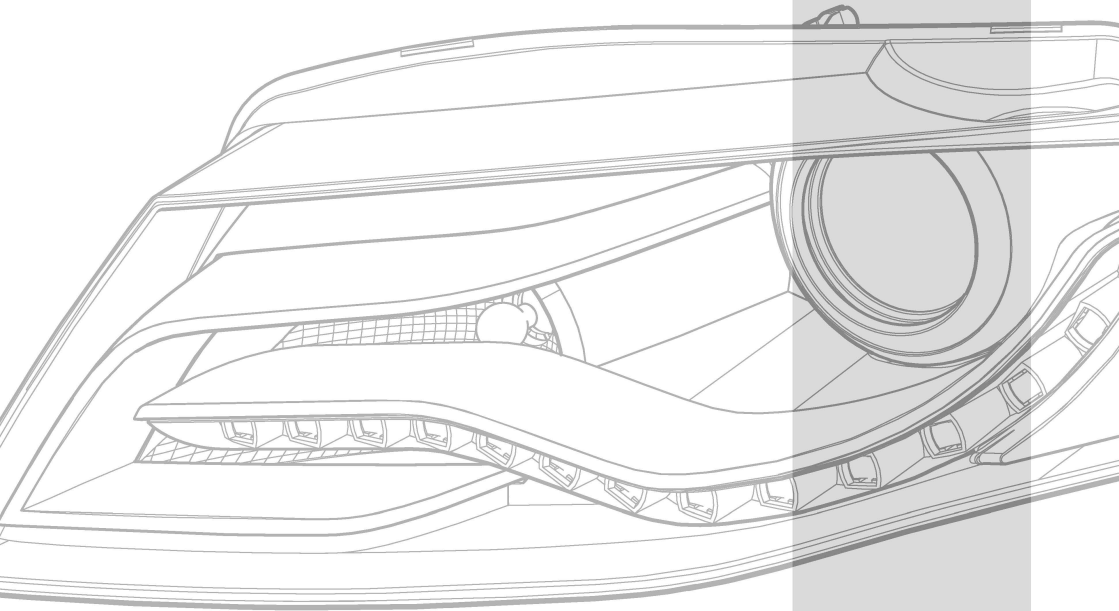


Audi Dissertationsreihe



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

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

X Vergleich verschiedener Systeme zur Sichtverbesserung bei Nacht in Pkw

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

1	Einführung	1
1.1	Fahrerassistenzsysteme im Automobil	3
1.2	Motivation für Sichtverbesserungssysteme	4
1.3	Zielsetzung der Arbeit	9
1.4	Gliederung der Arbeit	10
2	Grundlagen zu NightVision-Systemen	11
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
3	Systemausprägungen	55
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



XII Vergleich verschiedener Systeme zur Sichtverbesserung bei Nacht in Pkw

4 Bildanalyse	67
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
5 Alternatives Sichtverbesserungssystem	109
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
6 Fahrversuche	127
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
7 Zusammenfassung und Gesamtbewertung	153
8 Ausblick	155
Anhang	156
Literaturverzeichnis	223



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

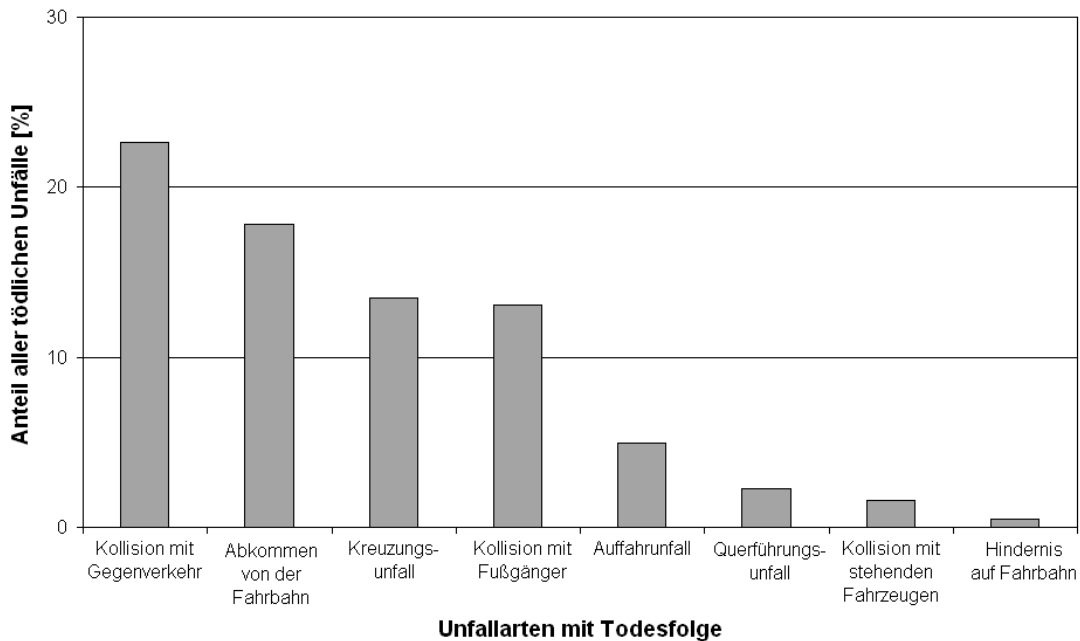


Bild 1.1 : Häufigste Unfallarten mit Todesfolge [Sta03]

