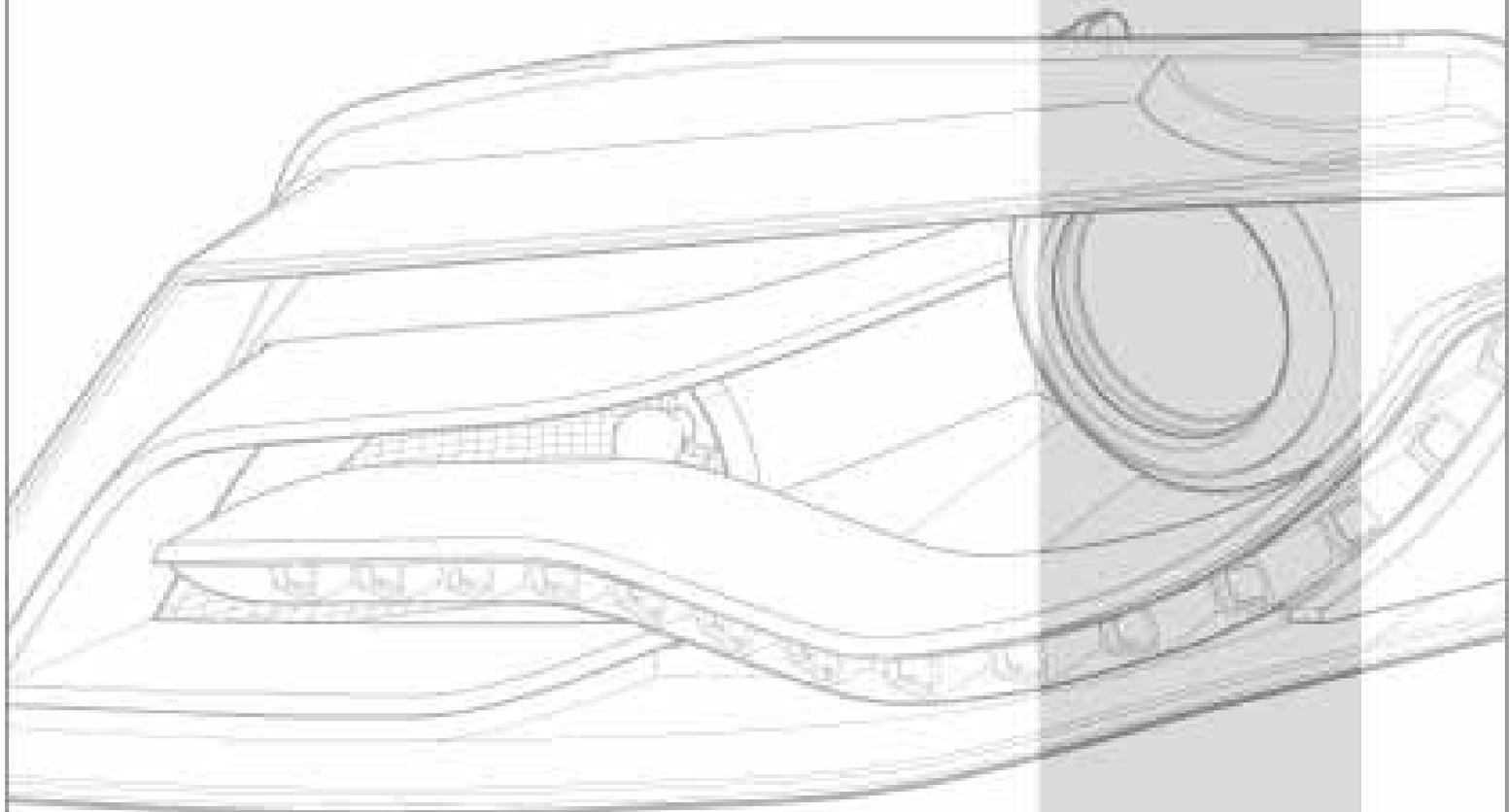


Audi Dissertationsreihe



# Vergleich verschiedener Systeme zur Sichtverbesserung bei Nacht in Personenkraftwagen

Anil Taner



Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation  
der Technischen Universität München

## **Vergleich verschiedener Systeme zur Sichtverbesserung bei Nacht in Personenkraftwagen**

Anıl Taner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Rigoll

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Färber

Die Dissertation wurde am 15.02.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 25.06.2007 angenommen.

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2007

Zugl.: (TU) München, Univ., Diss 2007

ISBN 978-3-86727-448-7

Audi Dissertationsreihe, Band 1

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2007

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://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, 2007

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISSN 1865-9268

ISBN 978-3-86727-448-7

## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, die vorliegende Dissertation mit dem Titel

*Vergleich verschiedener Systeme zur Sichtverbesserung bei Nacht in Personenkraftwagen*

selbständig und ausschließlich mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst zu haben.

Des Weiteren habe ich bis heute an keiner anderen Universität einen Promotionsversuch unternommen.

Anıl Taner

Ingolstadt, den 14.02.2007



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von Mai 2003 bis Oktober 2006 während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der AUDI AG und der Audi Electronics Venture GmbH in Ingolstadt in der Vorentwicklung Elektrik/ Elektronik.

Mein erster Dank gilt Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Rigoll, Leiter des Lehrstuhls für Mensch-Maschine-Kommunikation der Technischen Universität München, für die freundliche Unterstützung und Betreuung der Arbeit. Prof. Rigoll hat mir und meinem Promotionsthema großes Interesse entgegengebracht, das über die Erwartungen eines externen Doktoranden weit hinausgeht. Für diese Art der Motivation, die offenen Diskussionen und Ratschläge bin ich ihm sehr verbunden.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Färber danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens, für die Zeit, die er sich genommen hat, um mit mir die Inhalte der Arbeit zu besprechen, und für die offene und sehr angenehme Diskussion über Inhalt und Struktur der Arbeit.

Ich danke meinen fachlichen Betreuern Dr.-Ing. Wolfgang Huhn und Stephan Berlitz, die mir sowohl bei der Wahl des Themas als auch bei der Durchführung der Arbeit viel Freiraum gelassen und mir damit sehr viel Vertrauen entgegengebracht haben. Meinen Vorgesetzten Walter Streit und Dr. Martin Meyer danke ich für ihr Vertrauen, ihre Unterstützung bei der Umsetzung meiner Ideen und ihren Einsatz, der es mir ermöglicht, meine Arbeit fortzusetzen.

Weiterhin danke ich Dr.-Ing. Mathias Mann, Markus Popken, Dr. rer. nat. Holger Grünleitner, Michael Lübcke, Dr.-Ing. Helmut Riedel und Paul Sprickmann für die persönliche und fachliche Unterstützung sowie das angenehme Arbeitsklima. Vor allem danke ich den Herren für den perfekten Einstieg ins Berufsleben und viel Spaß bei der Arbeit.

Ich danke allen, die mit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, insbesondere Marco Jessen, Pierre Kring und Christian Schmidt, die mich im Rahmen ihrer studentischen Tätigkeiten unterstützt haben, Stefan Hebauer, der mir in Notfällen mit dem Versuchsfahrzeug immer zur Seite stand und nicht zuletzt den 52 Probanden, die freiwillig und ohne Gegenleistung viele Nächte zur Bewertung der Systeme mit mir auf Testfahrt waren. Besonderer Dank gilt Dr. rer. nat. Stefan Mayer, Markus Popken, Dr.-Ing. Wolfgang Huhn, Dr.-Ing. Helmut Riedel und meiner Freundin Sabine Ilzhöfer für das Korrekturlesen und für offene Diskussionen über Inhalt und Formulierung der Arbeit.

