kontur um die Winkelkoordinaten, die einen Zählwert höher als 3474 aufweisen und somit 10 % aller Objekte enthalten. Die klassifizierenden Zählwerte für den 50 %- und 90 %-Bereich sind 1299 und 115.

³⁶ Maximum Landstraße: 0,05° horizontal, 0,16° vertikal. Maximum Autobahn: 2,12° horizontal, 0,16° vertikal.

³⁷ DTV von 1995: 44.000 Kfz Autobahn, 9100 Kfz Bundesstraße, 3500 Kfz Landstraße.

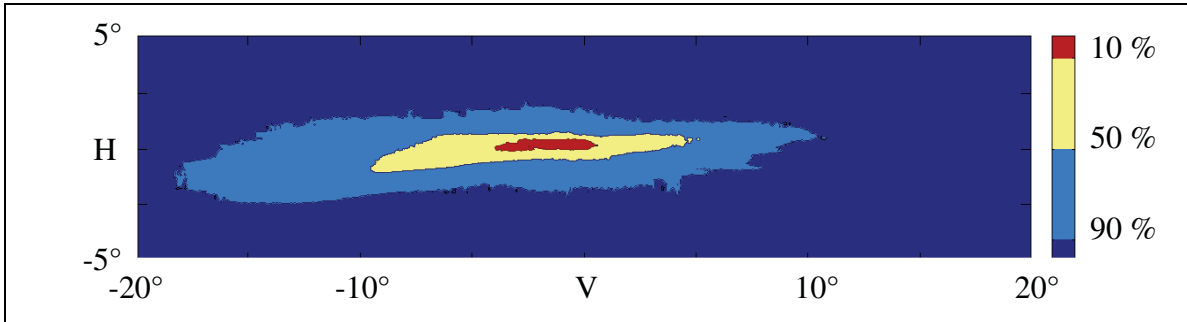


Abbildung 49 Diskretisierte Häufigkeitsbereiche der realen Objektdichteverteilung auf Landstraßen gemäß dem gewählten Streckenprofil. Zählwerte der Bereiche 3474, 1299 und 115.

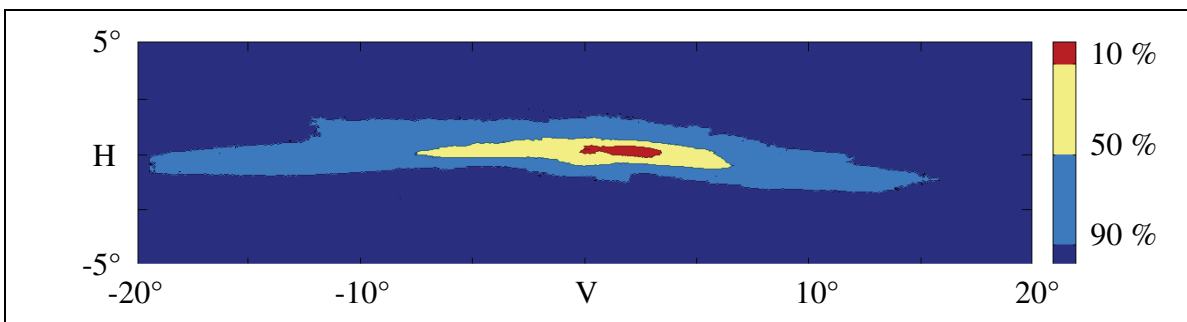


Abbildung 50 Diskretisierte Häufigkeitsbereiche der realen Objektdichteverteilung auf Autobahnen gemäß dem gewählten Streckenprofil; Zählwerte der Bereiche 4940, 1498, 162.

Es ist zu erkennen, dass der 90 %-Bereich auf Autobahnen deutlich breiter ist als der auf Landstraßen. Aufgrund der breiteren Straßengeometrie kommt dies zustande. In der vertikalen Verteilung spiegeln sich ebenfalls die geometrischen Randbedingungen wider. Auf Autobahnen mit ihren größeren Kuppen- und Wannenradien ist der 90 %-Bereich vertikal schmaler. Die 50 %-Bereiche sind ähnlich groß. Allerdings ist der 50 %-Bereich der Autobahnen horizontal nach rechts verschoben. Die Heckleuchten Überholer und die geminderte Erkennung von Scheinwerfern Entgegenkommender führen zu dieser Verschiebung. Der 10 %-Bereich beschreibt den Bereich, in dem sich mit der höchsten Wahrscheinlichkeit ein Objekt befindet. Auf Landstraßen ist dieser breiter. Grund ist, dass durch Kurven nicht jedes Objekt im Fluchtpunkt erscheint und dann seiner Trajektorie folgt.

Objekte pro Bild

Abbildung 51 zeigt die absolute und kumulierte Häufigkeit aller erkannten Objekte pro Bild. Für einspurige Bundes- und Landstraßen wurden insgesamt 666.970 und für mehrspurige Autobahnen 299.312 Bilder analysiert. Die Gewichtung beider Anteile entspricht dem gleichen Verhältnis, in dem auch die Verkehrsraumanalyse durchgeführt wurde. Bei dieser Analyse werden sämtliche Objektklassen berücksichtigt. Sie beinhaltet auch noch nicht klassifizierte Objekte. Zudem ist zu beachten, dass nicht jedes Scheinwerfer- und Heckleuchtenpaar als solches erfasst wird. Das Paar wird häufig als Licht zweier unterschiedlicher Objekte gewertet. Insofern kann nicht von der Objektanzahl auf die Anzahl der Verkehrsteilnehmer geschlossen werden.

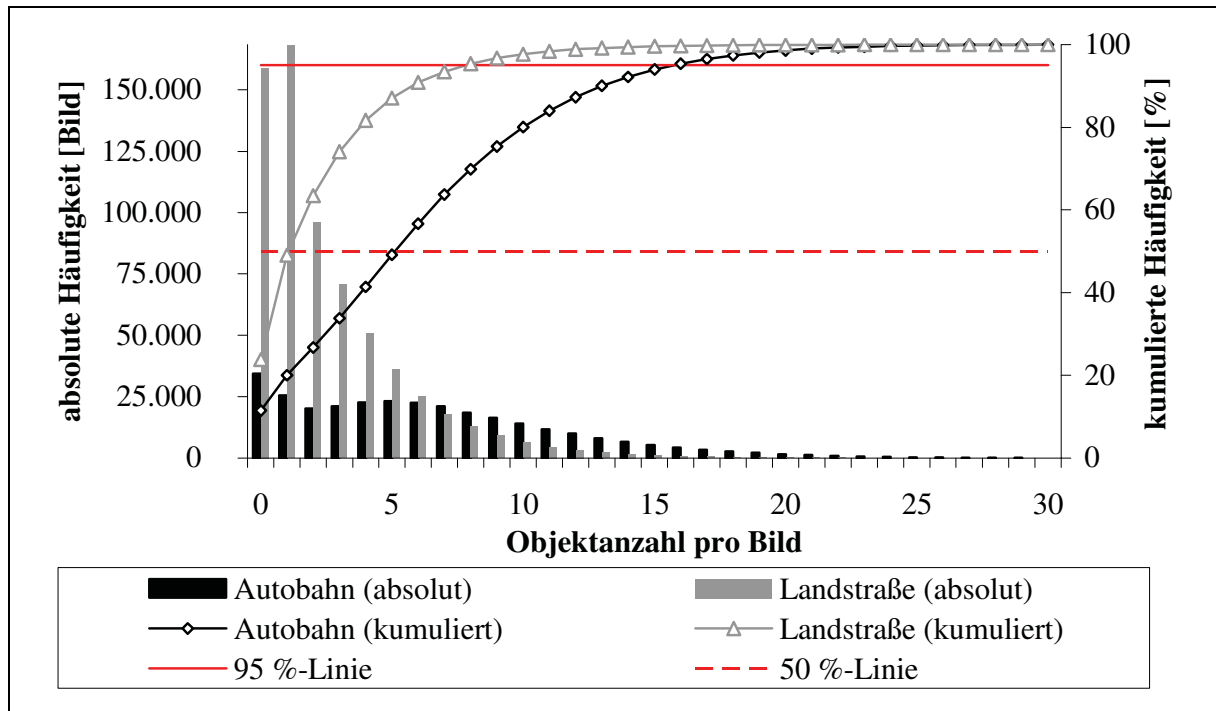


Abbildung 51 Objekanzahl pro Bild auf Autobahnen und Landstraßen; absolute und kumulierte Häufigkeit

Eine Objektanzahl von kleiner gleich acht deckt auf Landstraßen 95 % aller Bilder ab. Situationen mit mehr als 30 Objekten treten vereinzelt auf. Die höchste gemessene Anzahl liegt bei 41 Objekten. Auf Autobahnen beträgt die Objektanzahl für das 95 %-Perzentil 16 und für das Maximum 44 Objekte. Bereits oberhalb von 35 Objekten sind nur noch einzelne Bilder zu finden. Mit einer Objektanzahl von acht werden hier rund 70 % aller Situationen abgedeckt.

Die absoluten Häufigkeiten von Landstraßen und Autobahnen unterscheiden sich erheblich, was sich darauf zurückführen lässt, dass ca. 70 % aller Bilder auf Landstraßen aufgenommen wurden. Die Maximalanzahlen beider Straßenklassen verhalten sich ähnlich. Auf Autobahnen herrscht zwar eine deutlich höhere Verkehrsdichte, allerdings kann aus einer höheren Verkehrsdichte nicht direkt auf eine höhere Objektanzahl geschlossen werden. Mit steigender Verkehrsdichte nimmt die gegenseitige Verdeckung von Verkehrsteilnehmern zu. Abgeschattete Lichtquellen können nicht detektiert werden und treten daher nicht als Objekt in Erscheinung.

6.4 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird die simulierte Verkehrsraummodellierung mit den gewonnenen Ergebnissen aus der realen Verkehrsraumanalyse verglichen. Anschließend wird das weitere Vorgehen in Bezug auf die anstehende Erarbeitung einer effizienten Fernlichtunterteilung diskutiert.

6.4.1 Vergleich der Verkehrsraummodellierung mit der Praxis

Grundsätzliche Unterschiede

In der Verkehrsraummodellierung werden die Ergebnisse der theoretischen Verkehrsraumanalyse verwendet, um ein für Deutschland typisches Straßenprofil sowie Verkehrsgeschehen zu simulieren. Als Ergebnis wird eine Objektliste mit vollständiger Kenntnis über die Position und Größe anderer Verkehrsteilnehmer erhalten. Diese Objektliste wird in Form einer Objekthäufigkeitsverteilung visualisiert. Einige der notwendigen Parameter können nicht ermittelt werden, wie z.B. die Lage auf der Spur. Diese Parameter werden im Rahmen realistischer Grenzen zufällig bestimmt oder auf einen vernünftigen Wert gesetzt. So wird unter anderem die Lage auf der Spur so gewählt, dass sich das Fahrzeug stets auf der eigenen Spur befindet. Die Objekthäufigkeitsverteilung der gewählten Referenzstrecke ist in Abbildung 43 auf Seite 65 zu finden. Es fällt auf, dass der vorausfahrende und überholte Verkehr unterbewertet ist.

Die reale Verkehrsraumanalyse stellt eine empirische Untersuchung des Verkehrsraumes dar, deren Umfang begrenzt ist. Als Meßsystem dienen ein Kamerasystem sowie Sensoren im Versuchsfahrzeug. Als Ergebnis wird ebenfalls eine Objektliste erhalten, die in eine Objekthäufigkeitsverteilung umgewandelt werden kann. Aufgrund der Kameraeigenschaften unterscheidet sich diese Objektliste deutlich von der simulierten im Informationsgehalt:

- Die Entfernungsangaben sind ungenau. Sie dürfen daher nicht weiter verwendet werden.
- Es sind nur die Objektbereiche der virtuell eingerahmten Lichtquellen bekannt, nicht die gesamten Abmaße der Verkehrsteilnehmer.
- Es ist keine Nachverfolgung eines Objektes von Bild zu Bild möglich („object-tracking“).
- Es kann nicht zwischen vorausfahrenden und entgegenkommenden Fahrzeugen unterschieden werden.

Die Ergebnisse erscheinen als plausibel (siehe Seite 71 ff.). Die Unterschiede zwischen den Messungen auf Autobahnen und Landstraßen lassen sich durch die Straßenanbaubedingungen erklären. Die reale und die simulierte Objekthäufigkeitsverteilung unterscheiden sich. Besonders die Unterbewertung vermutlich Überholter und Vorausfahrender ist erkennbar. Allerdings ist so kein objektiver Vergleich zwischen der simulierten und der realen Objekthäufigkeitsverteilung möglich. Gründe sind in der vertikal höheren Position der Fahrzeugkamera und in der Detektion ausschließlich der Objektbereiche der Lichtquellen zu sehen. Daher ist die reale Objekthäufigkeitsverteilung schmäler und vertikal nach unten versetzt.

Vergleich über die relative horizontale Objekthäufigkeit

Um dennoch einen objektiven Vergleich zu ermöglichen, wird eine relative horizontale Objekthäufigkeitsverteilung auf Basis der obigen Objekthäufigkeitsverteilung gebildet (siehe Abbildung 52).

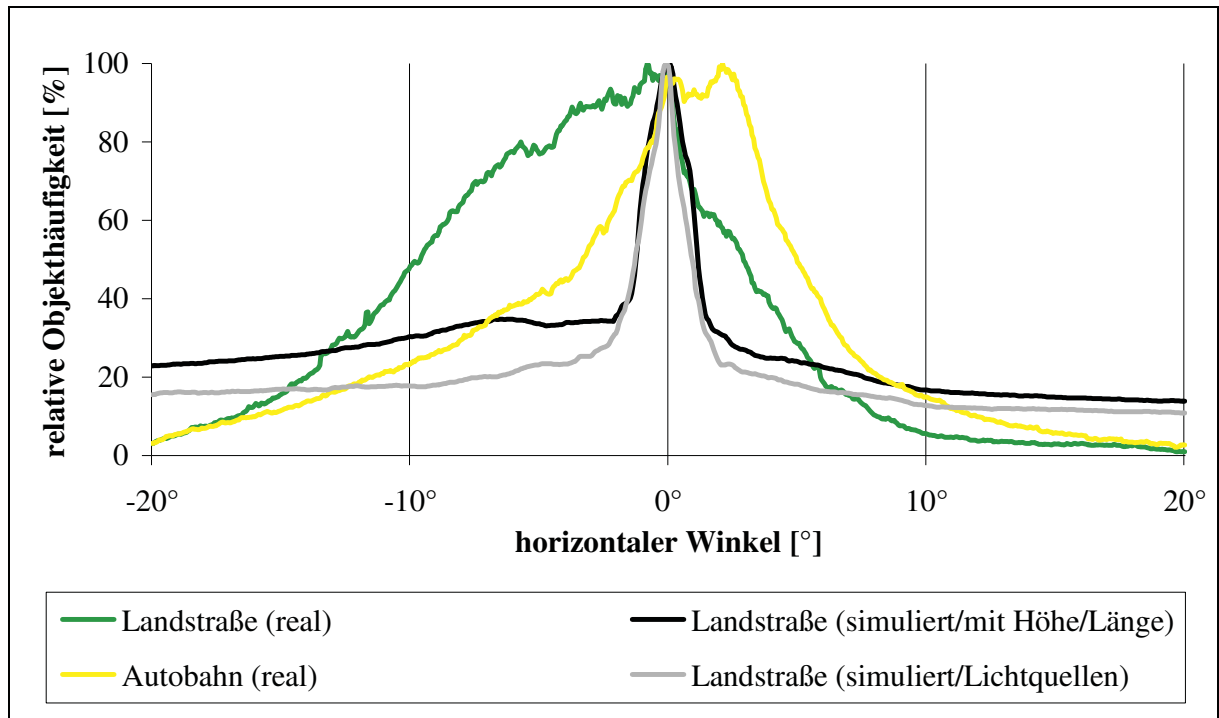


Abbildung 52 Vergleich realer und simulierter horizontaler Objektdichteverteilungen; Simulationen je bei einer mittleren Verkehrsdichte von 242 Kfz/h; „simuliert/mit Höhe/Länge“ bedeutet, dass die gesamten Abmaße der Fahrzeuge berücksichtigt werden; Bei „simuliert/Lichtquellen“ werden wie in der Realität nur die Lichtquellen zur Bildung der Objekthäufigkeit herangezogen.

Dabei werden alle vertikalen Werte in einer Spalte der entsprechenden horizontalen Winkelkoordinate zugeordnet und aufsummiert. Zudem wird eine weitere Objektliste erstellt, die auf derselben Referenzstrecke und dem gleichen Verkehrsgeschehen basiert wie die ursprünglich simulierte. Im Unterschied dazu weisen nun andere Verkehrsteilnehmer weder eine Fahrzeuglänge noch -höhe auf. Es werden wie in der Realität nur die Lichtquellen der Fahrzeuge berücksichtigt. In Abbildung 52 ist die horizontale Objektdichte dieser Simulation unter „Landstraße (simuliert/Lichtquellen)“ zu finden.

An den horizontalen Objekthäufigkeitsverläufen der realen Verkehrsraumanalyse sind deren charakteristischen Merkmale erkennbar. Die Landstraße weist eine breitere und durch den Gegenverkehr geprägte Verteilung auf. Die der Autobahn ist rechtslastig, jedoch ist in dieser Darstellung ein lokales Maximum in der Nähe von null Grad in der Horizontalen zu sehen. Nach außen hin fallen beide Kurven stark ab.

Die simulierte Objektliste mit Fahrzeugabmaßen weist ab minus zwei bis minus sieben Grad einen leicht ansteigenden Bereich auf. Die Simulation lediglich der Lichtquellen lässt diesen verschwinden. Der Wiederanstieg des Häufigkeitsverlaufes entsteht durch die Trajektorie der Entgegenkommenden und durch deren vorhandene Fahrzeughöhe. In diesem Fall werden besonders übereinanderliegende Winkelkoordinaten von Spalten mehrmals um einen Zählwert erhöht. Diese Zählwerte einer Spalte werden in einer einzigen horizontalen Winkelkoordinate aufsummiert. Somit wird die Fahrzeugfront mehrmals in der horizontalen Objekthäufigkeit berücksichtigt. Allgemein erklärt dies die höheren Werte im negativen Außenbereich und warum die Simulation nur der Lichtquellen hier geringere Werte annimmt.

Abbildung 53 zeigt die Auswirkungen unterschiedlicher Verkehrsdichten auf die simulierte Objekthäufigkeitsverteilung. Im Vergleich zu den horizontalen Häufigkeitsverläufen der Realität erweist sich dabei die in Abbildung 52 dargestellte mittlere Verkehrsdichte als eine sinnvolle Herangehensweise für die Verkehrsraummodellierung. Ein maximales Verkehrsaufkommen gewichtet Entgegenkommende unangemessen stark. Im Gegensatz dazu führt ein minimales Verkehrsaufkommen zu einer Unterbewertung der linken Seite (negativer Winkelbereich). Durch die geringe Verkehrsdichte sind überdurchschnittlich viele Überholvorgänge möglich. Das äußert sich entsprechend in einer Aufwertung der rechten Seite.

Ursache der horizontalen Unterschiede

Abbildung 54 zeigt die relative und kumulierte Häufigkeit der befahrenen Kurvenradien sowie die der Referenzstrecke. Die Gierrate und Geschwindigkeit werden nach Formel 6.1 mit Hilfe eines Filters im ADTF berechnet. Ein Kurvenradius oberhalb 1000 m wird wie auch in Schwab als Gerade gewertet.

Dadurch ergibt sich in der realen Untersuchung ein Kurvenanteil an der Gesamtstrecke von 40,4 %. Unterhalb Radien mit 150 m weist die reale Strecke ein geringes Kurvenvorkommen auf. Das wird durch das höhere Vorkommen größerer Radien ausgeglichen.

Der Kurvenanteil der Referenzstrecke beträgt mit 37 % einen ähnlichen Wert wie oben. Allerdings sind hier gerade Kurven mit Radien unterhalb von 300 m stark gewichtet. Besonders bei Radien unterhalb von 150 m ist ein erheblicher Unterschied zu erkennen. Kurven mit größeren Radien sind dafür seltener vertreten.

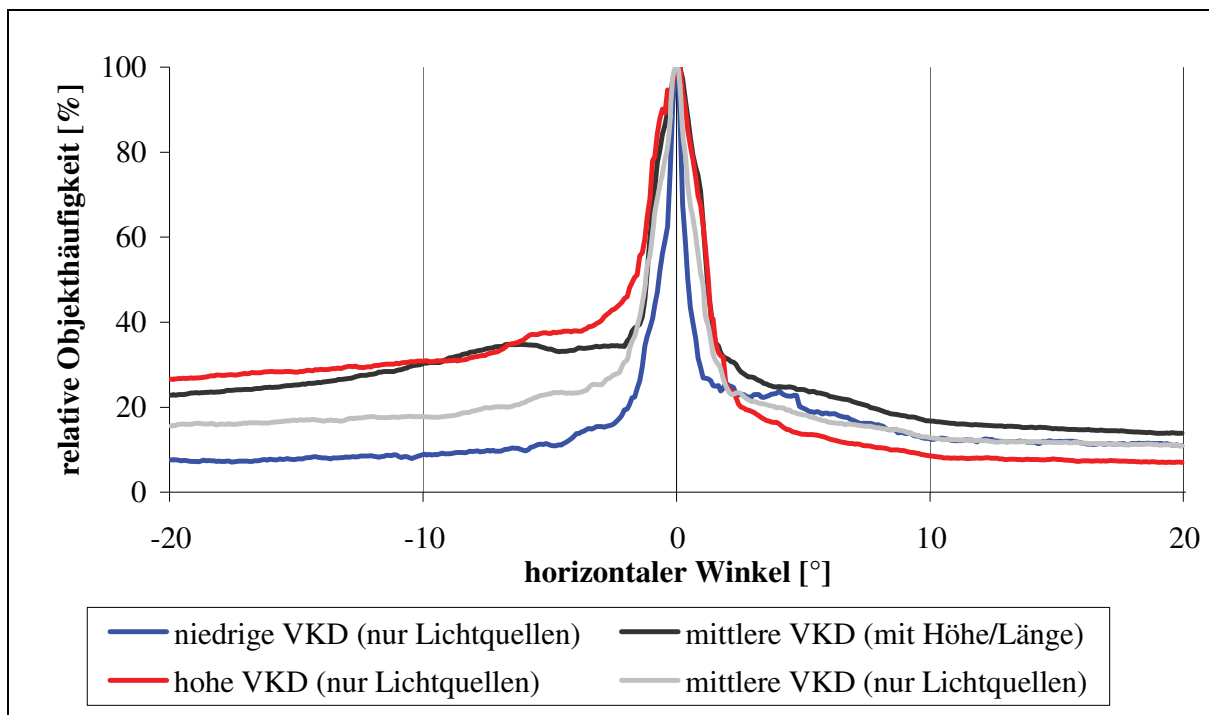


Abbildung 53 Horizontale Objekthäufigkeit bei unterschiedlichen Verkehrsdichten (VKD) je Simulation; Kfz/h: 23, 242 und 478; Die „mittlere VKD“ entspricht den simulierten Ergebnissen der Landstraße in Abbildung 52.

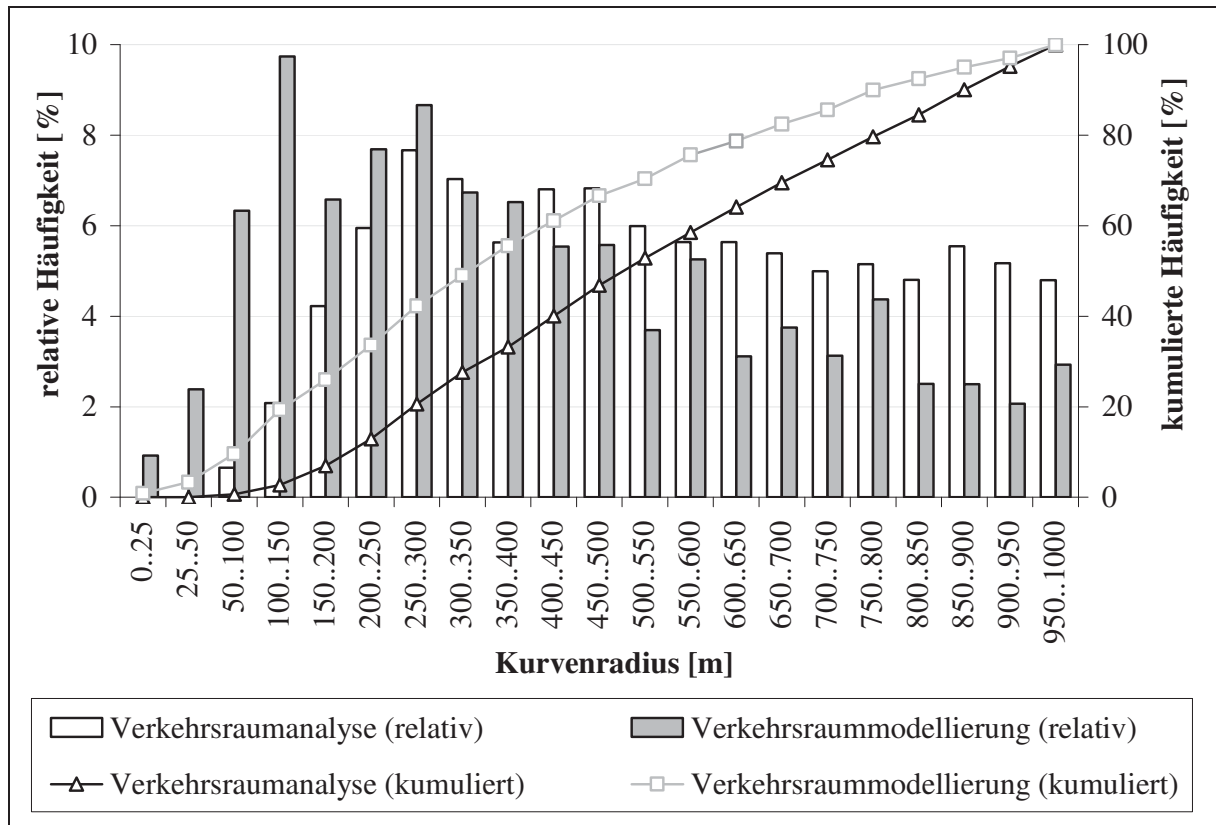


Abbildung 54 Kurvenradien der realen Verkehrsraumanalyse und der Verkehrsraummodellierung nach [Schw03] auf Landstraßen

Diese Erkenntnisse spiegeln sich in der horizontalen Objekthäufigkeitsverteilung auf Landstraßen wieder. Große Radien führen in dieser zu kleinen Winkeln und kleine Radien zu großen Winkeln. Bei dem Vergleich der realen Messung und der Simulation, bei der lediglich Lichtquellen berücksichtigt werden, sind daher folgende Auswirkungen zu erkennen:

- Beide Verteilungen weisen ein zentrales Maximum auf. Grund ist der ähnlich große Geradenanteil an der Gesamtstrecke.
- Referenzstrecke/Verkehrsraummodellierung: Die Verteilung ist mittig sehr schmal und besitzt in den Außenbereichen eine hohe Objekthäufigkeit. Ursachen dafür sind wenige Kurven mit großen Radien und viele Kurven mit kleinen Radien.
- Reale Verkehrsraumanalyse: Die Verteilung ist im zentralen Bereich relativ breit und flacht zu den Rändern hin schnell ab. Das ausgeprägte Vorhandensein von Kurven mit großen Radien und das gleichzeitige Fehlen von Kurven sehr kleiner Radien erklären dies.

Die Verkehrsraummodellierung unterscheidet sich von den Ergebnissen der realen Verkehrsraumanalyse aufgrund ihres Streckenprofils. Es besteht zwar die Möglichkeit in der Simulation das gleiche Kurvenvorkommen wie in der Messung zu hinterlegen, bei der realen Verkehrsraumanalyse handelt es sich allerdings um eine empirische Untersuchung. Die in der Simulation hinterlegten Werte von Schwab erfassen dagegen ein größeres Gebiet und eine längere Strecke. Daher werden diese Werte in der Verkehrsraummodellierung beibehalten.

6.4.2 Bedeutung der Ergebnisse für die weitere Arbeit

Im weiteren Verlauf wird das Ziel verfolgt, eine effiziente Fernlichtunterteilung zu erarbeiten. Dafür werden zwei Dinge benötigt:

- Informationen über das räumliche Auftreten anderer Verkehrsteilnehmer zur Erstellung sinnvoller Fernlichtunterteilungen, welche im Rahmen dieses Kapitels hinreichend erarbeitet wurden und wieder aufgegriffen werden, sowie
- ein Werkzeug, mit dem jede erstellte Fernlichtunterteilung nach ihrem Nutzungsgrad objektiv bewertet werden kann.

Damit Fernlichtunterteilungen objektiv bewertet werden können, ist ein reproduzierbares Testverfahren nötig. Die Grundlage dafür ist, dass gespeicherte Objektlisten mit hinreichendem Informationsgehalt vorliegen, welche auf verschiedene Fernlichtunterteilungen angewendet werden können. Ein hinreichender Informationsgehalt bedeutet hier, dass auf Basis dessen die exakten Abmaße sowie die Position der Objekte bekannt sind oder zumindest bestimmt werden können, die wiederum entblendet werden müssen.

Der Vorteil der Verkehrsraummodellierung gegenüber der realen Verkehrsraumanalyse ist, dass aufgrund der Simulation sämtliche Informationen direkt und exakt abrufbar sind. Zudem konnte die Verkehrsraumanalyse mit Hilfe der realen Verkehrsraumanalyse validiert werden, indem die Verkehrsdichte angepasst und die hinterlegten horizontalen Kurvenradien bestätigt wurden. Aus diesen Gründen wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Verkehrsraummodellierung als Basis für die objektive Bewertung von Fernlichtunterteilungen herangezogen.

7 Berechnung des Nutzungsgrades von Fernlichtsystemen

Das Ziel von blendfreien Fernlichtsystemen ist es, dem Fahrer so viel Licht wie möglich zur Verfügung zu stellen. Bei Matrix-Beam ist diese Lichtmenge abhängig von der Fernlichtunterteilung. Genauer betrachtet bedeutet das, dass sie von der Gesamtanzahl der Lichtsegmente und durch deren jeweilige Größe beeinflusst wird.

In diesem Kapitel werden Fernlichtunterteilungen erarbeitet und nach ihrem Nutzungsgrad bewertet. Der Nutzungsgrad η wird dabei über den durchschnittlichen Lichtstrom definiert, der bei simuliertem Normverkehr im Mittel verfügbar ist.

$$\text{Nutzungsgrad } \eta = \frac{\text{Lichtstrom}_{\text{Abblendlicht}} + \text{aktiver}_{\text{Lichtstrom}}_{\text{Fernlicht}}}{\text{Lichtstrom}_{\text{Abblendlicht}} + \text{gesamter}_{\text{Lichtstrom}}_{\text{Fernlicht}}} \cdot 100 \% \quad (7.1)$$

7.1 Bewertungsverfahren

Nach Erstellung einer Fernlichtunterteilung wird für jedes Lichtsegment der Anteil am Lichtstrom des Fernlichtes berechnet. Anschließend wird die Referenzstrecke der Verkehrsraummodellierung abgefahren. Dabei wird für jedes Lichtsegment festgehalten, wie häufig es im Mittel an ist bzw. genutzt wird. Der Lichtstrom eines jeden Lichtsegmentes wird mit dessen jeweiligem Nutzungsgrad gewichtet. Die gewichteten Lichtströme der einzelnen Lichtsegmente ergeben summiert den aktiven Lichtstrom des Fernlichtes in Formel 7.1.

7.1.1 Gewichtung durch Lichtstrom

Im Gegensatz zu bisherigen Untersuchungen werden hier nicht nur die geometrischen Bereiche berücksichtigt, die zur Lichtverteilung beitragen [Rosl05]. Stattdessen wird der Lichtstrom innerhalb der Abstrahlwinkel der Lichtsegmente berücksichtigt. So werden zentrale Lichtsegmente mit höherem Lichtstrom stärker gewichtet als äußere.

Die Bestimmung des jeweiligen Lichtstromes basiert auf der Lichtverteilung des Bi-Xenon-Scheinwerfers im Audi A8, da dieser Scheinwerfer eine sehr gute Lichtverteilung aufweist. Aufgrund der Messauflösung von je $0,2^\circ$ beginnt das Fernlicht nicht exakt ab $-0,57^\circ$ vertikal, sondern gerundet ab $-0,6^\circ$. Die Lichtverteilung wird in MATLAB eingelesen. Dort können die Lichtsegmente in zehntel Gradschritten zugeordnet werden. Das führt zu einer Auflösung von 56 mal 400 Pixel.

Abbildung 55 zeigt die Ausschnitte des Abblendlichts und Fernlichts, die zur Bestimmung des Lichtstromes dienen. Zu beachten ist, dass in der Simulation der überlappende Bereich des Asymmetriezweiges zwischen Fernlicht und Abblendlicht doppelt gezählt wird. In einem Bi-Xenon-Scheinwerfer wird mit einer Blende zwischen Abblend- und Fernlicht gewählt. In einem solchen Fall kommt es zu keiner Überlagerung.

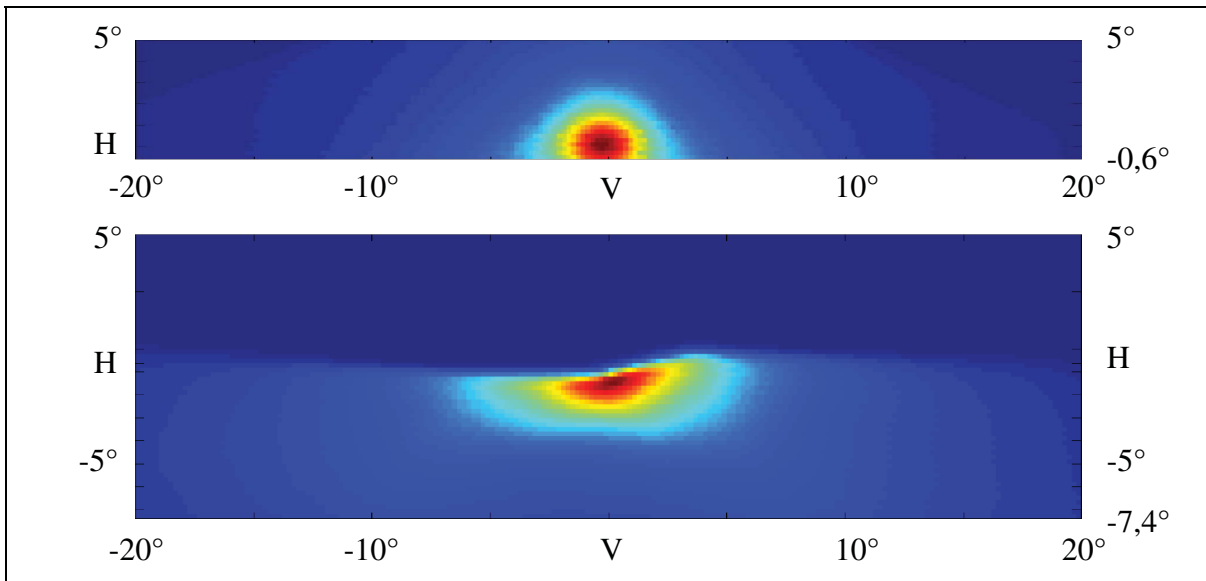


Abbildung 55 Lichtverteilung Bi-Xenonscheinwerfer im Audi A8; vertikal in einer Entfernung von 25 m gemessen; oben: Fernlicht (maximale Beleuchtungsstärke 129 lx), unten: Abblendlicht (maximale Beleuchtungsstärke 68 lx); Rot: hohe Beleuchtungsstärke, Blau: niedrige Beleuchtungsstärke

Für das Abblendlicht ergibt sich so einen Anteil von 48 % und für das Fernlicht ein Anteil von 52 % am gesamten Lichtstrom. Aktuelle Konzepte für Matrix-Beam sehen allerdings zwei eigenständige Lichtfunktionen vor. Somit bleibt das Abblendlicht mit Asymmetriezweig stets an und wird von dem segmentierten Fernlicht überlagert. Unter Berücksichtigung der Überlagerung errechnet sich ein geringfügig anderes anteiliges Verhältnis mit 48,87 % und 51,13 %. Im Folgenden werden dennoch sämtliche Nutzungsgrade nach obiger Methode mit überlappendem Bereich im Asymmetriezweig angegeben. Nach Formel 7.2 kann bei Bedarf von dem Nutzungsgrad der Methode mit überlappendem Bereich auf den der Methode ohne Überlappung geschlossen werden.

$$\eta_{\text{ohne Überlappung}} = 48,87 \% + 51,13 \% \cdot \frac{\eta_{\text{mit Überlappung}} - 48 \%}{52 \%} \quad (7.2)$$

Vergleich der Nutzungsgrade von Roslak

Im Unterschied zu der Definition des Nutzungsgrades von Roslak wird hier das Abblendlicht mit berücksichtigt und die einzelnen Bereiche per Lichtstrom gewichtet (vgl. Seite 24). Für einen Vergleich der Ergebnisse von Roslak, werden seine Nutzungsgrade $\eta_{\text{nach Roslak}}$ ins Verhältnis zum Lichtstrom des Abblendlichtes gesetzt (siehe Formel 7.3).

$$\eta_{\text{Vergleich}} = 48 \% + 52 \% \cdot \eta_{\text{nach Roslak}} \quad (7.3)$$

Die Gewichtung durch den Lichtstrom kann nicht berücksichtigt werden, da seinerseits nur der Nutzungsgrad des Fernlichtes bekannt ist. In seinem Fall bezieht sich das Fernlicht auf das Licht oberhalb eines symmetrischen Abblendlichtes. Umgerechnet bedeutet das, dass 52,2 % bzw. 95,8 % des gesamten Lichtes verwendet werden (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10 Nutzungsgrad η nach Untersuchungen von Roslak; original und zum Vergleich angenähert [Rosl05]

Ausleuchtstrategie	$\eta_{nach\ Roslak}$	$\eta_{Vergleich}$
Fernlichtassistent	8 %	52,2 %
individuelle Entblendung	92 %	95,8 %

7.1.2 Simulation

Roslak moniert in seiner sehr idealisierten Simulation den mangelnden Bezug zur Realität. Dabei werden weder Kurven noch Kuppen und Wannan berücksichtigt, um einige Schwachstellen zu nennen. Diesen Anregungen wurde bereits im Rahmen der Verkehrsraummodellierung Rechnung getragen.

Durch eine Erweiterung der Verkehrsraummodellierung ist es möglich, ein Simulationsprofil mit bestehendem Streckenprofil und Verkehrsgeschehen erneut abzufahren (vgl. Abbildung 41 auf Seite 61). Während einer Simulation werden zugleich fünf verschiedene blendfreie Fernlichtkonzepte untersucht (vgl. Abbildung 13 auf Seite 21). Jedes System basiert auf der obigen Fernlichtverteilung und somit auf demselben Lichtstromverhältnis. Die Systeme sind:

- der Fernlichtassistent,
- die gleitende Leuchtweite GLW,
- das maskiertes Dauerfernlicht MDF,
- Matrix-Beam und
- das Pixellicht (individuelle Ausleuchtung).

In der Simulation werden die Systeme nahezu realitätsgetreu nachgebildet. Der einzige Unterschied zur Realität besteht darin, dass nur ein Scheinwerfer und nicht beide Scheinwerfer bewertet werden. Dieser zentrale Scheinwerfer befindet sich an derselben Position wie die virtuelle Kamera in einer Anbauhöhe von 65 cm mittig am Fahrzeug.

Im Falle des MDFs müssen systembedingt beide Scheinwerfer betrachtet werden. Erst durch das Zusammenspiel beider Scheinwerfer ist es hier möglich, einen Schattenbereich inmitten der Lichtverteilung zu erzeugen. Für die Simulation wird die Methode mit rechteckigen Blenden und nicht die Methode mit Walze und Schwenken herangezogen. Beide Scheinwerfer nehmen dabei die gleiche Position ein wie die virtuelle Kamera. Der Matrix-Beam-Scheinwerfer wird je nach der hinterlegten Fernlichtsegmentierung bewertet. Eine gleichzeitige Bewertung verschiedener Fernlichtsegmentierungen ist nicht vorgesehen.

Während der virtuellen Fahrt werden die Objektpositionen aus der Objektliste mit den Winkelbereichen der einzelnen Pixel abgeglichen. Bei einer möglichen Blendung wird entsprechend dem jeweiligen Konzept adaptiv entblendet. Der Abgleich sowie die Dokumentation des jeweilig aktiven Lichtstromes werden in der Simulationsschrittweite von einem Meter durchgeführt. Es wird dabei der Detektionsbereich der virtuellen Kamera berücksichtigt. Objekte außerhalb des Detektionsbereiches führen zu keiner Pixeldeaktivierung. Als Ergebnis wird der jeweilige Nutzungsgrad präsentiert.

Wahl der Vergleichsstrecke

Als Vergleichsstrecke soll die sogenannte Referenzstrecke aus Kapitel 5 (siehe Abbildung 42 auf Seite 65) dienen. Zur Beurteilung der Nutzungsgrade der Fernlichtsysteme muss jeweils virtuell die Referenzstrecke mit ihrer Länge von 100 km abgefahren werden. Dies führt zu langen Programmlaufzeiten. Im nachfolgenden Verlauf der Arbeit sollen mehr als 130 verschiedene Fälle untersucht werden. Um all diese Fälle betrachten zu können, werden jeweils nur die ersten 50 km der Referenzstrecke berücksichtigt. Die dadurch entstehenden Abweichungen zwischen der gefahrenen Strecke und der Gesamtstrecke sind in Abbildung 56 zu sehen. Die Abweichungen werden dabei durch die Differenz der Flächen unter den horizontalen Häufigkeitsverlaufskurven gebildet (vgl. Abbildung 52).

Eine anteilige Strecklänge von 50 km weicht demnach nur mit 0,3 % von der Gesamtstrecke ab. Wenn es nicht explizit erwähnt wird, werden die nachfolgenden Untersuchungen stets basierend auf den ersten 50 km der Referenzstrecke und auf der daraus entstandenen Objektliste durchgeführt. Durch die Verwendung dieser reproduzierbaren Testbedingungen wird die Vergleichbarkeit der einzelnen Ergebnisse gewährleistet.