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 Spurwechsellassistenten 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.

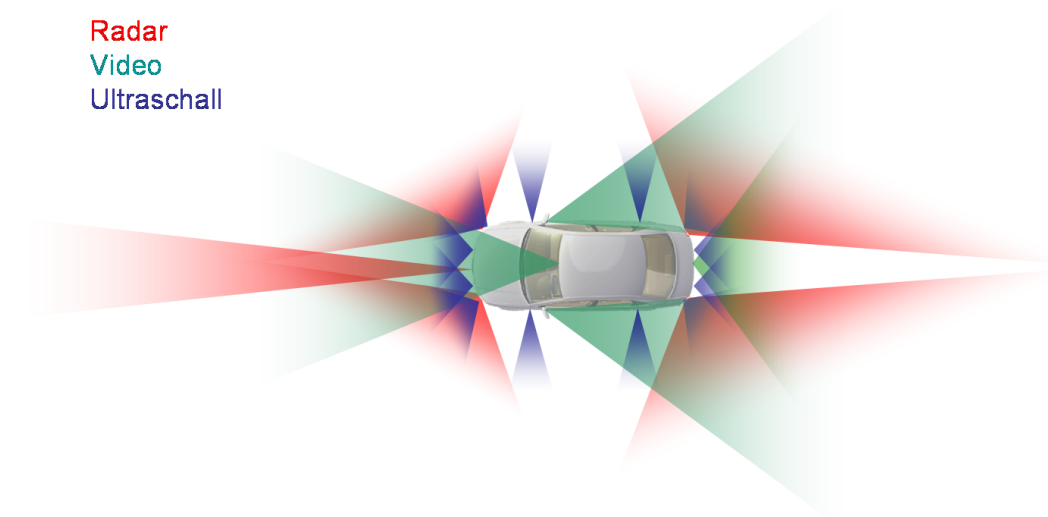


Bild 1.2 : Umfeldsensoren im Fahrzeug und ihre Erfassungsbereiche

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.