Ich danke Dr.-Ing. Frank J. Christophersen für die schöne Zeit während des Studiums und seine Freundschaft. Er schafft es, mich zu solchen Projekten wie einer Doktorarbeit zu motivieren - und sorgt dafür, dass ich diese zu Ende führe.

Ich danke Sabine, dass sie mich durch Höhen und Tiefen bei der Erstellung der Dissertation begleitet und mein Vorhaben trotz projektbedingter Arbeitszeiten unterstützt hat.

## VI Vergleich verschiedener Systeme zur Sichtverbesserung bei Nacht in Pkw

Mit ihrer Geduld und ihrem liebevollen Beistand war sie mir eine große Hilfe und hat entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Der größte Dank gilt meiner Mutter, die mir die notwendige Ausbildung ermöglicht, mich in meinem Bestreben immer unterstützt und meine Launen geduldig ertragen hat.

Für meinen Vater, der mir ein Vorbild auf meinem Weg war.

Für meine Mutter, die mir diesen Weg ermöglicht hat.



## Kurzfassung

Autofahrer nehmen etwa 90% der Information, die sie zur Erfüllung der Fahraufgabe benötigen, über den visuellen Kanal auf. Bei Dunkelheit ist die visuelle Informationsaufnahme stark beeinträchtigt, da die Reichweite des Abblendlichts auf etwa 60 bis 100 m beschränkt ist, um andere Verkehrsteilnehmer vor Blendung zu schützen. Die Nutzung des Fernlichts ist ebenfalls zum Schutz anderer Verkehrsteilnehmer nur erlaubt, wenn deren Blendung ausgeschlossen ist. Die schlechtere Sicht bei Dunkelheit führt zusammen mit Müdigkeit der Fahrer sowie Fahren unter Alkoholeinwirkung zu einer erhöhten Unfallrate bei Nacht. NightVision- oder "Nachtsicht"-Systeme bieten dem Fahrer eine größere Sichtweite als das Abblendlicht und versuchen auf diese Weise, Unfälle zu reduzieren, die auf die eingeschränkte Sicht bei Nacht zurückzuführen sind.

NightVision-Systeme erfassen das Vorfeld des Fahrzeugs mit Hilfe einer infrarotempfindlichen Kamera und übertragen das Bild an einen Monitor, der die gewonnene Information anzeigt. Die Darstellung des Bildes ermöglicht dem Fahrer zwar eine größere Sichtweite, kann jedoch den Blick durch die Frontscheibe nicht ersetzen, so dass der Fahrer seine Aufmerksamkeit abwechselnd der Anzeige und dem realen Vorfeld zuwenden muss. Die heute auf dem Automobilmarkt verfügbaren Systeme belasten den Fahrer physisch und psychisch, da er die Inhalte des NightVision-Bildschirms zusätzlich zur Information, die real vor dem Fahrzeug zu sehen ist, aufnehmen und verarbeiten muss.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Sichtverbesserungssystems, das die visuelle Informationsaufnahme des Fahrers bei Nachtfahrten optimal unterstützt. Dazu vergleicht und bewertet dieser Beitrag verschiedene Ansätze für NightVision-Systeme und erläutert die Erfassung der Szene mit Kameras, die im nahen Infrarot (NIR) oder im fernen Infrarot (FIR) arbeiten. NIR-Systeme beleuchten das Vorfeld des Fahrzeugs aktiv mit Infrarotstrahlung und zeichnen ein Bild auf, das der visuellen Empfindung des Menschen ähnlich ist. FIR-Systeme hingegen empfangen die Wärmeverteilung der Szene und liefern ein für den Menschen ungewohntes Bild, in dem jedoch warme Objekte wie Menschen und Tiere besonders hell dargestellt sind. Um die Anzeige des Bildes konkurrieren verschiedene Bildschirme wie beispielsweise das Display im Kombiinstrument zwischen Geschwindigkeits- und Drehzahlanzeige, das Mitteldisplay über der Mittelkonsole und das HeadUp-Display miteinander. Die theoretische Bewertung lässt jedoch weder für die Sensorik noch für die Anzeige eine eindeutige Festlegung auf einen Ansatz zu, da alle Sensor- und Anzeigevarianten Vor- und Nachteile haben.

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung eines hervorhebenden FIR-Systems, das den Fahrer bei der Erkennung von Gefahren durch Markierung von potenziell gefährlichen Objekten im NightVision-Bild unterstützt und die Orientierung im Wärmebild durch Hervorhebung der Fahrbahnränder vereinfacht. Kern der Fahrbahnerkennung ist die Detektion von Stützpunkten auf den Fahrbahnrändern, deren Güte durch einfache und gekoppelte Kalman-Filter verbessert und durch Hough-Transformationen kontrolliert wird. Darauf

aufbauend untersucht diese Arbeit verschiedene Modelle zur Repräsentation der Straße, deren Parameter die gesammelten Stützpunkte liefern. Die Markierung von Gefahren erfolgt mit Hilfe einer Objekterkennung, die warme Objekte detektiert und sie nach Größe, Position und Formatverhältnis klassifiziert.

Probanden bewerten und vergleichen die einzelnen Systemkomponenten in Fahrversuchen im realen Straßenverkehr. Der erste Teilversuch befasst sich mit dem Vergleich verschiedener NIR- und FIR-Systeme. Hier stellt sich heraus, dass - zumindest in Kurzzeituntersuchungen - keine signifikante Präferenz für einen Sensoransatz vorhanden ist: Zwar bestechen NIR-Systeme gegenüber FIR-Systemen durch die Bildqualität und die Übertragbarkeit der im Bild vorhandenen Informationen in die Realität, dennoch zieht fast die Hälfte der Probanden das FIR-System dem NIR-System vor. Im zweiten Teilversuch bewerten Probanden verschiedene Anzeigen und sprechen sich eindeutig gegen eine Darstellung des Bildes im zentralen Mitteldisplay über der Mittelkonsole und im HeadUp-Display aus. Die Informationsaufnahme und -verarbeitung ist bei der Anzeige im Mitteldisplay zu aufwändig, während die Darstellung des Bildes im HeadUp-Display auf Grund der dauerhaften Wahrnehmung im peripheren Blickfeld stört.

Insbesondere der erste Versuch zeigt jedoch, dass NightVision-Systeme den gewünschten Effekt einer früheren Erkennung von Gefahren verfehlen: Unabhängig vom Sensoransatz und von der Anzeige übersehen die meisten Probanden Gefahren direkt neben der Straße. Geringe Fahrtgeschwindigkeiten bei einigen Probanden und die intensive Nutzung des Fernlichts während des Versuchs zeigen, dass NightVision-Systeme die mentale Belastung des Fahrers steigern und dabei jedoch nur einen geringen Nutzen haben.

Aus diesem Grund schlägt diese Arbeit ein "blendfreies" oder "adaptives" Fernlicht vor, das sich automatisch der Verkehrssituation anpasst und dabei die bestmögliche Ausleuchtung gewährleistet, ohne andere Verkehrsteilnehmer zu blenden. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Adaptive Fernlicht ermöglicht einen Ansatz für die Sichtverbesserung bei Nacht, der den Fahrer nicht durch die zusätzliche Anzeige eines Bildes belastet. Die Bildverarbeitung für das Adaptive Fernlicht nutzt dabei die für die Objekterkennung im Wärmebild entwickelten Algorithmen.