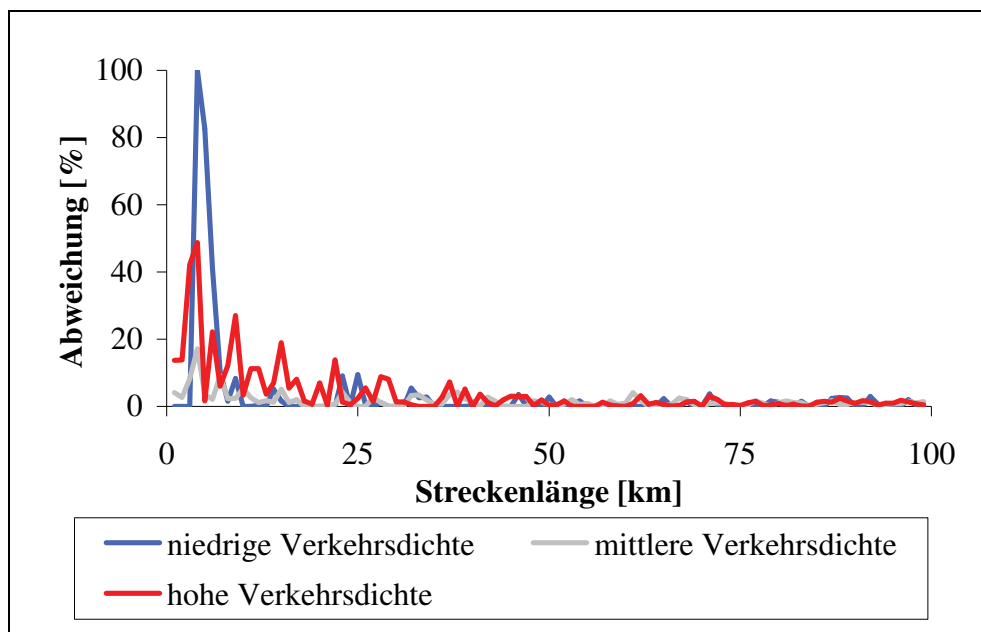


Abbildung 56 Betrag der Abweichung bei Streckenkürzung; die Abweichung bezieht sich jeweils auf den horizontalen Häufigkeitsverlauf der zugehörigen 100 km langen Referenzstrecke bei gleicher Verkehrsdichte.

7.2 Methoden zur Segmentierung einer Fernlichtverteilung

In einem Matrix-Beam-Scheinwerfer ist die Anzahl der LEDs begrenzt. Dadurch ist die Anzahl der verfügbaren Lichtsegmente ebenfalls limitiert. Ziel ist es nun, trotz dieser Begrenzung im Mittel möglichst viel Licht an zu lassen.

Das Pixellicht kann dabei als idealer Matrix-Beam-Scheinwerfer verstanden werden. Der Nutzungsgrad des Pixellichtes liegt beim Durchfahren der Referenzstrecke bei 98,14 %. Es weist in der Simulation 22.400 Segmente mit je einer Kantenlänge von $0,1^\circ$ auf. Die Anzahl der Lichtsegmente liegt in einem realistischen Matrix-Beam-Scheinwerfer ca. drei Größenordnungen darunter. Das spiegelt sich folglich in dem Nutzungsgrad wider.

In diesem Abschnitt wird daher das Fernlicht nach verschiedenen Ansätzen in Lichtsegmente unterteilt und diese nach ihrem Nutzungsgrad bewertet. Weiter wird betrachtet, inwiefern sich eine Minimierung der Lichtsegmentanzahl auf die Leistungsfähigkeit von Matrix-Beam auswirkt.

7.2.1 Objekthäufigkeitsbasierte Segmentierung

Dieser Ansatz beruht auf der Objekthäufigkeitsverteilung. Die Idee ist, Lichtsegmente automatisch zu bestimmen. Dabei sollen die Lichtsegmente jeweils die gleiche Anzahl an Objekten innerhalb ihres Winkelbereiches aufweisen. Dies führt in Bereichen mit einer hohen Objekthäufigkeit zu kleinen Lichtsegmenten, in Bereichen mit einer geringen Objekthäufigkeit entsprechend zu größeren Lichtsegmenten. Als Datengrundlage zur Segmentierung dient die Objekthäufigkeitsverteilung der 100 km langen Referenzstrecke (siehe Abbildung 43 auf Seite 65). Diese wird mit Hilfe zweier verschiedener Algorithmen segmentiert:

- individuelle Segmentierung und
- horizontal individuelle Unterteilung.

Aufgrund der quadratischen Geometrie einer LED fällt die Wahl auf rechteckige Lichtsegmente. Durch eine Kombination z.B. von Zylinderlinsen lässt sich das LED-Licht entsprechend formen.

Individuelle Segmentierung

Durch die individuelle Anpassung rechteckiger Lichtsegmente an das Verkehrsgeschehen wird ein möglichst hoher Nutzungsgrad erhofft. Grund dieser Annahme ist die Ähnlichkeit zu der individuellen Ausleuchtung des Pixellichtes. Der hinterlegte Algorithmus geht im Wesentlichen in den folgenden Schritten vor:

- Ausgehend vom Maximum der Objekthäufigkeitsverteilung wird das erste Segment in Rücksicht auf vorgegebene Mindestöffnungswinkel in der Horizontalen und Vertikalen gebildet.
- Daraufhin folgt die Bestimmung der absoluten Objektanzahl innerhalb dieses Segmentes.
- Als nächstes wird die Wahl des Bereiches für die Bildung des nächsten Segmentes anhand der höchsten Objektdichte am Rand des vorherigen Segmentes.

- Schließlich erfolgt die Bildung des nächsten Segmentes mit der gleichen Objektanzahl.

Der Mindestöffnungswinkel soll verhindern, dass nicht zu kleine Lichtsegmente entstehen. Kleinere Öffnungswinkel können durch Blenden oder durch Erhöhung der Brennweite erzielt werden. Allerdings führen Blenden zu Verlusten. Die Änderung der Brennweite bedeutet eine Vergrößerung des Bauraumes, wenn sich die Effizienz des optischen Systems nicht ändern soll. In jedem Fall erhöht sich der Justageaufwand.

Abbildung 57 zeigt eine Unterteilung mit 32 Segmenten bei einem Mindestöffnungswinkel von einem Grad. Zu sehen ist, dass der Algorithmus nur teilweise die gewünschte Unterteilung erzielt. Die Segmente, die zuerst gebildet werden, weisen eine gleiche Objektanzahl auf und berücksichtigen den Mindestöffnungswinkel. Allerdings entstehen dadurch Lücken, die diese Randbedingungen nicht erfüllen können. Die Einhaltung der Randbedingungen ist selbst mit einer weichen Grenze in Form einer Toleranz für die Objektanzahl nicht möglich.

Die Realisierung einer solchen Unterteilung ist grundsätzlich nicht vorstellbar. Da es sich hierbei um 32 unterschiedlich geformte Lichtsegmente handelt, bedarf es entsprechend 32 unterschiedlicher Optiken. Zusammen mit der Anordnung der Lichtsegmente führt dies zu einem erheblichen Entwicklungs- und Justageaufwand.

Horizontal individuelle Segmentierung (Linksverkehr)

Zur Erlangung realisierbarer Lichtsegmente können in diesem Ansatz horizontale Grenzen vorgegeben werden. Dadurch werden Zeilen erhalten, deren Winkelhöhe eingehalten wird (siehe Abbildung 58). Die vertikalen Grenzen eines Lichtsegmentes werden anhand der Objektanzahl und eines Mindestöffnungswinkels ermittelt, der für jede Zeile einzeln festgelegt werden kann.

Diese Variante führt insgesamt zu unterschiedlichen Segmentgrößen. Eine Reduzierung der Zeilenanzahl würde dem entgegenkommen. Es besteht allerdings eine weitere Möglichkeit, die unterschiedlichen Segmentgrößen bei gleicher Zeilenanzahl zu minimieren.

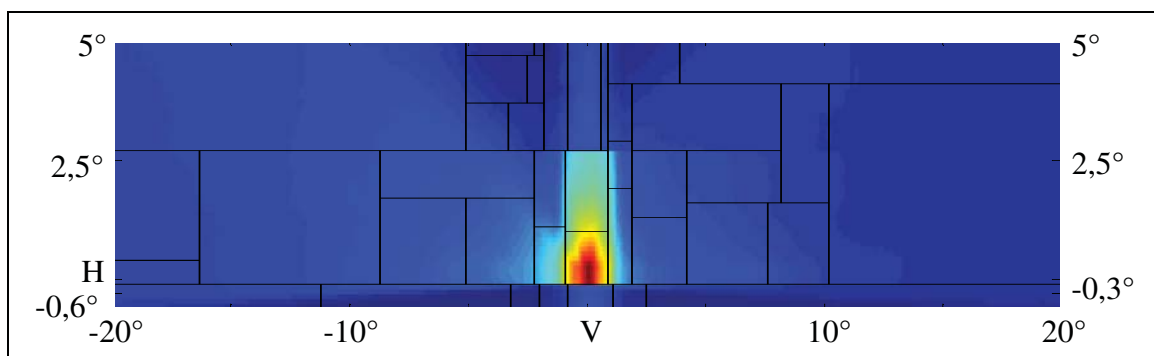


Abbildung 57 Beispiel einer individuellen Segmentierung auf Basis der 100 km langen Referenzobjektliste; Mindestöffnungswinkel: je 1°

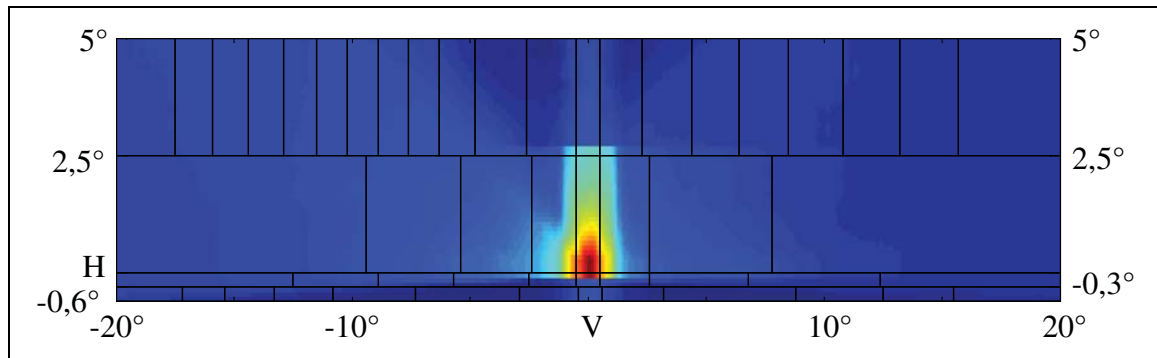


Abbildung 58 Horizontal individuelle Segmentierung auf Basis der 100 km langen Referenzobjektliste; Mindestöffnungswinkel: je 1°; ohne Kopplung der Bereiche

Es kann eine Zeile vorgeschlagen werden, deren vertikale Segmentgrenzen auf die anderen Zeilen übertragen werden. Dadurch entstehen spaltenweise Lichtsegmente mit gleichen vertikalen Grenzen. Es wird dabei von einer Verknüpfung der Zeilen gesprochen. Abbildung 59 zeigt eine solche Unterteilung. Dabei richten sich in diesem Fall alle vertikalen Segmentgrenzen nach der Objekthäufigkeit der zweiten Zeile von oben mit einem Mindestöffnungswinkel von einem Grad.

Die unterste horizontale Unterteilung liegt bei $-0,3^\circ$. Die Segmente darunter können auch als Autobahnlicht verwendet werden³⁸. Durch die beiden weiteren Unterteilungen im Horizont und bei $2,5^\circ$ teilt sich das Fernlicht vertikal in je zwei gleich große Zeilen. Aufgrund der größeren Objektanzahl wird die linke Hälfte des Fernlichtes häufiger unterteilt als die rechte.

Mit insgesamt 32 Segmenten wird ein Nutzungsgrad von 96,11 % erzielt. Bei nur einer horizontalen Unterteilung bei $-0,3^\circ$ sinkt der Nutzungsgrad auf 93,79 % ab. Die vertikalen Segmentgrenzen werden dabei über die obere Zeile berechnet. Ohne horizontale Unterteilung verringert sich der Nutzungsgrad geringfügig um weitere 0,24 %.

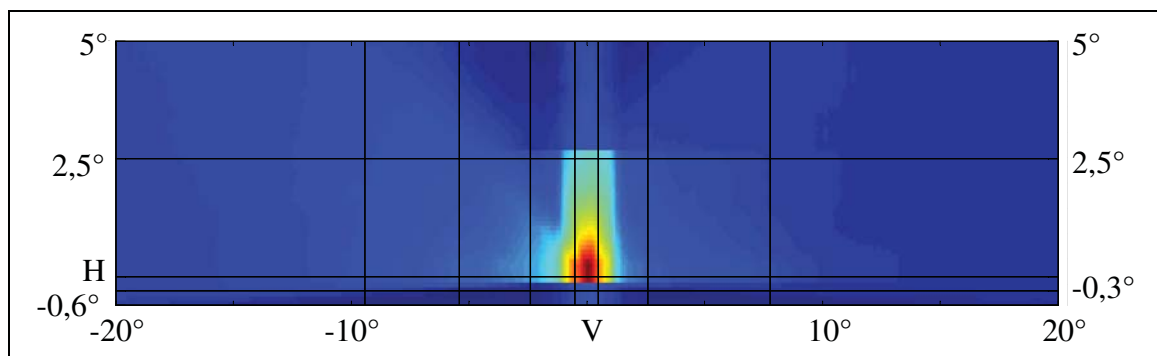


Abbildung 59 Horizontal individuelle Segmentierung auf Basis der 100 km langen Referenzobjektliste; Mindestöffnungswinkel: je 1°; Verknüpfung der Zeilen, Orientierung an der zweiten Zeile von oben

³⁸ Die Hell-Dunkel-Grenze des Autobahnlichtes besitzt eine Neigung von $-0,285^\circ$. Aufgrund der $0,1^\circ$ Auflösung der Simulation wird auf $-0,3^\circ$ abgerundet.

Nachteilig wirkt sich die grobe Segmentierung rechts aus. Befindet sich eine Lichtquelle in diesem Bereich, wird nahezu die gesamte rechte Hälfte des Fernlichtes deaktiviert. Gerade am eigenen Straßenrand wird Licht benötigt, um Fußgänger rechtzeitig zu erkennen. Eine solche Umsetzung ist daher fraglich.

Links- und Rechtsverkehr

Die bisher vorgestellten Unterteilungen wurden für den Rechtsverkehr ausgelegt. Sie eignen sich daher nicht für den Linksverkehr wie z.B. in England. Es ist für den Linksverkehr denkbar, die Scheinwerfer für den Rechtsverkehr bzw. deren Fernlichtunterteilungen spiegelverkehrt aufzubauen. Diese Individuallösung mit zwei unterschiedlichen Scheinwerfern führt aber dazu, dass sich die Kosten besonders in der Fertigung erheblich erhöhen. Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Scheinwerfer von Anfang an sowohl für den Links- als auch für den Rechtsverkehr auszulegen. Damit ein Scheinwerfer beide Verkehrsvarianten optimal abdecken kann, benötigt dieser eine größere Anzahl an Lichtsegmenten. Das bedeutet, dass mehr LEDs und Optiken vorgehalten werden müssen als nötig. Dies schlägt sich auf die Teilekosten und auf den Entwicklungsaufwand nieder, da insgesamt mehr Lichtsegmente realisiert werden.

Ob diese Allgemeinlösung oder die obige Individuallösung günstiger ist, hängt davon ab, wie sich die Einzelkosten in Abhängigkeit der Stückzahlen summieren. In Abbildung 60 ist eine solche allgemeine Unterteilung zu sehen, die gleichzeitig den Links- und den Rechtsverkehr berücksichtigt.

Durch eine additive Spiegelung der Objekthäufigkeiten an der Vertikalen bei null Grad wird dies ermöglicht. Durch die darauffolgende automatische Segmentierung werden insgesamt elf Spalten, hier in drei Zeilen, erhalten. Dabei sind die Bereiche mit der oberen Zeile verknüpft. Der Nutzungsgrad dieser Unterteilung beträgt 94,54 %. Bei nur einer horizontalen Unterteilung bei $-0,3^\circ$ und Beibehaltung der restlichen Einstellungen ergibt sich ein Wert von 94,2 %.

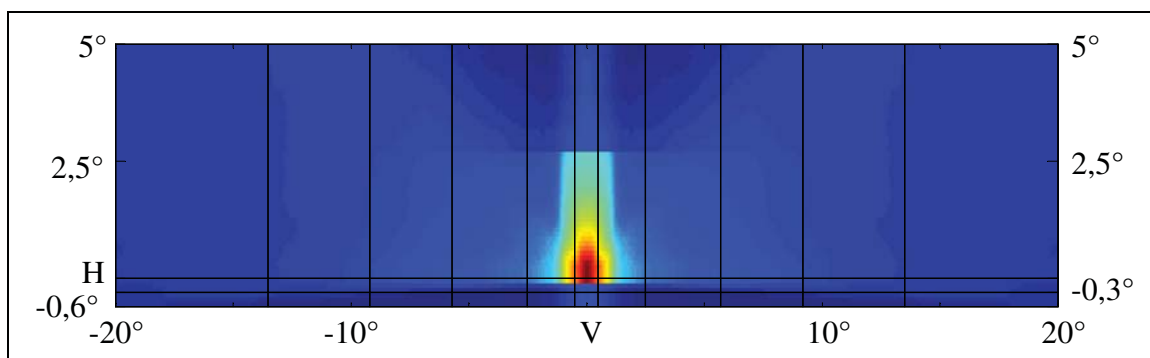


Abbildung 60 *Horizontal individuelle Segmentierung auf Basis der 100 km langen Referenzobjektliste, additiv an der Vertikalen V gespiegelt; Mindestöffnungswinkel: je 1° , Verknüpfung der Zeilen, Orientierung an der obersten Zeile*

Nutzungsgrade im Überblick

In Tabelle 11 sind die Nutzungsgrade unterschiedlicher horizontal individueller Segmentierungen zusammengefasst. Die variierenden Parameter sind dabei:

- die zu Grunde liegende Objekthäufigkeitsverteilung: original oder additiv gespiegelt,
- der Mindestöffnungswinkel,
- die Anzahl sowie die Position der horizontalen Unterteilungen (Zeilen) und
- die Verknüpfungen der Zeilen.

Die Verknüpfungen werden jeweils mit der Zeile vorgenommen, die die höchste Objektanzahl aufweist. Bei vier Zeilen ist das die zweite Zeile von oben. In allen anderen Fällen handelt es sich stets um die oberste Zeile. Alle ermittelten Unterteilungen weisen Werte oberhalb von 92 % auf. Mit steigender Zeilen- und Spaltenanzahl verbessert sich erwartungsgemäß der Nutzungsgrad η der Unterteilungen. Mehrzeilige Unterteilungen auf Basis der additiv gespiegelten Objektliste führen zu minimal besseren Ergebnissen. Aufgrund der Vorgehensweise bei der Ermittlung des ersten Segmentes weist keine Segmentierung eine Unterteilung in der vertikalen Achse auf (vgl. Abbildung 60 „V“-Linie).

7.2.2 Methode baugleicher Optikmodule

Die Unterteilung der Lichtverteilung in Lichtsegmente gleicher Winkelgrößen führt zu baugleichen Optikmodulen. Die gesamte Optik eines Matrix-Beam-Scheinwerfers besteht so aus einer Wiederholung eines einzigen Optikmoduls. Auf diese Weise wird ein gleichmäßiges Erscheinungsbild des Scheinwerfers ermöglicht. Zugleich reduzieren sich der Fertigungs- und der Entwicklungsaufwand in jeglicher Hinsicht. Durch die Konzentrierung auf ein mehrmals verwendetes Optikmodul ist insgesamt eine höhere Qualität zu erwarten.

Im Rahmen der Betrachtung des Nutzungsgrades wird der Einfluss der Zeilen- und Spaltenanzahl mit bewertet. Daher handelt es sich bei den folgenden Segmentierungen entweder ausschließlich um horizontale oder um vertikale Unterteilungen mit je derselben Ausdehnung. Die Spalten werden stets symmetrisch zur V-Linie gebildet, die Zeilen werden ebenfalls symmetrisch, jedoch zu einer horizontalen Linie bei $2,2^\circ$ vertikal erzeugt. In Abbildung 61 sind die Nutzungsgrade der verschiedenen Segmentierungen in Abhängigkeit der Anzahl ihrer Unterteilungen zu sehen.

Mit einem einzigen Segment, was der Funktion des Fernlichtassistenten entspricht, wird ein Nutzungsgrad von 83,75 % erreicht. Bei 40 Segmenten liegt der Nutzungsgrad bei 97,29 % bzw. bei 95,65 %. Die Unterteilung in Zeilen erzielt bei gleicher Segmentanzahl höhere Nutzungsgrade als die Unterteilung mit Spalten. Allerdings müssen bei einem Vergleich die vertikale und die horizontale Ausdehnung des Fernlichts berücksichtigt werden. Bei gleicher Segmentanzahl ist dadurch der Winkelbereich einer Spalte im Vergleich zu der einer Zeile um mehr als siebenmal größer. Die Zeilen teilen das Fernlicht feiner auf. Bei gleichem Winkelbereich leisten somit Spalten einen deutlich größeren Nutzungsgradbeitrag. Unterteilungen mit einer ungeraden Spaltenanzahl zwischen 10 und 20 schneiden besser ab als jene mit einer geraden Anzahl. Eine ungerade Anzahl führt dazu, dass in der V-Linie keine Unterteilung stattfindet.

Tabelle 11 Nutzungsgrade η bei horizontal individueller Unterteilung; Ermittlung durch Simulation

Objekthäufigkeitsverteilung	Mindestöffnungswinkel [°]	horizontale Unterteilung (vertikale Pos.) [°]	Anzahl Spalten	η [%]
original	1°	-	11	93,55
		-0,3°	11	93,79
		-0,3° , 0°	11	94,48
		-0,3° , 0° , 2,5°	8	96,11
	2°	-	6	92,20
		-0,3°	6	92,46
		-0,3° , 0°	6	93,34
		-0,3° , 0° , 2,5°	5	95,14
additiv gespiegelt	1°	-	11	93,52
		-0,3°	11	94,12
		-0,3° , 0°	11	94,54
		-0,3° , 0° , 2,5°	9	96,37
	2°	-	5	92,15
		-0,3°	5	92,86
		-0,3° , 0°	5	93,42
		-0,3° , 0° , 2,5°	5	95,80

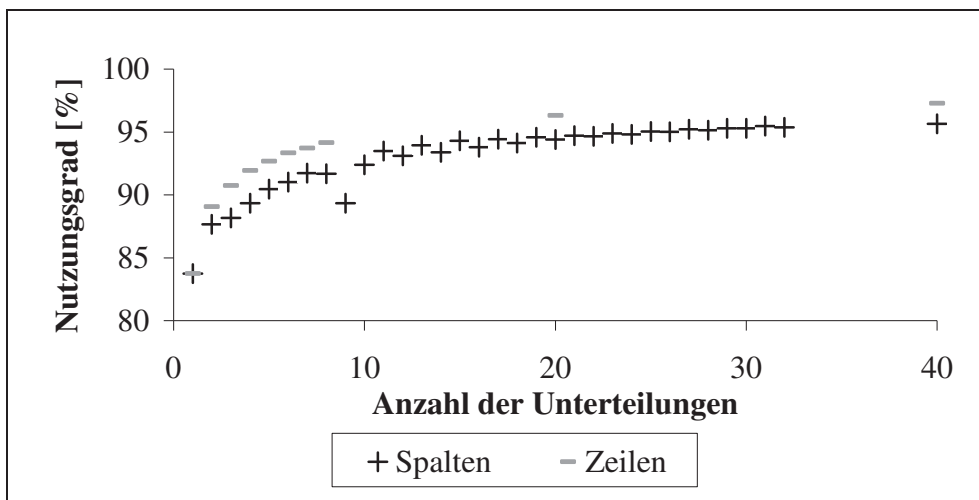


Abbildung 61 Einfluss der Spalten- und Zeilenanzahl auf den Nutzungsgrad; Ermittlung durch Simulation; dabei besitzen Spalten keine horizontale Unterteilung. Zeilen weisen entsprechend auch keine vertikale Unterteilung auf.

7.2.3 Methode zum gleichmäßigen Schalten von Lichtsegmenten

In einem Begegnungsprozess sollen sich andere Verkehrsteilnehmer stets dieselbe Zeit in einem Lichtsegment aufhalten. Die Schaltvorgänge der Lichtsegmente sollen dadurch gleichmäßig erscheinen. Eine gleiche Aufenthaltszeit in benachbarten Lichtsegmenten wird näherungsweise durch eine Verdopplung der Winkelbereiche nach außen hin erreicht. Eine Einhaltung der gleichen Aufenthaltszeit ist für Lichtsegmente nicht möglich, die sich über den Fluchtpunkt erstrecken oder an diesen angrenzen. Diese Methode ist daher für Unterteilungen mit weniger als vier Segmenten nicht sinnvoll.

Tabelle 12 zeigt die Nutzungsgrade bei gleichmäßigem Schalten. Die Unterteilungen sind symmetrisch zur V-Linie, da Überholvorgänge wie auch gewöhnliche Begegnungsprozesse davon betroffen sind. Aufgrund der Simulationsauflösung von $0,1^\circ$ werden die Unterteilungen entsprechend gerundet. Unterteilungen mit mehr als acht Segmenten führen zu einem Unterschreiten des Mindestöffnungswinkels von 1° und werden nicht berücksichtigt. Bereits mit vier Segmenten beträgt der Nutzungsgrad mehr als 90 %. Beachtlich ist der Sprung der Nutzungsgrade hin zu fünf Segmenten. Dieser Wert ist sogar geringfügig besser als die nachfolgende Unterteilung mit einer Spalte mehr.

Tabelle 12 Nutzungsgrad η bei gleichmäßigem Schalten von Lichtsegmenten; Ermittlung durch Simulation

Segmentanzahl	kleinster Winkelbereich [$^\circ$]	Grenzen +/- [$^\circ$]	η [%]
4	6,7 $^\circ$	0 $^\circ$, 6,7 $^\circ$, 20 $^\circ$	90,56 %
5	3,0 $^\circ$	1,5 $^\circ$, 7,5 $^\circ$, 20 $^\circ$	93,03 %
6	2,9 $^\circ$	0 $^\circ$, 2,9 $^\circ$, 8,7 $^\circ$, 20 $^\circ$	92,93 %
7	1,4 $^\circ$	0,7 $^\circ$, 3,5 $^\circ$, 9,1 $^\circ$, 20 $^\circ$	93,93 %
8	1,3 $^\circ$	0 $^\circ$, 1,3 $^\circ$, 3,9 $^\circ$, 9,1 $^\circ$, 20 $^\circ$	94,44 %

7.2.4 Bewertung des gesamten Matrix-Beam-Scheinwerfers

Es ist nicht sinnvoll, einen Matrix-Beam-Scheinwerfer ausschließlich nach seinem Nutzungsgrad zu beurteilen. Durch die Rolle des Fahrers und durch Fertigungsmöglichkeiten wird dessen Einfluss beschränkt.

Durch mehr Lichtsegmente kann ein besserer Nutzungsgrad gewährleistet werden. Allerdings wird es durch diese feinere Unterteilung erschwert, eine homogene Lichtverteilung zu erhalten. Sofern eine inhomogene Lichtverteilung vorliegt, bei dem die einzelnen Segmentgrenzen erkennbar sind, kann dies als zerstückelt empfunden werden. Das kann in einem mangelnden Fahrkomfort resultieren und dazu führen, dass der Fahrer das System nicht verwendet. Mit einer höheren Anzahl von Segmenten steigt ebenfalls der Fertigungsaufwand. Mit diesem Begriff sind hier vor allem Justage- und Montageaufwand gemeint. Auch der Bauraum steigt und die größere Anzahl der LEDs wirkt sich neben der Elektronik und den Kosten besonders auf die Lichtausbeute aus. Der Paarvergleich der Bewertungskriterien in Tabelle 13 ist zeilenweise zu lesen.

Tabelle 13 Paarvergleich der Bewertungskriterien für einen Matrix-Beam-Scheinwerfer

	η	FA	FK	Gewichtung
Nutzungsgrad η	1	2	0	3 (33,3 %)
Fertigungsaufwand FA	0	1	0	1 (11,1 %)
Fahrkomfort FK	2	2	1	5 (55,6 %)

Der Nutzungsgrad ist zweimal stärker zu werten als der Fertigungsaufwand. Der Fahrkomfort ist dabei doppelt so wichtig wie der Nutzungsgrad und der Fertigungsaufwand. Der Fahrer nimmt somit die wichtigste Rolle ein.

7.2.5 Diskussion der Methoden zur Segmentierung

Mit Hilfe eines auf dem Lichtstrom basierenden Bewertungsverfahrens werden automatisch generierte und selbsterstellte Fernlichtunterteilungen beurteilt. Bereits mit einer niedrigen Segmentanzahl können hohe Nutzungsgrade erreicht werden. Der Öffnungswinkel der Spalten ist dabei die entscheidende Größe.

Die objekthäufigkeitsbasierte Segmentierung aus Abschnitt 7.2.1 führt nicht zwangsläufig zu besseren Ergebnissen. Bei vergleichbarer Spaltenanzahl erzielt die Methode zum gleichmäßigen Schalten die besten Werte. Die Methode zum Erhalten baugleicher Optikmodule schneidet im Vergleich schlechter ab. Dennoch erreicht jede Methode Werte oberhalb von 90 % (siehe Tabelle 14). Die Verwendung der objektbasierten Methode ist nicht zielführend. Diese führt aufgrund unterschiedlicher Segmentgrößen zu einem technischen Mehraufwand, der sich nicht in einem höheren Nutzungsgrad ausdrückt. Vorteilhaft erscheint, dass keine der automatisch generierten Segmentierungen eine Unterteilung in der V-Linie aufweist. Der Bereich um den Fluchtpunkt wird häufig fixiert. Daher spielt eine homogene Lichtverteilung gerade in diesem Bereich eine große Rolle. Mit einer Unterteilung genau in der Mitte in diesem Bereich würde diese Anforderung erschwert.

Die Methode zum gleichmäßigen Schalten der Lichtsegmente soll dem Fahrer einen größeren Komfort bieten. Allerdings muss noch geklärt werden, ob der Fahrer ein solches Schalten überhaupt wünscht. Neben dem höchsten Nutzungsgrad bei wenigen Spalten existiert ein weiterer, jedoch nur kleiner elektronischer Vorteil, den dieses Verfahren unter Umständen mit der gespiegelten objektbasierten Methode teilt. Allgemein sind äußere Bereiche der Lichtverteilung dunkler als zentrale (vgl. Abbildung 55 auf Seite 80). Die Methoden sehen nach außen hin größere Lichtsegmente vor.

Tabelle 14 Vergleich der unterschiedlichen Methoden zur Segmentierung anhand der Nutzungsgrade von Unterteilungen mit vergleichbarer Spaltenanzahl bei je nur einer Zeile; Ermittlung durch Simulation

Methoden	Obj.-basiert (original)	Obj.-basiert (gespiegelt)	baugleiche Optikmodule	gleichmäßige Schaltvorgänge
5 Spalten	-	92,15 %	90,45 %	92,68 %
6 Spalten	92,2 %	-	91,03 %	93,33 %

Eine geschickte Wahl der Lichtsegmente kann zu einem ähnlichen Lichtstrombedarf der einzelnen Lichtsegmente führen. Ansteuerungsseitig bedeutet dies, dass für jedes Lichtsegment dieselbe Art und dieselbe Anzahl von LEDs angesteuert werden muss.

Baugleiche Optikmodule erreichen in dieser Konfiguration nicht die höchsten Nutzungsgrade. Allerdings birgt diese Methode die meisten Vorteile. Durch die baugleichen Optikmodule wird der Gesamtaufwand gesenkt und die Qualität der einzelnen Lichtbereiche kann so gesteigert werden. Durch die intensivere Beschäftigung mit nur einem Optikmodul wird es eher möglich, eine ausreichende Homogenität in der Intensität und besonders in der Farbe zu gewährleisten (siehe Abbildung 25 auf Seite 36). Anhand der Lichtverteilung des Nanolux-Scheinwerfers ist diese Problematik gut zu erkennen. Geteilt ist die Tatsache zu sehen, dass bei baugleichen Optikmodulen der gesamte Fernlichtbereich gleich hell ausgeleuchtet wird. Dabei ist die Seitenausleuchtung deutlich heller als bei gewöhnlichen Fernlichtverteilungen und kann durch Reflexionen im peripheren Gesichtsfeld zu Irritationen mit darauffolgenden Blickzuwendungen führen [Huhn99]. In solchen Momenten ist der Blick unnötigerweise von der Straße bzw. vom Straßenrand abgewendet, was somit ein Sicherheitsrisiko darstellt. Um eine typische Fernlichtverteilung zu erhalten, die nach außen hin dunkler wird und Blickabwendungen nicht begünstigt, müssen äußere Lichtsegmente gedimmt werden.

Insgesamt werden bei der Methode baugleicher Optikmodule mehr Licht und mehr LEDs vorgehalten als eigentlich nötig. Diese Eigenschaft könnte allerdings bei zukünftigen Entwicklungen ausgenutzt werden. Durch den Vorhalt dieser scheinbar überdimensionierten Lichtbereiche kann ein elektronisches Kurvenlicht ohne jegliche Mechanik erzeugt werden. Dabei ist noch zu klären, wie viele Segmente für ein elektronisches Kurvenlicht benötigt werden.

7.2.6 Vorschlag einer Segmentierung

Das hier verwendete Bewertungsverfahren wird weiter unten kritisch betrachtet (Seite 109). Dennoch sei hier vorweggenommen, dass Bereiche am Straßenrand nicht ausreichend berücksichtigt werden. Gerade hier ist die Erkennung von Fußgängern oder Wild entscheidend. Segmente in diesen Bereichen tragen deutlich zur Sicherheit aller bei.

Im nachfolgenden Abschnitt werden statische und dynamische Sicherheitsbereiche betrachtet, die zu einer sicheren Entblendung benötigt werden. Aufgrund der Systemeigenschaften müssen die bestehenden Kamerasegmentengrenzen künstlich erweitert werden. Gerade in geringeren Entfernungen zum Gegenverkehr nehmen die Sicherheitsbereiche hohe Werte an. Das bedeutet besonders für die äußeren Kamerasegmente eine beträchtliche künstliche Vergrößerung von mehreren Grad. In den Außenbereichen werden daher große Lichtsegmente empfohlen.

Es wird insgesamt eine Kombination aus allen drei vorgestellten Methoden empfohlen. Ausgangsbasis ist die objektbasierte Methode zur Erlangung einer symmetrischen Segmentierung und Erfahrungen aus der Probandenuntersuchung in Abschnitt 8.2. Nach diesen Untersuchungen sind im Begegnungsverkehr Erkennbarkeitsentfernungen bis 100 m und darüber möglich. Die Segmentierung wird daher hinsichtlich dieser Entfernung ausgelegt.

An dieser Stelle werden die Ergebnisse von Damasky³⁹ wieder aufgegriffen. Diese beziehen sich auf eine diskrete Entfernung, in deren sich Objekte befinden. Die im Rahmen der realen Verkehrsraumanalyse ermittelten Werte sind dafür nicht geeignet. Diese verfügen über keine Entfernungsinformationen.

Die Lichtverteilung wird als Grundlage zur Segmentierung in vier Bereiche gegliedert:

- innerer Zentralbereich: Grenze bei +/- 4,5° - entspricht in etwa dem 90 %-Bereich anderer Verkehrsteilnehmer in 100 m,
- äußerer Zentralbereich: Grenze bei ca. +/- 9° - entspricht in etwa dem 90 %-Bereich anderer Verkehrsteilnehmer in 50 m,
- Straßenausleuchtung: Grenze bei ca. +/- 13° - entspricht in etwa dem 90 %-Bereich von Leitpfosten in 50 m und
- Seitenausleuchtung: ab +/- 13°.

Ein Fahrzeug mit einer mittleren Breite von 1,75 m erscheint in einer Entfernung von 100 m unter einem Betrachtungswinkel von 1,0°. Idealerweise würde die Unterteilung zumindest eine doppelt so feine Auflösung aufweisen wie der entsprechende Betrachtungswinkel des Fahrzeuges. Allerdings führt dies zu Öffnungswinkeln kleiner als ein Grad und folglich auch zu einer zu hohen Gesamtanzahl von Segmenten. Als Öffnungswinkel im inneren Zentralbereich wird daher ein Grad gewählt, wobei keine Unterteilung in der V-Linie vorgesehen wird.

Die Auslegung der restlichen Lichtsegmente orientiert sich an den Bereichsgrenzen sowie an der Methode zum gleichmäßigen Schalten und baugleicher Optikmodule. Der äußere Zentralbereich wird zudem durch den Betrachtungswinkel von Fahrzeugen von ca. 2° geprägt. Es werden in diesem zwei Segmente mit je einem Öffnungswinkel von 2° vorgeschlagen.

Eine Straßenausleuchtung bis +/- 12,5° wird durch ein weiteres Segment mit einem Öffnungswinkel von 4° ermöglicht. Die Seitenausleuchtung kann nun wahlweise mit einem doppelt so breiten Segment oder durch zwei weitere baugleiche Segmente mit je 4° realisiert werden.

Das Fernlicht weist somit eine Gesamtbreite von +/- 20,5° auf. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten und hier eingezeichneten 20° sind als Mindestbreite anzusehen, wobei der Öffnungswinkel der Sensorik nicht überschritten werden darf. Diese geringfügige Verbreiterung stellt insofern kein Problem, sondern eher eine Verbesserung dar.

Abbildung 62 zeigt die vorgeschlagene Segmentierung, die einen Nutzungsgrad von 95,66 % erzielt. Durch die nach außen größer werdenden Segmente werden sowohl der objektbasierten Methode, der Methode zum gleichmäßigen Schalten als auch den dynamischen Sicherheitsbereichen Rechnung getragen. Zudem ist es möglich, für die Seitenausleuchtung mit zwei baugleichen Optikmodulen der Straßenausleuchtung zu realisieren, was den Entwicklungsaufwand verringert. In Abbildung 62 ist diese Möglichkeit an den gestrichelten Segmentgrenzen bei +/- 16,5° zu erkennen. Der Nutzungsgrad beträgt bei dieser Variante 95,67 %.

³⁹ Siehe Abbildung 45 auf Seite 67. Auf die Position „Augen entgegenkommender Fahrer“ werden zusätzlich 1,5 m addiert, um das gesamte Fahrzeug zu berücksichtigen. Auf die 90 %-Bereiche in 100 m Entfernung wird von denen in 50 m Entfernung unter Annahme eines geraden Straßenverlaufes geschlossen.

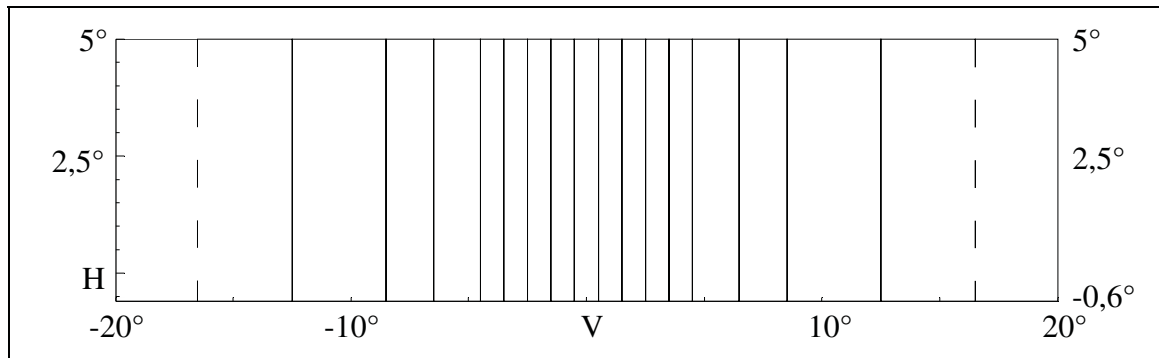


Abbildung 62 Vorschlag einer möglichen Segmentierung; Nutzungsgrad auf den ersten 50 km der Referenzstrecke mit Unterteilung bei $16,5^\circ$: 95,67 %, ohne diese Unterteilung: 95,66 %; zum Vergleich: mittlerer Nutzungsgrad auf den sieben Strecken gemäß Tabelle 18: 91,38 %; Ermittlung der Nutzungsgrade durch Simulation

Autobahnlicht und Schilderbeleuchtung

Bei einer ausreichenden Spaltenanzahl kann der Einfluss von Zeilen nahezu vernachlässigt werden. So erhöht sich der Nutzungsgrad des Segmentierungsvorschlages in Abbildung 62 um nur 0,5 %, wenn eine horizontale Unterteilung bei $-0,3^\circ$ (Autobahnlicht) eingefügt wird. Horizontale Unterteilungen führen daher in lediglich zwei Fällen zu einem Mehrnutzen:

- Autobahnlicht: unterhalb von $-0,28^\circ$ (vertikal) und
- Beleuchtung für Überkopfschilder: oberhalb von $2,6^\circ$ (vertikal).

Besonders bei weit vorausfahrendem Verkehr erhöht eine horizontale Unterteilung bei $-0,28^\circ$ die Sicht auf der Fahrbahn. Zudem können die dadurch entstehenden Segmente als Autobahnlicht dienen.

Schilder am Straßenrand werden durch die bereits vorhandenen vertikalen Segmente lesbar. Für Überkopfschilder ist eine weitere horizontale Unterteilung notwendig. Überkopfschilder befinden sich in einer Höhe von 5,5 m bis 8,5 m und werden in einer Entfernung zwischen 50 m und 120 m gelesen [Rosl05]. Zudem empfiehlt Damasky eine Fernlichthöhe von mindestens $2,6^\circ$ [Dama95]. Als relevante Fernlichthöhe wird in der gesamten Arbeit 5° angenommen.

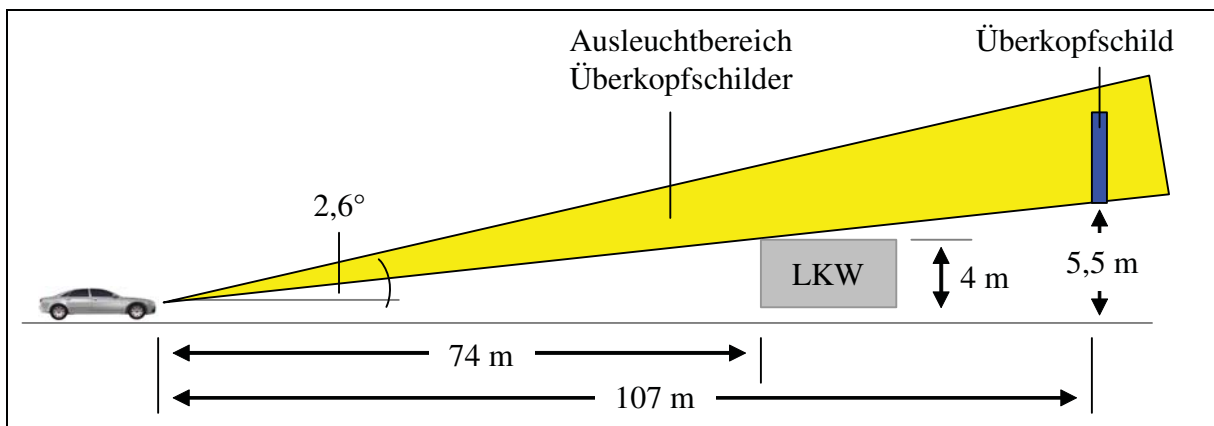


Abbildung 63 Ausleuchtungsbereich Überkopfschilder (nicht maßstabsgetreu)

Erfahrungen haben gezeigt, dass eine zu niedrige Höhe des Fernlichtes in Verbindung mit einer scharfen Hell-Dunkel-Grenze zu einem Tunneleffekt führen kann. Dabei ziehen manche Fahrer sogar den Kopf ein. Licht oberhalb von $2,6^\circ$ führt zu einer vollständigen Beleuchtung von Überkopfschildern bis in einer Entfernung von 107 m (siehe Abbildung 63). Befinden sich andere Verkehrsteilnehmer⁴⁰ näher als 74 m zum eigenen Fahrzeug, muss die Beleuchtung oberhalb $2,6^\circ$ ausgeschaltet werden. Sofern nur der Augenbereich und nicht die gesamte maximale Fahrzeughöhe entblendet wird, muss unterhalb einer Entfernung von 48 m abgeblendet werden. Die Überkopfschilder sind folglich in einer Entfernung von 48 m bzw. 74 m bis 107 m lesbar.

