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

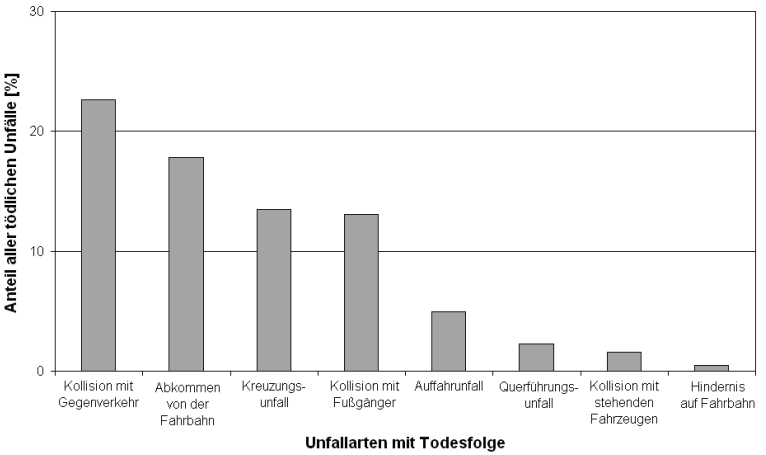

Bild 1.1 : Häufigste Unfallarten mit Todesfolge [Sta03]

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+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.

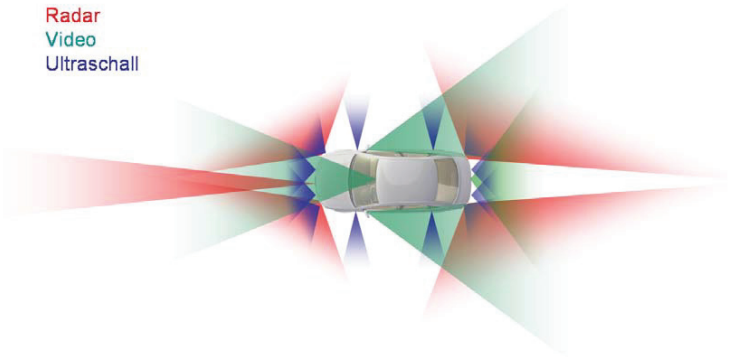

Bild 1.2 : Umfeldsensoren im Fahrzeug und ihre Erfassungsbereiche

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.