Im letzten Versuch vergleichen Probanden ein rein bildgebendes NightVision-System, das aus einem FIR-Sensor und der Darstellung des Bildes im Kombidisplay besteht, mit dem in dieser Arbeit entwickelten hervorhebenden NightVision-System sowie dem Adaptiven Fernlicht. Das rein anzeigende System bewerten die Probanden als sicherheitssteigernd und nicht störend. Die Zusatzinformationen des hervorhebenden Systems beurteilen sie jedoch unterschiedlich: Während die meisten Probanden auf die Hervorhebung des Fahrbahnverlaufs verzichten können, wünschen sich fast alle die Markierung von Gefahren im Bild. Das blendfreie Fernlicht erhält signifikant bessere Bewertungen als die beiden NightVision-Systeme, dennoch wünscht sich die Mehrzahl der Probanden sowohl das Adaptive Fernlicht als auch NightVision, um bei Nacht besser sehen zu können.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Fahrerassistenzsysteme im Automobil . . . . .	3
1.2	Motivation für Sichtverbesserungssysteme . . . . .	4
1.3	Zielsetzung der Arbeit . . . . .	9
1.4	Gliederung der Arbeit . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Grundlagen zu NightVision-Systemen</b>	<b>11</b>
2.1	Sensorik . . . . .	11
2.1.1	Restlichtverstärker . . . . .	11
2.1.2	Aktive NightVision-Systeme . . . . .	14
2.1.3	Passive NightVision-Systeme . . . . .	31
2.1.4	Vergleich zwischen aktiven und passiven Systemen . . . . .	36
2.1.5	Mischsysteme . . . . .	39
2.2	Anzeigen . . . . .	40
2.2.1	Das Auge und Anforderungen an die Anzeige . . . . .	40
2.2.2	Kombidisplay . . . . .	42
2.2.3	Zentrales Mitteldisplay . . . . .	44
2.2.4	HeadUp-Display . . . . .	45
2.2.5	Combiner . . . . .	48
2.2.6	TFT-Klappdisplay . . . . .	51
2.2.7	Weitere Anzeigevarianten . . . . .	51
2.2.8	Vergleich der Anzeigevarianten . . . . .	53
<b>3</b>	<b>Systemausprägungen</b>	<b>55</b>
3.1	Rein bildgebende NightVision-Systeme . . . . .	55
3.2	Erkennung von Objekten . . . . .	57
3.3	Hervorhebende NightVision-Systeme . . . . .	60
3.4	Warnende NightVision-Systeme ohne Bild . . . . .	60
3.4.1	Abstrakte Anzeigen . . . . .	61
3.4.2	Vergleich der abstrakten Anzeigen . . . . .	63
3.5	Vergleich der Systemausprägungen . . . . .	64

<b>4</b>	<b>Bildanalyse</b>	<b>67</b>
4.1	Ziele der Bildanalyse . . . . .	67
4.2	Fahrbahnerkennung in Wärmebildern . . . . .	69
4.2.1	Randbedingungen . . . . .	71
4.2.2	Suche nach Stützpunkten auf den Fahrbahnrändern . . . . .	73
4.2.3	Erweiterung der Stützpunktliste . . . . .	80
4.2.4	Der Condensation-Algorithmus . . . . .	81
4.2.5	Objektive Bewertung der ermittelten Stützpunkte . . . . .	84
4.2.6	Subjektive Bewertung der ermittelten Stützpunkte . . . . .	91
4.2.7	Ermittlung des Fahrbahnverlaufs . . . . .	92
4.3	Objektextraktion . . . . .	100
4.3.1	Randbedingungen . . . . .	101
4.3.2	Hervorhebung relevanter Objekte im Bild . . . . .	102
4.3.3	Bewertung der Objektextraktion . . . . .	106
<b>5</b>	<b>Alternatives Sichtverbesserungssystem</b>	<b>109</b>
5.1	Motivation für eine alternative Lösung . . . . .	109
5.2	Adaptives Fernlicht . . . . .	111
5.3	Umsetzung . . . . .	113
5.3.1	Videokamera und Radarsensor . . . . .	114
5.3.2	Bildverarbeitung . . . . .	116
5.3.3	Beleuchtung . . . . .	121
5.3.4	Kalibrierung des Systems . . . . .	122
5.4	Vergleich zwischen Adaptivem Fernlicht und NightVision . . . . .	123
5.5	Der aktive Scheinwerfer . . . . .	125
<b>6</b>	<b>Fahrversuche</b>	<b>127</b>
6.1	Untersuchungsgegenstand der Fahrversuche und Unterschiedshypothesen	127
6.2	Versuchsträger . . . . .	128
6.3	Versuchsdesign . . . . .	136
6.3.1	Probandenuntersuchung zu NightVision-Kameras . . . . .	137
6.3.2	Probandenuntersuchung zu Anzeigen . . . . .	143
6.3.3	Probandenuntersuchung zu den Gesamtsystemen . . . . .	147
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Gesamtbewertung</b>	<b>153</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick</b>	<b>155</b>
	<b>Anhang</b>	<b>156</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>223</b>

# 1 Einführung

Die Entwicklung und Herstellung von Kraftfahrzeugen als Massenprodukt und die steigende Kaufkraft der Bevölkerung führte in den letzten 40 Jahren zu einem rasanten Anstieg des Fahrzeugbestands. Zwischen den Jahren 1970 und 2004 hat sich die Anzahl der Personenkraftwagen in Deutschland von 194 Fahrzeugen pro 1000 Einwohner auf 560 fast verdreifacht. Mit dem steigenden Verkehrsaufkommen nahm auch die Komplexität des Straßenverkehrs und bis ins Jahr 1970 die Anzahl der Unfälle und der durch Unfälle verletzten und getöteten Menschen zu [Sta06].

Die Ausstattung von Fahrzeugen mit passiven Sicherheitssystemen wie Sicherheitsgurt, Energie absorbierenden Karosserien, steifen Fahrgastzellen und Airbags konnte die Sicherheit im Straßenverkehr deutlich erhöhen [Kra98]. Ziel dieser Systeme ist die Verringerung der Unfallschwere und des Verletzungsrisikos während eines Unfalls. Sie sind heute in allen Neufahrzeugen serienmäßig verbaut.

Die passive Sicherheit trägt maßgeblich zur Verringerung des Verletzungsrisikos im Straßenverkehr bei. Sie ist heute soweit optimiert, dass selbst aufwändige Weiterentwicklungen kaum noch einen Sicherheitsgewinn bringen [Sch04b]. Aktive Sicherheitssysteme wie beispielsweise ESP (Elektronisches Stabilisierungsprogramm) und ABS (Anti-Blockier-System) setzen im Gegensatz zur passiven Sicherheit nicht beim Schutz der Insassen während des Unfalls an, sondern beheben die Unfallursache durch die Erkennung und Korrektur kritischer Situationen vor dem Eintreten des Unfalls [Sei92].

Heute sind oben genannte Systeme unverzichtbarer Bestandteil der Fahrzeugsicherheit und konnten seit ihrer Einführung die Zahl der Verkehrstoten drastisch verringern. Im Jahre 2004 kamen in Deutschland pro Million Einwohner 71 Personen bei Verkehrsunfällen ums Leben, während im Jahre 1970 noch 274 Unfallopfer pro Million Einwohner zu beklagen waren [Sta06]. Bild 1.1 zeigt die häufigsten Unfallarten mit Todesfolge in Deutschland über die Jahre 1994 bis 2003 gemittelt [Sta03] und verdeutlicht, dass Kollisionen mit Gegenverkehr die Hauptursache tödlicher Unfälle sind.