7.3 Sicherheitsbereiche

Um eine sichere Entblendung zu gewährleisten, muss großflächiger entblendet werden als eigentlich nötig. Die Ursachen dafür rühren von zwei unterschiedlichen Typen von Sicherheitsbereichen:

- statische Sicherheitsbereiche: Einbau- und Einmesstoleranzen sowie
- dynamische Sicherheitsbereiche: Defizite der Sensorik und des Gesamtsystems.

Dabei wird eine künstliche Kamerasegmentvergrößerung, die sich zumindest in Abhängigkeit des Abstands ändert, zur Gruppe der dynamischen Sicherheitsbereiche gezählt. Der Parallaxenfehler zwischen Kamera und Scheinwerfer nimmt dabei eine Sonderrolle ein. Er ist ausschließlich abhängig vom Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern und wird daher getrennt betrachtet. Statische Sicherheitsbereiche werden durch Einbau- und Einmesstoleranzen verursacht. Seine Größe bleibt daher konstant.

Unabhängig von den obigen Ergebnissen wird für den Matrix-Beam-Scheinwerfer stets die Segmentierung aus Abbildung 64 angewendet⁴¹. Auf den ersten 50 km der Referenzstrecke wird damit ein Nutzungsgrad von 94,86 % erzielt.

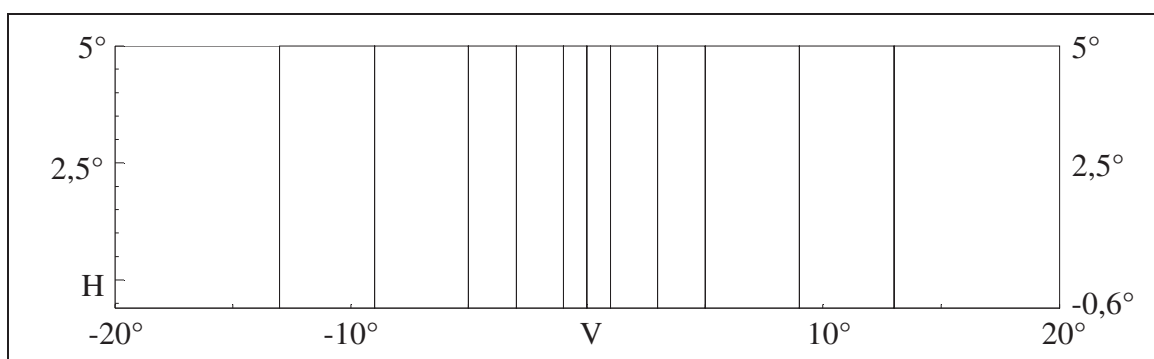


Abbildung 64 Segmentierung für weitere Untersuchungen; keine horizontale Unterteilung; vertikale Unterteilungen bei $\pm 0^\circ, 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ, 9^\circ, 13^\circ, 20^\circ$ horizontal

⁴⁰ Die Fahrzeughöhe anderer Verkehrsteilnehmer ist unbekannt. Diese wird maximal zu 4 m angenommen. Die Höhe des Augenbereiches beträgt 2,85 m (siehe Tabelle 7 auf Seite 60).

⁴¹ Die folgenden Untersuchungen wurden zeitgleich mit denen der Erarbeitung des Vorschlages der Segmentierung erarbeitet. Daher konnte hier nicht die vorgeschlagene Segmentierung herangezogen werden.

7.3.1 Statische Sicherheitsbereiche

Ein Kamerasegment beinhaltet die Größe und die Position eines Lichtsegmentes aus Sicht der Kamera (siehe Seite 47). Sämtliche Kamerasegmente eines Scheinwerfers werden in einem Parametersatz zusammengefasst. Wenn in der Produktion der Parametersatz eines einzigen Fahrzeuges für alle nachfolgenden Fahrzeuge übernommen werden soll, dann sind im Wesentlichen folgende Toleranzen zu berücksichtigen:

- die Fertigungstoleranz der LED-Module,
- die Fertigungstoleranz beim Scheinwerferhersteller,
- die Justagetoleranz des Scheinwerfers in der Produktion,
- die Justagetoleranz der Kamera in der Produktion und
- die Einmesstoleranz bei Bestimmung des Parametersatzes.

Die Einbautoleranzen der Kamera und der Scheinwerfer können vernachlässigt werden. Beide werden nach dem Einbau mit einer gewissen Toleranz justiert. Es kann vorkommen, dass sich die einzelnen Toleranzen ganz oder zumindest teilweise kompensieren. Allerdings ist auch der Fall denkbar, dass die einzelnen Toleranzen stets in derselben Raumrichtung mit maximaler Verstellung auftreten. In einem solchen Fall ist eine Gesamttoleranz von über einem Grad zu erwarten.

Aufgrund der Ungewissheit über die Toleranzrichtung müssen die Kamerasegmentengrenzen in sämtliche Richtungen künstlich erweitert werden. Das heißt, dass sich die Segmentgrenzen überlappen. Für die Segmentierung aus Abbildung 64 bedeutet das eine Erweiterung horizontal nach links und rechts. Abbildung 65 zeigt den relativen Verlust, der durch die künstliche Vergrößerung der Kamerasegmente auf den ersten 50 km der Referenzstrecke entsteht. Der Nutzungsgrad liegt ohne Sicherheitsbereiche bei 94,86 %. Eine künstliche Vergrößerung um je einem Grad in beide Richtungen führt zu einer Nutzungsgradabnahme um lediglich 6,7 %. Größere Sicherheitsbereiche wirken sich deutlich stärker aus. Bei einer Größe von 2° verringert sich der Nutzungsgrad um 27 %.

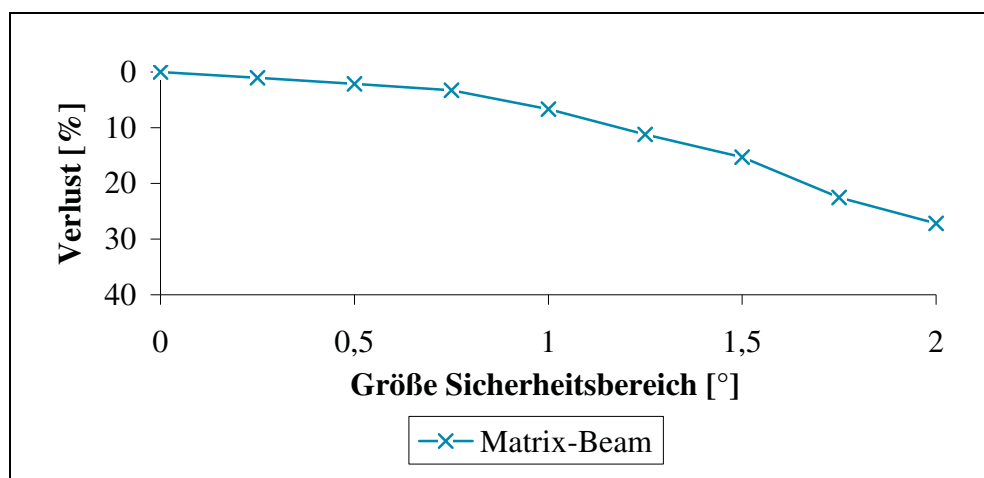


Abbildung 65 Verlust durch statische Sicherheitsbereiche nach Befahren der ersten 50 km der Referenzstrecke; Ermittlung durch Simulation; Segmentierung Matrix-Beam siehe Abbildung 64; Differenz zum Nutzungsgrad ohne Sicherheitsbereiche: 94,86 %

Minimierung der statischen Toleranzen

Durch einen größeren Messaufwand ist eine Verkleinerung der Sicherheitsbereiche möglich. Dennoch ist es zu aufwändig, einen Parametersatz für jedes einzelne Fahrzeug zu bestimmen. Es wird daher ein vertretbarer Mittelweg vorgeschlagen, der im Vergleich mit dem geringsten Mehraufwand eine erhebliche Verkleinerung der Sicherheitsbereiche erzielt.

Heutzutage werden einzelne Optikmodule wie Abblendlicht und Fernlicht bei der Scheinwerferherstellung automatisch zueinander eingestellt. Dabei werden die Lichtfunktionen zuerst vermessen und dann verstellt. Die Einstellung wird durch eine erneute Vermessung kontrolliert. Ist die Abweichung zu groß, beginnt die Schleife von vorne.

Für die Einstellung eines Matrix-Beam-Scheinwerfers bedeutet das, dass die Grenzen der einzelnen Lichtsegmente sowie die Lage zur Hell-Dunkel-Grenze des Abblendlichtes bekannt sind. Diese Werte müssen nach der letzten Kontrolle zusätzlich abgespeichert und dem Scheinwerfer eindeutig zugeordnet werden.

In der Produktion wird der Scheinwerfer anhand der Hell-Dunkel-Grenze des Abblendlichtes eingestellt. Unter Berücksichtigung der Justagetoleranz des Scheinwerfers und der Kamera in der Produktion können zusammen mit den abgespeicherten Grenzen der einzelnen Lichtsegmente die zugehörigen Kamerasegmente berechnet werden. Der Vorteil ist, dass alleine durch die Abspeicherung der ohnehin gemessenen Segmentgrenzen die Fertigungstoleranz der LED-Module sowie die der Scheinwerferherstellung durch eine einzige und somit deutlich kleinere Einmesstoleranz ersetzt werden.

7.3.2 Parallaxenfehler

Der Kamerawinkel, unter dem ein Objekt erkannt wird, stimmt nicht mit dem Winkel eines Lichtsegmentes überein, welches das gleiche Objekt anleuchtet (vgl. Abbildung 34 auf Seite 47). Sofern der Abstand des Objektes bekannt ist, kann mittels einer Koordinatentransformation auf den Winkel aus Sicht der Scheinwerfer geschlossen werden.

Wenn jedoch die Abstandsinformationen mangelhaft sind, so müssen die Kamerasegmente künstlich erweitert werden, um eine Blendung zu vermeiden. Das führt zu Verlusten im Nutzungsgrad. Es werden an dieser Stelle drei Fälle betrachtet:

- exakte Abstandsinformationen: keine Berücksichtigung des Parallaxenfehlers,
- Abstandsklassen: teilweise Berücksichtigung des Parallaxenfehlers,
- keine Abstandsinformationen: vollständige Berücksichtigung des Parallaxenfehlers.

Bei exakten Abstandsinformationen ist keine Berücksichtigung des Parallaxenfehlers in Form einer künstlichen Erweiterung der Kamerasegmente notwendig. Sofern eine grobe Entfernungsschätzung möglich ist, können die Kamerasegmente für jede Abstandsklasse einzeln angepasst werden. Es werden folgende Abstandsklassen verwendet:

- 0 m bis 50 m,
- 50 m bis 100 m,
- 100 m bis 200 m und
- 200 m bis 500 m.

Wenn keine Abstandsinformationen vorhanden sind, muss eine künstliche Erweiterung für einen Entfernungsbereich von 5,5 m bis 500 m vorgenommen werden (siehe Abbildung 66). Befindet sich ein entgegenkommendes Fahrzeug in einer Entfernung von näher als 5,5 m, so kann dieses nicht mehr geblendet werden. Die Ursache ist der begrenzte Öffnungswinkel des Fernlichtes in Kombination mit einem minimal angenommenen lateralen Versatz des entgegenkommenden Fahrzeuges zum eigenen Scheinwerfer von 1,0 m. Der Punkt P1-H ergibt sich anhand der fahrzeugäußeren Lichtsegmentgrenze (hier: oben) in einer Entfernung von 5,5 m.

Dieser Punkt P1-H definiert nun den äußeren horizontalen Winkel des künstlich vergrößerten Kamerasegmentes. Oberhalb einer Entfernung von 500 m ist das Fernlicht zu schwach, um zu blenden. Der innere Winkel des künstlich vergrößerten Kamerasegmentes bestimmt sich daher aus dem Punkt P2-H, der die Position der inneren Lichtsegmentgrenze in einer Entfernung von 500 m beschreibt. Das künstlich vergrößerte Kamerasegment, das ohne Abstandangaben den gesamten Parallaxenfehler berücksichtigt, spannt sich somit über die Punkte P1-H und P2-H auf.

Bei Vorhandensein von Abstandsklassen ist es möglich die Kamerasegmente für jede Abstandsklasse einzeln anzupassen. Dies führt zwar zu einer entsprechend größeren Anzahl von Kamerasegmenten, allerdings fällt dadurch die Vergrößerung pro Kamerasegment deutlich kleiner aus als im oberen Fall. Pro Abstandsklasse lässt sich dann die fahrzeugäußere Grenze des Kamerasegmentes über die fahrzeugäußere Lichtsegmentgrenze am Punkt P1-H' bestimmen. Der Punkt P1-H' befindet sich immer an der Untergrenze der gewählten Abstandsklasse. Die fahrzeuginnere Grenze ergibt sich hingegen an der Obergrenze der entsprechenden Abstandsklasse (siehe P2-H').

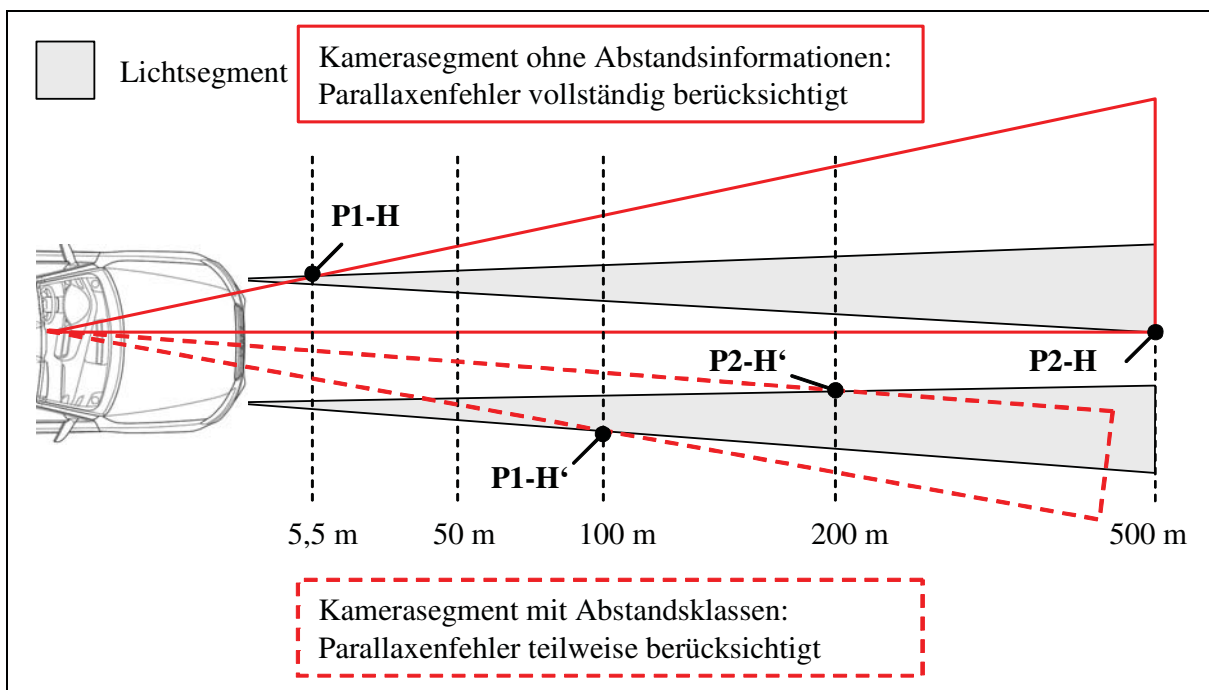


Abbildung 66 Künstliche Erweiterung der Kamerasegmente ohne Abstandsinformationen und mit Abstandsklassen zur Berücksichtigung des Parallaxenfehlers; hier beispielhaft für den Bereich von 100 m bis 200 m (nicht maßstabsgetreu)

In der bisherigen Simulation ist eine direkte Aussage über den Parallaxenfehler nicht möglich, da die virtuelle Kamera an der gleichen Position wie der Scheinwerfer angebracht ist. Um dennoch den Einfluss zu quantifizieren, werden die Nutzungsgrade durch die Simulation einer geraden Strecke mit einer Länge von 500 m ermittelt (Tabelle 15). Dabei weisen die Scheinwerfer und virtuelle Kamera unterschiedlichen Anbaupositionen auf.

Mit exakten Abstandsinformationen werden die höchsten Nutzungsgrade erzielt. Wenn der Parallaxenfehler vollständig kompensiert werden muss, so fällt der Nutzungsgrad um mehr als 6,5 %. Erstaunlich gute Nutzungsgrade erzielt die teilweise Berücksichtigung des Parallaxenfehlers, die sich auf wenige Abstandsklassen stützt. Tabelle 15 zeigt zudem die Nutzungsgrade auf, die in Kombination mit einem statischen Sicherheitsbereich von $\pm 1^\circ$ auf dieser geraden Strecke erreicht werden. Bei exakten Abstandsinformationen führt dies im Vergleich zum größten Verlust. Auf den bereits geschwächten Nutzungsgradwert der vollständigen Berücksichtigung wirkt sich der zusätzliche Sicherheitsbereich weniger stark aus.

Tabelle 15 Nutzungsgrad unter Berücksichtigung des Parallaxenfehlers; Ermittlung durch Simulation einer geraden Weglänge von 500 m; Segmentierung Matrix-Beam siehe Abbildung 64

Sicherheitsbereich	exakte Abstandsinformationen	Abstandsklassen	vollständige Berücksichtigung
$\pm 0^\circ$	91,67 %	90,80 %	85,11 %
$\pm 1^\circ$	86,19 %	85,62 %	82,10 %

7.3.3 Größe dynamischer Sicherheitsbereiche

Dynamische Sicherheitsbereiche entstehen aufgrund von Defiziten der Sensorik und des Gesamtsystems. Mit einer Kamera wird nur die Position anderer Verkehrsteilnehmer anhand derer Lichtquellen bestimmt. Allerdings lässt dies keine Aussage über deren Ausdehnung zu. Zudem können die Lichtsegmente aufgrund von aufeinanderfolgenden Verarbeitungsschritten nur in zeitlich diskreten Abständen angesteuert werden. Die Latenzzeit beschreibt dabei die Reaktionszeit des Gesamtsystems auf Änderungen im Kamerabild. Während dieser Latenzzeit verändern sich die eigene Position sowie die Position anderer Verkehrsteilnehmer. Zusammengefasst führt das zu den folgende Defiziten:

- unbekannte Ausdehnung von Objekten sowie
- eine Veränderung der Positionen während der Latenzzeit.

Beide Defizite können in geringen Entfernungen und in Kurvenfahrten zu einer Blendung über Seitenfenster oder Spiegel führen. Es werden an dieser Stelle nicht die Auswirkungen der somit notwendigen künstlichen Kamerasegmentvergrößerung auf den Nutzungsgrad hin quantifiziert. Aufgrund zahlreicher Randbedingungen ergeben sich zu viele Kombinationsmöglichkeiten. Daher wird hier lediglich die Größe der Sicherheitsbereiche für verschiedene Fälle berechnet.

Definition des Sicherheitsbereiches

Der Sicherheitsbereich s wird in der Winkeleinheit Grad bestimmt. Abbildung 67 zeigt mögliche Sicherheitsbereiche. Darin werden die Vorzeichenkonvention sowie der Nulldurchgang erklärt. Im Moment des Nulldurchganges, hier t_1 , ist keine seitliche Entblendung des anderen Fahrzeuges nötig. Dieser Fall tritt ausschließlich bei Linkskurven auf. Eine Erweiterung nach links wird als negativer, nach rechts als positiver Sicherheitsbereich gewertet.

Verändert ein Fahrzeug z.B. innerhalb der Zeitpunkte t_0 und t_1 seine Position, so kann seine neue Position bei bekanntem Straßenverlauf bzw. bei bekanntem Radius alleine über die Entfernung in X- oder in Y-Richtung eindeutig bestimmt werden. Im Folgenden wird die Entfernung in Y-Richtung verwendet, um die Position von Objekten zu beschreiben. Der Koordinatenursprung liegt dabei der Mitte der eigenen Fahrzeugfront.

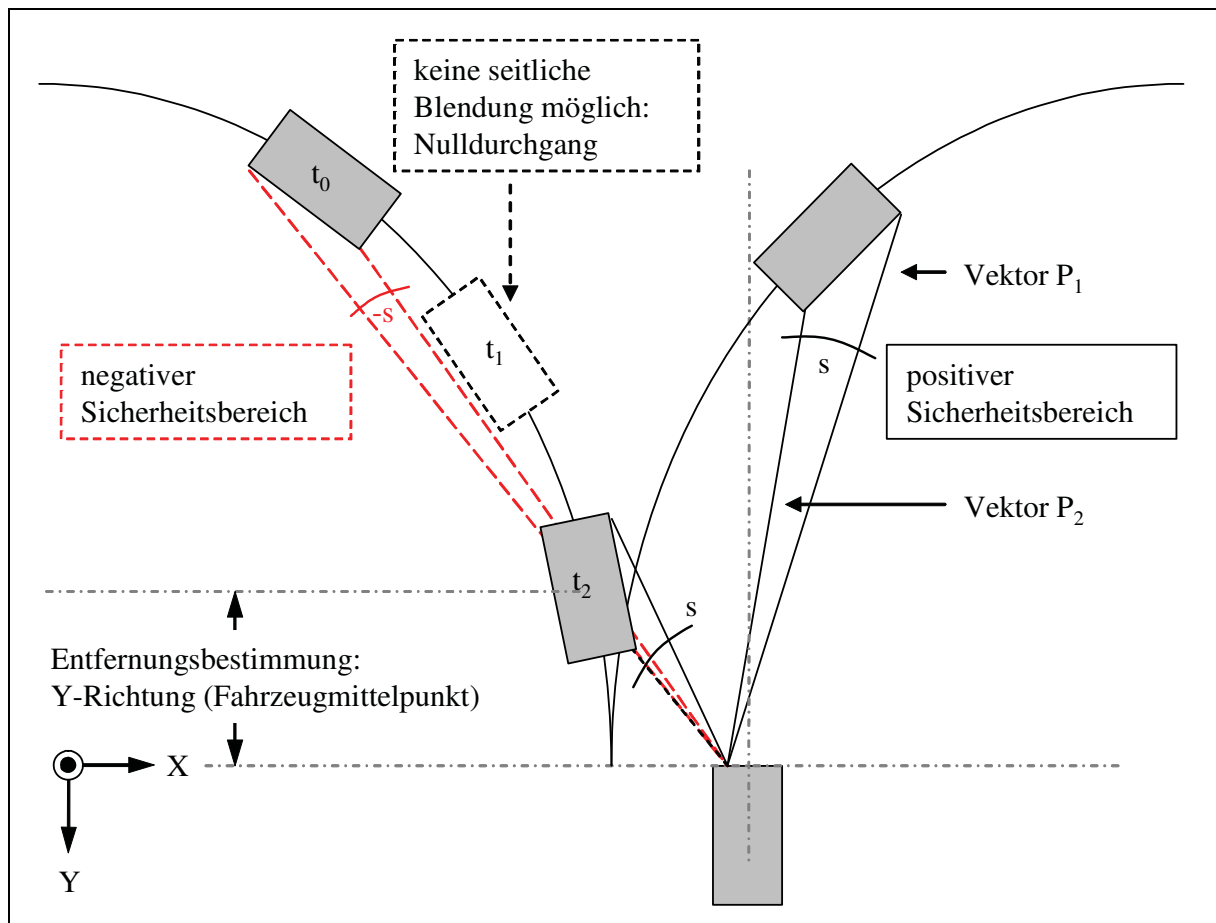


Abbildung 67 Schematische Darstellung dynamischer Sicherheitsbereiche

Herleitung des dynamischen Sicherheitsbereiches

Der Sicherheitsbereich s ist abhängig von folgenden Randbedingungen:

- Fahrzeuglänge: Mittelwert 4,3 m,
- Fahrzeugbreite: Mittelwert 1,75 m,
- Straßenverlauf: Kurvenradius von 100 m bis 1000 m,

- Fahrbahnbreite: Mittelwert 6,8 m,
- X/Y Position: entsprechend dem Straßenverlauf.

Der Grad der Schrägstellung, der auch als Gierwinkel bezeichnet wird, wird über diese Randbedingungen mit berücksichtigt. Nachfolgend wird die Formel 7.4 hergeleitet, mit der sich der Sicherheitsbereich s berechnen lässt. Dabei wird von einer idealen Kreisgleichung der Kurven ausgegangen. Zwecks der Übersichtlichkeit wurden in Abbildung 67 nicht alle Größen eingezeichnet bzw. beschriftet:

- s Sicherheitsbereich (Winkel) in Grad [°],
- x_p/y_p Koordinaten entsprechender Fahrzeugecken,
- x_s/y_s Koordinaten des Fahrzeugschwerpunktes (Gegenverkehr),
- x_{sw} Koordinate Fahrzeugscheinwerfer,
- $\Delta x/\Delta y$ Abmaße vom Schwerpunkt zu den Fahrzeugecken,
- R Kurvenradius,
- b halbe Fahrzeugbreite,
- l halbe Fahrzeuglänge,
- x_M Mittelpunkt des Kreisabschnittes bzw. der Kurve.

Der Gierwinkel wird anhand des Tangentenanstieges am idealen Kreisbogen bzw. Fahrzeugmittelpunkt ermittelt. Die Steigung m im Fahrzeugschwerpunkt mit der Fahrzeugneigung gleichzusetzen, wird aufgrund der Radiengröße und der daraus resultierenden geringen Abweichung zwischen gekrümmter Fahrbahn und gerader Fahrzeuglängsachse gerechtfertigt. Dass aus fahrdynamischen Gründen der vom Fahrzeug befahrene Kurvenradius in Abhängigkeit der Geschwindigkeit nicht dem tatsächlichen Kurvenradius entspricht, wird vernachlässigt. Damit sind die Position und die Ausrichtung des Verkehrsobjektes im Bezug zum eigenen Fahrzeug genau definiert. Da zur Ermittlung des Sicherheitsbereiches s die Eckpunkte eines Fahrzeuges relevant sind, wird näherungsweise vom aktuellen Kurvenradius eine halbe Fahrzeugbreite abgezogen und damit eine Kreisbahn durch die Fahrzeugaußenseite gelegt (siehe Abbildung 68). Dadurch kann im Weiteren erheblicher Rechenaufwand gespart werden.

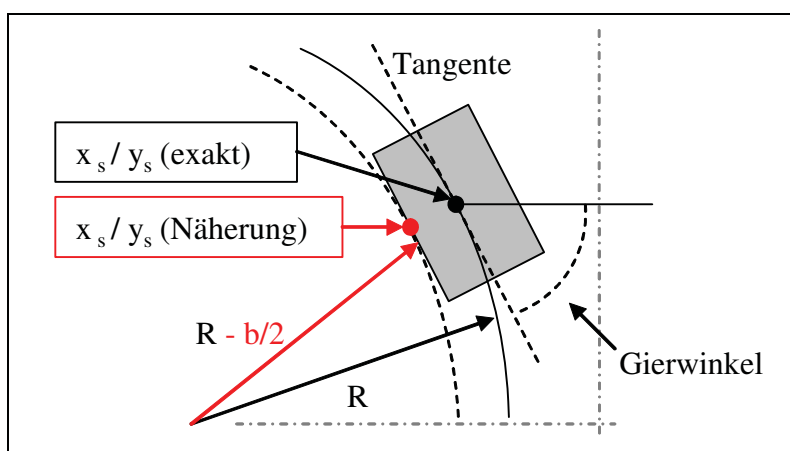


Abbildung 68 Näherung durch Verschiebung des Kreisbogens um die halbe Fahrzeugbreite b

Der Sicherheitsbereich in der Kurve wird durch zwei Vektoren P_1 und P_2 aufgespannt, die vom eigenen Scheinwerfer zu den horizontal äußersten Fahrzeugecken des anderen Fahrzeuges zeigen. Der Winkel zwischen diesen beiden Vektoren berechnet sich über

$$s_{\text{Kurve}} = \arccos \left(\frac{\vec{P}_1 \cdot \vec{P}_2}{|\vec{P}_1| \cdot |\vec{P}_2|} \right) \text{ mit } P_1 = \begin{pmatrix} x_{p1} \\ y_{p1} \end{pmatrix} \text{ und } P_2 = \begin{pmatrix} x_{p2} \\ y_{p2} \end{pmatrix}$$

Es ergibt sich:

$$s_{\text{Kurve}} = \arccos \left(\frac{x_{p1} \cdot x_{p2} + y_{p1} \cdot y_{p2}}{\sqrt{x_{p1}^2 + y_{p1}^2} \cdot \sqrt{x_{p2}^2 + y_{p2}^2}} \right)$$

mit $x_{p1} = x_s - \Delta x - x_{sw}$ und $x_{p2} = x_s + \Delta x - x_{sw}$ sowie $y_{p1} = y_s + \Delta y$ und $y_{p2} = y_s - \Delta y$. Der Straßenverlauf wird durch eine Kreisgleichung charakterisiert. Die entsprechende Ableitung für den Anstieg im Fahrzeugschwerpunkt bei x_s bzw. y_s ist:

$$y'_s = \frac{(R - x_s)}{\sqrt{(R - b)^2 - (R - x_s)^2}} = \frac{(R - x_s)}{\sqrt{-x_s^2 + 2R \cdot x_s + b \cdot (b - 2R)}}$$

Die Größen Δx und Δy , die die Abmaße vom Fahrzeugschwerpunkt zu den Fahrzeugecken beschreiben, werden zudem mit der halben Fahrzeuglänge l und -breite b wie folgt ersetzt:

$$\Delta x = \cos \left(\arctan \left(\frac{(R - x_s)}{\sqrt{(R - b)^2 - (R - x_s)^2}} \right) \right) \cdot l = \frac{l}{\sqrt{1 + \left(\frac{(R - x_s)}{\sqrt{(R - b)^2 - (R - x_s)^2}} \right)^2}}$$

$$\Delta y = \sqrt{l^2 - \Delta x^2}$$

Der Ausdruck Δx wird (ausgenommen von l) mit z substituiert, so dass $\Delta x = z \cdot l$ entsteht. Daraufhin gestaltet sich der Ausdruck zu:

$$\Delta y = \sqrt{l^2 - (z \cdot l)^2}$$

Eingesetzt ergibt sich:

$$s_{\text{Kurve}} = \arccos \left(\frac{(x_s - z \cdot l - x_{sw}) \cdot (x_s + z \cdot l - x_{sw}) + (y_s + \sqrt{l^2 - (z \cdot l)^2}) \cdot (y_s - \sqrt{l^2 - (z \cdot l)^2})}{\sqrt{(x_s - z \cdot l - x_{sw})^2 + (y_s + \sqrt{l^2 - (z \cdot l)^2})^2} \cdot \sqrt{(x_s + z \cdot l - x_{sw})^2 + (y_s - \sqrt{l^2 - (z \cdot l)^2})^2}} \right) \quad (7.4)$$

Berechnung des dynamischen Sicherheitsbereiches s

Es werden bei der Berechnung des dynamischen Sicherheitsbereiches s nur Fahrzeuge berücksichtigt, die sich innerhalb des Fernlichtbereiches befinden. Dessen Öffnungswinkel in der Horizontalen wird zu $\pm 20^\circ$ gewählt. Abbildung 69 zeigt die Sicherheitsbereiche in Linkskurven. Zu sehen sind Sicherheitsbereiche, die sich in Abhängigkeit der Entfernung in Y-Richtung zum anderen Verkehrsteilnehmer sowie dem Kurvenradius befinden.

Es wird wie im gesamten Kapitel die gesamte Fahrzeugseite mit einer durchschnittlichen Länge von 4,3 m berücksichtigt. Genau genommen müssen nur die Augen von anderen Fahrern entblendet werden. Das kann in Rechtskurven durch das zusätzliche Entblenden des Seitenfensters sichergestellt werden ($\sim 2,5$ m). Allerdings führt eine solche teilweise Entblendung zu Verunsicherungen bei Fahrern des blendfreien Fernlichtsystems. Die teilweise Entblendung ist für die Fahrer schwierig zu erkennen. Sie erhalten daher keine eindeutige visuelle Rückmeldung, ob das System richtig arbeitet. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass so eine Entblendung sämtlicher Insassen ermöglicht wird.

Ab einer gewissen Entfernung befindet sich das zu entblendende Objekt außerhalb des Fernlichtbereiches. Wenn die Objekte in den Fernlichtbereich eintreten bzw. diesen verlassen, beginnen bzw. enden die zugehörigen Kurven. Der Nulldurchgang ist ebenfalls zu erkennen.

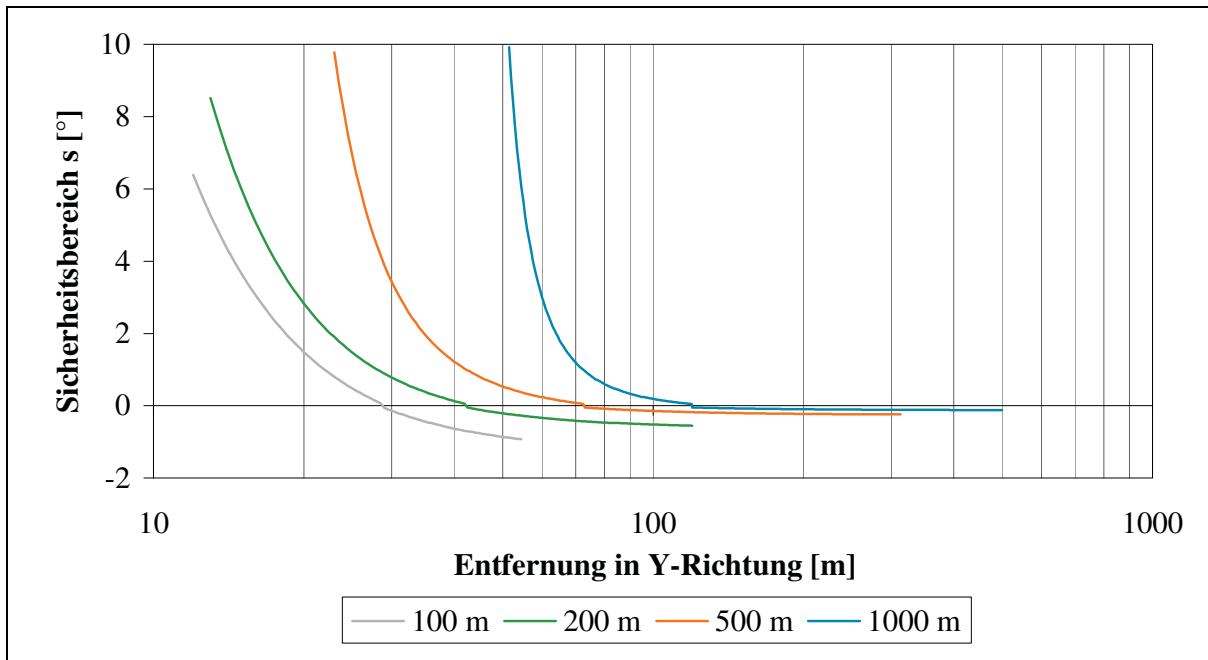


Abbildung 69 Sicherheitsbereich s in Linkskurven in Abhängigkeit des Kurvenradius und der Entfernung in Y-Richtung; Bei einem Radius von 50 m befinden sich andere Verkehrsteilnehmer außerhalb des Fernlichtbereiches. Das Maximum tritt bei einem Radius von 1000 m auf und beträgt $9,92^\circ$.

In diesem Punkt ist keine seitliche Blendung möglich. In geringen Entfernungen steigt die Größe des Sicherheitsbereiches drastisch an. Zu größeren Entfernungen hin wird der Sicherheitsbereich negativ. Zu kleineren Radien hin erhöht sich hier dessen Wert im Betrag. So ist für eine Kurve mit einem Radius von 1000 m ein maximaler Sicherheitsbereich von ca. $-0,1^\circ$ zu berücksichtigen. Bei einem Radius von 100 m wird hingegen der zehnfache Wert benötigt. Es ist zu beachten, dass negative Sicherheitsbereiche in Kombination mit dem begrenzten Fernlichtbereich und einer Linkskurve entfallen können.

Eine direkte Blendung durch Lichtsegmente, die links am rechten Scheinwerfer des Entgegenkommenden vorbeileuchten und den Fahrer treffen, ist bis auf Sonderfälle auszuschließen⁴². Im Gegensatz dazu muss ein positiver Sicherheitsbereich unbedingt berücksichtigt werden, um eine direkte Blendung zu vermeiden.

In Rechtskurven kommt es zu keinem Nulldurchgang und somit zu ausschließlich positiven Sicherheitsbereichen (siehe Abbildung 70). In nahezu jeder Entfernung besteht eine direkte Blendefahrer für Entgegenkommende. Ausnahmen sind große Radien in Verbindung mit einer großen Entfernung. Mit abnehmender Distanz nähern sich die Sicherheitsbereiche in Links- und Rechtskurven an. Grund ist, dass sich die Streckenprofile hin zu kürzeren Entfernungen mehr gleichen.

Der Sicherheitsbereich hin zu geringeren Entfernungen ist in dieser Abbildung auf zehn Grad begrenzt. In einer geringen Entfernung, wie hier von ca. zehn Meter, wird das Objekt bereits unter einem Winkel von über zwölf Grad angeleuchtet.

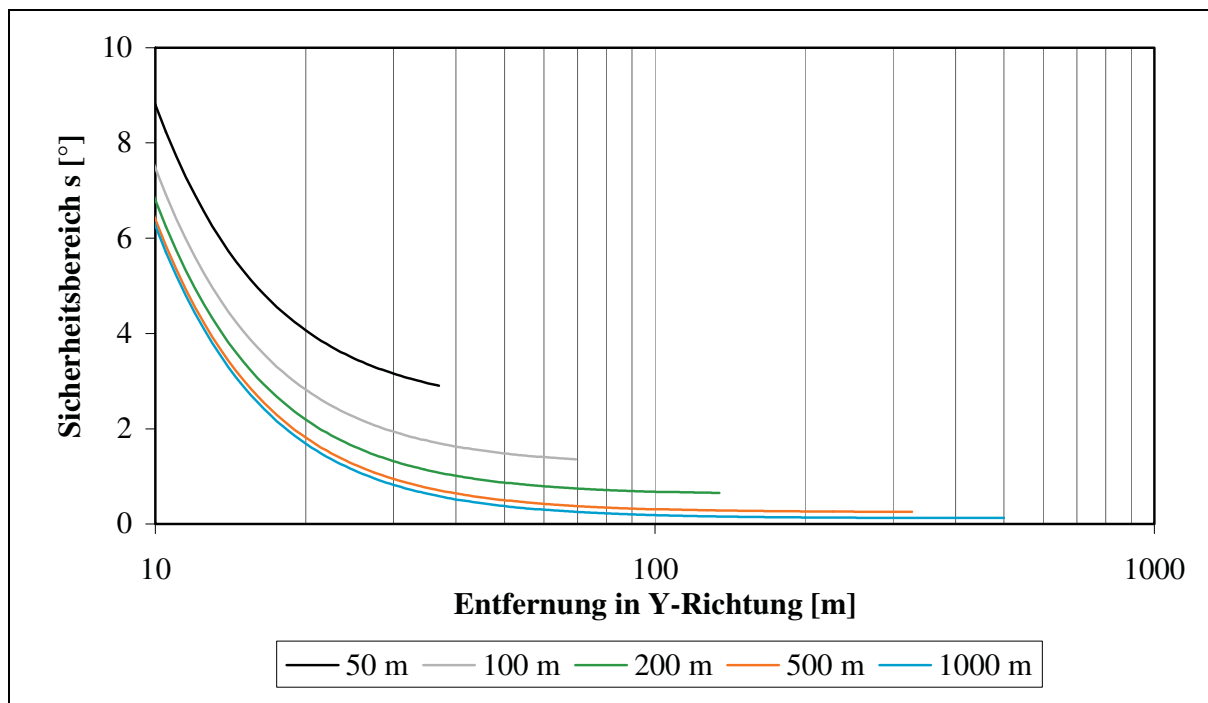


Abbildung 70 Sicherheitsbereich s in Rechtskurven in Abhängigkeit des Kurvenradius und der Entfernung

⁴² Dies trifft für Fahrzeuge zu, die dem Straßenverlauf folgen. Fahrzeuge, die orthogonal zur eigenen Fahrspur stehen (z.B. T-Kreuzung), werden angeleuchtet. In diesem Fall ist eine Anleuchtung auch sinnvoll, ansonsten könnte der Fahrer diese nicht erkennen. Er hat nach dem Erkennen die Aufgabe, manuell zu entblenden.

Das führt dazu, dass ein horizontaler Bereich von 12° bis 22° entblendet werden muss. Dieser Bereich erstreckt sich somit über den Blendbereich des Fernlichtes von 20° . Sicherheitsbereiche größer als 10° bieten unter diesen Bedingungen keinen Vorteil und werden daher nicht dargestellt.

Variationen der Eingangsparameter haben gezeigt, dass die Fahrzeuglänge den größten Einfluss auf den Sicherheitsbereich besitzt. Die Fahrbahn- und die Fahrzeugbreite weisen nur einen geringen Einfluss auf.

Latenzzeitbedingte Sicherheitsbereiche

Die Latenzzeit beschreibt die Verarbeitungsdauer des Gesamtsystems. Explizit ist damit die Zeitspanne gemeint, die das Gesamtsystem nach Darbietung einer Lichtquelle benötigt, um die entsprechenden LEDs auszuschalten. Das System befindet sich für die Dauer der Latenzzeit gewissermaßen im Blindflug und besitzt keine Kenntnis über die Positionsänderung anderer Verkehrsteilnehmer. Um eine Entblendung der Verkehrsteilnehmer in ihren inzwischen eingenommenen Positionen sicherstellen zu können, müssen die Lichtsegmente prädiktiv angesteuert werden. In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie diese Positionsänderungen innerhalb der Latenzzeit für verschiedene Kurvenradien und Geschwindigkeiten quantifiziert werden können.