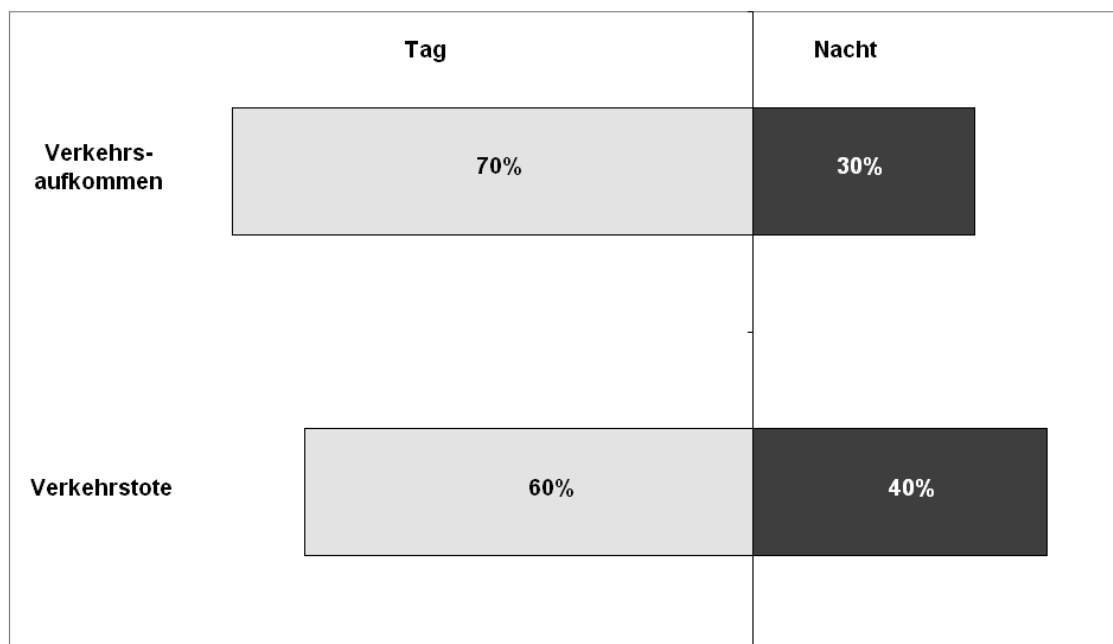


Bild 1.3 : Verkehrsaufkommen und Verkehrstote bei Tag und Nacht

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

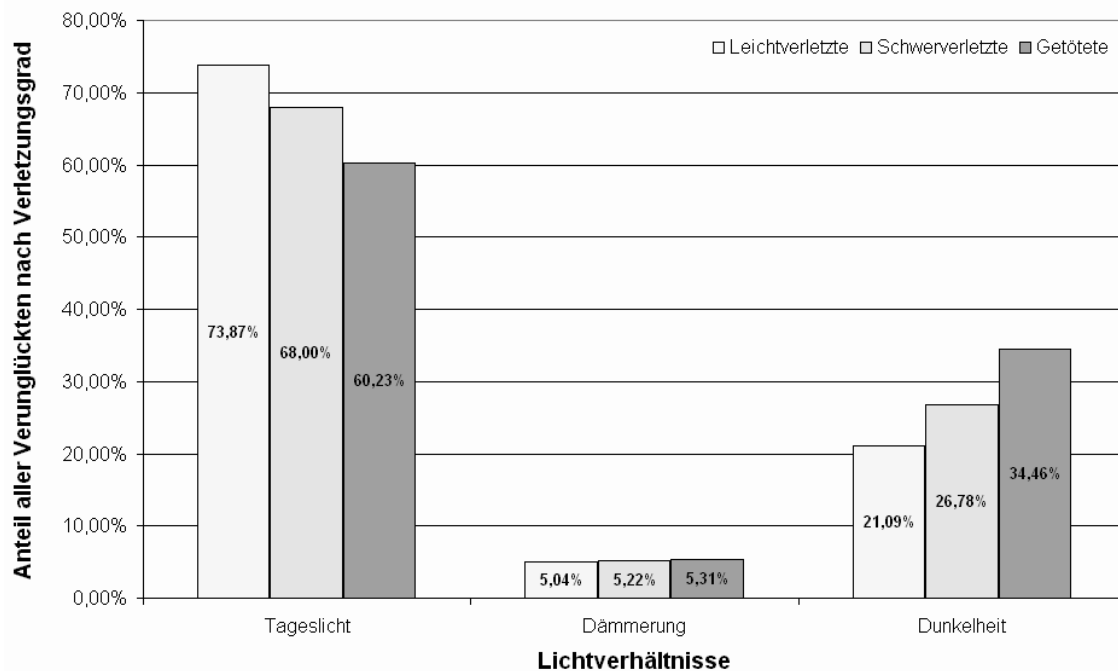


Bild 1.4 : Unfallschwere nach Lichtverhältnissen

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

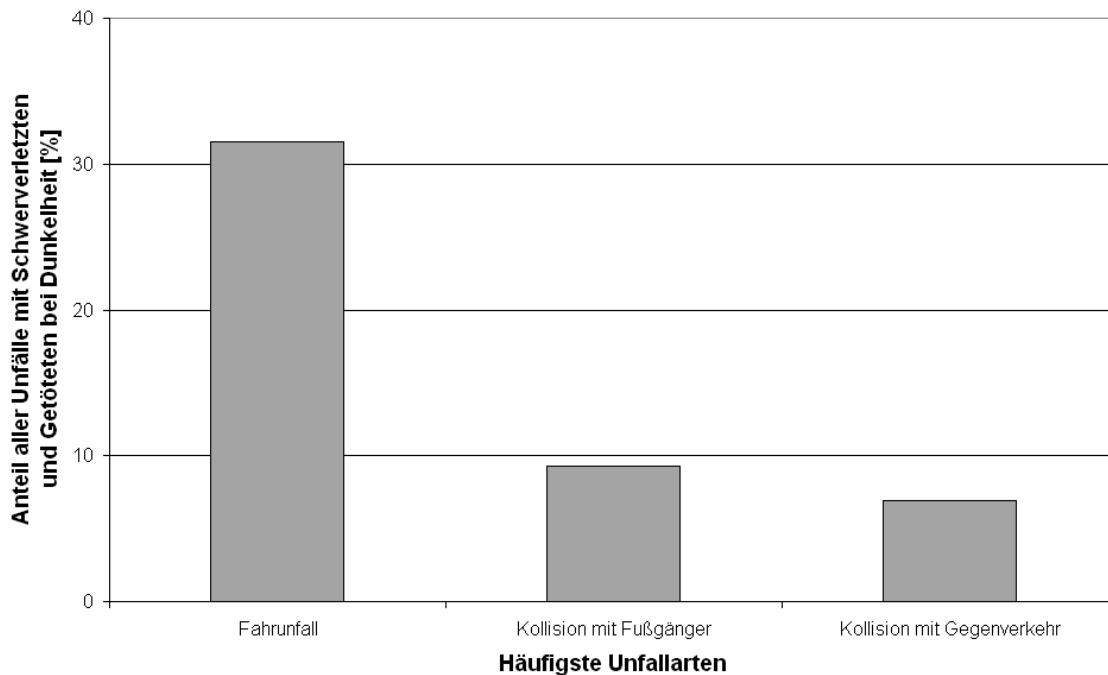


Bild 1.5 : Häufigste Unfallarten mit Schwerverletzten und Getöteten bei Dunkelheit