Die europäischen Regierungen haben sich im Weißbuch der Europäischen Union zur Verkehrspolitik [Eur01] zum Ziel gesetzt, die Anzahl der Verkehrstoten auf dem Gebiet der EU bis ins Jahr 2010 auf etwa 20000 zu reduzieren - dies entspricht der Hälfte der Verkehrstoten aus dem Jahre 2000. Dieses Ziel können die oben genannten Sicherheitssysteme nicht allein erreichen, da die passive Sicherheit an ihre technischen Grenzen stößt

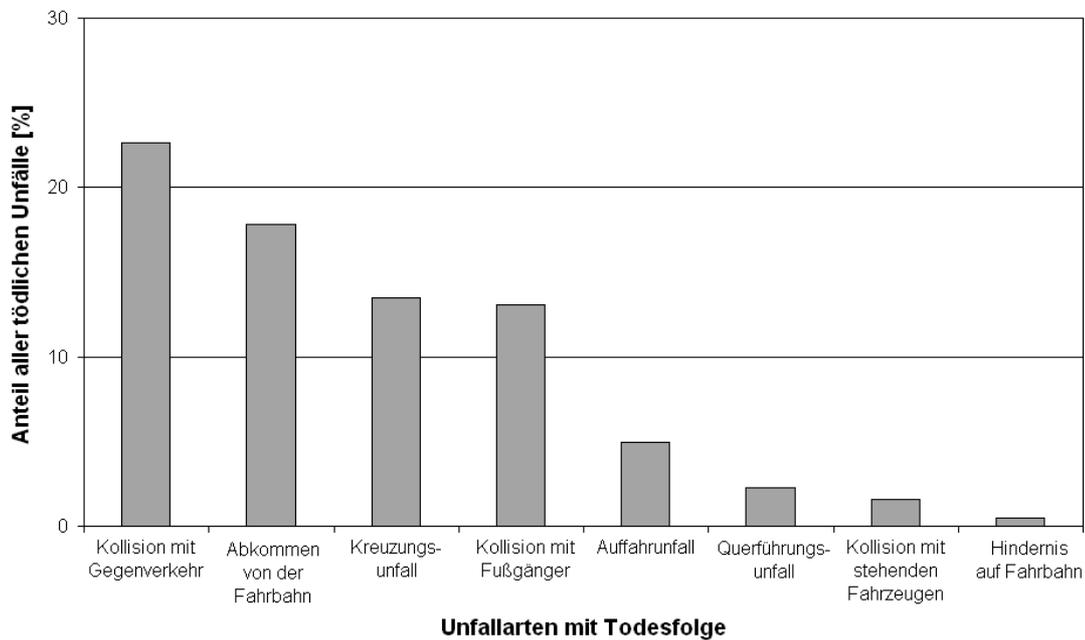


Bild 1.1 : Häufigste Unfallarten mit Todesfolge [Sta03]

und keine neuen Funktionen zu erwarten sind, die gravierende Verbesserungen der Fahrzeugsicherheit mit sich bringen [Sch04b]. Die aufgeführten aktiven Sicherheitssysteme hingegen können zwar fahrdynamische Daten des Fahrzeugs aufnehmen und verarbeiten, sie haben jedoch keine Informationen aus dem Umfeld des Fahrzeugs und können beispielsweise Kollisionen, die den Großteil tödlicher Unfälle ausmachen, nicht vermeiden. Damit sind die Möglichkeiten dieser Sicherheitssysteme auf das Erkennen und Korrigieren bereits eingetretener kritischer Situationen beschränkt.

Da menschliches Fehlverhalten in den meisten Fällen die Ursache tödlicher Unfälle ist [Grü05], müssen neue Systeme die Fahrzeugführung kontrollieren und unterstützen, um die Anzahl der Personenschäden im Straßenverkehr weiter zu reduzieren. Die Fahraufgabe ist nach dem Drei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung [Ber70] in eine Navigationsebene, eine Führungsebene und eine Stabilisierungsebene aufgeteilt. Auf der Navigationsebene legt der Fahrer bewusst die Fahrtroute nach Kriterien wie Fahrtzeit und Verkehrsauslastung fest. Auf der Führungsebene erledigt er Teilaufgaben wie Überholen von anderen Fahrzeugen und Abbiegen in Kurven. Diese Aufgaben führt der Fahrer zwar auch bewusst aus, jedoch ist die mentale Belastung geringer als bei Aufgaben auf der Navigationsebene. Die Tätigkeiten der Stabilisierungsebene beinhalten die Längs- und Querführung des Fahrzeugs, die der Fahrer größtenteils unbewusst ausführt.

Fahrerassistenzsysteme kontrollieren und unterstützen verschiedene Teilaufgaben der drei Ebenen und versuchen, Fahrfehler frühzeitig zu erkennen, ihnen entgegenzuwirken und sie im Idealfall zu korrigieren, um Unfälle zu vermeiden. Dazu erfassen Sensoren das Umfeld des Fahrzeugs und geben die gewonnene Information zur Interpretation an ein Steuergerät weiter. Dieses Steuergerät verarbeitet die Sensorsignale und bewertet die Situation mit Hilfe geeigneter Algorithmen. In kritischen Fällen steuert das System einen Aktuator an, um dem Fahrfehler entgegenzuwirken oder gibt eine Warnung an den Fahrer aus, damit dieser selbst reagiert.

## 1.1 Fahrerassistenzsysteme im Automobil

Fahrerassistenzsysteme (FAS) unterstützen den Fahrer bereits heute. Das bekannteste System heißt Adaptive Cruise Control (ACC) und bezeichnet eine Geschwindigkeits-Regelanlage (GRA) mit automatischer Abstandsregelung zu vorausfahrenden Fahrzeugen. Während eine GRA keine Sensorik zur Erkennung von Objekten im Vorfeld des eigenen Fahrzeugs hat und ungebremst auf langsamere Fahrzeuge auffährt, erkennt ACC mit Hilfe eines Radarsensors vorausfahrende Verkehrsteilnehmer und passt sich ihrer Geschwindigkeit an. Dabei hält das System einen vom Fahrer gewählten zeitlichen Abstand zum Vorderfahrzeug ein und beugt auf diese Weise Auffahrunfällen vor [Rob04].

Der Spurhalteassistent erfasst das Vorfeld des Fahrzeugs mit Hilfe einer Kamera. Das Steuergerät erkennt die Straßenmarkierungen im Kamerabild und berechnet die Position und den Verlauf der Fahrspuren, die Position des eigenen Fahrzeugs in der Fahrspur und den Verlauf der eigenen Trajektorie. Droht ein unbeabsichtigtes Abkommen von der Fahrspur, vibriert beispielsweise das Lenkrad oder der Fahrersitz, um den Fahrer zu warnen und seine Aufmerksamkeit wieder auf die Straße zu lenken [Spi05]. Der Fahrer kann dem System durch die Betätigung des Blinkers einen gewollten Fahrspurwechsel anzeigen und die Warnung unterdrücken. Die Vibration am Lenkrad setzt die Warnung an den Händen des Fahrers ab und adressiert auf diese Weise die reagierenden Gliedmaßen. Die haptische Warnung mit kurzem Rückkoppelungsweg ermöglicht auf Grund der Reaktionskompatibilität eine intuitive und schnelle Reaktion des Fahrers [Bus03].

Statt der Vibration des Lenkrads ist auch das Aufbringen eines Lenkmoments auf das Lenkrad möglich. Das Lenkmoment, das die Position des Fahrzeugs in der Fahrspur korrigiert, gibt dem Fahrer neben der Warnung auch die richtige Reaktionsrichtung an [Bus03]. Heading-Control-Systeme gehen einen Schritt weiter und halten das Fahrzeug mit Hilfe von Lenkmomenten selbständig in der Spur.