Die Positionsänderung wird dabei durch die Differenz der horizontalen Winkelkoordinaten der aktuellen und der nächsten Position beschrieben. Es wird dabei vereinfachend angenommen, dass sich die Fahrzeuge auf einer idealen Kreisbahn bewegen. Zudem wird die Positionsänderung des Fahrzeugmittelpunktes betrachtet. An dieser Stelle werden die Kurvenverläufe mit Hilfe einer Parameterdarstellung beschrieben, wobei $x_0 = \pm R$ und $y_0 = 0$ (siehe Formel 7.5 und 7.6).

$$x = x_0 + R \cdot \cos(\varphi) \quad (7.5)$$

$$y = y_0 + R \cdot \sin(\varphi) \quad (7.6)$$

Die Positionsänderung berechnet sich schließlich über die Winkelgeschwindigkeit und über die Latenzzeit (siehe Formel 7.7 und 7.8). Die Differenzgeschwindigkeit beziffert die doppelte Geschwindigkeit eines einzelnen Fahrzeuges.

$$\omega = \frac{v_{\text{Differenz}}}{R} = \frac{\varphi}{t_{\text{Latenzzeit}}} \quad (7.7)$$

$$\varphi = \frac{v_{\text{Differenz}}}{R} \cdot t_{\text{Latenzzeit}} \quad (7.8)$$

Die neue Position des Fahrzeugschwerpunktes kann somit über die Differenzgeschwindigkeit, den Kurvenradius und die Latenzzeit bestimmt werden (siehe Formel 7.9 und 7.10). Der Winkel α beschreibt die Position des anderen Verkehrsobjektes aus Sicht des eigenen Fahrzeuges. Der Sicherheitsbereich s berechnet sich schließlich aus der Differenz der neuen und der alten Winkelposition nach Formel 7.11.

$$x_{s,neu} = \pm R + R \cdot \cos\left(\frac{v_{Differenz}}{R} \cdot t_{Latenzzeit}\right) \quad (7.9)$$

$$y_{s,neu} = R \cdot \sin\left(\frac{v_{Differenz}}{R} \cdot t_{Latenzzeit}\right) \quad (7.10)$$

$$s_{Latenzzeit} = \alpha_{neu} - \alpha_{alt} = \arctan\left(\frac{x_{s,neu}}{y_{s,neu}}\right) - \alpha_{alt} \quad (7.11)$$

Berechnung der durch Latenzzeit bedingten Sicherheitsbereiche

Mit dem Nanolux-System aus Kapitel 5 kann im Fahrbetrieb nach erfolgreicher Plausibilisierung eine Latenzzeit von weniger als 100 ms gewährleistet werden (vgl. Latenzzeitmessung Gesamtsystem auf Seite 51). Für den hier zu untersuchenden Fall eines sich annähernden Fahrzeuges darf daher von einer Latenzzeit von 100 ms ausgegangen werden. Der latenzzeitbedingte Sicherheitsbereich ist zudem abhängig vom Kurvenradius und von der Geschwindigkeit. Um die daraus entstehenden Parameterkombinationen auf vernünftige Paarungen zu reduzieren, wird die Richtlinie zur Anlage von Straßen herangezogen [RAS-L]. Im Teil L Linienführung werden Mindeststradien in Abhängigkeit von der sogenannten Entwurfsgeschwindigkeit vorgeschrieben (siehe Tabelle 16). Soll z.B. eine Kurve mit 50 km/h befahren werden können, so muss ihr Radius mindestens 80 m betragen. Anhand dieser Angaben werden im Umkehrschluss die maximal zulässigen Differenzgeschwindigkeiten für die bereits oben betrachteten Kurvenradien abgeleitet.

Abbildung 71 zeigt die Sicherheitsbereiche, die unter verschiedenen Kurvenradien- und Differenzgeschwindigkeits-Paarungen entstehen. An dieser Stelle werden nur Rechtskurven betrachtet, da hier durchgängig eine direkte Blendungsgefahr besteht. Ausschließlich zum Vergleich ist zusätzlich ein Kurvenradius von 1000 m in Verbindung mit einer Differenzgeschwindigkeit von 500 km/h eingezeichnet.

Tabelle 16 Mindeststradien r nach den Richtlinien zur Anlage von Straßen [RAS-L] in Abhängigkeit der Entwurfsgeschwindigkeiten E

E [km/h]	50	60	70	80	90	100	120
r [m]	80	120	180	250	340	450	720

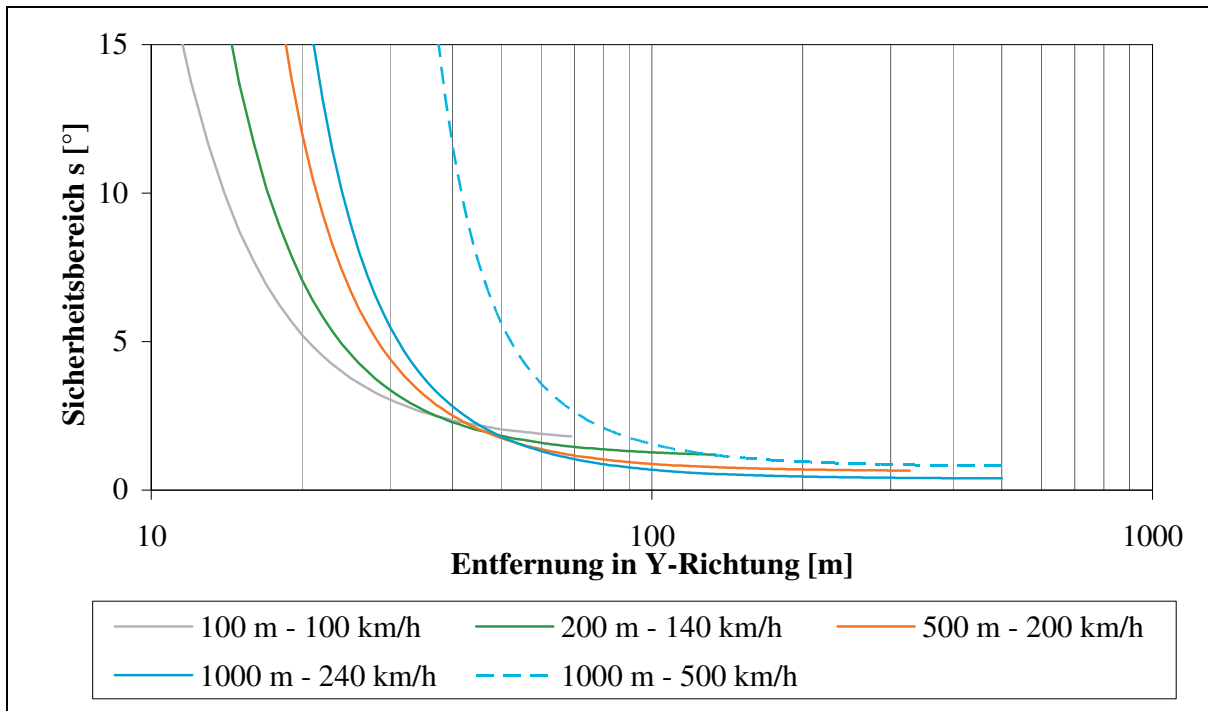


Abbildung 71 Latenzzeitbedingte Sicherheitsbereiche in einer Rechtskurve bei einer Latenzzeit von $t = 0,1s$

Zu geringen Entfernungen hin wächst auch hier der Sicherheitsbereich deutlich an. Der Sicherheitsbereich ist deshalb in dieser Abbildung auf 10° begrenzt. In Kombination mit dem Erfassungswinkel eines Objektes erstreckt sich der Entblendungsbereich in Entfernungen unterhalb von 40 Metern bereits über die Grenzen des Fernlichtbereiches. In größerer Entfernung wird bei einem Radius von 1000 m und einer realistischen Differenzgeschwindigkeit von 240 km/h ein minimaler Wert von ca. $0,2^\circ$ erreicht.

Im Allgemeinen zeigt sich, dass mit steigendem Radius bei konstanter Geschwindigkeit sich der Sicherheitsbereich verringert. Die Latenzzeit und die Differenzgeschwindigkeit haben den größten Einfluss auf den Sicherheitsbereich. Eine Verdoppelung dieser Eingangsgrößen führt in großen Entfernungen näherungsweise zu einer Verdoppelung des Sicherheitsbereiches. In geringen Distanzen wirken sich die Änderungen umso mehr aus.

7.3.4 Zusammenfassung der Sicherheitsbereiche

Es wird den statischen Sicherheitsbereichen in Form einer künstlichen Vergrößerung der Kamerasegmente Rechnung getragen. Dies führt zu deutlichen Verlusten in dem Nutzungsgrad. Dabei hält sich die Auswirkung bis hin zu einer künstlichen Vergrößerung von einem Grad mit einem Verlust von 6,7 % in Grenzen. Im Gegensatz dazu resultiert eine Verdoppelung der künstlichen Vergrößerung auf zwei Grad in einem vierfachen Nutzungsgradverlust.

Die Untersuchung der dynamischen Sicherheitsbereiche zeigt, dass Rechtskurven als kritischer anzusehen sind als Linkskurven. Hier besteht durchgängig eine direkte Blendefahr für den entgegenkommenden Fahrer.

Die Untersuchung des Parallaxenfehlers liefert die Erkenntnis, dass die Nutzungsgradverluste mit bereits wenigen und grob gefassten Entfernungsklassen erheblich verringert werden können. So beträgt der Nutzungsgrad mit vier Entfernungsklassen gerade einmal 0,8 % weniger als im Idealfall und ca. 5 % mehr als im Fall ohne Entfernungsangaben.

Der Einfluss durch die Straßengeometrie bzw. die Schrägstellung anderer Fahrzeuge wirkt sich wie die Latenzzeit besonders hin zu geringen Entfernungen stärker aus. Die notwendigen Sicherheitsbereiche nehmen schnell Werte an, die in Kombination mit der Winkelposition des Objektes außerhalb des Fernlichtbereiches liegen. Das führt dazu, dass der gesamte Bereich des Fernlichtes ab der Position des Objektes bis hin zur entsprechenden Außenseite des Fernlichtes ausgeschaltet werden muss. Für die Fernlichtsegmentierung lässt sich daraus ableiten, dass Lichtsegmente im Außenbereich durchaus deutlich größer ausfallen dürfen als mittlere Lichtsegmente. Unter Berücksichtigung der dynamischen Sicherheitsbereiche bieten Unterteilungen im Außenbereich keinen Mehrnutzen.

7.4 Blendfreie Fernlichtsysteme im Vergleich

In diesem Abschnitt werden zunächst blendfreie Fernlichtsysteme miteinander verglichen. Dabei soll erarbeitet werden, inwiefern sich eine Änderung der Verkehrsbedingungen auf den Nutzungsgrad auswirkt. Anschließend wird das Bewertungsverfahren kritisch betrachtet und diskutiert, welche Bedeutung diesem und somit auch der Aussagekraft zu Nutzungsgraden von blendfreien Fernlichtsystemen zugeordnet werden darf. Es werden dabei folgende Fernlichtsysteme betrachtet:

- Fernlichtassistent (FLA),
- gleitende Leuchtweite (GLW),
- maskiertes Dauerfernlicht (MDF),
- Matrix-Beam und
- Pixellicht.

Die Systeme und deren Funktionsweise werden ab Seite 20 ausführlich beschrieben. Das Pixellicht stellt mit seiner individuellen Ausleuchtung den bestmöglichen Fall dar.

7.4.1 Vergleich auf Basis der Referenzstrecke

Dieser Vergleich wird auf Basis der ersten 50 km der Referenzstrecke bei mittlerer Verkehrsdichte durchgeführt (siehe Abbildung 42 auf Seite 65). Die Ergebnisse sind somit mit denen aus 7.2 Methoden zur Segmentierung einer Fernlichtverteilung direkt vergleichbar.

Erwartungsgemäß schneiden der Fernlichtassistent und die gleitende Leuchtweite am schlechtesten ab (siehe Tabelle 17). Das Pixellicht erreicht den maximal möglichen Nutzungsgrad von 99,23 %. Im Gegensatz zu Matrix-Beam entstehen beim maskierten Dauerfernlicht keine Lücken zwischen Lichtsegment und entblendetem Objekt. Der Nachteil bei MDF ist, dass nur mit dem verbleibenden Lichtstrom eines Scheinwerfers links bzw. rechts an einem Objekt vorbeigeleuchtet wird. Mit Matrix-Beam werden daher höhere Nutzungsgrade erzielt.

Tabelle 17 Schätzung des Nutzungsgrades blendfreier Fernlichtsysteme; Ermittlung durch Simulation der ersten 50 km der Referenzstrecke bei mittlerer Verkehrsdichte; Achtung: Es handelt sich dabei um das Ergebnis auf Basis einer einzigen Strecke. In Tabelle 18 sind Durchschnittswerte auf Basis mehrerer Strecken zu finden (Segmentierung Matrix-Beam siehe Abbildung 64).

System	FLA	GLW	Matrix-B.	MDF	Pixellicht
Nutzungsgrad η [%]	83,75	89,92	94,86	93,31	99,23

7.4.2 Vergleich auf Basis unterschiedlicher Verkehrsdichten

Abbildung 72 zeigt den Einfluss unterschiedlicher Verkehrsdichten auf den jeweiligen Nutzungsgrad. Die Rangreihenfolge der einzelnen Systeme bleibt bei jeder Verkehrsdichte bestehen. Die Unterschiede der Funktionsweise und so der Wirksamkeit machen sich bei hohen Verkehrsdichten stärker bemerkbar. Hin zu niedrigeren Verkehrsdichten wird der Unterschied geringer. Das liegt an dem wachsenden Anteil der Fahrten mit vollem Fernlicht. Insofern werden weniger Situationen betrachtet, in denen das Fernlicht adaptiv angesteuert wird. Hervorzuheben ist, dass das Pixellicht mit seiner hohen Auflösung von 400 mal 56 Pixel zum einen die höchsten Nutzungsgrade erreicht und zudem am wenigsten abhängig von der Verkehrsdichte ist.

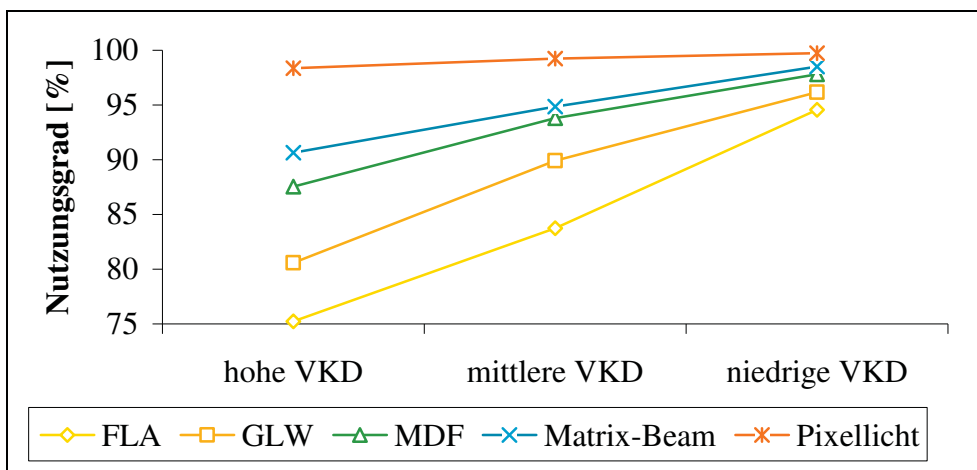


Abbildung 72 Einfluss der Verkehrsdichte auf den Nutzungsgrad von Fernlichtsystemen; Ermittlung durch Simulation der ersten 50 km der Referenzstrecke; Kfz/h: 23, 242 und 479 (Segmentierung Matrix-Beam siehe Abbildung 64)

7.4.3 Vergleich auf Basis unterschiedlicher Streckenprofile

An dieser Stelle wird nun betrachtet, inwiefern die Ergebnisse auf dieser Teilstrecke repräsentativ für andere Streckenprofile sind. Dazu werden mit Hilfe der Verkehrsraummodellierung aus Kapitel 6 sieben weitere Strecken unter den gleichen statistischen Randbedingungen wie die Referenzstrecke generiert. Der einzige Unterschied besteht darin, dass die neuen Strecken nur 50 km lang sind. In Abbildung 73 sind die Nutzungsgrade auf diesen sieben Strecken zu sehen. Zusätzlich sind die Ergebnisse bei Befahren der gesamten Referenzstrecke von 100 km dargestellt.

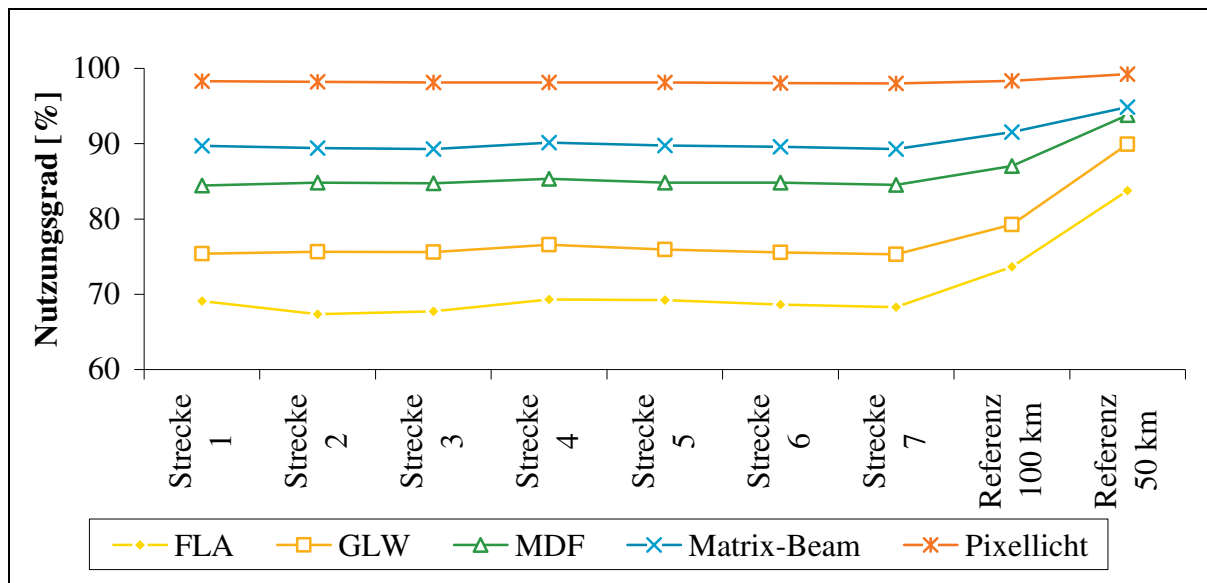


Abbildung 73 Nutzungsgrad auf unterschiedlichen Strecken; Ermittlung durch Simulation je bei mittlerer Verkehrsdichte; Streckenlänge der Strecken eins bis sieben je 50 km (Segmentierung Matrix-Beam siehe Abbildung 64)

Bei Verwendung des Fernlichtassistenten und der gleitende Leuchtweite unterscheiden sich die Ergebnisse der teilweise befahrenen Referenzstrecke deutlich mit bis zu 15 % höheren Werten von anderen Strecken. Bei Matrix-Beam, maskiertem Dauerfernlicht und Pixellicht fällt der Unterschied aufgrund der bereits höheren Nutzungsgrade geringer aus. Die Strecken eins bis sieben erzielen ähnliche Nutzungsgrade. Das ausschließliche Befahren der ersten 50 km der Referenzstrecke führt im Vergleich zum Befahren der Gesamtstrecke zu besseren Nutzungsgraden.

7.4.4 Kritische Betrachtung des Bewertungsverfahrens

An dieser Stelle wird das verwendete Bewertungsverfahren kritisch betrachtet. Dies beinhaltet sowohl eine Betrachtung der Konsistenz der Ergebnisse als auch eine Diskussion des Lichtstromes als Basis zur Gewichtung des Nutzungsgrades.

Konsistenz der Ergebnisse

In Abbildung 73 ist zu sehen, dass sich die Nutzungsgrade der teilweise und gesamt befahrenen Referenzstrecke unterscheiden. Ursache dafür ist, dass die Verkehrsdichte in der ersten Hälfte der Referenzstrecke geringer ist als im restlichen Streckenverlauf. Somit existieren anfangs mehr Situationen, in denen mit vollem Fernlicht gefahren werden kann.

Die zufällige Verteilung der Verkehrsteilnehmer auf einer Strecke geschieht unter Berücksichtigung der gewünschten Verkehrsdichte. Die Verkehrsteilnehmer werden dabei über die gesamte Strecke verteilt. Statistisch gesehen führt daher diese zufällige und somit auch sinnvolle Verteilung der Verkehrsteilnehmer erst nach Befahren der gesamten Strecke zu der gewünschten Verkehrsdichte, was sich in geringen Nutzungsgraden am Ende der Gesamtstrecke ausdrückt. Abbildung 74 zeigt die Nutzungsgrade, die Matrix-Beam nach verschiedenen Weglängen auf der Referenzstrecke erzielt.

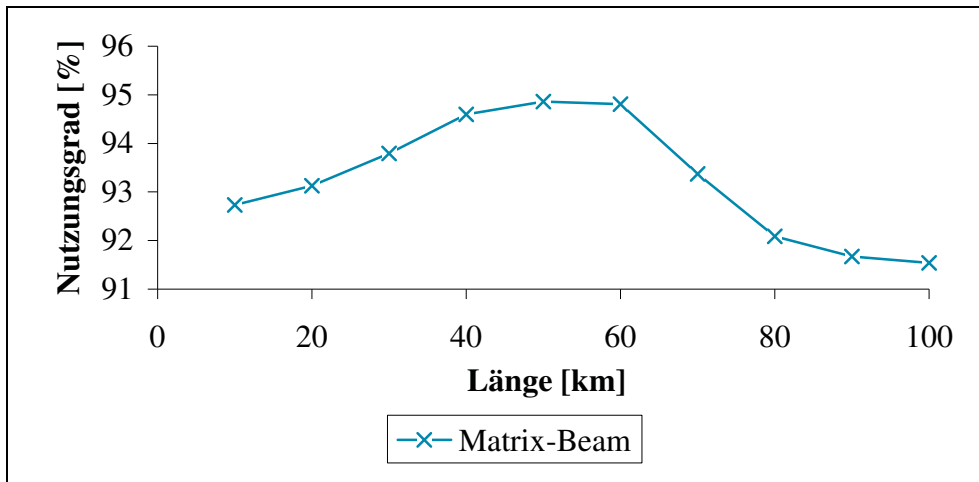


Abbildung 74 Einfluss der anteiligen Streckenlänge auf den Nutzungsgrad; Ermittlung durch Simulation bei mittlerer Verkehrsdichte; Standardabweichung: 1,26 %, Mittelwert: 93,26 %; Absolutwert nach 50 km: 94,86 %, nach 100 km: 91,54 % (Segmentierung Matrix-Beam siehe Abbildung 64)

Nach einer Weglänge von 50 km wird ein Maximum erreicht, danach verringern sich die Werte. Ersichtlich ist, dass auf der zweiten Hälfte der Referenzstrecke eine höhere Verkehrsdichte vorherrschen muss, die zu einer Wertbereinigung der Nutzungsgrade führt. Der Unterschied zwischen der gesamten befahrenen Referenzstrecke und der Strecken eins bis sieben kann dadurch nicht erklärt werden. Diese Abweichung ist vermutlich auf einen größeren Anteil von Kolonnen auf der 100 km langen Referenzstrecke zurückzuführen. Somit wird der Verkehr kompakter dargestellt und führt somit ebenfalls zu mehr Situationen, in denen mit vollem Fernlicht gefahren werden kann.

Insgesamt weisen die Ergebnisse eine hohe Abhängigkeit von der Verkehrsdichte auf. Bewertungen, die auf Basis der teilweise befahrenen Referenzstrecke basieren, ergeben zu hohe Werte. Dennoch sind diese Werte untereinander uneingeschränkt vergleichbar. Im Vergleich zu der Arbeit von Roslak sind die Nutzungsgrade hier deutlich höher. Ursache ist, dass Roslak nur den Fall einer Geraden untersuchte, bei dem stets andere Verkehrsteilnehmer vorhanden waren. Die Verkehrsdichte ist bei ihm somit höher, was erklärt, warum dessen Nutzungsgrade deutlich niedriger ausfallen (vgl. Tabelle 10).

Fragliche Gewichtung per Lichtstrom

Durch die Gewichtung per Lichtstrom steigt besonders der Einfluss der mittleren Bereiche der Lichtverteilung (siehe Abbildung 55 auf Seite 80). Die Überlegungen am Anfang der Arbeit waren, dass gerade diese Bereiche von einer großen Wichtigkeit zeugen und somit stärker gewichtet werden sollen. Allerdings wird nicht nur auf der eigenen Fahrspur, sondern auch am rechten Straßenrand mehr Licht benötigt. Gerade hier befinden sich kritische Objekte wie Fußgänger, unbeleuchtete Radfahrer oder herannahendes Wild. Diese müssen rechtzeitig erkannt werden, um Unfälle zu vermeiden. Der Straßenverlauf ist hingegen aufgrund der guten baulichen Infrastruktur mittels Leitpfosten und Straßenmarkierungen bereits mit Abblendlicht ausreichend sichtbar, um auch bei Gegenverkehr die Spur halten zu können.

Daher stellt sich die Frage, inwiefern diese lichtstrombasierte Gewichtung die Wichtigkeit der einzelnen Bereiche tatsächlich widerspiegelt. Allerdings ist dem entgegenzuhalten, dass der Lichtstrom neben der Lichtsegmentgröße die einzige physikalisch greifbare Größe ist, um eine Gewichtung vorzunehmen. Darüber hinaus ist die Gewichtung per Lichtstrom realitätsgetreuer als die Gewichtung über die Lichtsegmentgröße, was zudem die Verwendung des Lichtstromes rechtfertigt.

7.4.5 Abschließende Bewertung blendfreier Fernlichtsysteme

Die Nutzungsgrade der einzelnen adaptiven Fernlichtsysteme werden auf Basis der ersten 50 km der Referenzstrecke miteinander verglichen (siehe Tabelle 17). Die Ergebnisse weisen aufgrund der niedrigeren Verkehrsdichten hier zu hohe Werte auf. Um Werte mit einer größeren Aussagekraft zu erhalten, werden die Mittelwerte aus den Strecken eins bis sieben und der gesamten befahrenen Referenzstrecke gebildet. Da bei diesen Simulationen jeweils die gesamte Strecke befahren wird, führt das statistisch gesehen auf jeder Strecke zu der gewünschten mittleren Verkehrsdichte.

Tabelle 18 zeigt die durchschnittlichen Nutzungsgrade, die als abschließende Bewertung der adaptiven Fernlichtsysteme auf Basis des hier definierten Nutzungsgrades zu sehen sind. Dabei werden die grundsätzlichen Erkenntnisse aus dem Vergleich auf Basis der Referenzstrecke bestätigt. Erwartungsgemäß fallen die Nutzungsgrade kleiner aus und die Rangreihenfolge bleibt wie auch bei den anderen Untersuchungen unverändert. Demnach wird mit dem Pixellicht stets der höchste Nutzungsgrad erzielt. Die vorgeschlagene Segmentierung aus Abbildung 62 erreicht so einen mittleren Nutzungsgrad von 91,38 % und nimmt den zweiten Rang ein. Dieser folgen das maskierte Dauerfernlicht und die gleitende Leuchtweite. Der Fernlichtassistent, bei dem lediglich die Funktion des Fernlichthebels automatisiert ist, belegt den letzten Rang. Die Rangreihenfolge gestaltet sich im Überblick folgendermaßen:

1. Pixellicht
2. Matrix-Beam
3. maskiertes Dauerfernlicht
4. gleitende Leuchtweite
5. Fernlichtassistent

Tabelle 18 Durchschnittliche Nutzungsgrade blendfreier Fernlichtsysteme auf unterschiedlichen Strecken; Ermittlung durch Simulation bei einer mittleren Verkehrsdichte von 242 Kfz/h; Strecken 1 bis 7 und Referenzstrecke unter Berücksichtigung der Gesamtlänge von 100 km (Segmentierung Matrix-Beam siehe Abbildung 64 bzw. des Vorschlages Abbildung 62)

System	FLA	GLW	Matrix-B. (Abb. 64)	Matrix-B. (Vorschlag)	MDF	Pixel- licht
Nutzungsgrad η [%]	69,16	76,15	89,8	91,38	85,07	98,17
Standardabw. [%]	1,95	1,32	0,74	0,63	0,84	0,11

8 Psychophysiologische Untersuchungen

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Ergebnisse von subjektiven und objektiven Untersuchungen mit Probanden dargestellt. Dabei werden die Blendwirkung von LED-Scheinwerfern und die daraus resultierenden Abblenddistanzen für ein blendfreies LED-Fernlicht behandelt. In einem weiteren Fahrversuch werden die Erkennbarkeitsentfernungen von konventionellen Scheinwerfersystemen und blendfreien Fernlichtsystemen ermittelt.

8.1 Abblendentfernungen mit LED und Xenon

Das Ziel des Versuches ist die Bestimmung von Entfernungen, bei denen entgegenkommende Fahrer abblenden sollen. Fraglich ist, inwiefern die höhere Farbtemperatur von LEDs zu größeren Abblendentfernungen führt. Die Tests werden daher mit einem vergleichbaren Xenon- und LED-Scheinwerferpaar durchgeführt.

Die Motivation für diesen Versuch basiert auf der Tatsache, dass Matrix-Beam im Gegensatz zu den anderen blendfreien Fernlichtsystemen auf einen LED-Scheinwerfer zurückgreift. Eine höhere Abblendentfernung durch die LEDs würde in einer größeren Detektionsentfernung der Sensorik resultieren.

Die Versuchsfahrten fanden auf einer ca. ein Kilometer langen Gerade auf dem Prüfgelände der AUDI AG im Dezember 2007 und Januar 2008, je zwischen 18 Uhr und 20 Uhr, statt. Die Fahrten wurden ausschließlich bei guter Sicht und allerhöchstens auf feuchter, aber nie auf nasser Fahrbahn durchgeführt.

Insgesamt unterstützten 33 Probanden die Untersuchung. Der Großteil davon waren lichttechnische Laien. Eine Messreihe wurde durch aufsteigenden Nebel beeinflusst und musste somit weitgehend verworfen werden. Im Nachfolgenden werden daher die Messreihen von 27 Probanden betrachtet. Darunter befinden sich 8 weibliche und 19 männliche Versuchspersonen im Alter zwischen 21 und 50 Jahren.

Bisherige Untersuchungen

Hohm ermittelte Abblendentfernungen von Halogen- und Xenonscheinwerfer [Hohm05] für entgegenkommende und vorausfahrende Fahrzeuge. Er verwendet Scheinwerferpaare mit einer Lichtstärke von ca. 82.500 cd pro Scheinwerfer. Ein psychologischer Blendwert unterhalb von $W = 4$ nach De Boer wird hier als Abblendkriterium herangezogen [deBo71]. Für das Auffahren mit einem Halogenscheinwerfer genügt eine Abblenddistanz von ca. 100 m. Bei Gegenverkehr muss mit Xenon-Systemen in einer Entfernung von 485 m abgeblendet werden, um eine störende Blendung zu vermeiden. Bei Halogenscheinwerfern liegt dieser Wert deutlich unterhalb bei ca. 370 m. Die Werte beziehen sich jeweils auf das 95 %-Quantil, mit dem 95 % aller Ereignisse berücksichtigt werden.

8.1.1 Versuchsbeschreibung

Die Probanden fahren mit Abblendlicht auf einer ca. ein Kilometer langen Gerade auf eine feststehende Blendquelle zu. Die Probanden haben die Aufgabe, in zwei verschiedenen Entfernungen einen Taster zu betätigen. Die Beschreibung gegenüber den Probanden lautete:

- *Entfernung 1 ist der Moment, in dem Abblenden des Entgegenkommenden gewünscht wird.* Das bedeutet einen psychologischen Blendwert unterhalb von 5 nach De Boer. Oberhalb dieser Entfernung ist die Blendung erträglich.
- *Entfernung 2 ist der Moment, in dem die Lichthupe als Abblendaufforderung verwendet wird.* Die Blendung wird in dieser Entfernung als eindeutig störend empfunden. Der psychologische Blendwert beträgt somit $W = 3$.

8.1.2 Versuchsaufbau

Als Probandenfahrzeuge dienen drei Audi A4 (B8) mit identischen Halogenscheinwerfern. Als Blendquelle werden Bi-Xenon- und Voll-LED-Scheinwerfer des Audi R8 verwendet. Diese sind auf Halterungen entsprechend der Anbaulage im Fahrzeug montiert. Die Probanden sitzen auf dem Fahrer- und Beifahrersitz, der Versuchsleiter im Fond.

Messverfahren

Die gefahrene Entfernung wird über eine numerische Integration der Fahrzeuggeschwindigkeit über der Zeit ermittelt. Der Abstand zur Blendquelle berechnet sich aus der Differenz zwischen der Gesamtlänge von 1010 m und der gefahrenen Strecke. Die Tastersignale werden über die RS232-Schnittstelle am Messrechner eingelesen. In der Entwicklungsumgebung Vector CANoe wird das Geschwindigkeitssignal ausgelesen, das mit einer Aktualisierungsrate Δt von 50 ms vorliegt. Die Berechnung der gefahrenen Strecke bis zum Zeitpunkt des Tastendrucks $t_{Tastendruck}$ wird ebenfalls in Vector CANoe nach Formel 8.1 und 8.2 bestimmt.

$$i = \frac{t_{Tastendruck}}{\Delta t_{Aktualisierungsrate}} \quad (8.1)$$

$$S_{Fahrstrecke} = \sum_{i=0}^i v(t_i) \cdot \Delta t_{Aktualisierungsrate} \quad (8.2)$$

Ein direktes Einlesen des Tastersignals ist in Vector CANoe nicht möglich. Daher wird das Tastersignal mittels der Skriptsprache Python berücksichtigt. Bei Tastendruck schreibt Python einen Buchstaben. Dieser Buchstabe kann in der Entwicklungsumgebung ausgewertet werden. Aufgrund der Aktualisierungsrate des Geschwindigkeitssignals und der Einlesedauer des Tasters beträgt die absolute Messtoleranz weniger als $\pm 0,25$ m. Im Nachfolgenden werden Entfernungen von wenigen hundert Metern bis hin zu einem Kilometer bestimmt. Das führt zu einer Abweichung der Messwerte von 0,5 % bis 0,05 % und wird somit vernachlässigt.

8.1.3 Durchführung

Vorbereitungen

In einer vorläufigen Untersuchung wurde die Anzahl der Wiederholungsfahrten bestimmt. Dafür wurde mit zwei Probanden eine Messreihe von je zehn Fahrten durchgeführt. Bereits bei einer geringen Anzahl von Wiederholungen pendelt sich die Abblendentfernung ein. Durch sukzessives Abschneiden der ersten und der letzten Messwerte wird der Einfluss der wegfallenden Fahrten betrachtet. Die Anzahl wird auf fünf Fahrten festgelegt, wobei der erste Wert als Eingewöhnungsfahrt verworfen wird. Darüber hinaus scheint sich das Drückverhalten einer Versuchsperson als Fahrer und Beifahrer wenig zu unterscheiden. Daher wird jeder Proband fünfmal als Fahrer und fünfmal als Beifahrer auf beide Blendquellen zufahren. Daraus ergeben sich insgesamt 20 Messfahrten pro Proband.

Versuchsdurchführung

Die Probanden sind aufgrund der Anreise zum Prüfgelände bereits auf mesopische Bedingungen adaptiert. Dennoch werden die Probanden ca. 15 Minuten im Freien und vor den Probandenfahrzeugen mit eingeschaltetem Halogen-Abblendlicht begrüßt und eingewiesen. Die Blendlichtquelle in ca. 1 km Entfernung ist zu diesem Zeitpunkt bereits an.

Die Probanden werden angehalten mit einer Richtgeschwindigkeit von 80 km/h von einem definierten Startpunkt aus auf die Blendquelle zuzufahren. Um die Probanden nicht unnötig abzulenken, muss die Richtgeschwindigkeit nicht exakt gehalten werden. Bei zu starker Abweichung schreitet der jeweilige Versuchsleiter ein.

Die Entfernungen, in denen die Probanden den Taster drücken sollen, werden den Probanden greifbar beschrieben: Das erste Mal, wenn das Abblenden des Entgegenkommenden gewünscht wird; das zweite Mal, wenn die Blendung so störend ist, dass die Lichthupe als Aufforderung zum Abblenden verwendet werden würde.

Vor jeder einzelnen Messfahrt haben die Probanden die Aufgabe, auf den Schalthebel bei eingeschaltetem Innenlicht zu schauen, um den eingelegten Gang zu kontrollieren. Danach sollen sie nach vorne auf eine dunkelbraune Holzwand blicken, die in 15 m Entfernung von dem Abblendlicht teilweise beleuchtet wurde. Zum einen hat der Versuchsleiter so die Chance, die Messwerte zusätzlich zu notieren und zu sichern. Zum anderen dient es einer Referenzierung der Probanden vor jeder Fahrt.

Die Probandenfahrzeuge starten immer nacheinander. Es wird immer so lange gewartet, bis der Vorgänger seine Messung absolviert hat und außerhalb der Messstrecke mit ausgeschaltetem Licht parkt. So wird eine Irritierung durch das Licht der anderen Probandenfahrzeuge vermieden. Die Rückfahrt zum Startpunkt erfolgt gemeinsam.

Die Präsentationsreihenfolge der LED- und Xenon-Blendquelle wird an jedem Tag getauscht. Die Probanden werden nach der Einweisung gefragt, um welche Art von Lichtquelle es sich bei der Blendquelle handelt. Es ist bekannt, dass es entweder Xenon- oder LED-Scheinwerfer sein müssen. Eine Antwort darf einem Versuchsleiter nicht vor anderen Probanden genannt werden, um diese nicht zu beeinflussen.

Zur Eingewöhnung in den Testablauf wird zunächst eine offizielle Trainingsrunde absolviert. Der Test beginnt mit dem ersten der insgesamt vier Durchgänge mit je fünf Fahrten. Zu Beginn des zweiten Durchganges wechseln Fahrer und Beifahrer die Plätze. Danach wird kurz pausiert. In dieser Pause wird die Blendlichtquelle getauscht und die Probanden werden erneut nach der Art der Lichtquelle gefragt. Die beiden letzten Durchgänge werden entsprechend durchgeführt.

Blendbeleuchtungsstärke

Nach Abschluss des Tests wird an jedem Versuchsabend die Beleuchtungsstärke beider Scheinwerferpaare in verschiedenen Abständen dokumentiert. Der Messkopf des Beleuchtungsstärkemessgerätes⁴³ ist hierzu in Höhe der Kopflehne des Fahrers in Fahrtrichtung angebracht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 75 und in Abbildung 83 auf Seite 125 im Detail dargestellt. Nach einer Goniophotometermessung beträgt die Lichtstärke eines LED-Scheinwerfers alleine 81.000 cd. Die Lichtstärke eines einzigen Xenon-Scheinwerfers beläuft sich auf 75.000 cd.

8.1.4 Analyse der Messergebnisse

Stammdiagramme

In Abbildung 76 ist das Stammdiagramm der Entfernung 1 „Ablendwunsch“ dargestellt. Zu sehen sind die Mittelwerte der Fahrten zwei bis fünf pro Durchgang ohne Berücksichtigung der Messung bei Nebel. Manche Probanden nahmen ausschließlich als Fahrer bzw. als Beifahrer teil. Daher besitzen diese nicht für jeden Durchgang einen Messwert.

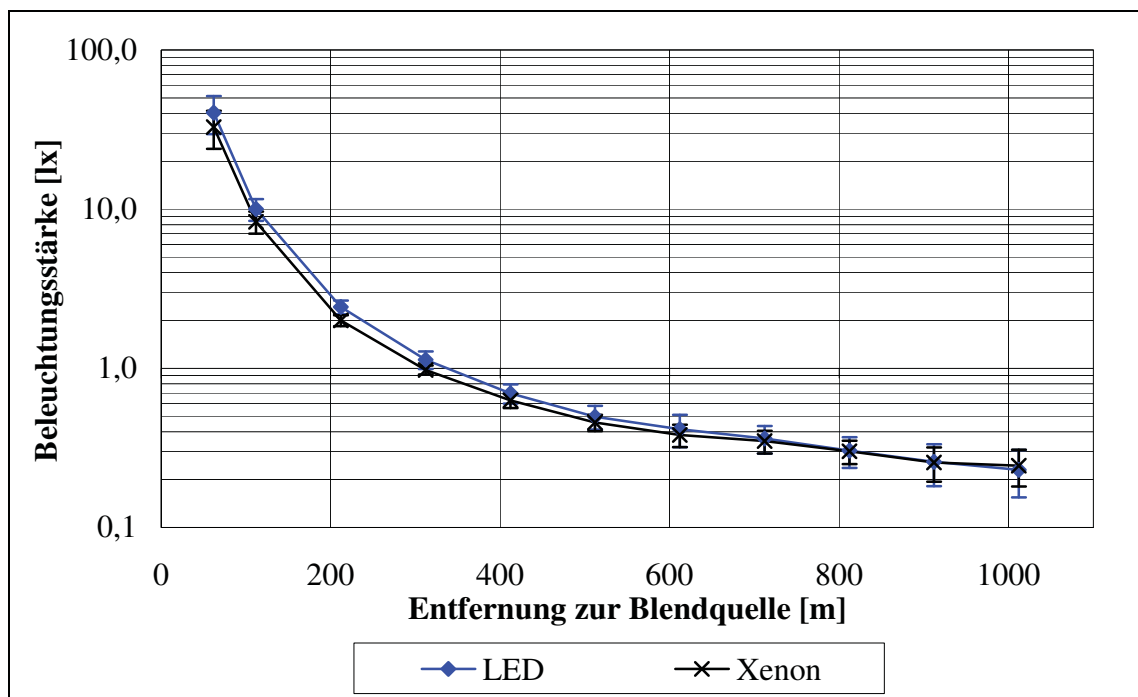


Abbildung 75 Blendbeleuchtungsstärke am Fahrerauge in verschiedenen Entfernungen

⁴³ Beleuchtungsstärkemessgerät LMT B360.

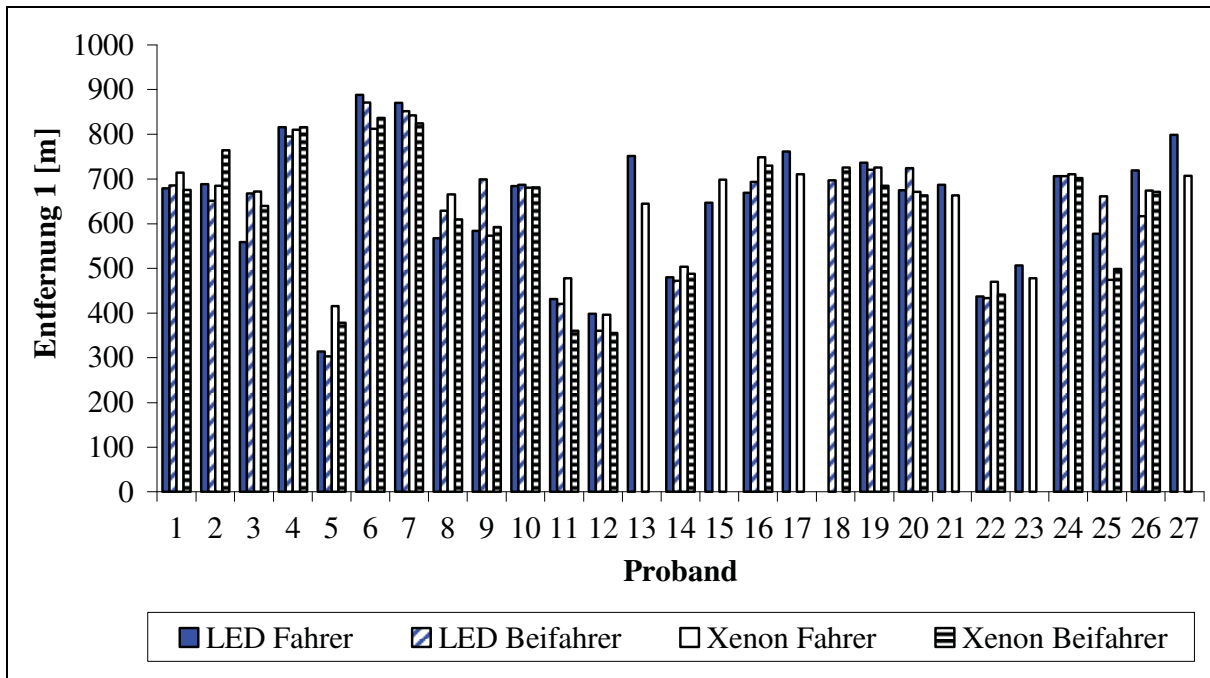


Abbildung 76 Stammdiagramm Entfernung 1 „Abblendwunsch“; Mittelwerte der Fahrten 2-5 pro Durchgang; Proband 13, 17 und 23 waren stets Fahrer, Proband 18 stets Beifahrer.