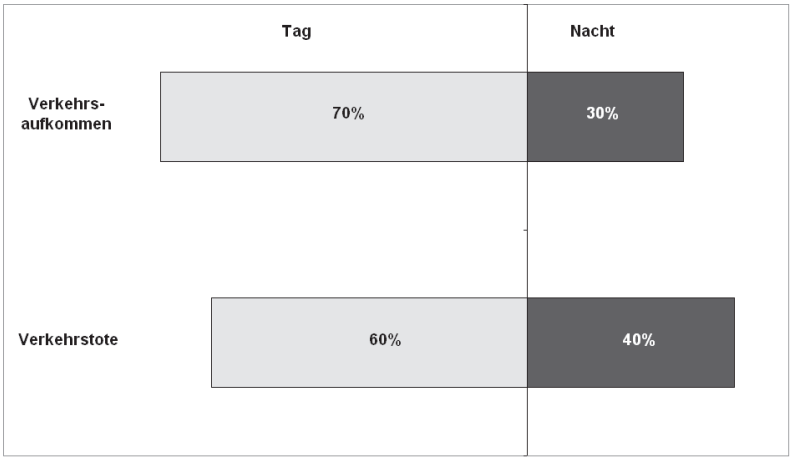

Bild 1.3 : Verkehrsaufkommen und Verkehrstote bei Tag und Nacht

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

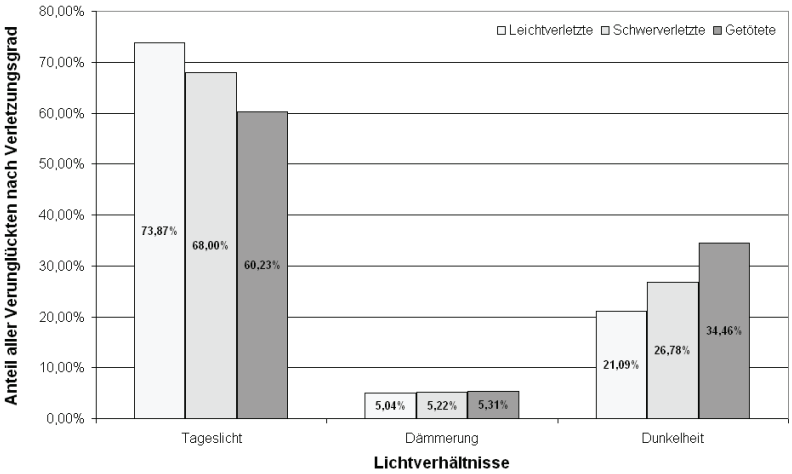

Bild 1.4 : Unfallschwere nach Lichtverhältnissen

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

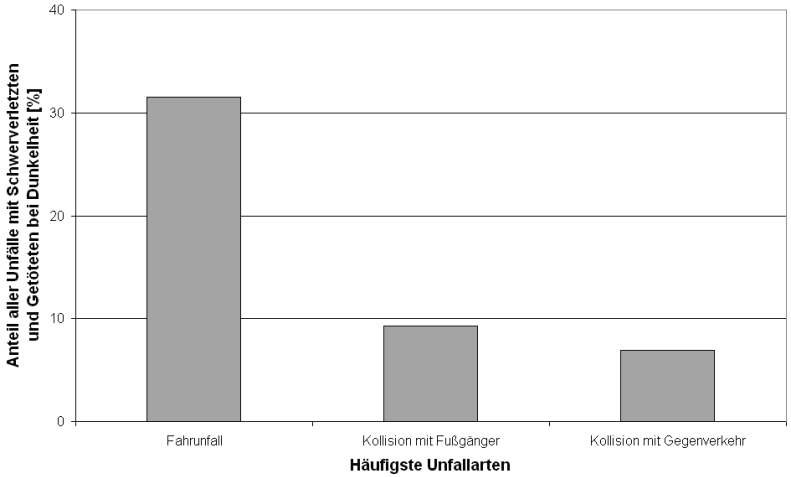

Bild 1.5 : Häufigste Unfallarten mit Schwerverletzten und Getöteten bei Dunkelheit

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-

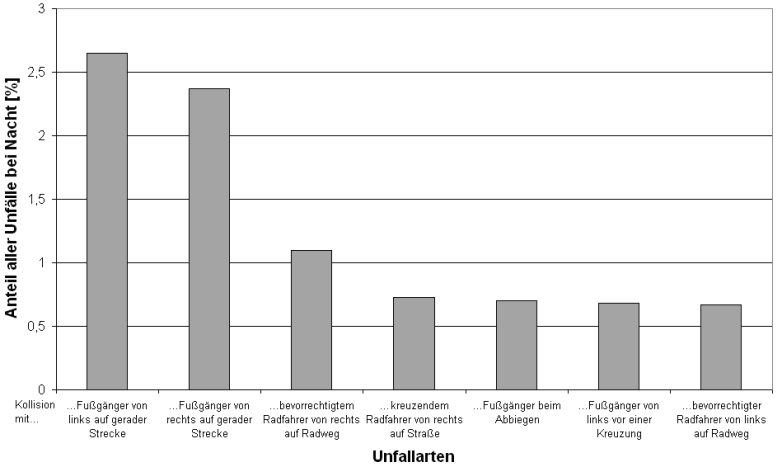

Bild 1.6 : Unfälle mit Personen bei Dunkelheit

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 Ausleuchtbereiche des Abblend- und Fernlichts eines Scheinwerfers mit Hochdruck-Gasentladungslampe.

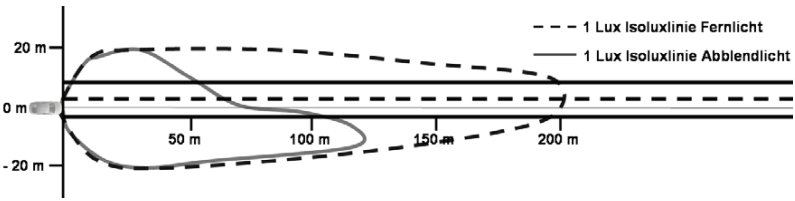

Bild 1.7 : Erfassungsbereich des Abblend- und Fernlichts

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].

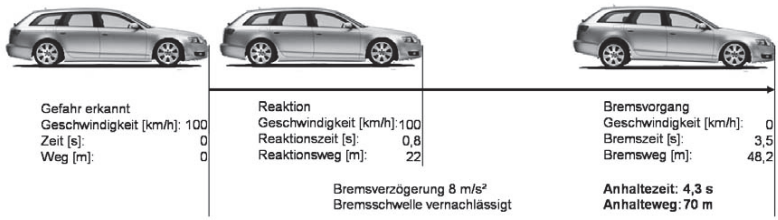

Bild 1.8 : Bremsweg aus einer Geschwindigkeit von 100 km/h

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.