Der Spurwechselassistent sichert das Fahrzeug bei der Querführung ab: Radarsensoren erfassen andere Verkehrsteilnehmer auf den Nebenspuren, die sich zu nah hinter dem ei-

genen Fahrzeug befinden oder sich mit hoher Geschwindigkeit nähern. Eine LED-Leiste im Außenspiegel warnt den Fahrer im Falle einer Gefahr [Pop06].

Weiterhin sind Systeme in Entwicklung, die Straßenschilder erkennen [ESS<sup>+</sup>94], automatisch eine Notbremsung einleiten, den Fahrer vor zu geringem Abstand warnen [Sch04a] oder die Aufmerksamkeit des Fahrers kontrollieren [Duc03, vJKSH05]. Bild 1.2 gibt einen Überblick über einige bereits heute im Fahrzeug verbaute Sensoren zur Erfassung der Umwelt. Neben dem Fernbereichsradar für ACC nach vorne, der Videokamera für den Spurhalteassistenten nach vorne und den Nahbereichsradaren für den Spurwechselassistenten nach hinten sind auch die Ultraschallsensoren für die Einparkhilfe nach vorne, nach hinten und zur Seite, die Rückfahrkamera zum sichereren Einparken nach hinten, die Videokameras an den Spiegeln zur Überwachung des Bereichs neben dem Fahrzeug nach hinten und die Nahbereichsradare für die Automatische Notbremsung beziehungsweise für Pre-Crash-Funktionen nach vorne dargestellt.

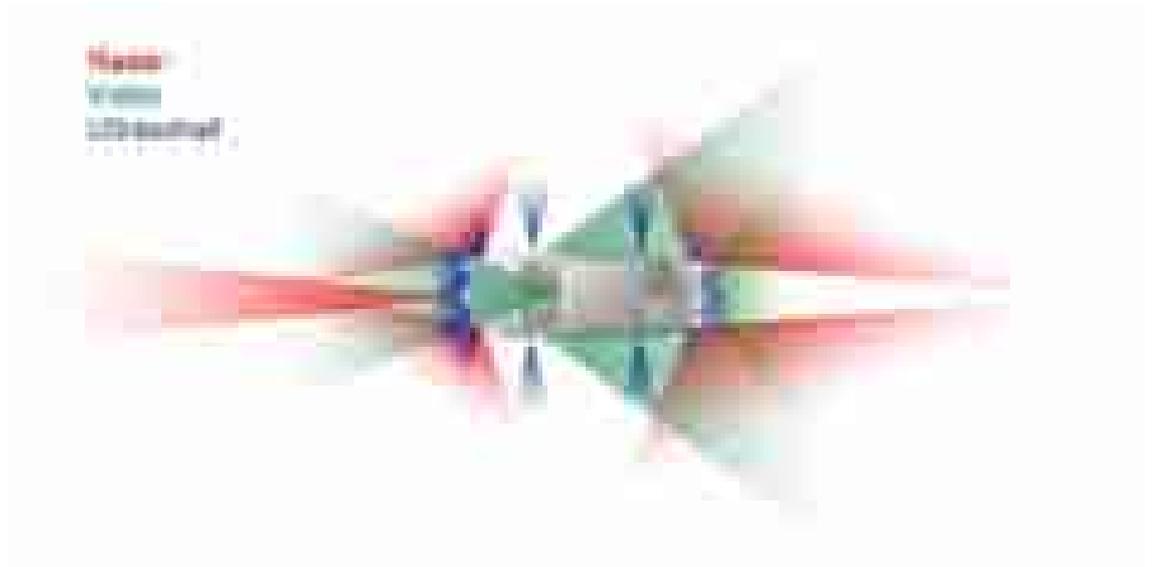


Bild 1.2 : Umfoldsensoren im Fahrzeug und ihre Erfassungsbereiche

## 1.2 Motivation für Sichtverbesserungssysteme

Der Fahrer nimmt etwa 90% der Information, die er zum Erfüllen der Fahraufgabe benötigt, visuell auf [Roc72]. Viele Menschen empfinden das Autofahren bei Nacht stärker belastend als bei Tageslicht, da die Sicht bei Dunkelheit trotz leistungsfähiger Fahrzeugbeleuchtungen eingeschränkt und das Informationsangebot vermindert ist [Coh86]. Um

die Fahraufgabe erfüllen zu können, müssen Autofahrer das Informationsdefizit ausgleichen, indem sie die verfügbare Information häufiger aufnehmen. Dies führt zu einer höheren Belastung und zu einer schnelleren Ermüdung bei Nachtfahrten [Coh87].

Ein weiterer Grund für die höhere Belastung bei Nachtfahrten ist die Verschlechterung der Sehschärfe und der Erkennbarkeit von Objekten [Coh86]: Die geringe Leuchtdichte bei Nacht reduziert die Kontraste der Objekte im Vorfeld des Fahrzeugs und die Pupille weitet sich, um mehr Licht ins Auge eintreten zu lassen. Durch die größere Pupillenöffnung bildet sich die Umwelt unscharf auf der Netzhaut ab [Sch93]. Nach LEIBOWITZ und OWENS leidet die Erkennbarkeit von Objekten mehr unter der Dunkelheit als die Erfüllung der Fahraufgabe, da sich die Fahrzeugführung auf das periphere Sehen stützt [LO97], das ohnehin eine geringe Sehschärfe bietet. Die Folge ist, dass die Geschwindigkeit der meisten Autofahrer bei Dunkelheit, gemessen an der Erkennungsreichweite von Objekten, zu hoch ist [Coh86].

Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge, Ablenkung durch Lichtquellen und Müdigkeit erschweren Nachtfahrten zusätzlich [Coh86]. Unfallstatistiken bestätigen die Empfindung, nachts einem höheren Unfallrisiko ausgesetzt zu sein. Bild 1.3 vergleicht das Verkehrsaufkommen mit dem Anteil der bei Tag und Nacht in Verkehrsunfällen getöteten Personen. Dabei ist das Verkehrsaufkommen bei Dämmerung und der dabei getöteten Personen in den Zahlen für die Nacht enthalten.

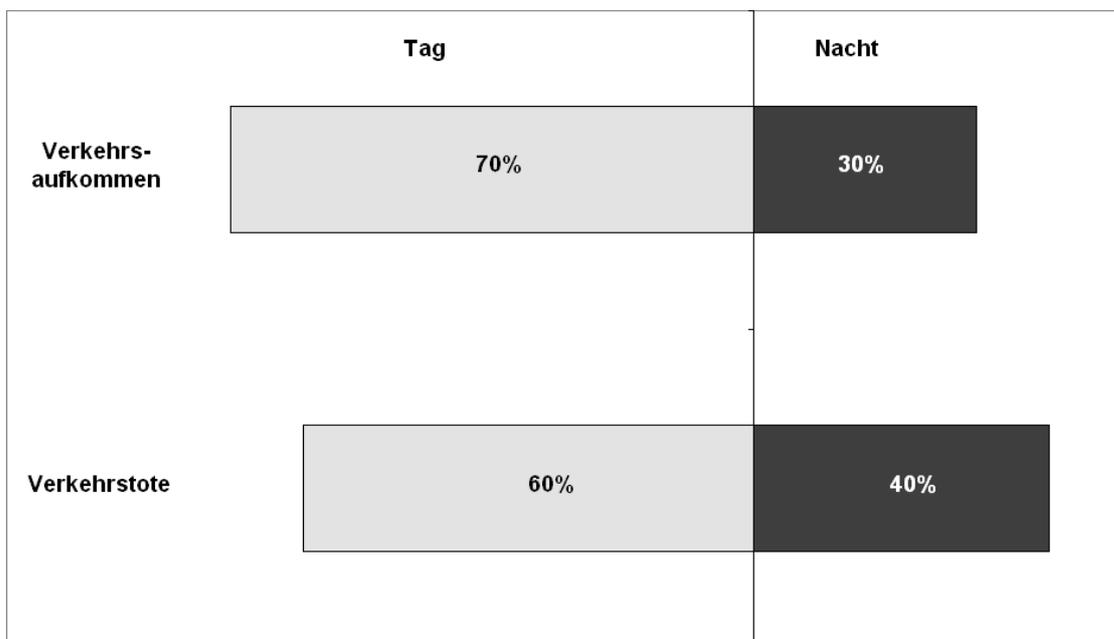


Bild 1.3 : Verkehrsaufkommen und Verkehrstote bei Tag und Nacht

Obwohl das Verkehrsaufkommen bei Nacht etwa 30% der gesamten Fahrleistung ausmacht [LB97], liegt der Anteil der Verkehrstoten bei Nacht bei 40% aller Verkehrstoten [Sta03]. Damit ist das Risiko, im Straßenverkehr getötet zu werden, bei Nacht um den Faktor 1,5 höher als am Tag.