In Abbildung 77 sind die Ergebnisse für die Entfernung 2 dargestellt. Erstaunlicherweise fühlte sich Proband 11 nicht ausreichend geblendet und signalisierte diese Entfernung nicht. Im Weiteren werden die Messdaten kritisch betrachtet und unter anderem geklärt, inwiefern das Verwerfen der ersten Fahrt pro Durchgang die Güte der Messdaten erhöht.

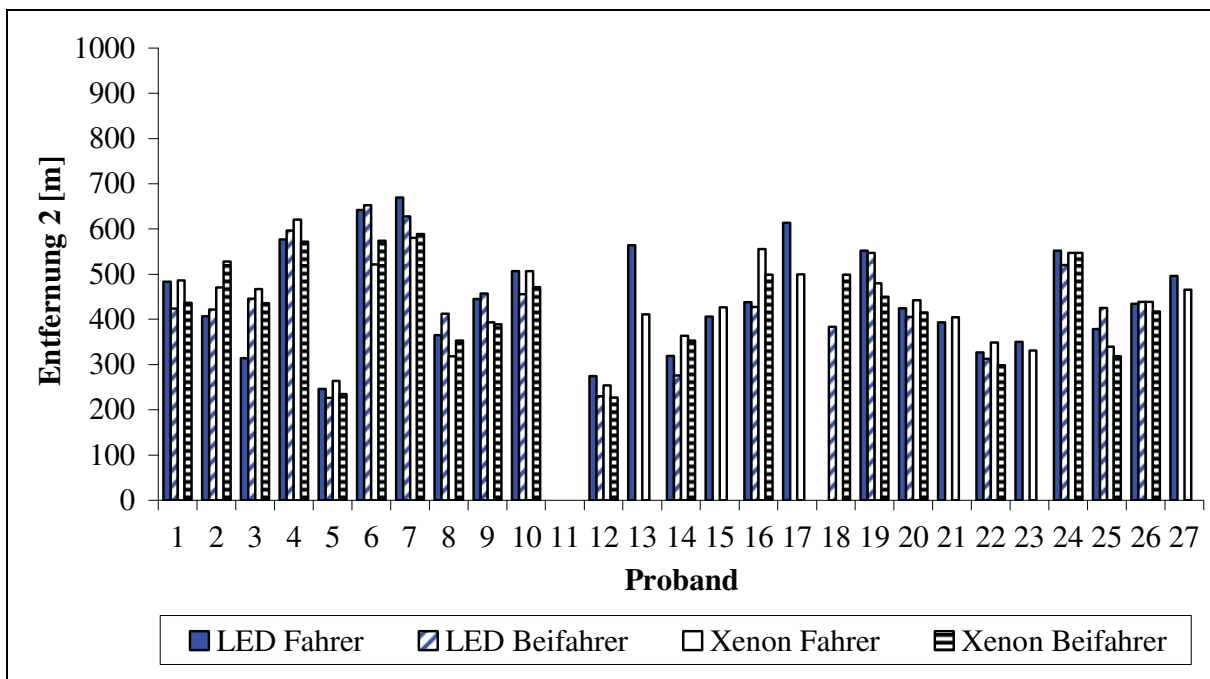


Abbildung 77 Stammdiagramm Entfernung 2 „Lichthupe“; Mittelwerte der Fahrten 2-5 pro Durchgang; Proband 11 signalisierte die zweite Entfernung nicht. Der Proband fühlte sich nicht ausreichend geblendet.

Bestätigung als Blindversuch

Die Probanden werden gefragt, von welcher Art Lichtquelle sie geblendet wurden. Aufgrund derselben Anbaulage der beiden Scheinwerferpaare und aufgrund der großen Distanz kann nicht erkannt werden, ob es sich um den LED- oder um den Xenon-Scheinwerfer handelt.

Tabelle 19 zeigt die Ergebnisse der Probandenbefragung. Es war für die Probanden nicht möglich, die Scheinwerfer richtig zu unterscheiden. Es kam sogar vor, dass Probanden bei der Präsentation der zweiten Blendquelle bewusst wiederholt auf dieselbe Lichtquellenart gesetzt haben. Selbst lichttechnisch erfahrene Probanden lagen falsch.

Der Weißabgleich der Probanden bezog sich auf das Halogen-Abblendlicht. Sie konnten nur feststellen, dass die blendende Lichtquelle eine höhere Farbtemperatur als das Halogenlicht besitzt. Sie konnten aber nicht den absoluten Unterschied in der Lichtfarbe bestimmen.

- *Ergebnis:* Mit diesen Befragungsergebnissen wird der Charakter eines Blindversuches bestätigt. Die Probanden wussten nicht, auf welche Blendquelle sie zuzufahren.

Tabelle 19 *Einschätzbarkeit von Lichtquellen*

	richtig	falsch
Zuerst Xenon	47 %	53 %
Zuerst LED	45 %	55 %

Verwerfung der ersten Fahrt pro Durchgang

Über den Variationskoeffizienten VK wird der Einfluss der jeweils ersten Fahrt eines jeden der vier Durchgänge quantifiziert. Der Variationskoeffizient beschreibt die relative Standardabweichung S bezogen auf den jeweiligen Mittelwert \bar{m} (siehe Formel 8.3).

$$VK = \frac{\bar{m}}{S} \quad (8.3)$$

Die in Abbildung 78 dargestellten Ergebnisse bestätigen die Vermutungen der Voruntersuchungen. Das Verwerfen der jeweils ersten Fahrt pro Durchgang führt durchweg zu einer Verringerung des Variationskoeffizienten und so zu einer höheren Güte der Messwerte. Die Variationskoeffizienten der Entfernung 2 sind grundsätzlich höher. Grund ist, dass der Mittelwert der Entfernung 2 deutlich geringer ist. Daher wirkt sich die Standardabweichung stärker aus, obwohl diese im Vergleich zur Entfernung 1 geringer ist (siehe Tabelle 22 weiter unten).

- *Ergebnis:* Durch die Verwerfung der jeweils ersten Fahrt pro Durchgang wird die relative Standardabweichung minimiert.
- *Weiteres Vorgehen:* Die jeweils erste Fahrt pro Durchgang wird verworfen.

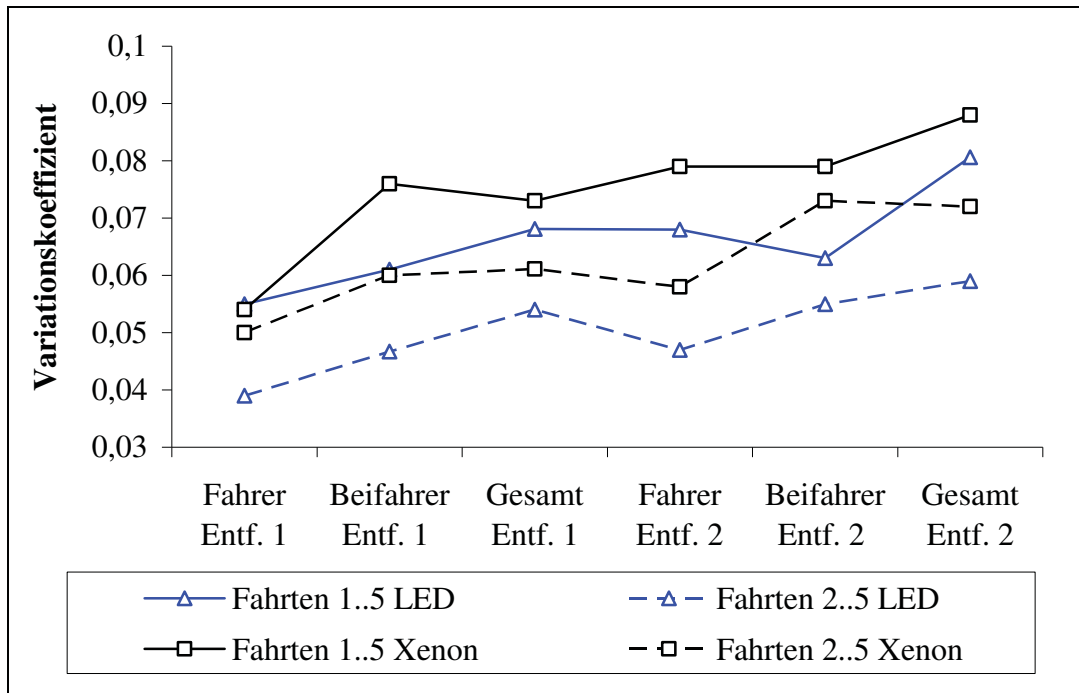


Abbildung 78 Auswirkung des Verwerfens des jeweils ersten Messwertes pro Durchgang anhand des Variationskoeffizienten

Betrachtung von Ausreißerwerten

Einige Messdaten unterscheiden sich deutlich vom Gesamtmittelwert. Es liegt die Vermutung nahe, dass die betroffenen Probanden die Aufgabe falsch verstanden haben. Es könnte aber auch sein, dass manche Probanden sich einfach später weniger geblendet fühlten.

Durch einen Vergleich der Ablendentfernungen eines Probanden zueinander kann dies beurteilt werden. Sofern eine Verbundenheit der Ablendentfernungen vorliegt, kann auf ein geringeres Blendempfinden geschlossen werden und die Messwerte dürfen weiterverwendet werden.

Um eine Tendenz zu erkennen, ob dies zutrifft, werden die Ablendentfernungen aller Probanden von Entfernung 1 gegen die der Entfernung 2 in einem XY-Diagramm als Punkteschwarm aufgetragen (siehe Abbildung 79). Es wird eine Ursprungsgerade an die Messwerte angenähert. Die Werte liegen innerhalb einer Ellipse um diese Ursprungsgerade. Je schmaler die Ellipse ist, desto größer ist die Verbundenheit der Messwerte [Ried89].

Dies trifft für Fahrer sowie Beifahrer und für beide Blendlichtquellen zu. Ein Proband, der erst spät das Ablenden wünscht, gibt auch erst spät eine Ablendaufforderung per Lichthupe. Das Verhältnis zwischen Entfernung 2 zu 1 kann anhand der angenäherten Ursprungsgerade abgelesen werden und liegt bei ca. 0,68.

Diese Verbundenheit von Entfernung 1 zu 2 kann quantitativ über den Korrelationskoeffizient r_{xy} beschrieben werden (siehe Formel 8.4). Dieser gilt als „lineares Abhängigkeitsmaß“ von Zufallsgrößen und zeigt den Grad ihrer Verbundenheit an. Zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten werden die Standardabweichungen S_x und S_y , die Kovarianz c_{xy} , die jeweiligen Messwerte x und y sowie die zugehörigen Mittelwerte \bar{x} und \bar{y} herangezogen.

$$r_{xy} = \frac{c_{xy}}{s_x \cdot s_y} = \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (x_i - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{s_x \cdot s_y} \quad (8.4)$$

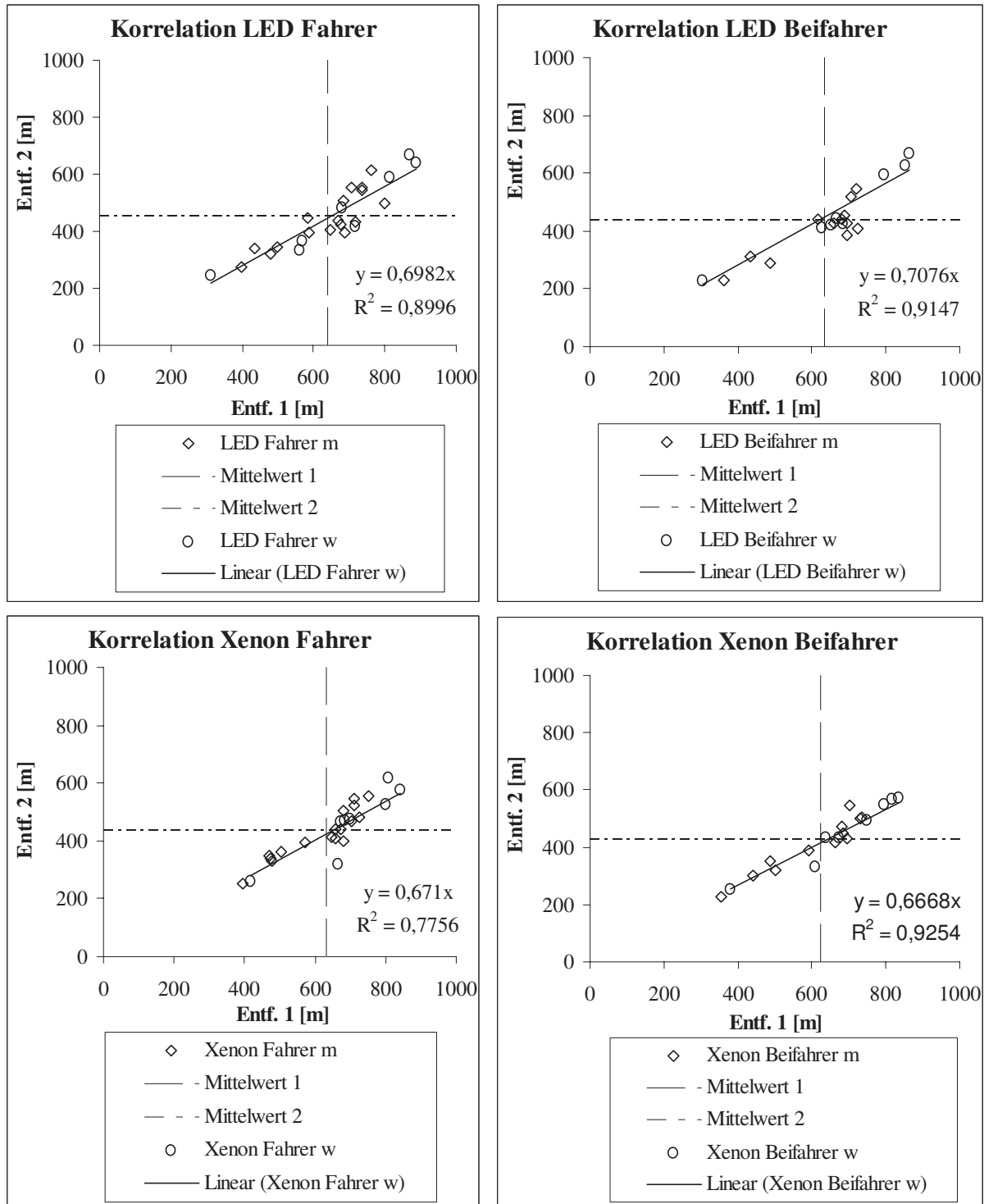


Abbildung 79 Korrelation von Entfernung 1 zu Entfernung 2; R^2 ist das Quadrat des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten und steht somit für das Bestimmtheitsmaß der linearen Trendlinie.

Tabelle 20 zeigt die Korrelationskoeffizienten der Entfernung 1 und 2 mit und ohne Ausreißerwerte. Die Schmalheit der Ellipse um die Ursprungsgerade spiegelt allgemein hohe Korrelationskoeffizienten wider. Zudem ist zu beobachten, dass die Berücksichtigung der vermeintlichen Ausreißerwerte zu einer höheren Korrelation der beiden Entfernungen führt.

- *Ergebnis:* Die vermeintlichen Ausreißerwerte sind auf ein geringeres Blendempfinden der betroffenen Probanden zurückzuführen.
- *Weiteres Vorgehen:* Die Werte werden daher im Nachfolgenden mit berücksichtigt.

Tabelle 20 Korrelationskoeffizient zwischen Entfernung 1 und 2 mit und ohne Ausreißer

	Fahrer LED	Beifahrer LED	Fahrer Xenon	Beifahrer Xenon
mit Ausreißern	0,95	0,96	0,88	0,96
ohne Ausreißer	0,87	0,87	0,81	0,95

Blendempfinden von Fahrer und Beifahrer

Um beurteilen zu können, ob das Blendempfinden als Fahrer und als Beifahrer sich unterscheidet, werden die Abblendentfernungen von Fahrer und Beifahrer in XY-Diagramme eingetragen und durch eine Ursprungsgerade angenähert (siehe Abbildung 80).

Im Idealfall unterscheiden sich die Messwerte nicht und die Steigung der Ursprungsgeraden sowie der Korrelationskoeffizient liegen je bei einem Wert von eins. In Tabelle 21 sind die Steigungen sowie die Korrelationskoeffizienten zusammengefasst. Das Verhältnis liegt nahezu bei eins, die Korrelationswerte zwischen 0,93 und 0,96. Somit wird die Vermutung der Voruntersuchung bestätigt.

- *Ergebnis:* Das Blendempfinden von Fahrer und Beifahrer ähnelt sich.
- *Weiteres Vorgehen:* Die Daten der Fahrer und Beifahrer werden zusammengefasst (siehe Abbildung 81).

Tabelle 21 Vergleich des Blendempfindens von Fahrer und Beifahrer

	Entf. 1 LED	Entf. 1 Xenon	Entf. 2 LED	Entf. 2 Xenon
Korrelationskoeffizient	0,94	0,96	0,93	0,95
Steigung	1,01	0,98	0,99	0,97

Statistische Betrachtung der Messwerte

Für eine statistische Vergleichbarkeit der jeweiligen Abblendentfernungen müssen diese eine Normalverteilung aufweisen. Dafür werden die Messwerte zunächst in Klassen eingeteilt und deren Häufigkeit in Histogrammen dargestellt. Die Intervallbreite der Klasseneinteilung beträgt 10 m.

Die Überprüfung auf Normalverteilung wird mit dem Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstest vorgenommen. Die Auswertung erfolgt in dem Programm Visual-XSel V10. Der Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstest prüft die Anpassung einer beobachteten an eine beliebige zu erwartende Verteilung.

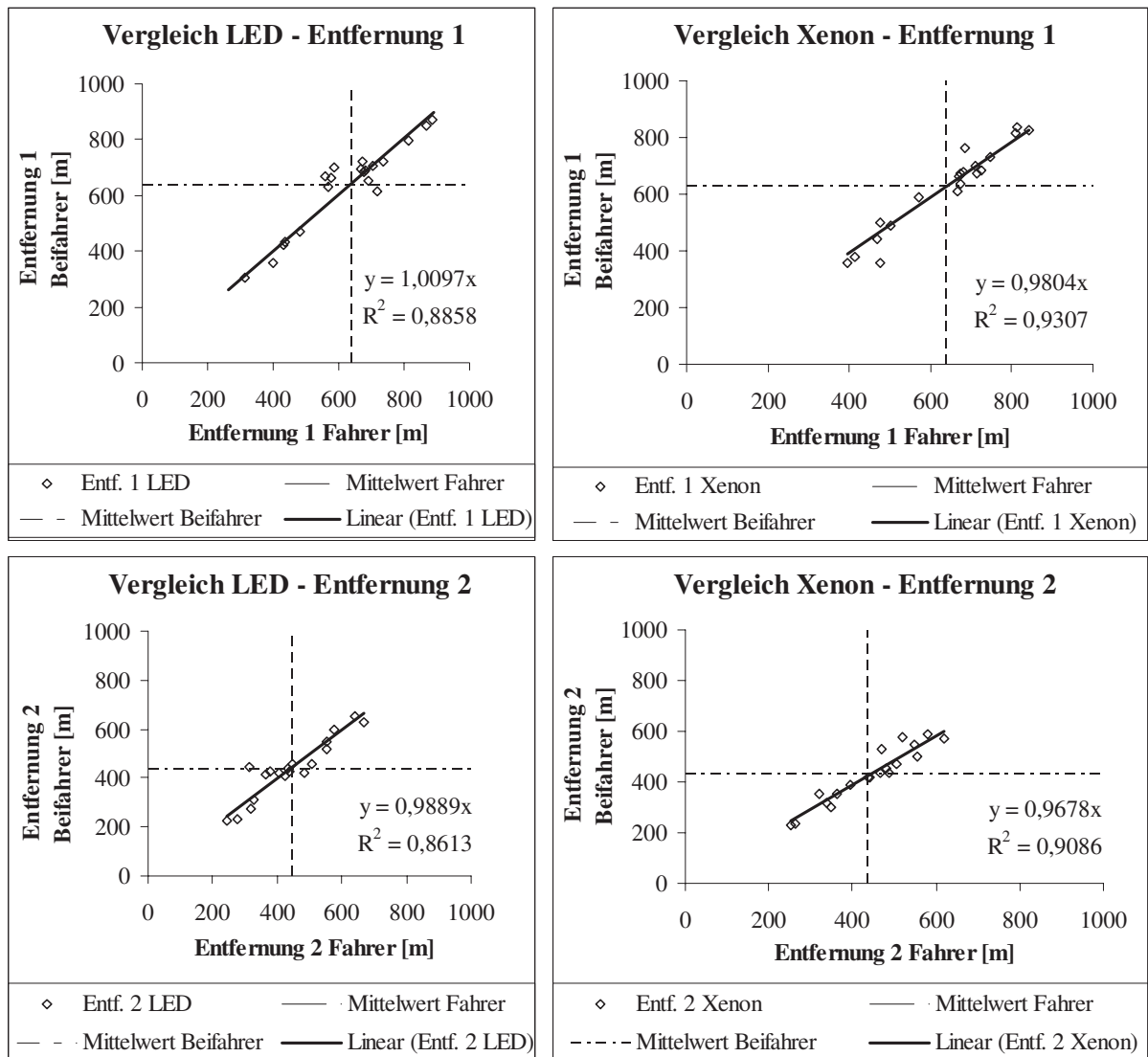


Abbildung 80 Vergleich des Blendempfindens von Fahrer und Beifahrer; R^2 beschreibt dabei das Bestimmtheitsmaß.

Besonders bei kleinen Stichprobenumfängen werden bei diesem Test eher Abweichungen von der Normalverteilung entdeckt. Geprüft wird die Nullhypothese: Die Stichprobe entstammt der bekannten Verteilung. Es werden für jeden Wert die relativen Summenhäufigkeiten verglichen und der maximale Differenzwert als Prüfgröße $T_{\text{prüf}}$ verwendet⁴⁴ (siehe Formel 8.5). Das Signifikanzniveau wird dabei zu $\alpha = 5\%$ gewählt.

Das Ergebnis der Überprüfung auf Normalverteilung sowie eine Zusammenfassung aller relevanten Testergebnisse sind in Tabelle 22 zu finden. Nur die Ablendentfernungen der Entfernung 2 sind normalverteilt. Jede Ablendentfernung besitzt eine hohe Standardabweichung von über 100 m. Die Standardabweichungen der Entfernung 2 liegen etwa 30 m unterhalb der jeweiligen Entfernung 1.

⁴⁴ H_E : erwartete absolute Häufigkeit; H_B : beobachtete absolute Häufigkeit.

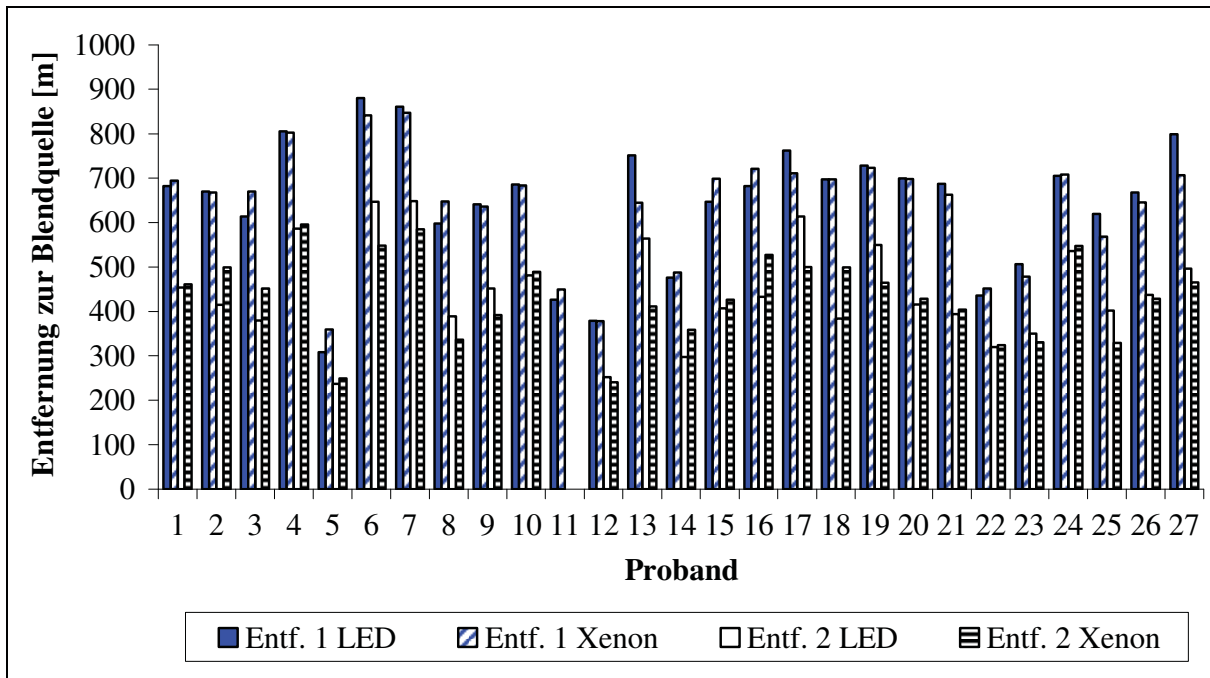


Abbildung 81 Stammendiagramm mit beiden Entfernungen, Fahrer und Beifahrer zusammengefasst; Proband 11 signalisierte die zweite Entfernung nicht.

Tabelle 22 Zusammenfassung der Abblendentfernungen

Entf.	Blend- quelle	Mittel- wert	Standardab- weichung	95 %- Perzentil	Beleuchtungs- stärke	Normal- verteilung
1	LED	638 m	150 m	861 m	0,27 lx	nein
	Xenon	633 m	139 m	834 m	0,3 lx	nein
2	LED	441 m	117 m	651 m	0,4 lx	ja
	Xenon	434 m	102 m	591 m	0,4 lx	ja

$$T_{Prüf} = \frac{\max|H_B - H_E|}{n} \tag{8.5}$$

Die Mittelwerte für LED mit 638 m und 441 m liegen um fünf bzw. sieben Meter höher als die entsprechenden für Xenon. Für die Entfernung 2 „Ablendaufforderung“ ergibt sich zusammen mit der jeweils hohen Standardabweichung kein signifikanter Unterschied zwischen dem Blendempfinden bei Xenon und LED. Abbildung 82 zeigt die Summenhäufigkeiten der einzelnen Abblendentfernungen.

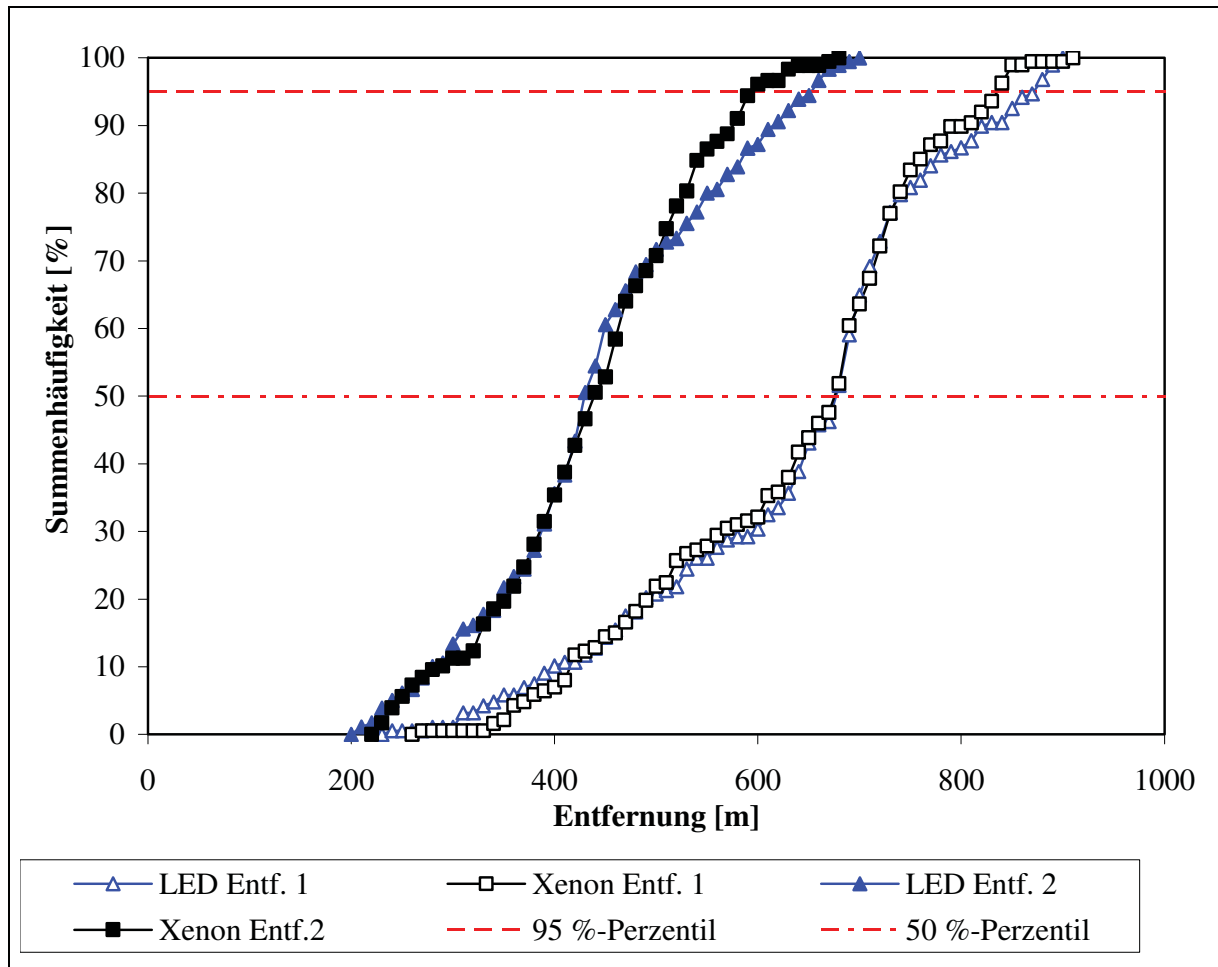


Abbildung 82 Summenhäufigkeit der Ablendentfernungen

Die jeweils zusammengehörigen Kurvenverläufe der Entfernung 1 bzw. Entfernung 2 unterscheiden sich unterhalb einer Summenhäufigkeit von ca. 75 % nur geringfügig. Oberhalb ruft die Blendung mit dem LED-Scheinwerferpaar höhere Ablendentfernungen hervor. Das 95 %-Perzentil der Entfernung 1 „Ablendwunsch“ beträgt bei LEDs 861 m und bei Xenon 834 m.

- *Ergebnis:* Es treten hohe Standardabweichungen auf.
- *Ergebnis:* Nur Entfernung 2 „Ablendaufforderung“ ist normalverteilt.
- *Ergebnis:* Die Ablendentfernungen mit LEDs sind marginal höher.

8.1.5 Diskussion

Anhand der Daten lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Blendempfinden von LED zu Xenon erkennen. Die marginal höheren Ablendentfernungen mit LEDs können durch die stets höhere Blendbeleuchtungsstärke verursacht sein. Aufgrund der großen Distanzen kann der Einfluss der Leuchtdichte vernachlässigt werden [Ripp01]. Der Einfluss des höheren Blauanteils und der höheren Farbtemperatur der LEDs ist daher als gering einzuschätzen.

Zudem können die Probanden ohne Referenzlichtquelle nicht entscheiden, ob sie von einem Xenon- oder LED-Scheinwerfer geblendet werden. Eine abschließende Probandenbefragung

lässt allerdings eine Tendenz erkennen, dass die LED-Blendquelle als unangenehmer empfunden wird (siehe Tabelle 23). Die Standardabweichungen der Entfernung 2 “Abblend-aufforderung“ sind geringer.

Der Punkt der eindeutigen Blendung kann durch die Probanden besser definiert werden. Das kann damit zusammenhängen, dass Unterschiede in der Blendbeleuchtungsstärke in kürzeren Entfernungen zur Blendquelle besser erkennbar sind. Als Ursache ist der quadratische Anstieg der Beleuchtungsstärke aufgrund des photometrischen Entfernungsgesetzes zu sehen. Die hiesige Entfernung 2 für Xenon liegt mit 590 m ca. 100 m oberhalb von den Ergebnissen nach Hohm [Hohm05]. Obwohl der hier verwendete Xenon-Scheinwerfer eine um rund 6000 cd geringere Lichtstärke aufweist, kommt es hier früher zur entsprechenden Blendung. Geringe Unterschiede können durch eine niedrigere Umfeldleuchtdichte erklärt werden.

Tabelle 23 Auszug aus der Probandenbefragung: Blendempfinden der Scheinwerfer

	Xenon	LED	kein Unterschied
Welcher Scheinwerfer wird als angenehmer empfunden?	14	10	3
Welcher Scheinwerfer blendet stärker?	8	13	6

Kritische Betrachtung der Ergebnisse

In diesem Test sind folgende Punkte als kritisch anzusehen:

- Es treten hohe Standardabweichungen auf. Allerdings kann daraus abgeleitet werden, dass es für die Probanden nicht möglich war, sich an besonderen baulichen Gegebenheiten zu orientieren.
- Die Relativgeschwindigkeit ist zu niedrig. Die Relativgeschwindigkeit beträgt hier nur 80 km/h. In der Realität liegt diese jedoch bei etwa 200 km/h. Das führt zu einer längeren Präsentationsdauer der Blendquelle.
- Die Blendquelle wird direkt fixiert. Die Fahrzeuginsassen sind normalerweise durch Unterhaltungen, durch das Radio oder durch die Umgebung abgelenkt. Zudem ist der Fahrer durch seine Fahraufgabe beschäftigt und sollte eigentlich während des Begegnungsprozesses hin zum rechten Fahrbahnrand blicken.

Die beiden letzten Punkte erklären, warum bereits niedrige Blendbeleuchtungsstärken von ca. 0,4 lx und 0,3 lx genügen, um bei den Probanden einen Abblendwunsch hervorzurufen. Bei Abblendlichtverteilungen ist die maximal erlaubte Beleuchtungsstärke oberhalb der Hell-Dunkel-Grenze beschränkt. Der Messpunkt B 50 L gibt die Richtung an, in der die Augen entgegenkommender Fahrer in 50 m Entfernung erwartet werden. In dieser Richtung darf eine maximale Beleuchtungsstärke von 1 lx in 25 m Entfernung nicht überschritten werden⁴⁵ (z.B. [ECE-R123]). Die Blendbeleuchtungsstärken im Test liegen mehr als die Hälfte darunter.

⁴⁵ Scheinwerfer werden in 25 m Entfernung vermessen. Dieser Wert bezieht sich daher auf 25 m.

Auswirkungen auf die Ablendentfernungen mit LED-Scheinwerfer

LED-Scheinwerfer führen tendenziell zu einer höheren psychologischen Blendbelästigung. Die geringen Unterschiede zwischen den Ablendentfernungen sind sowohl auf die höhere Farbtemperatur als auch auf die höhere Blendbeleuchtungsstärke des LED-Scheinwerferpaares zurückzuführen (siehe Abbildung 83). Aufgrund des Testdesigns werden allgemein zu hohe Ablendentfernungen gemessen, die nicht als Anforderungen an die Sensorik herangezogen werden können. Allerdings sind die Ergebnisse der Blendung mit Xenon und LED den gleichen systematischen Fehlern unterworfen. Ein relativer Vergleich ist daher möglich und führt zu dem Schluss, dass durch die Verwendung von LED-Scheinwerfern keine größeren Ablendentfernungen benötigt werden.

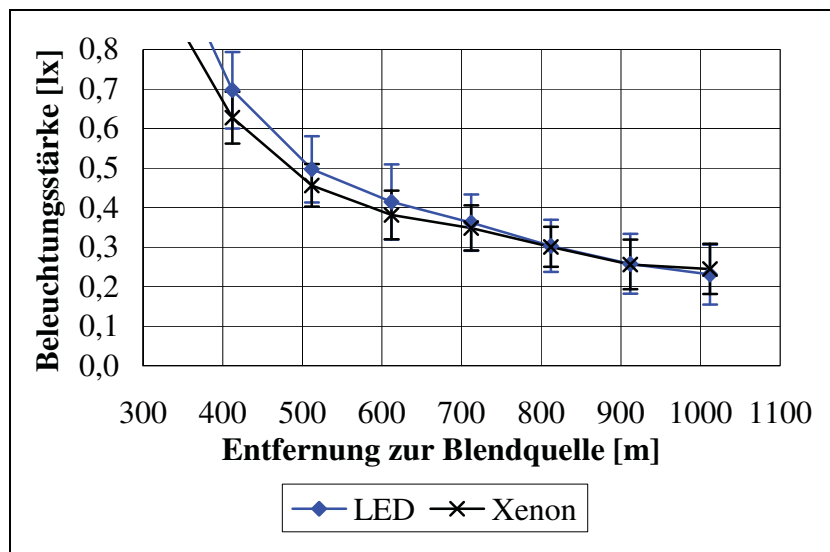


Abbildung 83 Blendbeleuchtungsstärke im Detail

8.2 Erkennbarkeitsentfernungen mit adaptiven Fernlichtsystemen

Das Ziel dieses Versuches ist es, unter möglichst realistischen Bedingungen Erkennbarkeitsentfernungen von herkömmlich manuellen und adaptiven Fernlichtsystemen zu ermitteln. Aufgrund des enormen Aufwandes mit bis zu fünf verschiedenen Versuchsfahrzeugen pro Versuchsabend wurde dieser halbdynamische Versuch in Zusammenarbeit mit Holger Sprute⁴⁶ im Februar und März 2008 durchgeführt.

Insgesamt 35 Probanden unterstützten die gesamte Untersuchung. In Voruntersuchungen wurde zusammen mit sechs Probanden das Testdesign erarbeitet bzw. verfeinert. Für die anstehende Untersuchung standen 29 Probanden im Alter von 23 bis 43 zur Verfügung. Unter diesen hauptsächlich lichttechnischen Laien befanden sich neun Frauen und zwanzig Männer.

Bisherige Untersuchungen

Bisherige Untersuchungen zu konventionellen und adaptiven Fernlichtsystemen sind ab Seite 27 aufgeführt. Dabei handelt es sich bis auf die Untersuchungen von Schmidt-Claussen um statische Versuche [Schm79]. Aufgrund des statischen Testdesigns werden bei den anderen erstaunlich hohe Erkennbarkeitsentfernungen bestimmt. Wenn das eigene Abblendlicht eingeschaltet ist und die Probanden sich unter dem Blendeinfluss eines Abblendlichtscheinwerferpaares befinden, ermittelt Böhm eine Erkennbarkeitsentfernung von 104 m [Böhm07]. Bei Verwendung des maskierten Dauerfernlichtes MDF erhöht sich die Erkennbarkeitsentfernung um weitere 30 m.

8.2.1 Versuchsbeschreibung

Die Probanden fahren einen Parcours mit Sehzeichen und Blendquellen ab. Die Blendquellen sind gewöhnliche Scheinwerferpaare mit eingeschaltetem Abblendlicht. Sobald die Probanden ein Sehzeichen eindeutig erkennen, haben sie die Aufgabe, einen Taster zu drücken. Die Erkennbarkeitsentfernung kann dadurch ermittelt werden. Das Versuchsdesign ist schematisch in Abbildung 84 dargestellt.

8.2.2 Versuchsaufbau

Die Tests werden auf der Handling-Strecke des Prüfgeländes der AUDI AG durchgeführt. Es handelt sich dabei um einen für Landstraßen typischen Parcours mit Kurven, Bodenwellen, Wald, einer Brücke und einer Unterführung. Abbildung 85 zeigt eine Übersicht des Versuchsaufbaus auf der Handling-Strecke 1. Es werden drei verschiedene Sehzeichen mit je einem Reflexionskoeffizienten von $\rho = 15\%$ verwendet:

- *Mann*: grauer Pappkamerad mit einer Höhe von 1,60 m
- *Kind*: grauer Pappkamerad mit einer Höhe von 0,80 m
- *Quadrat*: graues Quadrat mit einer Kantenlänge von 0,40 m

⁴⁶ Verwiesen sei hier auf die Veröffentlichung [Spru09a].

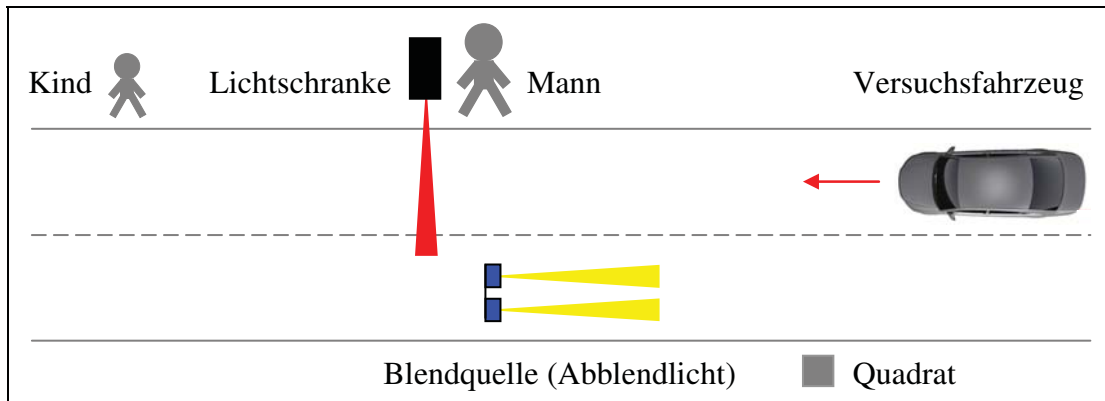


Abbildung 84 Versuchsdesign Erkennbarkeitsentfernungen (nicht maßstabsgetreu)

Die Sehzeichen befinden sich links und rechts am Straßenrand. Für diese Untersuchung sind gerade die Erkennbarkeitsentfernungen unter Einfluss von Blendung durch Gegenverkehr interessant. Daher wird neben Vexierschildern, die alleinstehend auf der gesamten Strecke zu finden sind, in der Nähe jeder Blendquelle jeweils eine gleiche Anordnung von drei aufeinander folgenden Sehzeichen gewählt (vgl. Abbildung 84):

- Sehzeichen „Quadrat“ 100 m vor einer Blendquelle ist auf der linken Straßenseite.
- Sehzeichen „Mann“ auf Höhe einer Blendquelle ist am rechten Straßenrand.
- Sehzeichen „Kind“ 100 m hinter der Blendquelle ist am rechten Straßenrand.