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-

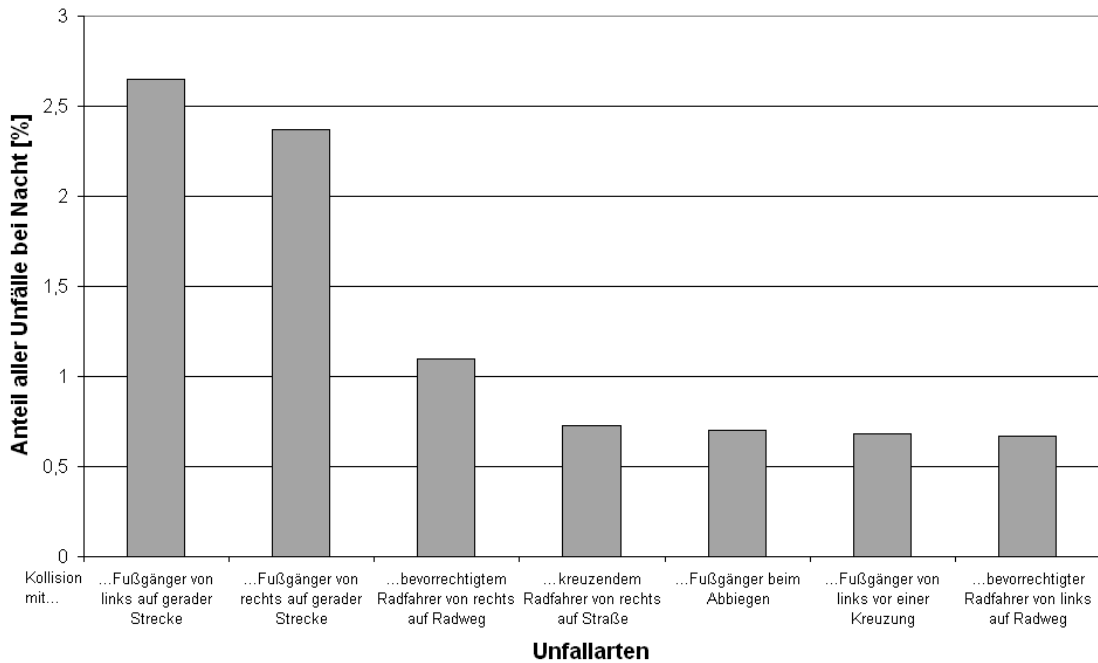


Bild 1.6 : Unfälle mit Personen bei Dunkelheit

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

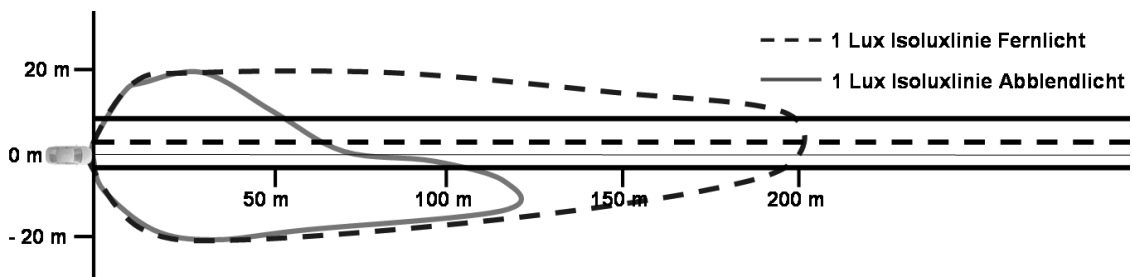


Bild 1.7 : Erfassungsbereich des Abblend- und Fernlichts

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].