Bild 1.4 verdeutlicht, dass mit einbrechender Dunkelheit auch die Unfallschwere ansteigt [Sta03]. Bild 1.5 zeigt die häufigsten Unfallarten mit Schwerverletzten und Getöteten bei

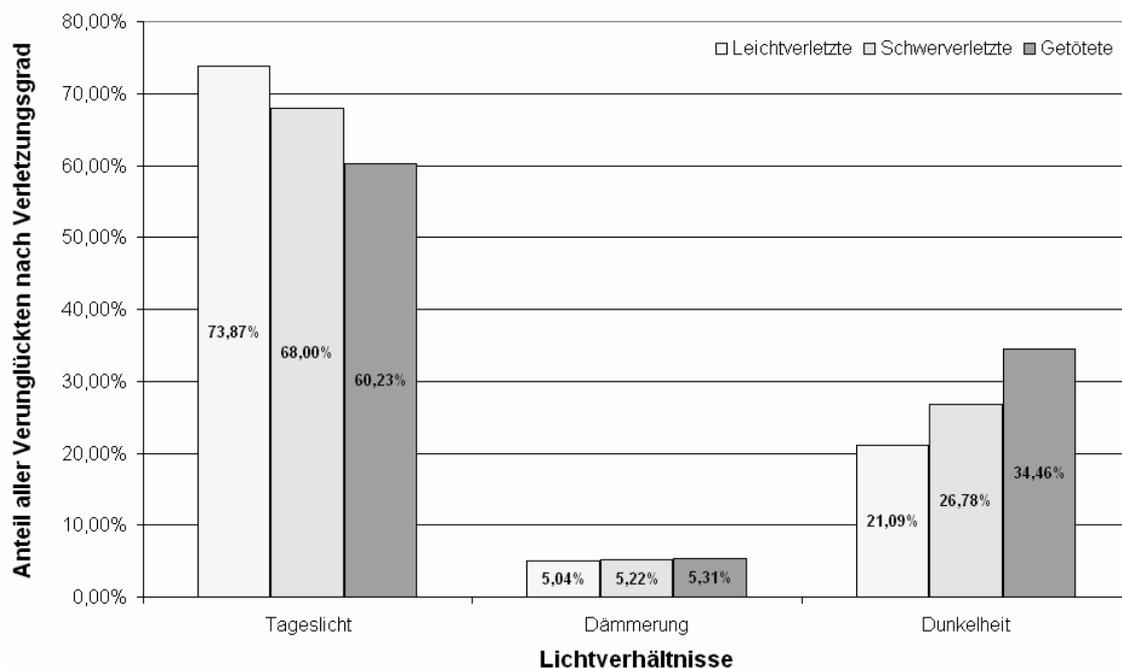


Bild 1.4 : Unfallschwere nach Lichtverhältnissen

Dunkelheit und stellt das Ergebnis einer Unfalldatenanalyse im Rahmen vorliegender Arbeit dar. Die Ergebnisse basieren auf der Datenbank der German-In-Depth-Accident-Study (GIDAS), die umfassende Informationen zu Unfällen, deren Hergang, den Umgebungsbedingungen und den Beteiligten enthält [Bun73]. Die Erhebung der Daten erfolgt durch ein von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) beauftragtes Team aus Ingenieuren und Medizinern direkt am Unfallort und geht weit über die Datenerfassung der Polizei hinaus [Bea03].

Die häufigsten Unfallarten bei Dunkelheit sind Fahrnfälle [Bun73], bei denen der Fahrer ohne Beteiligung eines anderen Verkehrsteilnehmers die Kontrolle über sein Fahrzeug verliert und beispielsweise von der Fahrspur abkommt. Fahrnfälle ereignen sich hauptsächlich außerorts auf Grund zu hoher Geschwindigkeit, schlechter Sichtbarkeit beziehungsweise Fehleinschätzung des Straßenverlaufs, Fahren unter Alkoholeinwirkung

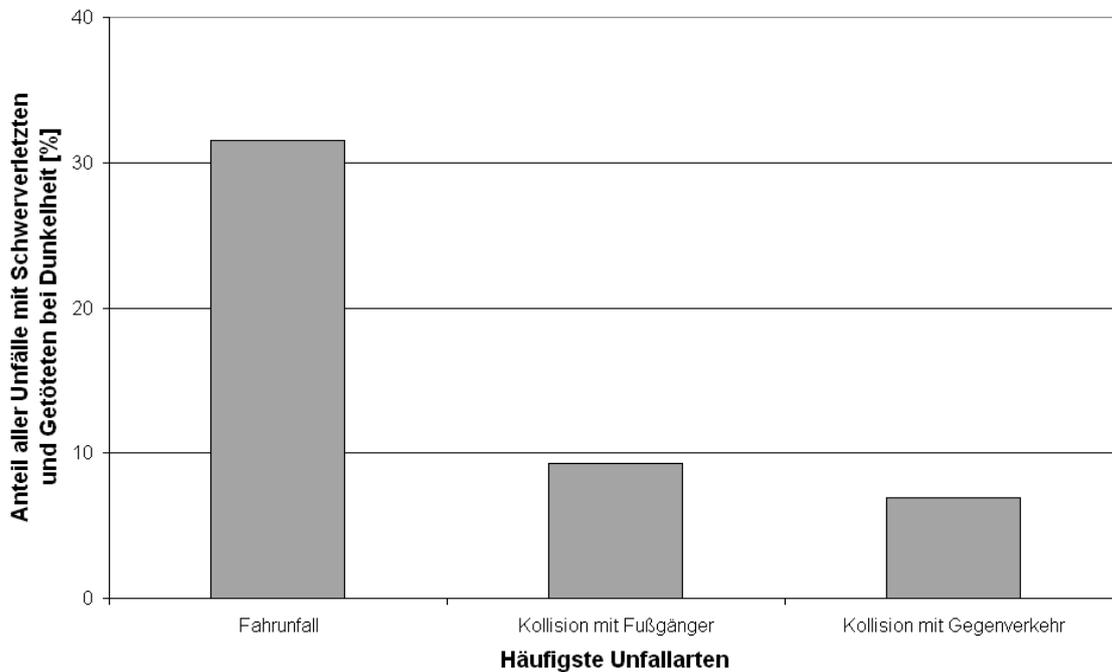


Bild 1.5 : Häufigste Unfallarten mit Schwerverletzten und Getöteten bei Dunkelheit

sowie Müdigkeit und Unaufmerksamkeit des Fahrers [Lan95]. Kollisionen mit Personen treten hauptsächlich innerorts auf [Bun73]: Trotz Straßen- und Fahrzeugbeleuchtung übersehen Autofahrer querende Fußgänger, da deren Kleidung oft nur einen geringen Reflexionsgrad und ein geringes Kontrastverhältnis zur Umwelt aufweist. Zudem lassen sich sowohl Autofahrer als auch Fußgänger durch andere Lichtquellen und den dichten Verkehr ablenken [Lan95]. Kollisionen mit dem Gegenverkehr ereignen sich größtenteils auf Landes- und Kreisstraßen [Bun73] und sind sowohl in den bereits genannten Faktoren als auch in der schlechten Einschätzbarkeit von Entfernungen und Geschwindigkeiten bei Dunkelheit begründet [Coh86, Die04]. Besonders Müdigkeit und Alkoholkonsum verzögern die Reaktionszeit des Fahrers und führen dadurch zu erhöhten Unfallraten bei Dunkelheit [Coh87]. Bild 1.6 zeigt die Anteile der häufigsten Unfallarten mit Fußgängern und Radfahrern bei Dunkelheit.