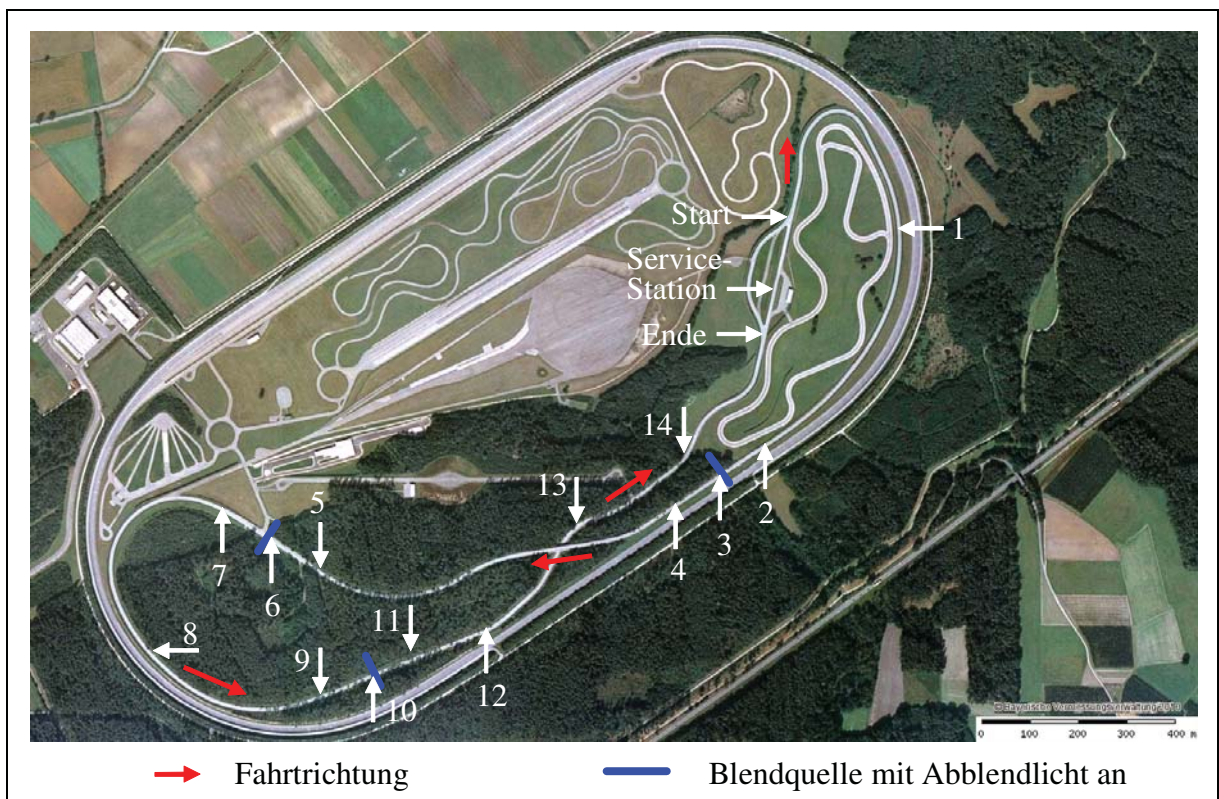


Abbildung 85 Positionen der Sehobjekte und Blendquellen auf der Handling-Strecke 1 (Quelle: © Bayerische Vermessungsverwaltung 2010)

Als Blendquellen dienen ein Xenon- und ein LED-Scheinwerferpaar des Audi R8. Zusätzlich wird ein Halogenscheinwerferpaar des Audi A4 (B8) verwendet. Die Scheinwerfer sind auf Halterungen entsprechend der Anbaulage im jeweiligen Fahrzeug angebracht.

Als Start- und Zielpunkt wird eine Service-Station auf der Strecke genutzt, auf der sich die Versuchspersonen zwischen den einzelnen Fahrten aufhalten. In Tabelle 24 sind sämtliche Positionen der Sehzeichen, Blendobjekte und Lichtschranken festgehalten.

Tabelle 24 *Positionen der Sehzeichen für den Probandentest der Erkennbarkeitsentfernung*

Nr.	Blendobjekt	Sehzeichen	Position	Entf. abs. [m]	Umgebungsbeschaffenheit
0	Start	-	-	0	Service-Station
1	-	Mann	rechts	522,7	Bodenwellen, lange Rechtskurve
2	-	Sehtafel	rechts	1220,7	Bodenwellen, Gerade
3	Halogen und Lichtschranke	Mann	rechts	1323,0	Bodenwellen, lange Gerade
4	-	Kind	rechts	1422,3	Steigung, Wald
5	-	Quadrat	links	2148,7	nach Rechtskurve
6	Xenon und Lichtschranke	Mann	rechts	2231,0	lange Gerade, breite Straße
7	-	Kind	rechts	2330,3	lange Gerade, breite Straße, vor Linkskurve
8	-	Mann	rechts	2905,5	lange Linkskurve, Sinuswellen
9	-	Quadrat	links	3338,9	lange Linkskurve, Sinuswellen
10	LED und Lichtschranke	Mann	rechts	3434,7	Gerade, Wald
11	-	Kind	rechts	3528,8	Gerade, Wald
12	-	Quadrat	links	3649,1	Linkskurve
13	-	Quadrat	rechts	4126,5	enge Rechtskurve
14	Lichtschranke	-	-	4206,1	enge Linkskurve
15	Ende	-	-	4516,2	kurze Gerade

Messverfahren

Für den Probandentest zu Abblendentfernungen bei Xenon und LED wurde bereits ein Messverfahren zur Bestimmung von zurückgelegten Weglängen erarbeitet. Dieses dient hier als Ausgangsbasis. Aufgrund von unterschiedlichen Fahrweisen können sich beim mehrmaligen Durchfahren einer Strecke mit Kurven verschiedene zurückgelegte Weglängen ergeben. Die Weglänge wird beeinflusst durch Kurvenschneiden, durch die laterale Position auf der Fahrspur und auch durch Schlupf der Räder bei Beschleunigungen oder Bremsungen.

Die besonders interessanten Sehzeichen befinden sich in der Nähe der Blendquellen jeweils auf geraden Streckenabschnitten. Wenn die Weglänge auf Höhe der Blendquellen referenziert wird, können diese Einflüsse weitgehend kompensiert werden. Der Einfluss von Schlupf ist auf diesen geraden Streckenabschnitten zu vernachlässigen. Die Probanden befahren diese ohne nennenswerte Beschleunigungen oder Bremsungen.

Für die Referenzierung werden zusätzlich entwickelte Infrarot-Lichtschraken ins Messsystem integriert. Diese werden analog der Tastereinbindung über die serielle Schnittstelle und ein Python-Skript bzw. Vector CANoe ausgewertet. Die Referenzierung und so die Bestimmung der Erkennbarkeitsentfernung für ein Sehzeichen werden jeweils anhand der Lichtschrake vorgenommen, die den kürzesten Abstand zu diesem Sehzeichen aufweist. Bei den interessanten Dreiergruppen bezieht sich das jeweils auf die Lichtschrake in der Mitte (vgl. Abbildung 84). Für die tatsächlichen Messentfernungen ergeben sich somit +/- 100 m. Durch die Einbindung der Lichtschrake erhöht sich die absolute Messtoleranz auf +/- 0,75 m.

Versuchsfahrzeuge

Es werden vier Versuchsfahrzeuge mit insgesamt fünf verschiedenen Systemen miteinander verglichen. In Tabelle 25 sind diese zusammengefasst. Die Funktionsweise der Systeme Matrix-Beam, MDF und GLW wird ab Seite 20 erläutert. Die drei Systeme sind jeweils mit der gleichen Kamerasensorik sowie mit einem Totzeitglied ausgestattet. Das Totzeitglied beschreibt eine einstellbare Zeitdauer. Wenn ein Bereich entblendet werden muss, so bleibt dieser Bereich um die Dauer des Totzeitgliedes deaktiviert. Bei Matrix-Beam ist dieses 250 ms, bei GLW und MDF je 1 s lang.

Tabelle 25 Liste der Versuchsfahrzeuge und deren Systeme für den Probandentest Erkennbarkeitsentfernung

Kurzbezeichnung	System	Fahrten	Fahrzeugtyp
Matrix-Beam	Matrix-Beam (Hybrid)	29	A8 D3 (WQ)
MDF	maskiertes Dauerfernlicht MDF	29	A8 D3 (WO)
GLW	gleitende Leuchtweite GLW	28	A8L D3 (VB)
Normal 1	manuelles Fernlicht, symmetrisches Abblendlicht, Kurvenlicht	15	
Normal 2	manuelles Fernlicht, asymmetrisches Abblendlicht, Kurvenlicht	12	A8L D3 (YM)

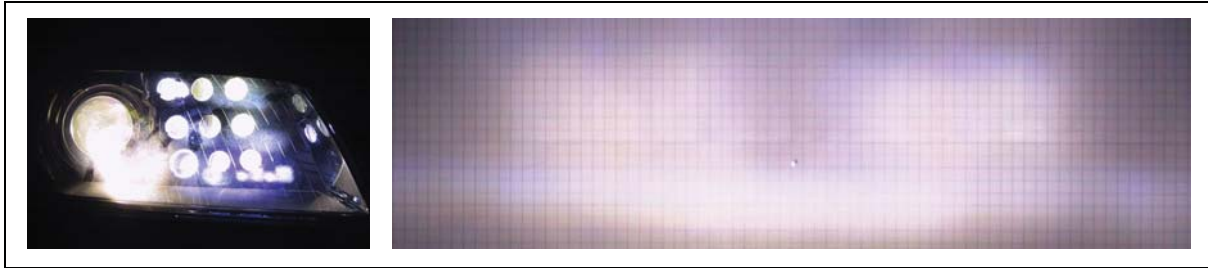


Abbildung 86 Scheinwerfer Matrix-Beam (Hybrid) links, resultierende Lichtverteilung rechts; das segmentierte Fernlicht besteht aus 9 LED-Modulen mit insgesamt 46 einzeln adressierbaren LEDs.

Als Matrix-Beam-Scheinwerferpaar dient hier eine Hybridlösung. Das Abblendlicht ist symmetrisch ohne Asymmetriezweig ausgeführt. Das segmentierte LED-Fernlicht ist darüber angeordnet (siehe Abbildung 86). Allerdings weist ein LED-Fernlicht allein ohne Abblendlicht gerade einmal eine maximale Beleuchtungsstärke von 60 lx auf. Die Verwendung des Nanolux-Systemes war zu dieser Zeit nicht möglich. Bei den anderen Scheinwerfern handelt es sich um Xenon-Scheinwerfer, die mit einem Fernlicht alleine eine maximale Beleuchtungsstärke von bis zu 120 lx erreichen.

Bei Deaktivierung des adaptiven Fernlichtsystems GLW wird im Versuchsträger VB das manuell bedienbare System Normal 1 erhalten. Die Besonderheit ist, dass das Abblendlicht im manuellen Betrieb eine Touristenlösung mit symmetrischer Hell-Dunkel-Grenze vorsieht. Der Versuchsträger VB sieht im automatischen GLW-Betrieb ein Abblendlicht mit asymmetrischer Hell-Dunkel-Grenze vor. Das System Normal 2 im Versuchsträger YM verfügt ebenfalls über ein Abblendlicht mit Asymmetriezweig (siehe Abbildung 87). Allerdings ist dieser größer als der des GLW-Systems.

8.2.3 Durchführung

Die Probanden sind aufgrund der Anreise zum Prüfgelände bereits an mesopische Bedingungen adaptiert. Dennoch werden die Probanden ca. 15 Minuten im Freien auf der Service-Station und hinter den Versuchsfahrzeugen mit eingeschaltetem Abblendlicht begrüßt und eingewiesen.

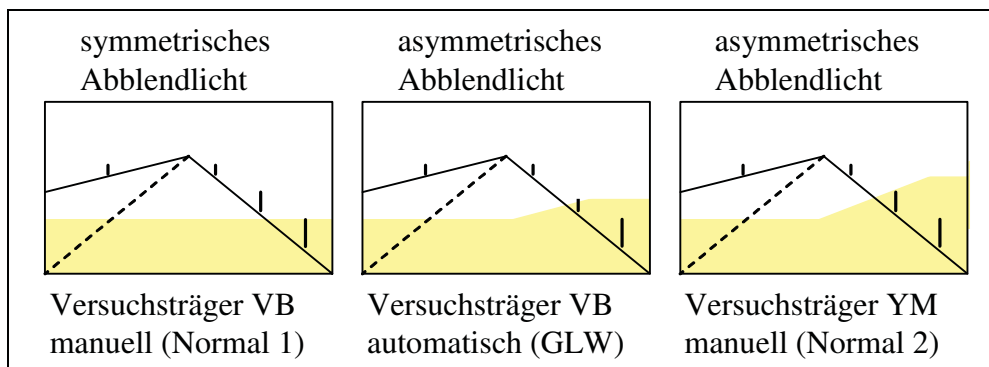


Abbildung 87 Abblendlicht mit symmetrischer und asymmetrischer Hell-Dunkel-Grenze

Sie sollen eine Richtgeschwindigkeit von 80 km/h einhalten und sich ausschließlich auf ihrer Fahrspur bewegen. Sobald die Probanden ein Sehzeichen erkannt haben, sollen sie einen Taster drücken, den sie in ihrer Hand halten.

Unmittelbar nach dem Drücken haben sie die Aufgabe, das Sehzeichen zu benennen. Voruntersuchungen zeigten, dass sich stets nur ein Sehzeichen in Sichtweite befindet. Jedoch wird so ein verfrühtes oder fälschliches Drücken „auf Verdacht“ vermieden.

Bei Fahrzeugen mit automatischer Fernlichtsteuerung dürfen die Probanden den Fernlichthebel nicht benutzen. Bei manuellen Systemen werden sie hingegen ausdrücklich auf eine Verwendung dessen hingewiesen und starten ihre Fahrt auch mit eingeschalteten Fernlicht. Sie sollen wie im realen Verkehr nach eigenem Ermessen ab- bzw. aufblenden.

Die Versuchspersonen wissen nur, ob sie in einem Fahrzeug mit automatischem oder manuellem Fernlichtsystem fahren. Welches adaptive System sie jeweils testen, wird ihnen nicht verraten. Zwischen den einzelnen Fahrten haben die Probanden die Aufgabe, einen Fragebogen zum gerade getesteten System auszufüllen.

Außer dem Probanden und dem jeweiligen Versuchsleiter befindet sich niemand in den Versuchsfahrzeugen. Der Versuchsleiter sitzt im Fond und protokolliert die Fahrt. Er kontrolliert auch die Fahrweise und weist nötigenfalls auf die Einhaltung der Spur und der Richtgeschwindigkeit hin. Es wird darauf geachtet, dass die Probanden weder durch Gespräche noch durch Radio oder Musik abgelenkt werden.

Um wiederholungsbedingte Lerneffekte zu vermeiden, beurteilen die Versuchspersonen jedes System nur einmal. Zudem wird die Darbietungsreihenfolge der Versuchsfahrzeuge von Proband zu Proband variiert. Wenn die Erkennbarkeitsentfernungen der jeweiligen Fernlichtsysteme über alle Probanden gemittelt werden, werden somit alle Fernlichtsysteme mit nahezu demselben Lerneffekt behaftet.

An jedem Testabend wurden je vier Systeme miteinander verglichen. Aufgrund der Verfügbarkeit des Versuchsträgers Normal 2 wurden mit diesem System nur insgesamt 12 Probandenfahrten absolviert. An Testabenden, an denen dieses System nicht zur Verfügung stand, wurden 15 Fahrten mit dem System Normal 1 abgedeckt. Die Systeme MDF und Matrix-Beam wurden von 29 Probanden gefahren, GLW von 28 Probanden. Der zeitlich begrenzte Rahmen verhinderte zudem, dass mit Normal 1 nicht 17 und mit GLW nicht 29 Fahrten durchgeführt werden konnten (siehe Tabelle 25 weiter oben).

8.2.4 Analyse der Messergebnisse

Abbildung 88 zeigt einen Gesamtüberblick der durchschnittlichen Erkennbarkeitsentfernungen. Im Rahmen dieser Untersuchung sind Sehzeichen in der Nähe der Blendquellen von besonderem Interesse. An ihnen können die konventionellen und adaptiven Fernlichtsysteme miteinander verglichen werden. Auf eine Betrachtung der anderen Sehzeichen im Detail wird verzichtet.

In den folgenden Abschnitten wird die Aussagekraft der Ergebnisse sowie die Vergleichbarkeit der Fernlichtsysteme an den einzelnen Sehzeichen betrachtet. Dabei müssen die einzelnen Ergebnisse im Kontext der Funktionsweise und der Lichtverteilung des betrachteten Systems sowie auch im Kontext der jeweiligen Streckenbedingungen wie z.B. von Kurven gesehen werden.

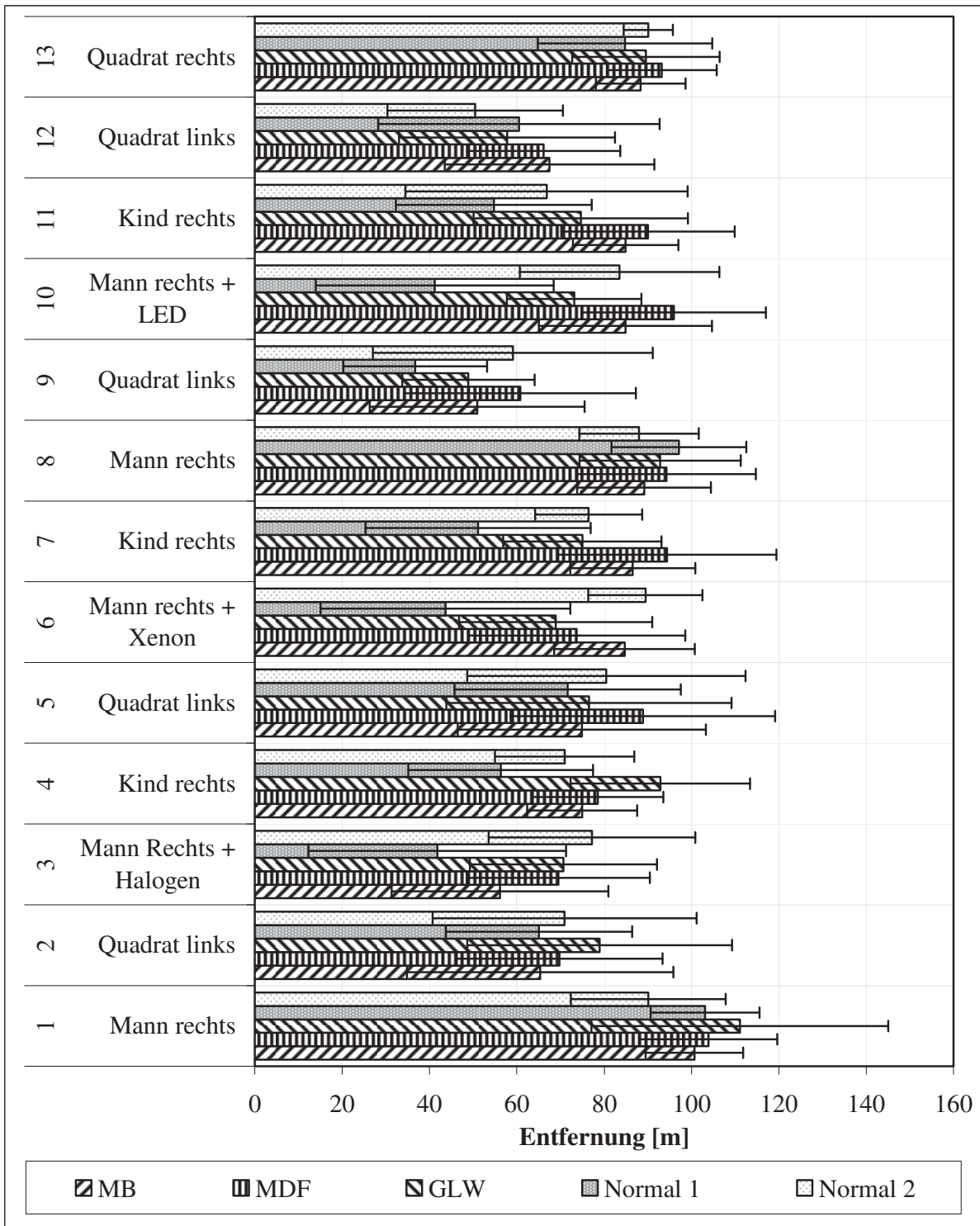


Abbildung 88 Gesamtüberblick der mittleren Erkennbarkeitsentfernungen und Standardabweichungen pro Sehzeichen und Fernlichtsystem

Statistische Betrachtung der Ergebnisse

Aufgrund des relativ geringen Stichprobenumfanges der Messungen von je unter 30 Werten wird der Shapiro-Wilk-Test angewendet. Dieser gilt gerade bei geringen Stichprobenumfängen als leistungsfähiger Standardtest zur Bestimmung der Normalverteilung [Sach02]. Der Shapiro-Wilk-Test prüft die Nullhypothese, dass eine Stichprobe aus einer normalverteilten Grundgesamtheit stammt. Der Test wird mit dem Programm Visual XSel 10 durchgeführt. Dabei wird das Signifikanzniveau zu $\alpha = 5\%$ gewählt. In Tabelle 26 sind die Mittelwerte sowie die Standardabweichung der einzelnen Sehzeichen zusammengefasst. Die grau hinterlegten Felder deuten auf eine Normalverteilung im obigen Sinne hin.

Keines der verschiedenen Fernlichtsysteme weist durchgängig normalverteilte Ergebnisse auf. Vor und hinter den Blendquellen weisen die Sehzeichen Nr. 5 und 7 für jedes System eine Normalverteilung auf. Auf Höhe der Blendquelle sind unter der Ausnahme des Systems Normal 2 die Sehzeichen Nr. 3 und 10 normalverteilt.

- *Ergebnis:* durchgängige Normalverteilung vor und hinter der Blendquelle: Sehzeichen Nr. 5 und 7.
- *Ergebnis:* weitgehende Normalverteilung auf Höhe der Blendquelle: Sehzeichen Nr. 3 und 10.

Tabelle 26 Erkennbarkeitsentfernungen der einzelnen Sehzeichen über alle Probanden gemittelt sowie Standardabweichungen und Normalverteilung; Normalverteilte Sehzeichenergebnisse sind grau hinterlegt; M-B: Matrix-Beam, N. 1: Normal 1, N. 2: Normal 2

Nr.	Mittelwerte [m]					Standardabweichungen [m]				
	M-B	MDF	GLW	N. 1	N. 2	M-B	MDF	GLW	N.1	N.2
1	100,7	103,9	111,1	103,1	90,1	10,5	15,3	30,9	12,5	13,6
2	65,3	69,8	79,0	65,1	71,0	32,8	23,6	31,1	21,3	22,9
3	56,2	69,5	70,7	41,8	77,2	12,3	21,0	21,6	29,5	18,1
4	75,0	78,6	92,9	56,3	71,0	11,4	18,3	32,9	21,1	17,8
5	74,9	88,9	76,5	71,7	80,5	28,8	30,2	32,7	25,9	25,6
6	84,7	73,7	68,9	43,7	89,4	16,2	24,6	22,0	28,6	22,3
7	86,6	94,4	75,0	51,1	76,4	14,3	26,3	13,9	25,8	23,3
8	89,2	94,3	92,8	97,1	88,0	16,4	20,5	12,9	15,4	16,4
9	51,0	60,8	48,9	36,7	59,1	25,2	26,5	16,4	16,4	10,1
10	84,8	96,0	73,1	41,2	83,5	20,5	21,0	11,1	27,2	9,0
11	84,9	90,0	74,6	54,7	66,8	11,8	27,5	16,2	22,4	12,9
12	67,5	66,2	57,7	60,5	50,5	18,5	24,3	17,0	32,2	15,8
13	88,4	93,2	89,5	84,8	90,1	10,5	22,7	16,6	20,0	19,5

Sehzeichen 1-4: eingeschränkte Funktionalität

Die Ergebnisse der ersten vier Sehzeichen weisen erhebliche Unregelmäßigkeiten auf. Diese sind sowohl auf die Eingewöhnung der Probanden auf den jeweiligen Versuchsträger, aber auch auf die Beschaffenheit der Strecke zurückzuführen.

In dem betroffenen Streckenabschnitt regen zyklische Bodenwellen vor den Sehzeichen 2 und 3 das Fahrzeug zu sich verstärkenden Nickbewegungen längs der Fahrtrichtung an. Zudem befinden sich zwischen Sehzeichen Nr. 3 und 4 Überkopfschilder.

Zum einen werden durch die Nickbewegungen die Überkopfschilder sehr gut ausgeleuchtet. Die entstehenden Reflexionen an den Überkopfschildern werden von der Kamerasensorik fälschlicherweise als relevante Objekte klassifiziert. Zusammen mit der Blendquelle in Höhe des Sehzeichens Nr. 3 führt dies zu einer unnötigen Entblendung der gesamten Straßenbreite. Zum anderen wird zeitweise der gesamte Streckenabschnitt in Abhängigkeit der Nickbewegungen allein durch das Abblendlicht beleuchtet.

Diese Effekte schränken die adaptiven Fernlichtsysteme in ihrer Funktionalität ein. An Sehzeichen Nr. 3 erzielt das System Normal 2 aufgrund seines asymmetrischen Abblendlichtes im Vergleich die höchste mittlere Erkennbarkeitsentfernung.

- *Ergebnis:* Die Systeme sind an Sehzeichen 1 bis 4 nur eingeschränkt funktionsfähig.
- *Weiteres Vorgehen:* Die Sehzeichen 1 bis 4 werden nicht zum Vergleich zwischen manuellen und adaptiven Fernlichtsystemen herangezogen.

Vergleich der Fernlichtsysteme anhand ausgewählter Sehzeichen

Im Rahmen der Datenanalyse zeigt sich, dass sich die Sehzeichen Nr. 5, 7 und 10 aufgrund ihrer weitgehenden Normalverteilung für einen statistischen Vergleich anbieten. Dennoch werden für eine ganzheitliche Betrachtung der Messergebnisse sämtliche Sehzeichen in der Nähe der zweiten und dritten Blendquelle herangezogen. Abbildung 89 zeigt die Differenzen der mittleren Erkennbarkeitsentfernungen zu dem manuellen System Normal 2 für diese Sehzeichen.

Die nachfolgende Überprüfung der Stichprobenverteilungen auf eine signifikante Unterscheidung hin wird mit dem t-Test durchgeführt. Unter der Annahme, dass die Varianzen der zu untersuchenden Grundgesamtheiten nahezu identisch sind, ist der t-Test dazu besser geeignet als der Welch-Test. Der Welch-Test hat den Nachteil, dass dieser das Signifikanzniveau nicht exakt halten kann [Sach02].

Zur Überprüfung der Unabhängigkeit zweier Stichprobenumfänge darf der t-Test nur angewendet werden, sofern die Stichproben je einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammen. Zudem müssen die beiden Varianzen identisch sein, wovon in diesem Fall ausgegangen wird. Beim t-Test wird die Nullhypothese H_0 gegen die zweiseitige Alternative H_1 getestet. Dabei werden die Erwartungswerte μ_x und μ_y miteinander verglichen (siehe Formel 8.6).

$$\begin{aligned} H_0 : \mu_x &= \mu_y \\ H_1 : \mu_x &\neq \mu_y \end{aligned} \tag{8.6}$$

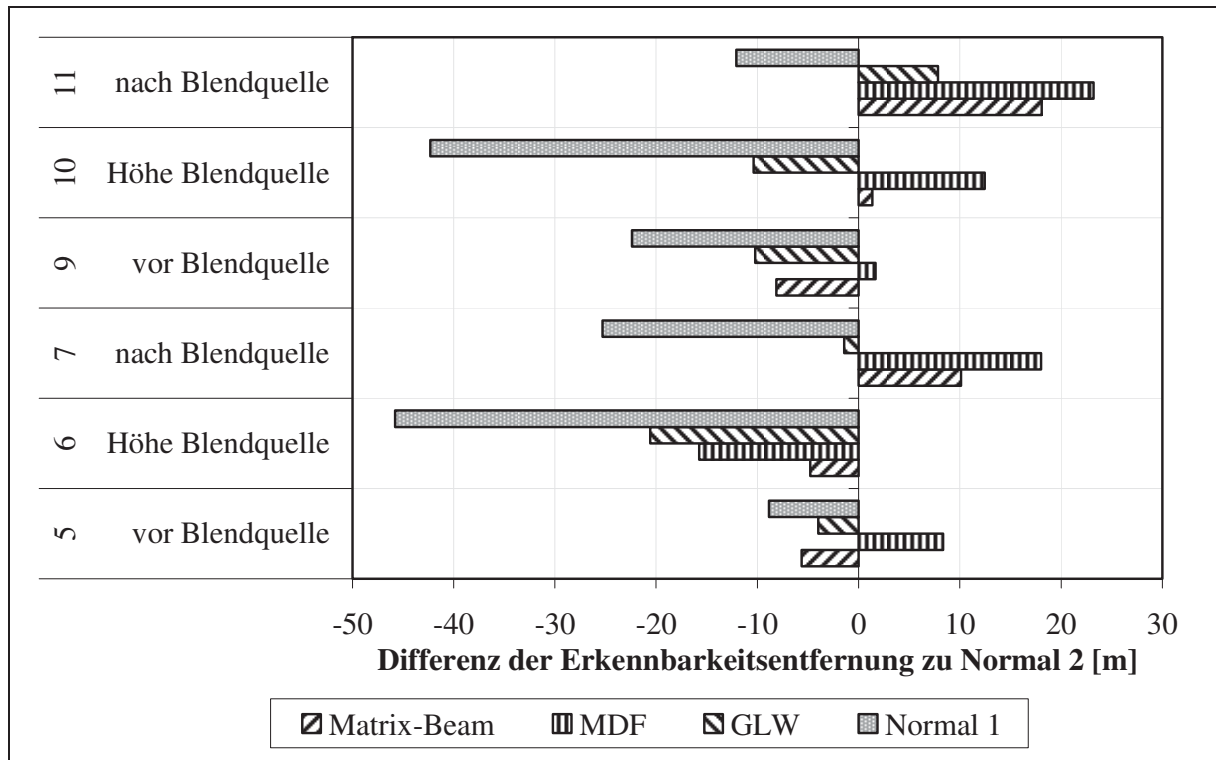


Abbildung 89 Differenz der Erkennbarkeitsentfernungen relevanter Sehzeichen

Die Prüfgröße t lässt sich mit Formel 8.7 berechnen. Die Differenz der Mittelwerte \bar{x} und \bar{y} wird durch eine Wurzelfunktion dividiert. In der Wurzel werden die empirischen Standardabweichungen S im Quadrat durch die jeweilige Anzahl der Stichproben n geteilt und danach addiert. Zusammengefasst bedeutet das, dass die Prüfgröße t umso größer wird, je mehr sich die Grundgesamtheiten unterscheiden.

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{\sqrt{\frac{S_x^2}{n_x} + \frac{S_y^2}{n_y}}} \quad (8.7)$$

Folglich wird H_0 zum Signifikanzniveau α abgelehnt, wenn der Betrag der Prüfgröße t größer ist als der zugehörige Wert (siehe Formel 8.8). Die Grundgesamtheiten unterscheiden sich in diesem Fall. Der t -Wert für das 0,95-Quantil und 56 Freiheitsgraden kann der entsprechenden Tabelle der Students t -Verteilung entnommen werden. Der t -Wert $t(0,975; 56)$ beträgt 2,005.

$$|t| > t(1 - \frac{\alpha}{2}, n_x + n_y - 2) \quad (8.8)$$

In Tabelle 27 sind Erkennbarkeitsentfernungen sowie die Ergebnisse des t -Testes der Sehzeichen 5, 7, 9, 10 und 11 zusammengefasst. Grau hinterlegte Felder deuten auf einen signifikanten Unterschied hin. Zudem werden der Zugewinn der Erkennbarkeitsentfernung sowie die Zeitgewinne dargestellt, die aufgrund der größeren Erkennbarkeitsentfernung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten resultieren.

Tabelle 27 *Verbesserung der Erkennbarkeitsentfernungen; die Werte beziehen sich auf die Ergebnisse mit MDF. Grau hinterlegte Felder deuten auf einen signifikanten Unterschied hin. N. 2: Normal 2*

	vor Blendquelle		nach Blendquelle		Höhe Blendquelle	
	Nr. 5	Nr. 9	Nr. 7	Nr. 11	Nr. 10	Nr. 10
Sehzeichen						
Erkennbarkeitsentfernung	88,9 m	60,8 m	94,4 m	90,0 m	96,0 m	96,0 m
Zugewinn	8,4 m	1,7 m	18 m	23,2 m	22,9 m	12,5 m
Vergleichssystem	N. 2	N. 2	N. 2	N. 2	GLW	N. 2
Zeitgewinn (80 km/h)	0,38 s	0,08 s	0,81 s	1,04 s	1,03 s	0,56 s
Zeitgewinn (100 km/h)	0,30 s	0,06 s	0,65 s	0,84 s	0,82 s	0,45 s

Das Sehzeichen Nr. 5 befindet sich nach einer Rechtskurve. Die Probanden erkennen das Schild teilweise im Kurvenausgang. In diesem Moment sind sie meist noch mit Fernlicht unterwegs. Wenn bereits mit Abblendlicht gefahren wird, so wird das Quadrat aufgrund des Kurvenausganges mit dem Asymmetriezweig erfasst. Die automatischen Fernlichtsysteme beginnen hier bereits adaptiv zu entblenden. Der hohe Fernlichtanteil erklärt die insgesamt großen Erkennbarkeitsentfernungen von über 70 m für das kleine Sehzeichen. Der größte Zugewinn der Erkennbarkeitsentfernung liegt mit 8,3 m bei dem MDF und ist nicht signifikant.

Im Gegensatz dazu befindet sich das Sehzeichen Nr. 9 hinter einer Linkskurve. Das Blendobjekt ist bereits sichtbar und es ist daher meist abgeblendet. Das Quadrat wird aufgrund der Linkskurve nicht von den Asymmetriezweigen im Abblendlicht beleuchtet. Dadurch sinken die mittleren Erkennbarkeitsentfernungen im Vergleich zu Sehzeichen Nr. 5. Die adaptiven Fernlichtsysteme bieten in diesem Fall keinen Vorteil. Das Quadrat liegt auf einer Linie zwischen dem eigenen Fahrzeug und dem Blendobjekt und wird daher mit entblendet. In Verbindung mit einer besseren Sensorik könnte das GLW-System von unten näher an die Blendquelle leuchten und so Abhilfe schaffen.

Die Sehzeichen Nr. 7 und 11 befinden sich hinter den Blendquellen. Die Probanden haben im Moment der Erkennung teilweise aufgeblendet. Für Sehzeichen Nr. 7 beträgt die Erkennbarkeitsentfernung mit MDF 94,4 m. Der Unterschied zu dem System Normal 2 ist mit 18 m signifikant. An Sehzeichen Nr. 11 kommt es insgesamt zu geringeren Absolutwerten. Allerdings fallen die Verbesserungen zum manuellen System Normal 2 höher aus. Mit Matrix-Beam wird das Sehzeichen 18 m und mit MDF 23 m früher erkannt. Diese Werte sind leider nicht normalverteilt. Daher ist eine Beurteilung des Unterschiedes per t-Test nicht möglich.

Auf Höhe der Blendquellen sind die Sehzeichen Nr. 6 und Nr. 10 positioniert. Mit einem asymmetrischen Abblendlicht werden auf Höhe der Blendquelle ähnlich gute Ergebnisse erzielt wie mit den adaptiven Fernlichtsystemen. Bei Sehzeichen Nr. 6 weist das System Normal 2 deutlich höhere Erkennbarkeitsentfernungen auf als alle anderen Systeme. Das liegt in diesem Fall mitunter an der Position der Blendquelle und der zuvor durchfahrenen Rechtskurve. Zusammen mit dem Totzeitglied führt dies zu einem verzögerten Wiederein-

schalten der relevanten Lichtbereiche und schränkt so die adaptiven Fernlichtsysteme gegenüber dem System Normal 2 mit seinem ausgeprägten Asymmetriezweig ein.

Die mittlere Erkennbarkeitsentfernung des Sehzeichens Nr. 10 ist mit System Normal 2 ebenfalls ähnlich hoch wie mit Matrix-Beam. Ursache dafür sind ähnliche Beleuchtungsstärkewerte beider Systeme in diesem Bereich. Die Probanden erkennen das Sehzeichen mit MDF in einer Entfernung von 96 m. Der Unterschied zu dem nicht normalverteilten Ergebnis des Systems Normal 2 beträgt 12,5 m. Im Moment der Erkennung der Blendquelle befindet sich das GLW bereits im voll abgeblendeten Zustand. Es kann daher ebenfalls als Referenz zu einem asymmetrischen Abblendlicht gesehen werden (vgl. Abbildung 87 weiter oben). Die Unterschiede in der Erkennbarkeitsentfernung bezogen auf dieses asymmetrische Abblendlicht sind bei Matrix-Beam mit 11 m und bei MDF mit ca. 23 m jeweils signifikant.

Werden die Ergebnisse mit dem System Normal 1 verglichen, fallen die Zugewinne mit über 50 m sehr deutlich aus. Abbildung 90 zeigt diesen Vergleich. Allerdings haben die Ergebnisse nur bedingt eine Bedeutung. Im gewöhnlichen Straßenverkehr stellen Fahrzeuge mit Touristenlösung und folglich einem symmetrischen Abblendlicht eine Seltenheit dar. Allerdings kann daraus ein sehr großes Potenzial für MDF und Matrix-Beam für Objekte auf der linken Straßenseite abgeleitet werden.

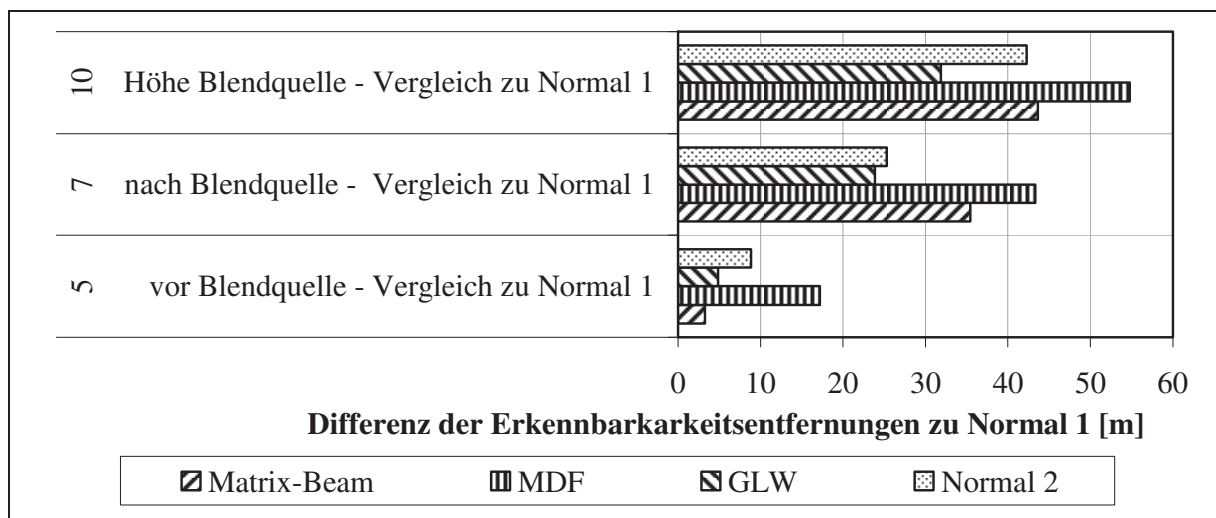


Abbildung 90 Differenzen der Erkennbarkeitsentfernungen zu dem manuellen System Normal 1

8.2.5 Diskussion

Probandenbefragung

Nach jeder Fahrt hatten die Versuchspersonen das jeweilige Fernlichtsystem in einem Fragebogen zu beurteilen. Die Bewertung war in einer Notenskala von 1 bis 5 vorzunehmen (siehe Tabelle 28).

Tabelle 28 *Bewertungsverfahren*

Note	1	2	3	4	5
Beschreibung	Trifft absolut zu	Trifft eher zu	Weiß nicht	Trifft eher nicht zu	Trifft gar nicht zu

Bei der Interpretation war darauf zu achten, dass die Fragen 3, 6, 8 und 17 sinnlich umgekehrt gestellt sind. Bei diesen bedeuten hohe Werte ein positives Ergebnis. Eine Ausnahme stellt Frage 14 dar. Der Idealfall wäre hier eine Note von 2,5. Die Fragen 11, 12 und 13 beschäftigen sich mit dem Interessantheitsgrad der Systeme und der Kaufbereitschaft der Probanden. Die Ergebnisse sind hier aufgeführt, allerdings werden sie nicht näher behandelt (siehe Tabelle 29).

Es handelt sich bei den Fragen 14, 18 und 19 um systemspezifische Fragen, die maximal nur auf ein bis maximal zwei Systeme zutreffen (siehe Tabelle 30). So trifft Frage 14 nur auf GLW und MDF zu. Die Probanden beurteilten die Übergangsgeschwindigkeit als tendenziell zu langsam. Zu beachten ist, dass bei dieser Frage eine Note von 2,5 das Optimum darstellt. Frage 18 bezieht sich mit der Schärfe der einzelnen Lichtsegmente und somit mit der Güte der optischen Rückmeldung eines Entblendungsvorganges. Je schärfer die Grenzen der Lichtsegmente sind, desto einfacher ist es für den Fahrer, das Ausschalten der Lichtsegmente wahrzunehmen. Für den verwendeten Matrix-Beam (Hybrid)-Scheinwerfer bedeutet daher eine Note von 2,22, dass der Fahrer gut erkennen kann, dass andere Verkehrsteilnehmer entblendet werden oder nicht. Er kann somit beurteilen, ob das System richtig arbeitet. Frage 19: „Das Regeln der Leuchtweite ist im Abblendlichtmodus deutlich erkennbar“, darf aufgrund einer unglücklichen Formulierung nicht näher betrachtet werden, weil sich die Leuchtweite „im“ Abblendlichtmodus nicht verändert. Gemeint war das Regeln „in den“ Abblendlichtmodus.

Tabelle 29 *Fragenkomplex der Probandenbefragung zum Interessantheitsgrad*

Fragen		Bewertung		
		GLW	MDF	M-B
11	Ich finde diese Technologie interessant.	1,57	1,62	1,14
12	Ich würde mir ein solches System als Sonderzubehör kaufen, wenn es mein Budget erlaubt.	2,18	2,55	1,93
13	Ich finde, dieses System sollte als Grundausstattung in jedes Auto (z.B. wie ABS).	2,21	2,59	2,03

Tabelle 30 Fragenkomplex der Probandenbefragung zu spezifischen Systemeigenschaften

Fragen		Bewertung		
		GLW	MDF	M-B
14	Die Geschwindigkeit des Übergangs des Fernlichtes ist...	3,12	3,30	-
18	Die Verteilung der ausgeblendeten Lichtsegmente ist deutlich erkennbar.	-	-	2,22
19	Das Regeln der Leuchtweite ist im Abblendlichtmodus deutlich erkennbar.	-	-	-

Die restlichen Fragen sind in zwei wesentliche Bereiche einzuordnen. Ziel ist es dabei herauszufinden, ob die Probanden die automatischen Systeme akzeptieren, sich an diese gewöhnen und diese schließlich als hilfreich einschätzen. Andernfalls würde der Benutzer eines solchen Systems dieses selten verwenden. In dem ersten Bereich wird die subjektive Sicherheitsrelevanz der Systeme getestet (siehe Fragen 5, 7, 8, 9, 15, 16 und 20 in Tabelle 31). Die Bewertungen von GLW und Matrix-Beam sind gut bis sehr gut. Das maskierte Dauerfernlicht erzielt ebenfalls gute Bewertungen, allerdings schneidet es schlechter ab. So wird in Frage 9 Matrix-Beam als signifikant hilfreicher erachtet als die anderen Systeme.