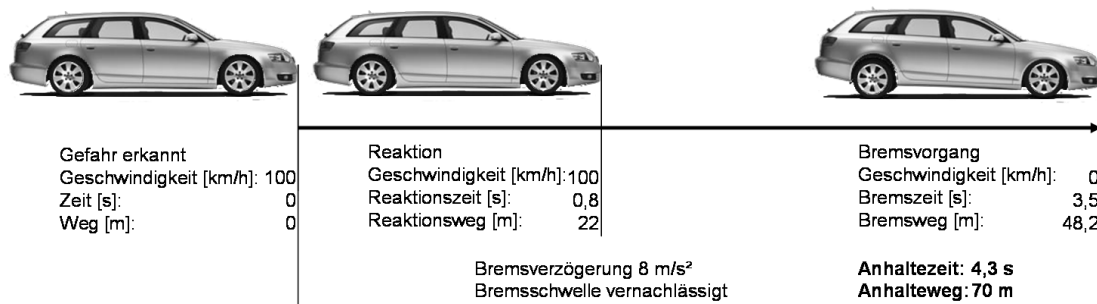


Bild 1.8 : Bremsweg aus einer Geschwindigkeit von 100 km/h

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-

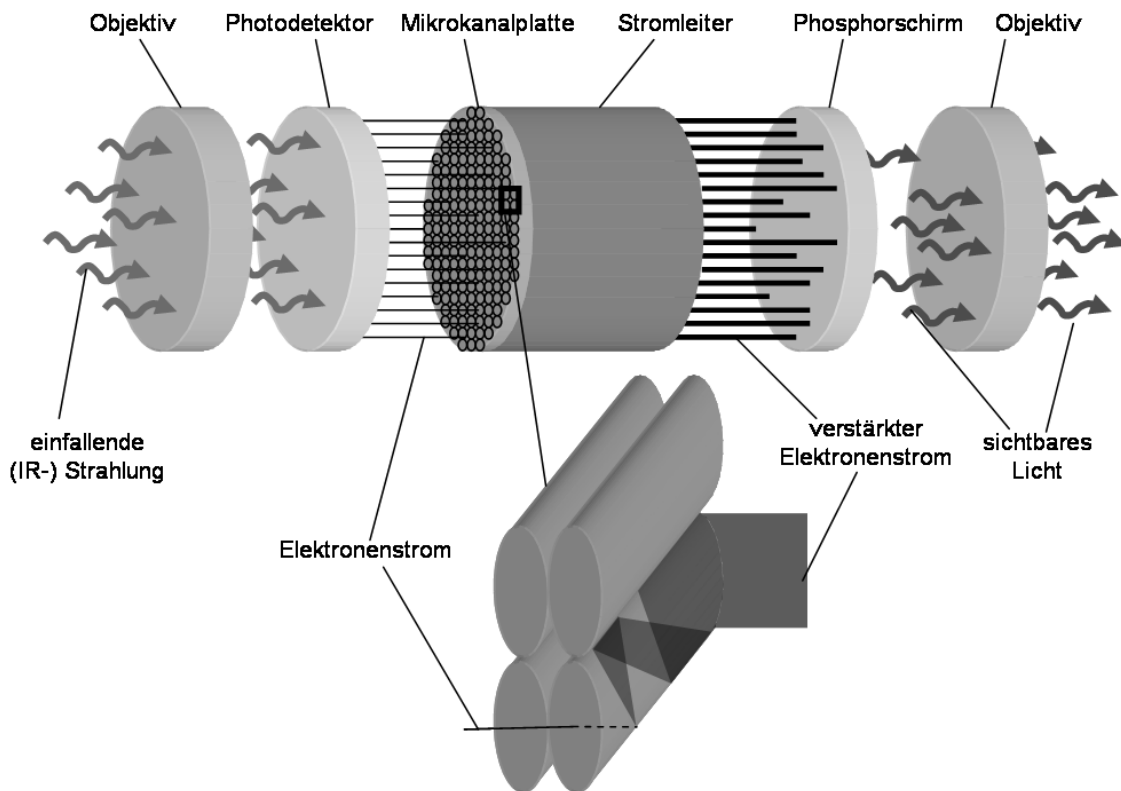


Bild 2.2 : Aufbau und Funktionsprinzip eines Restlichtverstärkers

lichtverstärker dürfen weder im eingeschalteten noch im ausgeschalteten Zustand lange Zeit hellen Lichtquellen ausgesetzt sein, da hohe Lichtintensitäten die Beschichtung des Photodetektors beschädigen. Die Integration im Fahrzeug bringt jedoch immer eine Beleuchtung des Restlichtverstärkers mit direktem Sonnenlicht mit sich, so dass sie für die Anwendung im Fahrzeug unbrauchbar sind.



Bild 2.3 : Bilder eines Restlichtverstärkers in verschiedenen Beleuchtungssituationen

2.1.2 Aktive NightVision-Systeme

Aktive NightVision-Systeme senden Infrarotstrahlung mit Wellenlängen knapp über dem Spektrum des sichtbaren Lichts aus. Auf Grund der in Bild 2.4 dargestellten Nähe zum sichtbaren Licht wird dieser Bereich als nahes Infrarot (NIR) und aktive Systeme auch als NIR-Systeme bezeichnet [KKBK03, LVBK03].

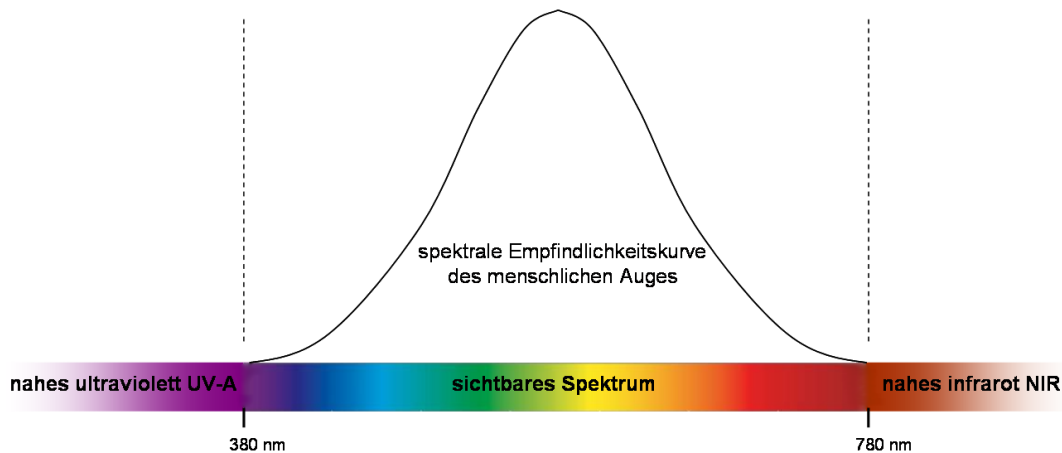


Bild 2.4 : Spektrum des sichtbaren Lichts und Empfindlichkeit des menschlichen Auges

Spezielle Scheinwerfer, die NIR-Strahlung aussenden, bestrahlen das Vorfeld des Fahrzeugs fernlichtartig [BAE01, IY03]. Als NIR-Quellen können gewöhnliche Halogen-Scheinwerfer dienen, deren Spektrum weit in das nahe Infrarot reicht: Interferenzfilter im Strahlengang des Lichts blocken den sichtbaren Anteil der Halogenstrahlung und lassen nur den Infrarotanteil durch [IY03, Bra06] (Bild 2.5). Der Scheinwerfer blendet andere Verkehrsteilnehmer bei der Ausstrahlung des Fahrzeugvorfelds nicht, da NIR-Strahlung für das menschliche Auge kaum sichtbar ist.

Um das unsichtbar ausgestrahlte Vorfeld dem Nutzer sichtbar zu machen, muss eine NIR-empfindliche Kamera die an den Objekten reflektierte NIR-Strahlung aufzeichnen und das Bild in einer Anzeige darstellen. Zur Aufnahme des Bildes eignen sich CCD- und CMOS-Kameras [Göh02, KKBK03], die aus dem Consumer-Bereich bekannt sind und in Massen produziert werden. Der Bedarf an NIR-empfindlichen Kameras für aktive NightVision-Systeme initiierte jedoch die Entwicklung von NIR-optimierten Objektiven und besonders NIR-empfindlichen Bildaufnehmern, die mit Handy-Kameras nicht mehr vergleichbar sind. Die Bildaufnahme Frequenz der Kamera muss mindestens 25 Hz betragen, damit der Nutzer die Einzelbilder als kontinuierliches Videobild wahrnimmt.

Bild 2.6 zeigt das Funktionsprinzip eines NIR-Systems im Fahrzeug. Die Kamera ist hinter der Frontscheibe verbaut, wo sie vor Steinschlag, Feuchtigkeit und Schmutz geschützt