Unfälle mit Tieren ereignen sich hauptsächlich, weil sie der Fahrer nicht rechtzeitig sehen kann. In Deutschland verunglücken jährlich etwa 3000 Personen in Wildunfällen, wobei über ein Fünftel dieser Personen schwer verletzt oder sogar getötet wird [Sta03].

Die Automobil- und Zuliefererindustrie versucht, dieser Gefahr mit Hilfe optimierter Abblend- und Fernlichtkonzepte entgegenzuwirken. Diese sind jedoch zum Schutz vor Blendung anderer Verkehrsteilnehmer gesetzlichen Auflagen unterworfen: So ist das Fernlicht, das ausreichende Voraussicht bietet, bei regelmäßiger Straßenbeleuchtung oder bei möglicher Blendung anderer Verkehrsteilnehmer auszuschalten. Durch die vorgeschrie-

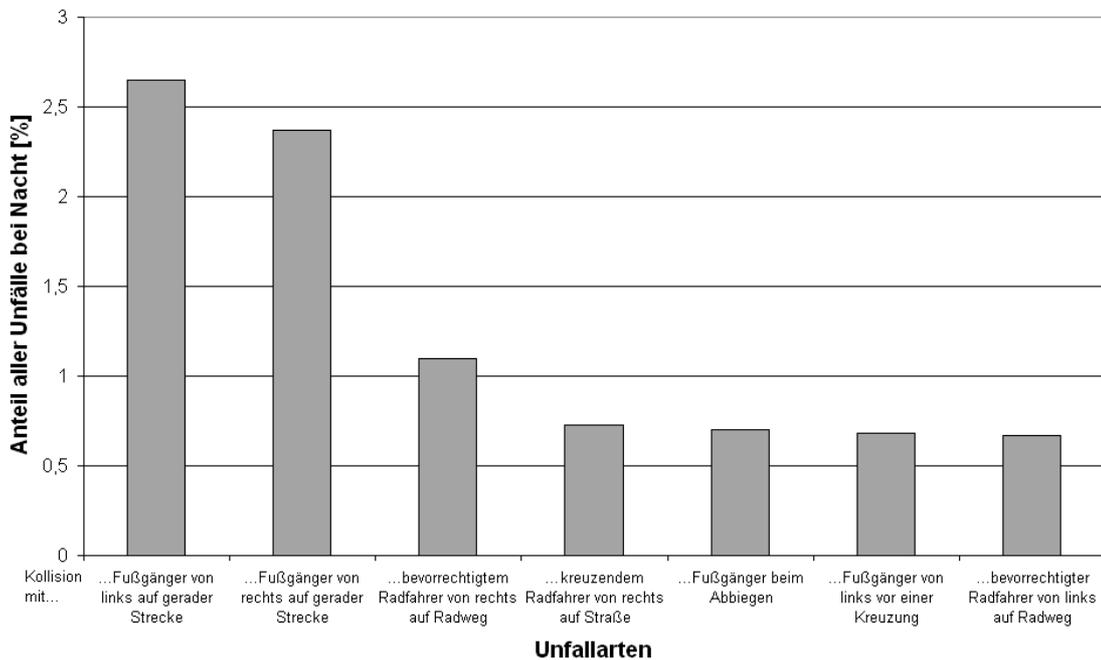


Bild 1.6 : Unfälle mit Personen bei Dunkelheit

bene Neigung des Abblendlichts zur Straße von 1% und die asymmetrische Lichtverteilung [Str06] ist eine Ausleuchtung des Fahrzeugvorfelds bis zu einer Entfernung von etwa 60 m am linken Fahrbahnrand und 110 m am rechten Fahrbahnrand gegeben. Die Erkennbarkeitsentfernung, in der Autofahrer Objekte erkennen können, liegt dabei in Abhängigkeit vom Reflexionsgrad des zu erkennenden Objekts im Mittel zwischen 50 und 70 m [Rum03, LVBK03].

Bild 1.7 zeigt die Ausleuchtungsbereiche des Abblend- und Fernlichts eines Scheinwerfers mit Hochdruck-Gasentladungslampe.

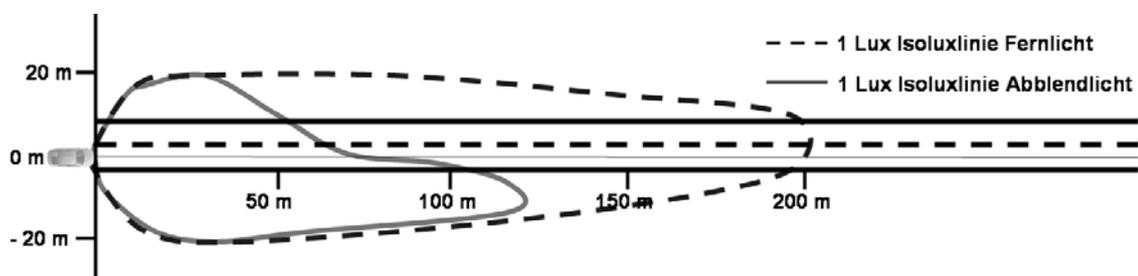


Bild 1.7 : Erfassungsbereich des Abblend- und Fernlichts

Bild 1.8 verdeutlicht, dass bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h die während der Schrecksekunde zurückgelegte Strecke und der Bremsweg nicht mehr ausreichen, um vor einem Hindernis zum Stehen zu kommen, selbst wenn der Fahrer schnell reagiert, mit der maximalen Verzögerung des Fahrzeugs bremst und der Straßenbelag trocken und griffig ist [Rob04, BB88, Int07].



Bild 1.8 : Bremsweg aus einer Geschwindigkeit von 100 km/h

Die aufgeführten Zahlen zeigen, dass die auch bei Nacht übliche Geschwindigkeit von 100 km/h auf Landstraßen für die Sichtweite mit Abblendlicht beziehungsweise die Reaktionszeit der Fahrer zu hoch ist. Da die meisten Fahrer das Risiko der überhöhten Geschwindigkeit bewusst oder unbewusst eingehen [Coh87], kann ein Fahrerassistenzsystem, das die Sichtweite bei Dunkelheit verbessert, die Unfallrate reduzieren. Der Fahrer hat mit diesem System die Möglichkeit, Gefahren und insbesondere unbeleuchtete Lebewesen früher zu erkennen und früher zu reagieren. Solche Fahrerassistenzsysteme existieren bereits unter Namen wie "NightVision", "NightView" oder "ClearView".

## 1.3 Zielsetzung der Arbeit

Im Jahre 1999 führte Cadillac in den Vereinigten Staaten von Amerika als erster Automobilhersteller ein NightVision-System im Modell DeVille ein [MB00]. Etwa drei Jahre später folgten Toyota und Lexus mit der Einführung des Systems in Japan in den Modellen Land Cruiser, Crown und LX470 [Rom02], verwendeten dabei jedoch einen anderen Sensoransatz als die Entwickler von Cadillac. Im Jahre 2004 erweiterte Honda mit dem Modell Legend die Anzahl der in Japan mit NightVision verfügbaren Fahrzeuge. Das Honda-System nutzt eine Weiterentwicklung des Sensors von Cadillac, beinhaltet jedoch einen doppelten Sensoransatz sowie eine automatische Fußgängererkennung. Honda verwendet zur Anzeige des Bildes einen anderen Anzeigeort als die Vorgängersysteme [Hon04]. Im Jahre 2005 führten BMW und Mercedes ihre NightVision-Systeme zeitgleich als erste in Europa ein und wählten dabei unterschiedliche Sensoren und zwei Anzeigen, die sich

von den Bildschirmen der japanischen und amerikanischen NightVision-Systeme unterscheiden. Sowohl bei Cadillac als auch bei Lexus sind die Verkaufszahlen nach einer Anfangseuphorie stark gesunken, so dass Cadillac das System bereits aus dem Angebot genommen hat [Pet04]. Die Systeme von BMW und Mercedes sind noch nicht lange genug verfügbar, um eine Aussage über deren langfristigen Erfolg treffen zu können.

Die vielen verschiedenen Ausführungen der NightVision-Systeme und der mäßige Erfolg dieser Funktion zeigen, dass die optimale Lösung des Systems noch nicht gefunden ist. Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, einen Überblick über heutige NightVision-Systeme zu geben und dabei sowohl die verschiedenen Sensoren als auch die unterschiedlichen Anzeigemöglichkeiten zu beschreiben und zu bewerten. Auf Basis der verfügbaren Systemkomponenten und Bildverarbeitungsalgorithmen versucht dieser Beitrag ein System umzusetzen, das den Fahrer optimal bei der Informationsaufnahme bei Dunkelheit unterstützt. Dazu sollen Bildverarbeitungsalgorithmen die Wahrnehmung und Interpretation der NightVision-Information vereinfachen. Probanden bewerten in Fahrversuchen auf öffentlichen Straßen die heute verfügbaren und die in dieser Arbeit umgesetzten Systeme, um das bestmögliche Sichtverbesserungssystem zu ermitteln.

## 1.4 Gliederung der Arbeit

Der erste Teil der Arbeit gibt einen Überblick über NightVision-Systeme: Kapitel 2 behandelt die Komponenten der verschiedenen Systemansätze, während Kapitel 3 auf die möglichen Ausprägungen der Systeme eingeht und diese miteinander vergleicht.

Der zweite Teil bildet den Kern der Arbeit und befasst sich mit Bildverarbeitungsalgorithmen für NightVision-Systeme zur Unterstützung des Fahrers. Dazu beschreibt Kapitel 4 Algorithmen zur Extraktion und Hervorhebung der Fahrbahn in Wärmebildern und Verfahren zur Markierung von für den Fahrer potenziell relevanten Objekten. Kapitel 5 nimmt einen Teil der Ergebnisse der Fahrversuche aus dem dritten Teil der Arbeit vorweg und erläutert die Notwendigkeit eines neuen Ansatzes für die Sichtverbesserung bei Nacht. Anschließend stellt es den neuen Lösungsvorschlag vor und skizziert die Umsetzung des alternativen Sichtverbesserungssystems.

Der dritte Teil der Arbeit untersucht in Fahrversuchen die Akzeptanz, Nutzung und Wirkung der NightVision-Systeme und des Alternativsystems auf den Fahrer. Kapitel 6 beschreibt ausführlich die Fahrversuche und deren Ergebnisse. Kapitel 7 rundet die Arbeit mit der Gesamtbewertung der Systeme ab, bevor Kapitel 8 einen Ausblick und Anregungen für weitere Untersuchungen gibt.

## 2 Grundlagen zu NightVision-Systemen

Ziel eines NightVision-Systems ist es, dem Fahrer eine bildliche Darstellung des Fahrzeugvorfelds bei Nacht zu bieten, die mehr Informationen enthält, als das menschliche Auge bei Ausleuchtung der Straße mit Abblendlicht erfassen kann. Der Fahrer soll mit dem System “mehr” sehen als mit dem bloßen Auge durch die Frontscheibe und dadurch entspannter bei Nacht fahren.

Das System muss den Regelungen der Straßenverkehrs-Zulassungsordnung [Str06] entsprechen, die genau beschreibt, wie ein Scheinwerfer die Straße ausleuchten darf und alle anderen Ausleuchtungen und die Blendung anderer Verkehrsteilnehmer verbietet.

Einfache NightVision-Systeme bestehen aus einer Sensorik, die Daten aufzeichnet, und einer Anzeige, die diese Daten darstellt. Aufgabe der Sensorik ist die Erfassung von Umfeldinformationen, die das menschliche Auge nicht aufnehmen kann. Die Anzeige dient der Darstellung der von den Sensoren zusätzlich gewonnenen Informationen. Zwischen dem Sensor und der Anzeige kann sich eine Bildverarbeitungseinheit befinden, die durch Entrauschung des Bildes, Anpassung der Gesamthelligkeit oder Schärfung von Kanten die Darstellungsqualität erhöht. Bild 2.1 zeigt beispielhaft ein NightVision-System im Fahrzeug aus der Perspektive des Nutzers.

### 2.1 Sensorik

Dieser Abschnitt beschreibt verschiedene Sensoren für NightVision-Systeme, die bei Dunkelheit Informationen erfassen, die das menschliche Auge nicht aufnehmen kann.

#### 2.1.1 Restlichtverstärker

Restlichtverstärker sind Geräte aus der Militärtechnik, die eine Umfelderkundung bei Nacht ermöglichen. Sie bestehen in ihren Hauptkomponenten, wie in Bild 2.2 dargestellt, aus einem Detektor, einem Ladungsmultiplizierer und einer Anzeige. Das auf das Detektormaterial treffende Licht erzeugt, ähnlich wie bei CMOS und CCD-Kameras,



Bild 2.1 : NightVision-System im Fahrzeug

Ladungsträger. Diese durchlaufen eine Mikrokanalplatte, die ihre Anzahl vervielfacht [SM79, Hol96]. Die Erhöhung der Ladungsträgeranzahl entspricht einer Verstärkung des vom Detektor empfangenen Signals um einen Faktor von etwa  $k = 10^5$ . Die Anzeige stellt das erzeugte Signal dar.

Restlichtverstärker sind für die Umwelterkundung in dunklen Gegenden ohne künstliche Beleuchtung und nicht für die Nutzung im Straßenverkehr bei Nacht ausgelegt. Künstliche Lichtquellen wie das eigene Scheinwerferlicht, das Licht des Gegenverkehrs, Ampelanlagen oder Straßenbeleuchtungen sind so hell, dass sie die Bildinformation überstrahlen und zerstören (Bild 2.3). Da die Verstärkung des eintreffenden Lichts nur eingeschränkt adaptiv ist, erfährt das Signal bis zur Sättigung der Elektronenmultiplikation in der Mikrokanalplatte einen hohen Verstärkungsfaktor. Die Nutzung eines NightVision-Systems ist aber gerade in Situationen mit anderen Verkehrsteilnehmern vorgesehen, da hier die Nutzung des Fernlichts nicht erlaubt ist.

Ein weiterer gravierender Nachteil von Restlichtverstärkern ist ihre Lagerung und Handhabung, die sich mit den Gegebenheiten in einem Fahrzeug nicht vereinen lassen: Rest-