In dem zweiten Bereich wird mit dem Fragenkomplex 1, 2, 3, 4, 6, 10 und 17 die Akzeptanz der Systeme untersucht (siehe Tabelle 32). Grundvoraussetzung dafür ist, dass die Sensorik einwandfrei arbeitet und dass die Entblendung anderer Verkehrsteilnehmer vom Fahrer wahrgenommen wird. Alle drei adaptiven Fernlichtsysteme basieren auf derselben Kamerasensorik. Das führt zu ähnlichen Ergebnissen bei den Fragen hinsichtlich der Sensorik bzw. deren Erkennungsleistung (Fragen 4 und 6).

Tabelle 31 Fragenkomplex der Probandenbefragung zur Einschätzung der Sicherheitsrelevanz

Fragen		Bewertung		
		GLW	MDF	M-B
5	Ich kann jederzeit weit genug sehen.	1,89	1,79	1,48
7	Ein solches System erhöht die Verkehrssicherheit.	1,89	2,17	1,66
8	Mit dem System werden Fußgänger und Radfahrer mehr geblendet, als ohne das System.	3,25	2,72	3,17
9	Dieses System ist hilfreich.	1,89	1,97	1,48
15	Mit einem solchen System können Fußgänger und Radfahrer eher erkannt werden.	2,50	2,34	2,03
16	Durch das System kann ich mich mehr auf das Fahren konzentrieren.	2,00	2,07	1,62
20	Meine Sicht ist mit dem System deutlich höher als bei normalem Abblendlicht.	2,00	2,00	1,69

Tabelle 32 Fragenkomplex der Probandenbefragung zur Akzeptanz

Fragen		Bewertung		
		GLW	MDF	M-B
1	Ich fühle mich mit dem automatischen System wohl.	1,54	2,34	1,41
2	Es ist deutlich zu erkennen, dass das System den Gegenverkehr entblendet.	1,86	1,90	2,00
3	Ich würde früher abblenden als das automatische System.	3,25	3,21	3,38
4	Dieses System erkennt andere Verkehrsteilnehmer zuverlässig.	2,18	2,07	1,83
6	Ich würde später abblenden als das automatische System.	3,68	3,86	3,69
10	Ich habe nicht das Gefühl, dass andere Fahrer sich durch das System gestört fühlen.	2,50	2,62	2,41
17	Beim Fahren hatte ich das Gefühl, das Fernlicht per Hand steuern zu wollen.	4,00	3,93	4,28

Die Probanden vertrauen schnell den einzelnen Systemen. Das führt trotz der nur rund 5 km langen Strecke insgesamt zu einer hohen Akzeptanz und Gewöhnung der Probanden an adaptive Fernlichtsysteme. Mit GLW und Matrix-Beam fühlen sich die Probanden signifikant wohler als mit MDF (vgl. Frage 1).

Interessant ist, dass Matrix-Beam bei Fragen nach der Sicht und Gewöhnung an das System (siehe Fragen 5, 17 und 20) tendenziell besser abschneidet. Die objektive Probandenuntersuchung hat gezeigt, dass die Erkennbarkeitsentfernungen mit MDF aufgrund seiner höheren Beleuchtungsstärken größer sind als mit den beiden anderen adaptiven Fernlichtsystemen. Dennoch bewerten die Probanden die Sicht mit Matrix-Beam subjektiv besser (siehe Frage 20). Ursache dafür kann sein, dass Veränderungen in der Lichtverteilung bei Matrix-Beam besser erkennbar sind. Schaltvorgänge sind bei MDF und GLW im Gegensatz zu Matrix-Beam kontinuierlich.

Kritische Betrachtung der Ergebnisse

Die ermittelten Erkennbarkeitsentfernungen sind realistisch und liegen über 40 m unterhalb der Ergebnisse, die bei einem statischen Test mit MDF von Böhm gefunden wurden [Böhm07]. Die Differenz zwischen manuellen und adaptiven Fernlichtsystemen beträgt hier maximal 23 m im Vergleich zu über 30 m im statischen Fall (vgl. Tabelle 4 auf Seite 28).

Für erwartete Sehzeichen können die Erkennbarkeitsentfernungen bis zu doppelt so hoch sein als für unerwartete Sehzeichen [Völk06]. Daher sind die absoluten Entfernungen, die ermittelt wurden, nur mit Vorsicht weiterzuverwenden. Jedes Sehzeichen und jedes System ist von diesem systematischen Effekt betroffen. Daher ist die Auswirkung auf die Differenzen der Erkennbarkeitsentfernungen der einzelnen Fernlichtsysteme als gering einzuschätzen.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde nicht protokolliert, wann die Probanden auf- und abgeblendet haben. An dieser Stelle sei auf eine interessante Arbeit von Sprute verwiesen [Sprute08]. Im Anschluss an diesen Test hat er den Sachverhalt geklärt, wie lange Probanden benötigen, um auf- bzw. abzublenden, und wie viele Fehler sie dabei machen.

Abschließende Betrachtung der Ergebnisse

Mit adaptiven Fernlichtsystemen kann die Sicht maßgeblich verbessert werden. Gerade im Begegnungsverkehr, in dem die eigene Sicht durch die Blendung entgegenkommender Fahrzeuge eingeschränkt ist, werden Sehzeichen bis zu 23 m früher erkannt als mit sehr guten konventionellen Systemen.

Grundsätzlich ist zu beobachten, dass das maskierte Dauerfernlicht MDF den anderen Systemen überlegen ist. Das MDF ist durch die Bildung eines großen Schattenbereiches über allen detektierten Objekten in seiner Funktionalität gegenüber dem Matrix-Beam eingeschränkt. Allerdings kommt das bei diesem Versuchsdesign mit maximal einem zu entblendenden Objekt nicht zum Tragen.

Darüber hinaus ist die maximale Beleuchtungsstärke eines Matrix-Beam (Hybrid)-Scheinwerfers um die Hälfte geringer als die eines verwendeten Xenon-Scheinwerfers. Dieser gravierende Unterschied in der Beleuchtungsstärke resultiert in einer späteren Erkennung der Sehzeichen.

Das System Normal 2 überzeugt durch seinen ausgeprägten Asymmetriezweig im Abblendlicht. Auf Höhe der Blendquellen führt dieser zu sehr guten Ergebnissen. In Verbindung mit einem MDF oder Matrix-Beam liegt es nahe auf den Asymmetriezweig im Abblendlicht zu verzichten, da das Fernlicht diesen Bereich ohnehin ausleuchten kann. Der Vorteil bestünde darin, dass so eine symmetrische Hell-Dunkel-Grenze im Abblendlicht vorhanden wäre. Die segmentierten Fernlichtbereiche könnten in einem solchen Fall einfacher und folglich mit einer besseren Homogenität in die Lichtverteilung integriert werden. Die hiesigen Ergebnisse zeigen allerdings, dass ein Asymmetriezweig gerade bei sensorikbedingten Einschränkungen der adaptiven Fernlichtsysteme wesentlich zu einer besseren Sicht beiträgt. Daher ist von einer Substitution des Asymmetriezweiges durch Teile des Fernlichtes abzusehen.

9 Sicherheitsgewinn mit blendfreiem Fernlicht

Adaptive Fernlichtsysteme erhöhen die Erkennbarkeitsentfernung und so die Sicherheit im Straßenverkehr. Gleichzeitig führt eine durch technische Fortschritte erzielte Sicherheits-erhöhung meist zu einer Risikokompensation [Pete06]. Diese beiden Effekte werden im Folgenden näher betrachtet und quantifiziert.

9.1.1 Risikokompensation

Nach Petermann sind Fahrer normalerweise bemüht ein konstantes Beanspruchungsniveau beizubehalten [Pete06]. Die Fahrtätigkeit an sich ist selbstgetaktet und bietet Regulationsmöglichkeiten z.B. über die Geschwindigkeit. So wird es dem Fahrer möglich, das Beanspruchungsniveau konstant zu halten. Zusätzlich schreiben sich Fahrer eine hohe Handlungsfähigkeit zu. Aus psychologischer Sicht ist es daher als kritisch anzusehen, dem Fahrer über Straßengestaltungen oder fahrzeugseitige Verbesserungen subjektiv mehr Handlungsfreiräume anzubieten. Systeme, die nachts die Sicht verbessern, sind daher als kritisch einzustufen.

Die Auswirkungen der Risikokompensation sind nicht direkt messbar. In der Literatur findet sich ein lichttechnisch relevanter Fall, bei dem die Einführung einer Straßenbeleuchtung hinsichtlich der Risikokompensation betrachtet wird. Die Unfallzahlenreduktion berechnet sich theoretisch über die Zunahme der Erkennbarkeitsentfernung zu 80 %. Tatsächlich finden nach der Anbringung der Straßenbeleuchtung aber nur 30 % weniger Unfälle statt. Gründe dafür sind Verhaltenseffekte. Zum einen befahren nach ihrer Einführung mehr Personen die Strecke, die zuvor nicht dort gefahren sind. Zum anderen erhöht sich die mittlere Geschwindigkeit um 3 % und die Fahrer sind bei Beleuchtung weniger aufmerksam [Pete06].

9.1.2 Quantifizierung des Sicherheitsgewinns und der Risikokompensation

Nach Enke resultiert die Vorverlegung der Fahrerreaktion in einem erheblichen Vermeidungspotenzial von Unfällen [Enke79]. Demnach können bei einer Vorverlegung der Fahrerreaktion um 23 m mehr als 80 % aller Auffahrunfälle verhindert werden (siehe Abbildung 91). Enke untersuchte verschiedene Unfalltypen. Der Unfalltyp Auffahrunfall ist vergleichbar mit den Typen Fußgänger- und Wildunfall auf Landstraßen und wird daher herangezogen. Jeder dieser Unfalltypen ist durch Kollisionen mit einem stehenden oder sich langsam bewegenden Objekt gekennzeichnet.

Nach Untersuchungen von Sprute erhöht sich die mittlere Reisegeschwindigkeit bei Fahrten mit Fernlicht im Unterschied zu Fahrten mit Abblendlicht um ca. 5 km/h [Sprute09a]. Diese Differenz ist in verschiedenen Geschwindigkeitszonen nahezu gleich. Bei einer Grundgeschwindigkeit von 70 km/h mit Abblendlicht führt diese schnellere Fahrweise zu einem verlängerten Anhalteweg von 5,2 m.

Bei 100 km/h vergrößert sich der Anhalteweg von 77,8 m auf 84,3 m⁴⁷. Die Verkürzung der Vorverlegung der Fahrerreaktion wird in Abbildung 91 mit 6,5 m berücksichtigt und schwarz eingezeichnet. Durch die höhere Geschwindigkeit werden rund 15 % weniger Auffahrunfälle verhindert als bei gleichbleibender Geschwindigkeit. Der Netto-Sicherheitsgewinn liegt somit bei 68 %.

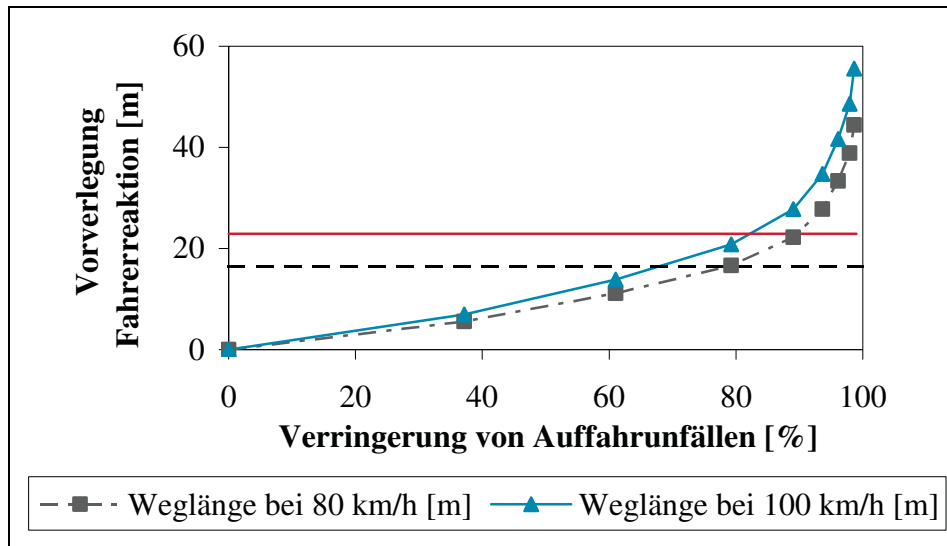


Abbildung 91 Sicherheitsgewinn durch Vorverlegung der Fahrerreaktion nach Enke [Enke79]; zusätzlich ist die Verbesserung der Erkennbarkeitsentfernung mit MDF (rot) um 23 m eingezeichnet. Die um die Risikokompensation bereinigte Erkennbarkeitsentfernung beträgt 16,5 m (schwarz, gestrichelt).

9.1.3 Abschließende Betrachtung des erwarteten Netto-Sicherheitsgewinnes

Im Rahmen der Unfallanalyse in Kapitel 3 wird das Potenzial abgeschätzt, nachts unter Tageslichtbedingungen fahren zu können. Für unbeleuchtete Objekte wie Fußgänger und Hindernisse auf der Straße ergibt sich auf Landstraßen eine mögliche Unfallzahlenreduktion von 74 % bzw. 58 %. Die über die Erkennbarkeitsentfernung nach Enke ermittelten Zahlen befinden sich mit 68 % in einem ähnlichen Bereich.

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei diesen Angaben jeweils um Schätzungen handelt. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist daher fraglich. Allerdings weisen beide Methoden eindeutig auf eine drastische Erhöhung der Straßensicherheit in Dunkelheit hin und unterstreichen somit die Wichtigkeit blendfreier Fernlichtsysteme.

⁴⁷ Die angenommene Reaktionszeit beträgt 1s. Der Bremsweg berechnet sich nach Formel 4.1 auf Seite 25.

10 Zusammenfassung

10.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mittels einer Unfallanalyse wird das Potenzial abgeschätzt, wenn nachts unter Tageslichtbedingungen gefahren werden könnte. Aufgrund einer Kontrastminimierung ist mit einer Verschlechterung für Unfallarten mit beleuchteten Objekten zu rechnen. Im Gegensatz dazu stellt sich bei Unfällen mit unbeleuchteten Objekten eine deutliche Verbesserung ein. Unter Tageslichtbedingungen würden sich demnach 58 % weniger Fußgängerunfälle ereignen. Blendfreie Fernlichtsysteme ermöglichen zwar keine Tageslichtbedingungen, dennoch erhöhen sie die Erkennbarkeit unbeleuchteter Objekte und das, ohne den Kontrast beleuchteter Objekte zu minimieren.

In zwei Versuchsträgern wird die Funktion des blendfreien LED-Fernlichtes Matrix-Beam umgesetzt und dessen technische Machbarkeit dargestellt. Zunächst wird der Versuchsträger WQ mit dem Prototypen-Scheinwerfer Matrix-Beam (Hybrid) ausgestattet, dessen Abblendlicht mit einem Xenon-Projektionsmodul realisiert wird.

Im Rahmen des Verbundprojektes des Bundesministeriums für Bildung und Forschung „Nanolux“ wird ein LED-Prototypen-Scheinwerfer entwickelt und aufgebaut. Dieser wird zusammen mit einem Stereo-Kamerasystem und einer Ansteuerlogik in den sogenannten Nanolux-Versuchsträger integriert und das Gesamtsystem in Betrieb genommen. Das Fernlicht des Scheinwerfers weist eine schmale, niedrige sowie inhomogene Lichtverteilung auf. Die notwendige scharfe Abgrenzung der einzelnen Lichtsegmente führt zu dieser Inhomogenität in der Lichtverteilung. Die konträren Anforderungen nach einer homogenen Lichtverteilung und gleichzeitig nach scharf abgetrennten Lichtsegmenten stellen wohl die größte optische Herausforderung für das blendfreie LED-Fernlicht dar. Die Leistungsfähigkeit des Stereo-Kamerasystems ist ernüchternd. Im Stereo-Betrieb versagt das System nahezu vollständig. Im Mono-Betrieb werden hohe Detektionsentfernungen erzielt, wobei Abstandsangaben nicht zuverlässig sind. Im Matrix-Beam-Betrieb, der somit nur im Mono-Betrieb möglich ist, führen Reflexionen des lichtstarken Fernlichtes zu Fehldetektionen.

Mit dem Kamerasystem im Mono-Betrieb und mit dessen bekannten Einschränkungen wird eine reale Verkehrsraumanalyse durchgeführt und die Bereiche der höchsten Objektdichte bestimmt. Zudem wird der Verkehrsraum in einer Simulation mit für Deutschland typischen Verkehrs- und Straßengeometrie-Bedingungen modelliert. Die Ergebnisse der realen und der theoretischen Verkehrsraumanalysen werden anhand ihrer horizontalen Objektdichte verglichen. Dabei zeigt sich, dass die Verkehrsraummodellierung mit einer mittleren Verkehrsdichte die realistischsten Ergebnisse liefert, wobei sich auch diese von der realen Verkehrsraumanalyse unterscheidet. Aufgrund der mangelnden Informationsdichte der realen Verkehrsraumanalyse wird für die nachfolgenden Untersuchungen dennoch auf die Daten der Verkehrsraummodellierung zurückgegriffen.

Es wird ein lichtstrombasiertes Bewertungsverfahren entwickelt, mit dem Aussagen zum Nutzungsgrad blendfreier Fernlichtsysteme sowie unterschiedlicher Fernlichtunterteilungen von Matrix-Beam möglich sind. Dabei werden einzelne Bereiche des Fernlichtes entsprechend ihres anteiligen Lichtstromes bezüglich des gesamten Fernlichtes und nicht nur nach ihrer Fläche gewichtet. Der Nutzungsgrad wird während des Befahrens eines für Deutschland typischen Streckenprofils ermittelt.

Zunächst werden Methoden zur Fernlichtsegmentierung eines Matrix-Beam-Scheinwerfers erarbeitet. Dazu zählen automatisch generierte objektbasierte Methoden sowie die Methoden zur Erlangung baugleicher Optikmodule und gleichmäßiger Schaltvorgänge. Unter der Berücksichtigung verschiedenster Einflüsse wird eine Segmentierung vorgeschlagen, mit der ein mittlerer Nutzungsgrad von 91 % erzielt wird (siehe Abbildung 62). Es hat sich gezeigt, dass vertikale Unterteilungen einen erheblich größeren Einfluss auf den Nutzungsgrad besitzen als horizontale. Daher weist der Segmentierungsvorschlag keine horizontale Unterteilung auf, womit sich die Anzahl der Lichtsegmente auf 17 beschränkt.

Ein Vergleich der Nutzungsgrade ergibt erwartungsgemäß, dass das Pixellicht das ideale Scheinwerfersystem ist, um ein blendfreies Fernlicht zu realisieren. Für dieses wird ein durchschnittlicher Nutzungsgrad von über 98 % ermittelt. Der Segmentierungsvorschlag für Matrix-Beam weist eine um zwei Größenordnungen geringere Anzahl von Lichtsegmenten auf. Dennoch beträgt dessen mittlerer Nutzungsgrad 91 %. Beim maskierten Dauerfernlicht (MDF) kann systembedingt mit je nur einem Scheinwerfer an Objekten links bzw. rechts vorbeigeleuchtet werden. Daher wird mit MDF ein Wert von 85 % erzielt. Im Vergleich dazu beträgt der Nutzungsgrad der gleitenden Leuchtweite (GLW) 76 % und die des Fernlichtassistenten (FLA) 69 % (vgl. dazu Tabelle 18).

Aufgrund der Systemeigenschaften eines blendfreien Fernlichtes sind größere Lichtbereiche zu entblenden als eigentlich notwendig. Die zusätzlich entblendeten Lichtbereiche werden in statischen bzw. dynamischen Sicherheitsbereichen zusammengefasst.

Statische Sicherheitsbereiche werden durch Einbau- und Einmesstoleranzen verursacht. Bei einer Größe unterhalb eines Winkelgrades führen statische Sicherheitsbereiche zu einer relativ geringen Nutzungsgradabnahme. Allerdings resultiert bereits eine Verdoppelung des Sicherheitsbereiches von einem auf zwei Grad in einer Vervierfachung des Verlustes auf 27 %.

Dynamische Sicherheitsbereiche werden durch Defizite der Sensorik und des Gesamtsystems hervorgerufen. Es werden die Größe der Sicherheitsbereiche, bedingt durch den Parallaxenfehler, die Latenzzeit sowie durch die Schrägstellung anderer Verkehrsteilnehmer, unter verschiedensten Bedingungen bestimmt. Im Allgemeinen steigt die Größe hin zu geringen Entfernungen erheblich an und nimmt Werte deutlich oberhalb von zehn Grad an. Es wird daher für die Matrix-Beam-Segmentierung empfohlen, die Lichtsegmente in den Außenbereichen sehr groß zu wählen.

Es werden zwei psychophysiologische Untersuchungen durchgeführt, wobei es sich jeweils um halbdynamische Fahrversuche handelt. Im ersten Versuch werden Abblenddistanzen bei Blendung durch ein LED- und ein Xenon-Scheinwerferpaar bestimmt. Ziel ist es, die Auswirkung der höheren Farbtemperatur der LED auf die damit erwartete gesteigerte psychologische Blendung zu ermitteln.

Ergebnis ist, dass LED-Scheinwerfer tendenziell zu einer höheren psychologischen Blendung führen, wobei lediglich nur geringe Unterschiede zwischen den Abblendentfernungen existieren. Diese Unterschiede sind sowohl auf die höhere Farbtemperatur als auch auf die höhere Blendbeleuchtungsstärke des LED-Scheinwerferpaares zurückzuführen. Dies führt zu dem Schluss, dass durch die Verwendung von LED-Scheinwerfern keine größeren Abblendentfernungen benötigt werden. Für die Sensorik bedeutet das, dass in Kombination mit LED-Scheinwerfern keine größere Detektionsentfernung benötigt wird.

Im zweiten Versuch werden Erkennbarkeitsentfernungen in Begegnungssituationen zwischen konventionellen und blendfreien Systemen evaluiert. Es zeigt sich, dass das MDF den anderen Systemen überlegen ist. So wird gerade im kritischen Begegnungsverkehr die Erkennbarkeitsentfernung von 73 m mit einem konventionellen System deutlich um 23 m verbessert. Zudem erlangen die neuartigen Systeme eine hohe Akzeptanz der Probanden.

Für die Tests mit Matrix-Beam stand lediglich der Versuchsträger WQ zur Verfügung. Das MDF-System weist einen erheblich breiteren Hotspot-Bereich sowie ein doppelt so hohes Beleuchtungsstärkemaximum auf als einer der Matrix-Beam (Hybrid)-Scheinwerfer. Trotz dieses erheblichen Nachteils erhöht sich die Erkennbarkeitsentfernung mit Matrix-Beam um ca. 16 m. MDF ist systembedingt eingeschränkt, weil nur mit je einem Scheinwerfer links bzw. rechts an Objekten vorbeigeleuchtet werden kann. Mit Matrix-Beam-Scheinwerfern, die eine vergleichbare Beleuchtungsstärkeverteilung wie MDF-Scheinwerfer aufweisen, sind daher grundsätzlich größere Erkennbarkeitsentfernungen möglich.

Abschließend wird der Sicherheitsgewinn von blendfreien Fernlichtsystemen qualitativ und quantitativ diskutiert. Adaptive Fernlichtsysteme erhöhen die Erkennbarkeitsentfernung um bis zu 23 m und so die Sicherheit im Straßenverkehr um bis zu 80 %. Gleichzeitig führt aber eine durch technische Fortschritte erzielte Sicherheitserhöhung zu einer Risikokompensation [Pete06], die sich meist in einer Geschwindigkeitserhöhung ausdrückt. Durch diese verlängert sich der Anhalteweg und der Sicherheitsgewinn schwindet. Unter Berücksichtigung der zu erwartenden Risikokompensation bleibt dennoch ein Netto-Sicherheitsgewinn von 68 % bestehen!

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei diesen Angaben jeweils um Schätzungen handelt. Die Genauigkeit der Ergebnisse ist daher fraglich. Allerdings weisen beide Methoden eindeutig auf eine drastische Erhöhung der Straßensicherheit in Dunkelheit hin und unterstreichen somit die Wichtigkeit blendfreier Fernlichtsysteme.

Nachfolgend sind die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit kompakt dargestellt:

- Die Funktion Matrix-Beam ist technisch realisierbar.
- Blendfreie Fernlichtsysteme werden vom Kraftfahrzeugführer schnell akzeptiert und intuitiv bedient.
- Der Asymmetriezweig des Abblendlichtes soll auch in Zukunft erhalten bleiben.
- Mit der LED als Lichtquelle sind keine größeren Abblendentfernungen und somit keine größeren Detektionserfernungen der Sensorik notwendig.
- Vertikale Unterteilungen haben einen großen Einfluss auf den Nutzungsgrad. Bereits vier vertikale Segmente erzielen Nutzungsgrade oberhalb von 90 %.
- Äußere Lichtsegmente sind aufgrund anwachsender Sicherheitsbereiche groß zu wählen.
- Um jederzeit eine sichere Entblendung gewährleisten zu können, müssen dynamische und statische Sicherheitsbereiche berücksichtigt werden.
- Änderungen der Differenzgeschwindigkeit und der Latenzzeit besitzen einen erheblichen Einfluss auf die Größe des Sicherheitsbereiches.
- Das lichtstrombasierte Bewertungsverfahren unterrepräsentiert wichtige Bereiche am Straßenrand. Dennoch ist der Lichtstrom die momentan einzige greifbare Größe.
- Blendfreie Fernlichtsysteme erhöhen theoretisch und praktisch die Sicherheit. Auch unter Berücksichtigung der Risikokompensation tragen blendfreie Fernlichtsysteme zur Straßenverkehrssicherheit bei.

10.2 Ausblick

Ein System ist nur so stark wie das schwächste Glied. Dies trifft auch für blendfreie Fernlichtsysteme und deren Sensorik zu. Zum Ende der Arbeit wird daher der bisher nicht voll funktionsfähige Nanolux-Versuchsträger mit einer neuen und besseren Kamerasensorik ausgestattet. Diese weist eine hinreichende Erkennungsleistung auf, sodass Reflexionen des Fernlichtes nur in Einzelfällen zu Fehldetektionen führen. Die Kamerasensorik liefert zudem belastbare Entfernungsangaben in Form von Entfernungsklassen. Somit ist es nun möglich, das blendfreie LED-Fernlicht in Kombination mit lichtstarken Scheinwerfern erleben zu können.

Aktuell wird in einem ersten Schritt die kameraseitige Erhöhung der Informationsdichte genutzt, um dynamische Sicherheitsbereiche in Abhängigkeit von Abstandsklassen zu implementieren. Die Einbeziehung des Kurvenradius basiert momentan auf odometrischen Werten. Dadurch kann die Schrägstellung anderer Verkehrsteilnehmer nur wage geschätzt werden. Für die Zukunft wird daher empfohlen weitere Informationsquellen bzw. Sensoriken einzubinden, um eine genauere Aussage über andere Verkehrsteilnehmer treffen zu können. Als Basis dafür können prädiktive Streckendaten, eine Car2Car-Kommunikation oder via Satelliten gestützte Daten dienen.

Die vorgestellte Aussage über Nutzungsgrade blendfreier Fernlichtsysteme beruht auf der Gewichtung der Lichtsegmente durch ihren anteiligen Lichtstrom. Dadurch werden wichtige Bereiche wie der rechte Straßenrand unterbewertet. Das Bewertungsverfahren ist somit fraglich. Der Lichtstrom stellt aktuell die einzig greifbare Größe dar und seine Berücksichtigung ist realistischer, als nur die Fläche der Lichtsegmente zu berücksichtigen. Es wird daher empfohlen, dieses Bewertungsverfahren um einen Sicherheitsaspekt zu erweitern.

Die Wirkung eines blendfreien Fernlichtes auf Entgegenkommende oder Vorausfahrende ist noch zu untersuchen. Erste Erfahrungen zeigen, dass Entgegenkommende entweder das Mehr an Licht nicht bemerken oder zumindest nicht als störend empfinden. Andere Verkehrsteilnehmer gehen anscheinend davon aus, dass mit Abblendlicht gefahren wird. Diese Annahme ist allerdings in psychophysiologischen Versuchen zu verifizieren. Gerade hinsichtlich der Zulassung solcher sogenannter „Adaptive Driving Beam“-Systeme sind diese Versuche von besonderer Relevanz.

Die gleitende Leuchtweite wird das erste dieser vorgestellten Systeme sein, das noch 2009 in Serie geht. Wenn die gesetzlichen Rahmenbedingungen geschaffen sind, scheint es nur noch eine Frage der Zeit zu sein, bis die blendfreien Fernlichtsysteme der nächsten Generation, wie maskiertes Dauerfernlicht und Matrix-Beam, folgen werden!

11 Anhang

11.1 Tabellen und Abbildungen

11.1.1 Unfallanalyse

Tabelle 33 Aufschlüsselung MAIS (Maximum Abbreviated Injury Scale) [Tenz07]

MAIS-Stufe	Bezeichnung
MAIS 0	leicht verletzt
MAIS 1	einfacher Knochenbruch
MAIS 2	mehrfacher Knochenbruch
MAIS 3	Aufenthalt Intensivstation
MAIS 4	kritisch
MAIS 5	lebensgefährlich
MAIS 6	tödlich

11.1.2 Kamerasystem

Tabelle 34 Objektklasseneinteilung der Bildverarbeitung

Objektklasse	Eigenschaften/Info	Farbliche Markierung
Scheinwerfer	entgegenkommendes Fahrzeug	Blau
Heckleuchten	vorausfahrendes Fahrzeug	Rot
Straßenlampen	statisch, netzbetrieben	Türkis
statisches Objekt allgemein	Schilder	Orange
Begrenzungsposten	Reflektor	Gelbgrün
Reflexion	auf der Fahrbahn	Gelb
Fahrzeug-Zusatzleuchten		Lila
LED-Leuchten		Rosa
unbestimmt	erkannt, aber nicht klassifiziert	Grün

11.1.3 Daten zur Modellierung des Verkehrsraumes

Tabelle 35 *Summenhäufigkeiten von horizontalen Krümmungsradien (Kurvenradien) auf Landstraßen nach Schwab [Schw03]*

Radius [m]	Summenhäufigkeit [%]	Radius [m]	Summenhäufigkeit [%]	Radius [m]	Summenhäufigkeit [%]
25	0,9	350	49,0	700	82,5
50	3,3	400	56,6	750	85,6
100	9,6	450	61,1	800	90,0
150	19,4	500	66,7	850	92,5
200	26,0	550	70,4	900	95,0
250	33,7	600	75,6	950	97,0
300	42,3	650	78,8	1000	100

Tabelle 36 *relative Häufigkeit von Kuppen und Wannen auf Landstraßen nach Kuhl [Kuhl06]*

Kuppenradius [m]	rel. Häufigkeit [%]	Wannenradius [m]	rel. Häufigkeit [%]
200	0,00	200	0,00
500	0,00	500	0,00
1000	0,25	1000	0,25
1500	0,25	1500	0,25
2000	1,00	2000	1,00
3000	2,00	3000	2,00
5000	4,50	5000	4,00
7000	4,50	7000	4,50
10000	6,00	10.000	5,50
13000	4,50	13.000	4,50
16000	4,00	16.000	3,50
20000	4,00	20.000	3,50
Ebene	40,0		

Tabelle 37 Durchschnittliche Straßenbreiten nach Damasky [Dama95]

Breite [m]	Anzahl [N/1]		Breite [m]	Anzahl [N/1]	
	Bundesstraße	Landstraße		Bundesstraße	Landstraße
3,75	-	7	6,25	239	327
4	-	21	6,5	486	335
4,25	-	35	6,75	344	113
4,5	-	123	7	431	49
4,75	-	239	7,25	313	35
5	4	514	7,5	539	-
5,25	2	599	7,75	85	-
5,5	46	813	8	137	28
5,75	93	549	8,25	4	-
6	313	602	Durchschnitt	6,85m	5,63m

Tabelle 38 Fahrzeugmaße der deutschlandweit am meisten zugelassenen Fahrzeuge im Segment [GENE08]; der Durchschnitt ist das arithmetische Mittel unter Berücksichtigung der Anzahl.

Segment	Modellreihe	Anzahl	Breite [m]	Höhe [m]	Länge [m]
Minis	Renault Twingo	435.671	1,67	1,47	3,36
Kleinwagen	VW Polo	1.489.125	1,65	1,47	3,90
Kompaktklasse	VW Golf, Jetta	3.843.270	1,76	1,49	4,20
Mittelklasse	BMW 3er	1.399.600	1,75	1,42	4,52
Obere Mittelklasse	Mercedes E-Kl.	821.383	1,82	1,45	4,82
Oberklasse	BMW 7er	72.332	1,90	1,50	5,03
Geländewagen	Toyota RAV 4	106.021	1,74	1,67	3,81
Sportwagen	Mercedes SLK	135.353	1,79	1,30	4,10
Mini-Vans	Renault Scenic	295.558	1,81	1,62	4,26
Großraum-Vans	Opel Zafira	409.938	1,74	1,63	4,32
Utilities	VW Transp.	428.747	1,90	1,95	4,90
Wohnmobile	Fiat Ducato	115.185	2,05	2,25	5,26
Durchschnitt			1,75	1,51	4,27

11.1.4 Dauerzählstellen in Bayern

Die Daten der bayrischen Dauerzählstellen wurden freundlicherweise von der Autobahndirektion Südbayern der AUDI AG für wissenschaftliche Zwecke überlassen. Die Zählstelleninformationen aus Bayern liegen für den Monat Juni 2007 (Sommer) und für den Monat Dezember 2006 (Winter) vor. In Abbildung 92 ist ein Überblick der Verteilung der Dauerzählstellen zu sehen.

Tabelle 39 Übersicht der Dauerzählstellen auf Landstraßen

Landstraße	Zählstelle	Landstraße	Zählstelle	Landstraße	Zählstelle
St2025	266	St2111	273	K M11	283
St2035	267	St2136	274	K M18	285
St2078	270	St2230	276	K M3	282
St2096	271	K LI16	284		

Tabelle 40 Übersicht der verwendeten Dauerzählstellen in Bayern; im Sommer wurden die Zählstellen 193, 222 und 251 baustellenbedingt nicht verwendet.

Bundesstraße	Zählstelle	Bundesstraße	Zählstelle	Bundesstraße	Zählstelle
B11	184	B21	216	B305	250
B12	186	B22	220	B31	226
B13	193	B23	222	B388	251
B14	197	B27	225	B469	252
B15	198	B285	237	B470	254
B16	202	B286	238	B472	259
B17	203	B299	240	B505	260
B173	236	B300	241	B512	262
B19	206	B303	242	B8	180
B2	172	B304	248	B85	299
B20	211				



Abbildung 92 Übersichtskarte der Dauerzählstellen in Bayern

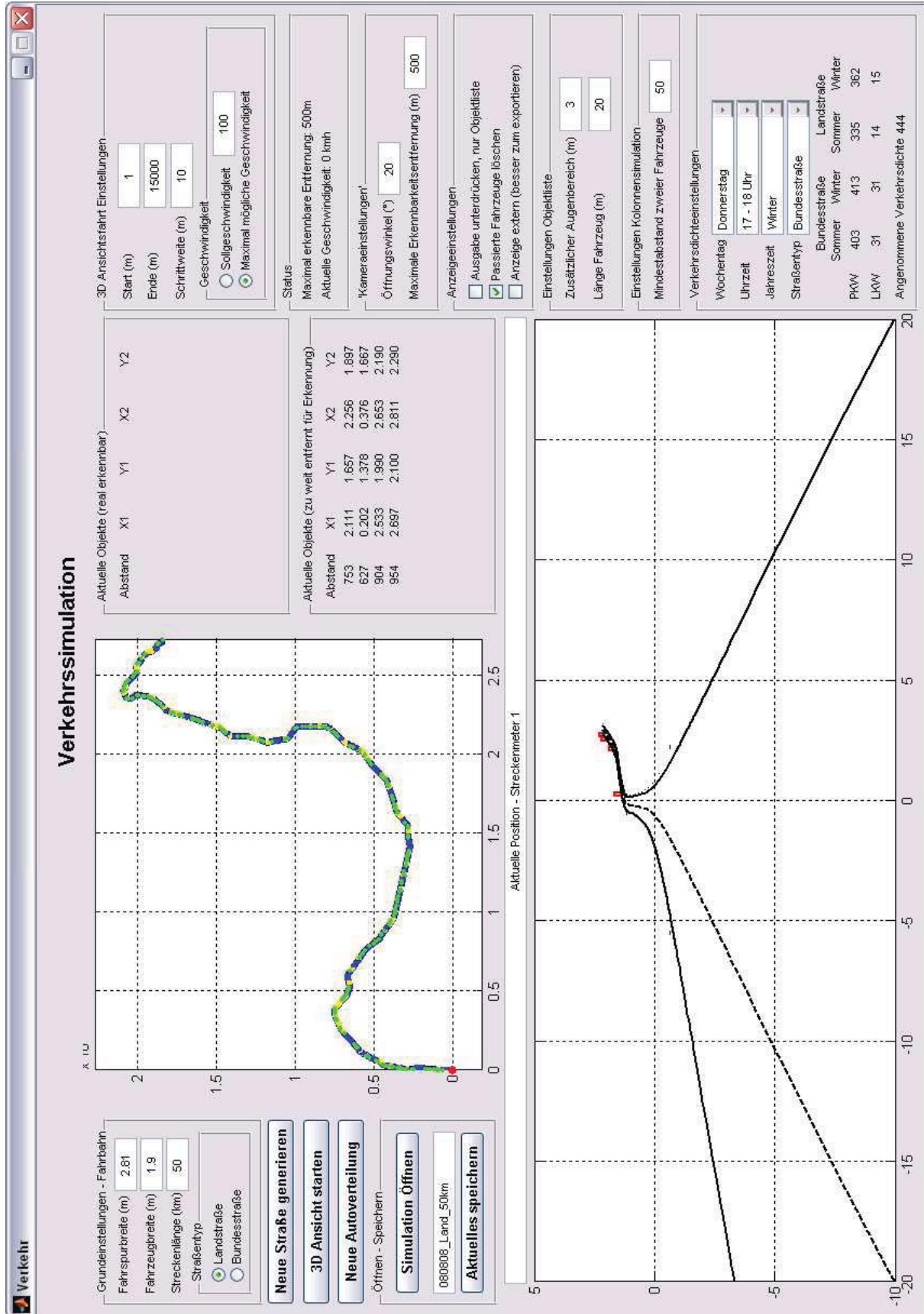


Abbildung 93 Simulationsplattform der Verkehrsraummodellierung

11.2 Verzeichnisse

11.2.1 Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1	FUNKTIONSPRINZIP EINES BLENDFREIEN LED-FERNLICHTES (MATRIX-BEAM)	3
ABBILDUNG 2	VISUALISIERUNG DES BLENDFREIEN LED-FERNLICHTES AUS DER VOGELPERSPEKTIVE	3
ABBILDUNG 3	DÄMMERUNGSARTEN (SCHEMATISCHE DARSTELLUNG)	7
ABBILDUNG 4	DURCHSCHNITTLICHES VERKEHRSAUFKOMMEN PRO STUNDE IN BAYERN	8
ABBILDUNG 5	UNFALLANALYSE NACH SULLIVAN	9
ABBILDUNG 6	BERECHNUNG DES RISIKO-ÜBERHÖHUNGSFAKTORS	10
ABBILDUNG 7	GESAMTERGEBNIS DER POTENZIALABSCHÄTZUNG AUßERORTS	12
ABBILDUNG 8	AUFBAU EINER HOCHLEISTUNGS-LED	14
ABBILDUNG 9	HALOGENGLÜHLAMPE UND GASENTLADUNGSLAMPE	16
ABBILDUNG 10	HOCHLEISTUNGS-LEDs: LUXEON REBEL UND OSRAM OS DIAMOND DRAGON	16
ABBILDUNG 11	EFFIZIENZ EINES 1-WATT-LABORMUSTERS UND OPTIMISTISCHE LEISTUNGSGRENZE	17
ABBILDUNG 12	AUFBAU DES R8 LED-SCHEINWERFERS	19
ABBILDUNG 13	ÜBERSICHT VERSCHIEDENER KONZEPTE MIT BLENDFREIEM FERNLICHT	21
ABBILDUNG 14	AUSLEUCHTSTRATEGIE GLEITENDE LEUCHTWEITE GLW	21
ABBILDUNG 15	VARIOX-MODUL DER FA. HELLA	22
ABBILDUNG 16	AUSLEUCHTSTRATEGIE MASKIERTES DAUERFERNLICHT	23
ABBILDUNG 17	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG VON ISOLUX-LINIEN DES FERNLICHTES	25
ABBILDUNG 18	AUSWIRKUNGEN VON BELEUCHTUNGSSTÄRKEN UNTER- UND OBERHALB DER HDG	26
ABBILDUNG 19	EINFLUSS DER BLAUEN ZAPFEN AUF DEN PSYCHOLOGISCHEN BLENDWERT	31
ABBILDUNG 20	NANOLUX-SCHEINWERFER UND DAS INTEGRIERTE OSRAM MULTICHIP-LED-ARRAY	32
ABBILDUNG 21	EXPLOSIONSZEICHNUNG NANOLUX-SCHEINWERFER	33
ABBILDUNG 22	OSTAR HEADLAMP LED (OSRAM OS)	33
ABBILDUNG 23	GONIOPHOTOMETERMESSUNG DES RECHTEN ABBLENDLICHTES	34
ABBILDUNG 24	GONIOPHOTOMETERMESSUNG DES RECHTEN FERNLICHTES	35
ABBILDUNG 25	PHOTOS DER LICHTVERTEILUNGEN: LINKES UND RECHTES ABBLENDLICHT	36
ABBILDUNG 26	WIRK- UND BLENDFELD EINES LICHTSEGMENTES	36
ABBILDUNG 27	ANSTEUERUNGSPRINZIP EINES LED-ARRAYS	37
ABBILDUNG 28	AUFWÄRTSWANDLER ALS KONSTANTSTROMQUELLE	37
ABBILDUNG 29	EMPFINDLICHKEITSKURVE DES BILDSENSORS KAC-00400 CMOS	38
ABBILDUNG 30	ERZEUGUNG EINES VIRTUELLEN RAHMENS UM ERKANNTE OBJEKTE	40
ABBILDUNG 31	VALIDIERUNG DER ABSTANDSSCHÄTZUNG IM MONO-BETRIEB UND STEREO-BETRIEB	42
ABBILDUNG 32	OBJEKTAGLEICH (NICHT MABSTABSGETREU)	45
ABBILDUNG 33	PARALLAXENFEHLER ZWISCHEN KAMERA UND DEM LINKEN SCHEINWERFER (SKIZZE)	46
ABBILDUNG 34	LICHTSEGMENT UND VERGRÖßERUNG DES KAMERASEGMENTS	47
ABBILDUNG 35	TOPOLOGIE NANOLUX-VERSUCHSTRÄGER	50
ABBILDUNG 36	MESSAUFBAU LATENZZEIT	52

ABBILDUNG 37	BESCHREIBUNG DES BEDIENKONZEPTES ANHAND EINES PETRINETZES	54
ABBILDUNG 38	VORKOMMEN HORIZONTALER KRÜMMUNGEN AUF LANDSTRABEN NACH SCHWAB	58
ABBILDUNG 39	RELATIVE HÄUFIGKEIT VON KUPPEN UND WANNEN AUF LANDSTRABEN NACH KUHL	58
ABBILDUNG 40	VORKOMMEN VON FAHRBAHNBREITEN NACH DAMASKY	59
ABBILDUNG 41	SCHEMATISCHER SIMULATIONSABLAUF	61
ABBILDUNG 42	REFERENZSTRECKE AUS DER VOGELPERSPEKTIVE	65
ABBILDUNG 43	OBJEKTHÄUFIGKEIT DER REFERENZSTRECKE AUF BASIS DER GEWONNENEN OBJEKTLISTE	65
ABBILDUNG 44	TRAJEKTORIE EINES ENTGEGENKOMMENDEN FAHRZEUGES	66
ABBILDUNG 45	ZUSAMMENFASSUNG AUSGEWÄHLTER 90 %-OBJEKTBEREICHE NACH DAMASKY	67
ABBILDUNG 46	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES MESSSYSTEMS	68
ABBILDUNG 47	REALE OBJEKTHÄUFIGKEITSVERTEILUNG AUF LANDSTRABEN	71
ABBILDUNG 48	REALE OBJEKTHÄUFIGKEITSVERTEILUNG AUF AUTOBAHNEN	71
ABBILDUNG 49	HÄUFIGKEITSBEREICHE DER REALEN OBJEKTDICHTEVERTEILUNG AUF LANDSTRABEN	72
ABBILDUNG 50	HÄUFIGKEITSBEREICHE DER REALEN OBJEKTDICHTEVERTEILUNG	72
ABBILDUNG 51	OBJEKTANZAHL PRO BILD AUF AUTOBAHNEN UND LANDSTRABEN	73
ABBILDUNG 52	VERGLEICH REALER UND SIMULIRTER HORIZONTALER OBJEKTDICHTEVERTEILUNGEN	75
ABBILDUNG 53	HORIZONTALE OBJEKTHÄUFIGKEIT BEI UNTERSCHIEDLICHEN VERKEHRSDICHTEN	76
ABBILDUNG 54	KURVENRADIEN DER REALEN VERKEHRSRAUMANALYSE UND DER NACH SCHWAB	77
ABBILDUNG 55	LICHTVERTEILUNG BI-XENONSCHWEINWERFER IM AUDI A8	80
ABBILDUNG 56	BETRAG DER ABWEICHUNG BEI STRECKENKÜRZUNG	82
ABBILDUNG 57	BEISPIEL EINER INDIVIDUELLEN SEGMENTIERUNG; MINDESTÖFFNUNGSWINKEL: JE 1°	84
ABBILDUNG 58	HORIZONTAL INDIVIDUELLE SEGMENTIERUNG OHNE KOPPLUNG DER BEREICHE	85
ABBILDUNG 59	HORIZONTAL INDIVIDUELLE SEGMENTIERUNG MIT VERKNÜPFUNG DER ZEILEN	85
ABBILDUNG 60	HORIZONTAL INDIVIDUELLE SEGMENTIERUNG, ADDITIV GESPIEGELT	86
ABBILDUNG 61	EINFLUSS DER SPALTEN- UND ZEILENANZAHL AUF DEN NUTZUNGSGRAD	88
ABBILDUNG 62	VORSCHLAG EINER MÖGLICHEN SEGMENTIERUNG	93
ABBILDUNG 63	AUSLEUCHTBEREICH ÜBERKOPFSCHILDER (NICHT MAßSTABSGETREU)	93
ABBILDUNG 64	SEGMENTIERUNG FÜR WEITERE UNTERSUCHUNGEN	94
ABBILDUNG 65	VERLUST DURCH STATISCHE SICHERHEITSBEREICHE	95
ABBILDUNG 66	KÜNSTLICHE ERWEITERUNG DER KAMERASEGMENTE	97
ABBILDUNG 67	SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DYNAMISCHER SICHERHEITSBEREICHE	99
ABBILDUNG 68	NÄHERUNG DURCH VERSCHIEBUNG DES KREISBOGENS	100
ABBILDUNG 69	SICHERHEITSBEREICH S IN LINKSKURVEN	102
ABBILDUNG 70	SICHERHEITSBEREICH S IN RECHTSKURVEN	103
ABBILDUNG 71	LATENZZEITBEDINGTE SICHERHEITSBEREICHE IN EINER RECHTSKURVE	106
ABBILDUNG 72	EINFLUSS DER VERKEHRSDICHTE AUF DEN NUTZUNGSGRAD	108
ABBILDUNG 73	NUTZUNGSGRAD AUF UNTERSCHIEDLICHEN STRECKEN	109
ABBILDUNG 74	EINFLUSS DER ANTEILIGEN STRECKENLÄNGE AUF DEN NUTZUNGSGRAD	110
ABBILDUNG 75	BLENDBELEUCHTUNGSSTÄRKE AM FAHRERAUGE IN VERSCHIEDENEN ENTFERNUNGEN	115
ABBILDUNG 76	STAMMDIAGRAMM ENTFERNUNG 1 „ABBLENDWUNSCH“	116

11.2 Verzeichnisse	157	
ABBILDUNG 77	STAMMDIAGRAMM ENTFERNUNG 2 „LICHTHUPE“	116
ABBILDUNG 78	AUSWIRKUNG DES VERWERFENS DES JEWEILS ERSTEN MESSWERTES PRO DURCHGANG	118
ABBILDUNG 79	KORRELATION VON ENTFERNUNG 1 ZU ENTFERNUNG 2	119
ABBILDUNG 80	VERGLEICH DES BLENDEMPFINDENS VON FAHRER UND BEIFAHNER	121
ABBILDUNG 81	STAMMDIAGRAMM MIT BEIDEN ENTFERNUNGEN, FAHRER UND BEIFAHNER ZUSAMMEN	122
ABBILDUNG 82	SUMMENHÄUFIGKEIT DER ABBLINDENTFERNUNGEN	123
ABBILDUNG 83	BLENDBELEUCHTUNGSSTÄRKE IM DETAIL	125
ABBILDUNG 84	VERSUCHSDESIGN ERKENNBARKEITSENTFERNUNGEN (NICHT MAßSTABSGETREU)	127
ABBILDUNG 85	POSITIONEN DER SEHOBJEKTE UND BLENDQUELLEN	127
ABBILDUNG 86	SCHEINWERFER MATRIX-BEAM (HYBRID)	130
ABBILDUNG 87	ABBLINDLICHT MIT SYMMETRISCHER UND ASYMMETRISCHER HELL-DUNKEL-GRENZE	130
ABBILDUNG 88	GESAMTÜBERBLICK DER MITTLEREN ERKENNBARKEITSENTFERNUNGEN	132
ABBILDUNG 89	DIFFERENZ DER ERKENNBARKEITSENTFERNUNGEN RELEVANTER SEHZEICHEN	135
ABBILDUNG 90	DIFFERENZEN DER ERKENNBARKEITSENTFERNUNGEN ZU DEM SYSTEM NORMAL 1	137
ABBILDUNG 91	SICHERHEITSGEWINN DURCH VORVERLEGUNG DER FAHRERREAKTION NACH ENKE	143
ABBILDUNG 92	ÜBERSICHTSKARTE DER DAUERZÄHLSTELLEN IN BAYERN	153
ABBILDUNG 93	SIMULATIONSPLATTFORM DER VERKEHRSRAUMMODELLIERUNG	154

11.2.2 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1	VERHÄLTNISS DER UNFALLDATEN NACH TENZER	8
TABELLE 2	POTENZIALABSCHÄTZUNG AUßERORTS	11
TABELLE 3	AKTUELLE EIN-CHIP-HOCHLEISTUNGS-LEDS	16
TABELLE 4	STATISCHE ERKENNBARKEITSENTFERNUNG MIT MDF NACH BÖHM07	28
TABELLE 5	9-STUFIGE DE BOER-SKALA: BLENDWERT W BEI PSYCHOLOGISCHER BLENDUNG	30
TABELLE 6	KENNWERTE DES NANOLUX-SCHEINWERFERS	34
TABELLE 7	DURCHSCHNITTLLICHE MAßE VON PKWs IN DEUTSCHLAND	60
TABELLE 8	SIMULATIONSPARAMETER	62
TABELLE 9	ÜBERSICHT DER LÄNGEN UNTERSCHIEDLICHER STRECKENPROFILE	69
TABELLE 10	NUTZUNGSGRAD H NACH UNTERSUCHUNGEN VON ROSLAK	81
TABELLE 11	NUTZUNGSGRAD H BEI HORIZONTAL INDIVIDUELLER UNTERTEILUNG	88
TABELLE 12	NUTZUNGSGRAD BEI GLEICHMÄßIGEM SCHALTEN VON LICHTSEGMENTEN	89
TABELLE 13	PAARVERGLEICH DER BEWERTUNGSKRITERIEN FÜR EINEN MATRIX-BEAM-SCHEINWERFER	90
TABELLE 14	VERGLEICH DER UNTERSCHIEDLICHEN METHODEN ZUR SEGMENTIERUNG	90
TABELLE 15	NUTZUNGSGRAD UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES PARALLAXENFEHLERS	98
TABELLE 16	MINDESTRADIIEN R NACH DEN RICHTLINIEN ZUR ANLAGE VON STRAßEN	105
TABELLE 17	SCHÄTZUNG DES NUTZUNGSGRADES BLENDFREIER FERNLICHTSYSTEME	108
TABELLE 18	DURCHSCHNITTLLICHE NUTZUNGSGRAD E BLENDFREIER FERNLICHTSYSTEME	111
TABELLE 19	EINSCHÄTZBARKEIT VON LICHTQUELLEN	117
TABELLE 20	KORRELATIONSKOEFFIZIENT ZWISCHEN ENTFERNUNG 1 UND 2 MIT UND OHNE "AUSREIßER"	120
TABELLE 21	VERGLEICH DES BLENDEMPFINDENS VON FAHRER UND BEIFAHNER	120

TABELLE 22	ZUSAMMENFASSUNG DER ABBLENDENTFERNUNGEN	122
TABELLE 23	AUSZUG AUS DER PROBANDENBEFRAGUNG: BLENDENPFINDEN DER SCHEINWERFER	124
TABELLE 24	POSITIONEN DER SEHOBJEKTE FÜR DEN ZWEITEN PROBANDENTEST	128
TABELLE 25	LISTE DER VERSUCHSFAHRZEUGE FÜR DEN ZWEITEN PROBANDENTEST	129
TABELLE 26	ERKENNBARKEITSENTFERNUNGEN DER EINZELNEN SEHZEICHEN	133
TABELLE 27	VERBESSERUNG DER ERKENNBARKEITSENTFERNUNGEN	136
TABELLE 28	BEWERTUNGSVERFAHREN	138
TABELLE 29	FRAGENKOMPLEX DER PROBANDENBEFRAGUNG ZUM INTERESSANTHEITSGRAD	138
TABELLE 30	FRAGENKOMPLEX DER PROBANDENBEFRAGUNG ZU SPEZIFISCHEN SYSTEMEIGENSCHAFTEN	139
TABELLE 31	FRAGENKOMPLEX DER PROBANDENBEFRAGUNG ZUR SICHERHEITRELEVANZ	139
TABELLE 32	FRAGENKOMPLEX DER PROBANDENBEFRAGUNG ZUR AKZEPTANZ	140
TABELLE 33	AUFSCHLÜSSELUNG MAIS (MAXIMUM ABBREVIATED INJURY SCALE)	149
TABELLE 34	OBJEKTKLASSENEINTEILUNG DER BILDVERARBEITUNG	149
TABELLE 35	SUMMENHÄUFIGKEITEN VON HORIZONTALEN KRÜMMUNGSRADIEN NACH SCHWAB	150
TABELLE 36	RELATIVE HÄUFIGKEIT VON KUPPEN UND WANNEN AUF LANDSTRABEN NACH KUHLMANN	150
TABELLE 37	DURCHSCHNITTLICHE STRABENBREITEN NACH DAMASKY	151
TABELLE 38	FAHRZEUGMAÙE DER DEUTSCHLANDWEIT AM MEISTEN ZUGELASSENEN FAHRZEUGE	151
TABELLE 39	ÜBERSICHT DER DAUERZÄHLSTELLEN AUF LANDSTRABEN	152
TABELLE 40	ÜBERSICHT DER VERWENDETEN DAUERZÄHLSTELLEN IN BAYERN	152

11.2.3 Abkürzungsverzeichnis

ABBL	Abblendlicht
ACC	Adaptive Cruise Control
ADTF	Automotive Data and Time triggered Framework
AEV	Audi Electronics Venture GmbH
asb	Apostilb: Maßeinheit für die Leuchtdichte einer nicht selbstleuchtenden Fläche
KBA	Kraftfahrt Bundesamt
CCD	Charge Coupled Devices
CLEPA	Comitè de Liaison de la Construction des Equipements et de Pièces d'Automobiles
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CoP	Conformity of Production: Nachprüfung von SW aus Serienproduktion
DMD	Digital Micromirror Device
DRL	Daytime Running Light: Tagfahrlicht
DST	Daytime Saving Time: 1h Uhrumstellung Sommer-/Winterzeit
DTV	durchschnittliches tägliches Verkehrsaufkommen
EDEL	Enhanced Driver's Perception in Poor Visibility
FAKRA	Fachnormenausschuss für Kraftfahrzeugtechnik
FARS	Fatality Analysis Reporting System - eine Unfall-Datenbank der NHTSA

FKT	Fachausschuss für Kraftfahrzeugtechnik
FL	Fernlicht
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
FRA	Fahrtrichtungsanzeiger (Blinker)
GIDAS	German In-Depth Accident Study (Unfalldatenbank)
GRE	Groupe de Rapporteurs sur l'Eclairage
GPS	Global Positioning System
GTB	Groupe de Travail de Bruxelles
HAV	Hinweise zum Anbringen von Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen
HDG	Hell-Dunkel-Grenze
HID	High-pressure Discharge Lamps
JARI	Japan Automotive Research Institute
KBA	Kraftfahrtbundesamt
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
NCAP	New Car Assessment Programme
NHTSA	U.S. National Highway Traffic Safety Administration
NSL	Nebelschlussleuchte
NSW	Nebelscheinwerfer
OECD	Organisation for Economic Co-Operation and Development
OICA	Organisation Internationale de Constructeurs d'Automobile
RAS-L	Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil Linienführung
SA	Sonderausschuss
SAE	Society of Automotive Engineers
SEPIC	Single Ended Primary Inductance Converter
SMD	Surface Mounted Device
SRA	Scheinwerferreinigungsanlage
SVRD	Single Vehicle Road Departure
SW	Scheinwerfer
UHP	Ultra High Performance (Lampe)
UMTRI	University of Michigan Transportation Research Institute
VKD	Verkehrsdichte (Kfz/h)
WP	Working Party
WVGA	Wide Video Graphics Array

11.3 Literatur

- [Acke05] Ackermann, R.: Optical Approach for LED-Headlamps. Automotive Lighting Reutlingen, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2005
- [Acke07] Ackermann, R.: Effects of LED Roadmaps on Headlamp Main Functions. Automotive Lighting Reutlingen, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2007
- [ABD05] Autobahndirektion Südbayern: Verkehrsmengenatlas zur Straßenverkehrszählung Bayern, herausgegeben von der Autobahndirektion Südbayern, München, 2005
- [ABD07] Autobahndirektion Südbayern: Zählstellendaten der Monate Dezember 2006 und Juni 2007. Freundliche Bereitstellung dieser Daten, 2007
- [Adle73] Adler, B.: Three Beam Headlight Evaluation. PB-Report 221614, 1973, zitiert in [Schw03]
- [Bart98] Barthel, R.: Flussvermessung mit einem Stereo-Kamerasystem. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 1998
- [Berl07] Berlitz, S.: LED is now – what is next? AUDI AG, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2007
- [Berl08] Berlitz, S.: Strengthening the Brand Image with HB-LEDs. LEDs 2008, San Diego, 2008
- [Biso06] Bisogno, F. E.; Nittayarumphong, S.: A Line Power-Supply for LED Lighting using Piezoelectric Transformers in Class E Topology. Proc. CES/IEEE 5th International Power Electronic and Motion Control Conference IPEMC '06, Band 2, 2006, zitiert in [Wern06]
- [Bock87] Bockelmann, W. D.: Auge Brille Auto. 2. völlig neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1987
- [Böhm07] Böhm, M.; Kley, F.; Kalthoff, S.: Improving Detection Distances by an Adaptive Cut-Off Line System. L-Lab, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2007
- [Brod05] Brod, R., Zeller, A. (beide BMW Group, München); Falb, D. (Gentex Corporation, Zeeland/USA); Schaudel, C. (Gentex GmbH, Erlenbach): Fernlichtassistent (High-Beam Assist). VDI Berichte Nr. 1907, Baden-Baden, 2005
- [CAN106] G.I.N. mbH: CANlog 3 Handbuch. Gesellschaft für Industrielle Netzwerke mbH., Griesheim, 2006
- [CIE07] CIE-TC4: Scheinwerfertest in Balocco - Daten für Erkennbarkeitsentfernungen mit Fernlicht. Balocco (Italien), 2007

- [Cohe87] Cohen, A. S.: Blickverhalten und Informationsaufnahme von Kraftfahrern. Forschungsbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bericht Nr.168, Bergisch Gladbach, 1987
- [Dama95] Damasky, J.: Lichttechnische Entwicklung von Anforderungen an Kraftfahrzeugscheinwerfer. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 1995
- [Deci08] Decius, N.: Schaltungsanordnung zur elektrischen Ansteuerung eines Kraftfahrzeug-Scheinwerfers. Offenlegungsschrift DE 10 2006 031 679 A1, Hella KGaA Hueck & Co., Lippstadt, 2008
- [deBo71] De Boer, J. B., Schmidt-Claussen, H. J.: Über die zulässige Blendung in der Kraftfahrzeugbeleuchtung. CIE-Publ. P-7139-XVII Session, Barcelona, 1971
- [Derl05] van Derlofske, J.; Bullogh, J. D.; Watkinson, J.: Spectral Effects of LED Forward Lighting Renssealer Polytechnic Institute, USA, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2005
- [Diec07] Dieckmann, H.: Scheinwerfer-Test. Auto Bild, Heft 42, Hamburg, 2007
- [Diem04] Diem, C.: Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr. Dissertation, Herbert Utz Verlag, München, 2004
- [DIN 70000] Deutsche Industrienorm 70.000: Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten, deutsche Übersetzung mit Modifizierungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994
- [dSPA08] dSPACE GmbH: Bedienungsanleitung dSPACE MicroAutobox. Paderborn, 2008
- [ECE-R48] ECE Regulation No. 48: Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles to the Installation of Lighting and Light-signalling Devices. Economic Commission for Europe, letzte Änderung 2006
- [ECE-R98] ECE Regulation No. 98: Uniform Provisions concerning the Approval of Motor Vehicle Headlamps equipped with Gas-Discharge Light Sources. Economic Commission For Europe, letzte Änderung 2003
- [ECE-R99] ECE Regulation No. 99: Uniform Provisions Concerning the Approval of Gas-Discharge Light Sources for use in Approved Gas-Discharge Lamp Units for Motor Vehicles. Economic Commission For Europe, letzte Änderung 2004
- [ECE-R123] ECE Regulation No. 123: Uniform Provision Concerning of the Approval of adaptive Front-Lighting Systems for Motor Vehicles. Economic Commission For Europe, in Kraft seit 2007
- [Ecke93] Eckert, M.: Lichttechnik und optische Wahrnehmungssicherheit im Straßenverkehr. Verlag Technik, Berlin, 1993
- [Elsn90] Elsnner, A.: Planungsrelevante Kenngrößen des Bundesfernstraßennetzes. Straße und Autobahn, Heft 6, Bonn, 1990
- [Ende01] Enders, Dr. M.: Pixel Light. BMW AG, Progress in Automobile Lighting (PAL), Darmstadt, 2001

- [Engl07] Engl, M.; Muschaweck, J.: LEDs for Headlamps. Osram Opto Semiconductor, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2007
- [Enke79] Enke, K.: Möglichkeiten zur Verbesserung der aktiven Sicherheit innerhalb des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug-Umgebung. 7. Tagung über Sicherheitsfahrzeuge, Paris, 1979
- [Flan03] Flannagan, M. J. (University of Michigan); Flanigan, C. (NHTSA): Development of a Headlighting Rating System. Progress in Automobile Lighting (PAL), Darmstadt, 2003
- [Fles05] Flesch, Dr. P.: HID Lamps. Habilitationsschrift, Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe (TH), 2005
- [Föll94] Föllinger, O.: Regelungstechnik - Einführung in die Methoden und ihre Anwendungen, 8. überarbeitete Auflage. Hüthig Buch Verlag, Heidelberg, 1994
- [Fran06] Franzke, D.: Einfluss ambierter Beleuchtung auf das Kontrastsehvermögen. Diplomarbeit, Fachhochschule Jena, durchgeführt am Lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [Funk09] Funk, C.: Heterogeneous Datafusion to control a predictive Bending Light. AUDI AG Ingolstadt, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2009
- [Gist90] Gistl, E., Dr. med.: Überwachung von Glühlampen. Offenlegungsschrift, DE 40 10 627 A1, Neuwied, 23.01.1990
- [Hamm00] Hamm, M.; Friedrich, A.: Intelligente adaptive Scheinwerfersysteme: Die Fahrzeugaußenbeleuchtung der Zukunft. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Heft 12, Wiesbaden, 2000
- [Hamm05] Hamm, M.: LED-Revolution in Headlamp Optics, Mechanics, Thermomanagement and Styling. International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2005
- [Heer04a] Heering, W.: Optoelektronik 2. Vorlesungsfolien, Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe (TH), 2004
- [Heer04b] Heering, W.: Optoelektronische Schaltungen. Vorlesungsfolien, Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe (TH), 2004
- [Hell08] Hella KG a. A. Hueck & Co.: Explosionszeichnung des Nanolux-Scheinwerfers. Freundliche Bereitstellung des Bildes, Lippstadt, 2008
- [Hend01] Hendrichk, W.: From Xenon, Bi-Xenon to Vario-Xenon. Progress in Automobile Lighting (PAL), Darmstadt, 2001
- [Hilg08] Hilgenstock, J.; Schneider, A.; Kirchner, A.: Verfahren zur Bestimmung einer Eigenschaft für den Betrieb eines Kraftfahrzeugs und entsprechend ausgestaltetes Kraftfahrzeuges. Offenlegungsschrift DE 10 2008 011 699 A1, Volkswagen AG, Wolfsburg, 25.09.2008

- [Hohm05] Hohm, A.: Physiologische und Photometrische Untersuchungen zur Herleitung von Randbedingungen für eine Ablendautomatik. Studienarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2005
- [Hopp01] Hoppe, G.: Schaltung zur Überwachung der Funktion einer Leuchtdiode. Offenlegungsschrift, DE 100 18760 A1, Volkswagen AG, Braunschweig, 18.01.2001
- [Huhn99] Huhn, W.: Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung im Rahmen der ECE-Regelungen. Dissertation, Herbert Utz Verlag, München, 1999
- [Huhn08] Huhn, Dr. W.: Low Energy Automotive Lighting. AUDI AG, Convergence, Detroit, 2008
- [Inab08] Inaba, T.; Watanabe (Koito Manufacturing), S.; Yamady, Y. ((Toyota Motor Corporation): LED Headlamp Development for Mass Production. SAE World Congress 2008, SAE 2008-01-0339, Detroit, 2008
- [Jari04] JARI (Japan Automotive Research Institute): Glare Effects of white Light with LED in different Color Temperature. Meeting GTB LED Task Force, Karlsruhe, Oktober 2004
- [Jeba06] Jebas, C.: Untersuchung des Einflusses von Vorfeld- und Seitenausleuchtung auf die Erkennbarkeitsentfernung von Sehobjekten. Diplomarbeit, Fachhochschule Jena, durchgeführt am Lichttechnischen Institut der Universität Karlsruhe (TH), 2006
- [Kalz07] Kalze, F. J.; Schmidt, C.: Dynamic Cut-Off-Line Geometry as the next Step in Forward Lighting beyond AFS. Hella KGaA Hueck & Co., International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2007
- [Karl98] Karlsson, A.: Partial Dimming System. Produktbeschreibung, Räfskult, 1998, zitiert in [Schw03]
- [Kasp07] Kasper, D.: Entwurf und Design einer ambienten Innenraumbelichtung im Audi A8. Studienarbeit, Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe (TH), 2007
- [Klie07] Kliebisch, D.; Völker, S.: Measurement and calculation of detection distances of headlamp light distributions. L-Lab, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2007
- [Koda07] Kodak Image Sensor Solutions: Device Performance Specification: KODAK KAC-00400 Image Sensor. Eastman Kodak Company, www.kodak.com/go/imagers, September 2007
- [Koen07] Koennig, T. (Hella KGaA Hueck); Amsel, C. (Hella KGaA Hueck); Hoffmann, I. (Hella-Aglaiia GmbH): Light has to go where it is needed – Future Light Based Driver Assistance Systems. International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2007

- [Köth08] Köth, K.: Auslegung der Kraftfahrzeugbeleuchtung anhand neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse hinsichtlich Sicht und Sichtbarkeit. Dissertation, Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe (TH), 2008
- [Koko03] Kokoschka, S.: „Grundlagen der Lichttechnik“, Skript zur Vorlesung, Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe(TH), Juli 2003
- [Kuhl06] Kuhl, P.: Anpassung der Lichtverteilung an den vertikalen Straßenverlauf. Dissertation, Universität Paderborn und BMW AG, 2006
- [Lang97] Langwieder, K.; Bäuml, H.: Charakteristik von Nachtunfällen, Progress in Automobile Lighting (PAL), Darmstadt, 1997
- [Lemm04] Lemmer, U.: Optoelektronik 1. Vorlesungsfolien, Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe (TH), 2004
- [Lemm05] Lemmer, U.; Manz, K.; Kooß, D.; Klinger, K.: Automoblile Licht- und Displaytechnik – Lichtquellen. Vorlesungsfolien, Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe (TH), 2005
- [Lipp00] Lipp, H. M.: Grundlagen der Digitaltechnik. 3. korrigierte Auflage, Oldenbourg Verlag, München, Wien, 2000
- [Manz97] Manz, K.: About Criticism of Headlamps with Gas Discharge Lamps. Progress in Automobile Lighting (PAL), Darmstadt, 1997
- [Meff07] Mefford, M. L.; Flanagan, M. J.; Bogard, S.E.: Real-World Use of High-Beam Headlamps. International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2007
- [Neub00] Neubert, L.: Statistische Analyse von Verkehrsdaten und Modellierung von Verkehrsfluss mittels zellulärer Automaten. Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität, Duisburg, 2000
- [Osra09a] Osram GmbH: Lichtprogramm 2009/2010 Fahrzeuglampen. München, 2009
- [Osra09b] Osram Opto Semiconductor: Datasheet Diamond Dragon LW W5AP. Regensburg, 2009
- [Pete06] Petermann, I.; Weller, G.; Schlag, B.; Carraro, U.: Mehr Licht - Mehr Sicht - Mehr Sicherheit? Der Einfluss unterschiedlicher Lichtverhältnisse auf das Fahrverhalten. Literaturstudie im Auftrag der Volkswagen AG, Abteilung für Unfallforschung, Technische Universität Dresden, 2006
- [Phil08] Philips Lumileds Lighting Company: Luxeon K2 - technical Datasheet DS51. San Jose, 2008
- [Phil09a] Philips: Philips EcoVision Autoscheinwerferlampe - H7 12 V 55 W (12972ECO). Koninklijke Philips Electronics N.V., Datenblatt, Aachen, 2009
- [Phil09b] Philips Lumileds Lighting Company: Luxeon Rebel ANSI binned - technical Datasheet DS63. San Jose, 2009

- [RAS-L] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Straßen RAS, Teil Linienführung, RAS-L. FGSV Verlag, Köln, 1995
- [RAS-Q] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Anlage von Straßen RAS, Teil Querschnitt, RAS-Q. FGSV Verlag, Köln, 1995
- [Ried89] Riedwyl, H.: Angewandte Statistik. Verlag Paul Haupt, Bern, 1989
- [Ripp01] Ripperger, J.: Lichttechnische Anforderungen an Schluss- und Bremsleuchten für Kraftfahrzeuge. Dissertation, Herbert Utz Verlag, München, 2001
- [Rosl05] Roslak, J.: Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums. Dissertation, Universität Paderborn, 2005
- [Ruma70] Rumar, K.: Die Wirksamkeit herkömmlicher, neuer und zukünftiger Fahrzeugbeleuchtungssysteme. 10. Internationale Studienwoche für Straßenverkehrstechnik und Verkehrssicherheit, Rotterdam, 1970
- [Ruma01a] Rumar, K.: Intensity of High-Beam Headlights. The University of Michigan, Progress in Automobile Lighting (PAL), Darmstadt, 2001
- [Ruma01b] Rumar, K.: Night traffic and the zero vision. The University of Michigan, Progress in Automobile Lighting (PAL), Darmstadt, 2001
- [Sach02] Sachs, L.: Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002
- [Saue06] Sauerlander, G.; Hente, D.; Radermacher, H.; Waffenschmidt, E.; Jakobs, J.: Driver Electronics for LEDs. Hente, D. (Herausgeber): 41st IAS Annual Meeting Industry Applications, Conference Record of the 2006 IEEE, Band 5, 2006, zitiert in [Wern08]
- [Scha07] Schaudel, C.; Falb, D.: SmartBeam – a High-Beam Assist. Gentex Corporation, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2007
- [Schi08] Schiller, C.; Khanh, T. Q.: Psychologische Blendung bei Halogen und Xenon-scheinwerfern. VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, September 2008
- [Schm79] Schmidt-Clausen, H.-J.: Über die Verbesserung der Sehleistung im Begegnungsverkehr durch das kontinuierliche Abblenden (Dimmen) des Fernlichtes. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift, Heft 9, Wiesbaden, 1979
- [Schm92] Schmidt-Claussen, H.-J.; Damasky, J.; Wambganß, H.: Foreground Illumination – Comfort Aspects und Reflected Glare On Wet Roads. TH Darmstadt, Final Report Eureka Projekt 273 VEDILIS, Eindhoven, 1992
- [Schw03] Schwab, G.: Untersuchungen zur Ansteuerung adaptiver Kraftfahrzeugscheinwerfer. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, DER ANDERE VERLAG, Ilmenau, 2003

- [Schü97] Schürmann, B.: Rechnerverbindungsstrukturen – Bussysteme und Netzwerke. Lehrbuch, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft m.b.H., Braunschweig, Wiesbaden, 1997
- [Siva05] Sivak M.; Schoettle B.; Minoda T.; Flannagan M.J.: Blue Content of LED Headlamps and Discomfort Glare. University of Michigan, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2005
- [Spru07] Sprute, J. H.; Khanh, T. Q.: Approval Requirements for a Front-Lighting System with Variable Cut-Off Line in Europe. Technische Universität Darmstadt, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2007
- [Spru06] Sprute, J. H.: Automobil-Lichttechnik. Institutsbericht 2005-2006, Institut für Elektromechanische Konstruktionen (EMK) der Technischen Universität Darmstadt, 2006
- [Spru08] Sprute, J. H.; Khanh, T.Q.; Haferkemper, N., Reeber, D.: Influence of New High Beam Assistance Systems on Driver Behavior and their Potentials. Vision, 2008
- [Spru09] Sprute, J. H.; Haferkemper, N.; Schiller, C.; Khanh, T.Q.: Implications of Adaptive High Beam Headlighting Systems for Discomfort and Disability Glare. In SAE International Worldcongress 2009, Technische Universität Darmstadt, 2009
- [Spru09a] Sprute, J. H.: Entwicklungsbegleitende Untersuchungen zum Fahrerassistenzsystem „Gleitende Leuchtweite“. Forschungsbericht 82-08, Technische Universität Darmstadt, April 2009
- [Stat07] Stath, Dr. N.: Zusammenfassung des Nanolux-Status-Treffens. Osram OS, Regensburg, März 2007
- [Stat08] Stath, Dr. N.: Zusammenfassung des Nanolux-Status-Treffens. Osram OS, Regensburg, September 2008
- [STVO02] Straßenverkehrsordnung STVO. Kirschbaum Verlag, Bonn, 2003
- [Sull02] Sullivan, J. M., Flannagan, M. J.: The Role of Ambient Light Level in Fatal Chashes”. Accident Analysis and Prevention 34, Elsevier Information System GmbH, Frankfurt, 2002
- [Sull07] Sullivan, J.M., Flannagan, M. J.; Bogard, S.E.: Development of Headlight Rating System. International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt,
- [Tane07a] Taner, A.: NightVision: Comfort Feature or Gimmick? AUDI AG, International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2007
- [Tane07b] Taner, A.: Vergleich verschiedener Systeme zur Sichtverbesserung bei Nacht in Personenkraftwagen. Dissertation, Technische Universität München, 2007

- [Tenz06] Tenzer, A.: Analyse des Unfallgeschehens bei eingeschränkter Sicht. VW-Konzernunfallforschung, Wolfsburg, September 2007
- [Tenz07] Tenzer, A.: Unfallanalyse zum Thema Maskiertes Dauerfernlicht. VW-Konzernunfallforschung, Wolfsburg, September 2007
- [Trot78] Trotter, J.: Das Auge. 5. Auflage, DOZ-Verlag Optische Veröffentlichung, Heidelberg, 1978
- [vHof03] von Hoffmann, A. : Lichttechnische Anforderungen an adaptive Kraftfahrzeugscheinwerfer für trockene und nasse Fahrbahnoberflächen. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2003
- [VIZ06] Radke, S.: Verkehr in Zahlen. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW), Deutscher Verkehrs-Verlag GmbH, Hamburg, 2006
- [Völk06] Völker, S.: Hell- und Kontrastempfinden - ein Beitrag zur Entwicklung von Zielfunktionen für die Auslegung von Kraftfahrzeugscheinwerfern. Habilitationsschrift, Paderborn, 2006
- [Wata07] Watanabe, S. (Toyota Motor Corporation); Watanabe, S. (Koito Manufacturing): Development of LED Headlamp. International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, 2007
- [Wegw08] Wegwerth, C.; Thomschke, S.; Laschinsky, Y.; Gonter, M.: Active Safety Light. Volkswagen AG, Group Research Integrated Light and Safety, Vision 2008, Stuttgart 2008
- [Wern08] Werner, T.: Jahresabschlussbericht 2008 - Innovative Ansteuerung, Energieverteilung und Kontaktierung für moderne LED-Beleuchtungssysteme in Kraftfahrzeugen. Forschungsprojekt, Institut für angewandte Forschung IAF der FH Ingolstadt, erstellt im Auftrag der AUDI AG, Ingolstadt, 2008
- [Zobe08] Zobel, Dr. R.: Unfallanalyse maskiertes Dauerfernlicht - Ergänzungen. VW-Konzernunfallforschung, Wolfsburg, Februar 2008

Internet:

- [ADAC08] ADAC: ADAC Statistiken -Straßenlängen.
www.adac.de/verkehrs-experten, Seite zuletzt besucht am 9.06.2008
- [GENE08] GENESIS-Datenbank des statistischen Bundesamtes:
www.statistik-portal.de/statistik-portal/GenesisUebersicht.asp.
Seite zuletzt besucht am 20.06.2008
- [KBA08] Kraftfahrtbundesamt: www.kba.de. Seite zuletzt besucht am 28.09.2008

11.4 Betreute Arbeiten

- [Eibl08] Eibl, W.: Optoelektronische Ansteuerungen. Diplomarbeit in Zusammenarbeit der Fachhochschule Nürnberg und der AUDI AG, Ingolstadt, Juni 2008
- [Hübb08] Hübbel, A.: Entwicklung eines lizenzfreien Generatorblockes für CAN-Botschaften. Praktikum, Fachhochschule der Bundeswehr Neubiberg, Audi AG Ingolstadt, August 2008
- [Jobs07] Jobstvogt, J.: Untersuchung eines LED-Scheinwerfers. Praktikum, AUDI AG, Ingolstadt, Oktober 2007
- [Jobs08] Jobstvogt, J.: Sicherheitsgewinn durch ein blendfreies LED-Fernlicht. Diplomarbeit in Zusammenarbeit der Technischen Universität Braunschweig und der AUDI AG, Ingolstadt, Mai 2008
- [Kolt08a] Kolter, S.: Ansteuerung des Nanolux-Scheinwerfers mit einem CANlog3. Praktikum, AUDI AG, Ingolstadt, März 2008
- [Kolt08b] Kolter, S.: Ansteuerung eines LED-Arrays. Diplomarbeit in Zusammenarbeit der Fachhochschule Köln und der AUDI AG, Ingolstadt, August 2008
- [Rabe08a] Rabel, P.: Programmierung einer Ansteuerumgebung für ein LED-Array in Matlab und CANoe. Praktikum, AUDI AG, Ingolstadt, Mai 2008
- [Rabe08b] Rabel, P.: Verkehrsraumanalyse zur Optimierung der Segmenteinteilung eines blendfreien LED-Fernlichtes. Diplomarbeit in Zusammenarbeit des Lichttechnischen Institutes der Universität Karlsruhe (TH) und der AUDI AG, Ingolstadt, November 2008
- [Totz07] Totzauer, A.: Grundsatzuntersuchungen zum Schaltverhalten des LED-Versuchsscheinwerfers Matrix-Beam (Hybrid). Praktikum, AUDI AG Ingolstadt, September 2007
- [Totz08] Totzauer, A.: Erarbeitung einer effizienten Fernlichtunterteilung. Praktikum, AUDI AG, Ingolstadt, September 2008
- [Totz09] Totzauer, A.: Entwurf und Integrierung eines Matrix-Beam-Ansteueralgorithmus auf einem Evaluierungsboard. Diplomarbeit in Zusammenarbeit der Technischen Universität Darmstadt und der AUDI AG, Ingolstadt, Juni 2009
- [Tsch09] Tschirne, H.: Berechnung von statischen und dynamischen Sicherheitsbereichen. Praktikum, AUDI AG, Ingolstadt, 2009

11.5 Im Rahmen der Arbeit entstandene Veröffentlichungen

11.5.1 Konferenzbeiträge mit Vortrag

- [Humm07] Hummel, B.: Herausforderungen und Möglichkeiten mit Matrix-Beam. ProMotion 2007, Doktorandentag der AUDI AG, Vortragsreihe, Ingolstadt, Juni 2007
- [Humm08a] Hummel, B.: Zukunft des LED-Scheinwerfers. Haus der Technik: Die LED in der Lichttechnik, Essen, März 2008
- [Humm08b] Hummel, B.: Matrix Beam the antiglaring LED Highbeam - Road Safety Enhancement and Dipping Distances with LEDs. SPIE Photonics Europe, Industrial Perspectives, Strasbourg, April 2008
- [Humm08c] Hummel, B.: Erkennbarkeitsentfernungen mit blendfreiem Fernlicht. ProMotion Doktorandentag der AUDI AG, Vortragsreihe, Ingolstadt, Juni 2008
- [Humm08d] Hummel, B.: LED-Headlamps – the Audi R8 and the Nanolux-Project. 2008 Taiwan Solid State Lighting (tSSL), International Technical Research Institute ITRI, Taipei, Juni 2008
- [Humm08e] Hummel, B.: Benefits with LEDs? Institution of Lighting Engineers (ILE) L & SE Region Technical CPD Seminar, London, Oktober 2008
- [Humm09f] Hummel, B.: Matrix-Beam – an Adaptive Driving Beam. International Symposium on Automotive Lighting (ISAL), Darmstadt, September 2009
- [Humm09g] Hummel, B.: Matrix-Beam: Ergebnisse und Möglichkeiten. ProMotion, Doktorandentag der AUDI AG, Vorstandsrundgang, Ingolstadt, November 2009

11.5.2 Konferenzbeiträge mit Poster

- [Humm08h] Hummel, B.: Matrix-Beam: Next Generation of LED-Headlamps. Karlsruhe School of Optics and Photonics (KSOP), Summerschool, Universität Karlsruhe, Bad Herrenalb, August 2008

11.5.3 Weitere Veröffentlichungen

- [Humm09a] Hummel, B.; Berlitz, S.; Böhn, M.: „Abschlussbericht Verbundprojekt Nanolux der AUDI AG Ingolstadt“. Abschlussbericht an das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Förderkennzeichen 13N8726, Ingolstadt, Januar 2009

11.5.4 Patentanmeldungen

- [Humm09b] Hummel, B.; Berlitz, S.: „Verfahren zur automatischen Justage einer Lichteinheit eines Fahrzeugs und Leuchtsystems für ein Fahrzeug“. DE-Anmeldung: amtliches Aktenzeichen 102007049619.4, Anmeldetag 17.10.2007; EP-Anmeldung: amtliches Aktenzeichen 08015161.6, Anmeldetag 28.08.2008
- [Humm09c] Hummel, B; Berlitz, S.: Verfahren zum Betreiben eines Leuchtsystems und eines Bilderfassungssystems eines Fahrzeugs sowie eines Objekterfassungssystem für ein Fahrzeug. DE-Anmeldung: amtliches Aktenzeichen 102007049637.2, Anmeldetag: 17.10.2007
- [Humm09d] Hummel, B.: Vorrichtung zum Ermitteln eines Betriebsparameters von zumindest einem Leuchtmittel einer Lichtquelle eines Kraftfahrzeuges. DE-Anmeldung: amtliches Aktenzeichen 102007049618.6, Anmeldetag 17.10.2007; EP-Anmeldung: amtliches Aktenzeichen 08012982.8, Anmeldetag 18.07.2008

11.6 Lebenslauf

Angaben zur Person

Name	Benjamin Sebastian Hummel
Berufsabschluss	Diplom-Ingenieur Elektrotechnik und Informationstechnik
Geboren am	12. Oktober 1981 in Öhringen
Staatsangehörigkeit	deutsch
Familienstand	ledig
Anschrift	Bergstr. 17 74255 Roigheim

Schulbildung

1988 – 1992	Grundschule Roigheim
1992 – 2001	Gymnasium Möckmühl
2001	Abitur mit den Leistungsfächern Mathematik und Physik

Universitäre Ausbildung

2001 – 2006	Studium der Elektrotechnik und Informationstechnik Universität Karlsruhe (TH)
2006 Diplomarbeit	Betreuung: Lichttechnisches Institut, Universität Karlsruhe (TH) Durchführung: AUDI AG Ingolstadt, Abteilung Licht und Sicht Titel: Sensorik einer intelligenten Heckleuchte
Hauptreferent:	Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer
Betreuer:	Dr.-Ing. Karsten Köth Dipl.-Ing. Christoph Kenn (AUDI AG)
2006 – 2009 Promotion	Betreuung: Lichttechnisches Institut, Universität Karlsruhe (TH) Durchführung: AUDI AG Ingolstadt, Abteilung Licht und Sicht Titel: Blendfreies LED-Fernlicht
Hauptreferent:	Prof. Dr. rer. nat. Uli Lemmer
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller