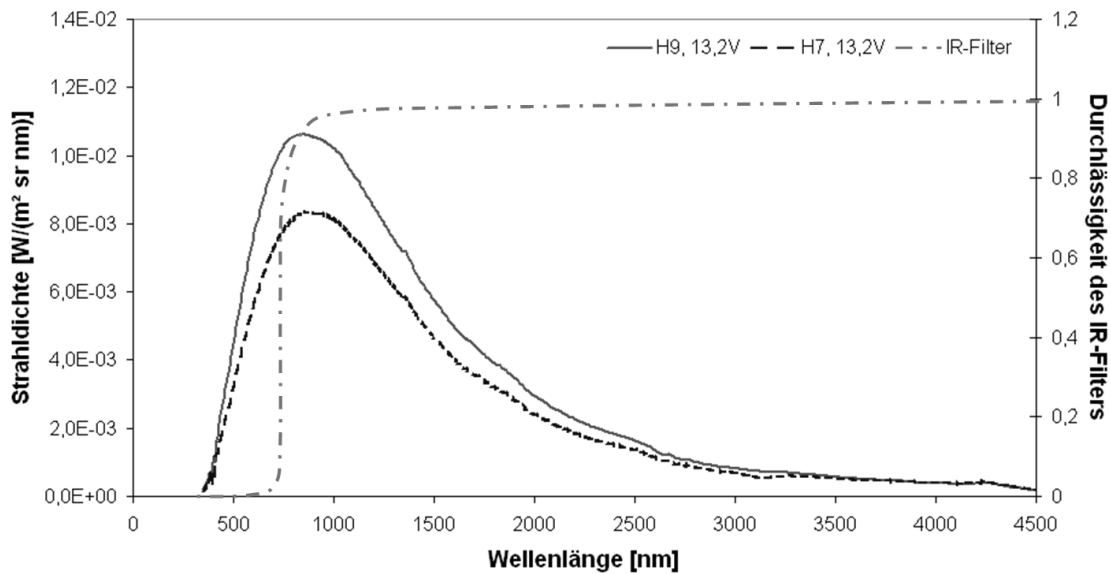


Bild 2.5 : Strahlendichte $L(\lambda)$ von Halogenscheinwerfern und Durchlassbereich $H(\lambda)$ eines Infrarotfilters

ist. Die Frontscheiben heutiger Fahrzeuge bestehen aus gefärbtem Glas mit wärmedämmendem Infrarotfilter. Die Färbung und der Bandfilter dämpfen NIR-Strahlen stark ab [III91], so dass Fahrzeuge mit aktiven Systemen besondere Klarglasscheiben und eine Aussparung des Wärmeschutzes im Sichtbereich der Kamera benötigen.

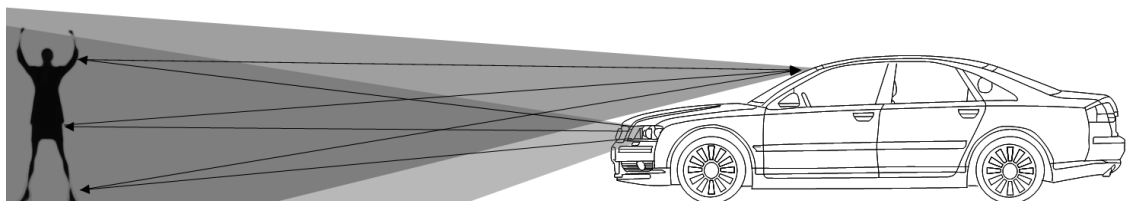


Bild 2.6 : Funktionsprinzip eines aktiven NightVision-Systems

Bild 2.7 zeigt ein typisches NIR-Bild, das einem Schwarz-Weiß-Bild aus dem sichtbaren Spektralbereich ähnelt. Das Bild entsteht auf Grund der aktiven Infrarotbestrahlung hauptsächlich aus der Reflexionsprojektion [Lan04]. Deshalb gibt die Bildinformation nicht die Leuchtdichte der Objekte, sondern ihren Reflexionsgrad wieder [KKLB03]. Dadurch sind Straßenschilder und Leitpfosten, die retroreflektierend ausgelegt sind, um im Abblendlicht gut sichtbar zu sein, auch im NightVision-Bild sehr hell abgebildet. Andere Lichtquellen, wie die Scheinwerfer des Gegenverkehrs, Ampelanlagen und Straßenbeleuchtungen, senden ebenfalls NIR-Strahlung aus und erscheinen aus diesem Grund sehr

hell im Bild. Diese Objekte stellen markante Punkte im Bild dar, die auch im realen Vorfeld leicht zu finden sind. Auf diese Weise fällt die Zuordnung der Bildinhalte zur Realität leicht. Nachteil des NIR-Systems ist jedoch die Darstellung von schwach reflektierenden Objekten: Die Sichtbarkeit von Fußgängern ist bei NIR-Systemen, wie auch beim gewöhnlichen Scheinwerfer, vom Reflexionsgrad ihrer Kleidung abhängig. Die hervorgehobene Darstellung von Reflektoren und Lichtquellen, die bereits ohne NightVision-System gut sichtbar sind, bietet dem Fahrer keinen Mehrwert.



Bild 2.7 : Typisches NIR-Bild

Bild 2.8 vergleicht die Reflexionsfaktoren einiger Objekte im nahen Infrarot. Anhang A erläutert die Messung der Reflexionsgrade und stellt sie tabellarisch dar. Der Reflexionsgrad der menschlichen Haut, von Kleidung und Fell ist viel geringer als der Reflexionsfaktor von Straßenschildern und Leitpfosten. Dies führt dazu, dass Menschen und Tiere vergleichsweise dunkel im NIR-Bild erscheinen und dementsprechend schwieriger zu erkennen sind. Selbst Grünpflanzen reflektieren besser als Menschen und Tiere, so dass Bäume und Sträucher im NIR-Bild besser sichtbar sind.

Die rauschäquivalente Leistung oder NEP (Noise Equivalent Power) eines optoelektronischen Empfängers gibt die minimale Strahlungsleistung Φ_{NEP} an, die der Sensor von Rauschen unterscheiden kann. Der Empfänger gibt einen Dunkelstrom I_{NEP} ab, auch wenn er nicht bestrahlt wird und $\Phi = 0$ lm gilt [HBG01]. Die Sättigung beschreibt die

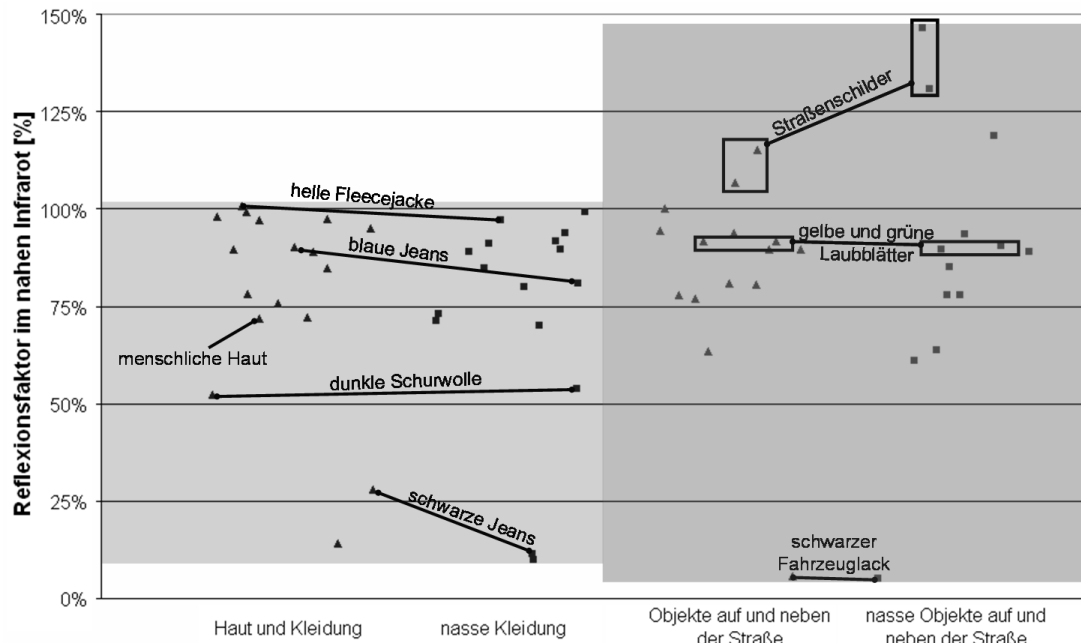


Bild 2.8 : IR-Reflektivitäten einiger Objekte

Strahlungsleistung Φ_{MAX} , die den Sensor maximal aussteuert und den Sättigungsstrom I_{MAX} hervorruft. Das Verhältnis zwischen beiden Signalleistungen stellt die Dynamik D des Empfängers dar:

$$D = \frac{\Phi_{MAX}}{\Phi_{NEP}} \quad \text{oder} \quad D_{log} = 10 \cdot \log \Phi_{MAX} - 10 \cdot \log \Phi_{NEP}. \quad (2.1)$$

Bild 2.9 zeigt den schematischen Aufbau eines Bildpunkts einer CCD-Kamera, die aus der flächenhaften Anordnung vieler solcher Bildpunkte, so genannter Pixel, besteht. Das Diagramm in Bild 2.9 stellt die lineare Kennlinie eines Pixels mit der Empfindlichkeit

$$S = \frac{I_{Pixel}}{E} \quad (2.2)$$

dar. Die Bestrahlungsstärke $E = \Phi/A$ ist die auf die Fläche A eines Pixels fallende Strahlungsleistung Φ , die in den Bildpunkten den Strom I_{Pixel} erzeugt. Der Strom I_{Pixel} entsteht durch die Trennung der Ladungen dQ in der strahlungsempfindlichen Raumladungszone (RLZ) des Sensor-Halbleitermaterials während der Integrationszeit dt , so dass $I_{Pixel} = dQ/dt$ gilt [HBG01].

Da die Pixel die Ladungen nicht sofort ableiten, sondern während der Integrationszeit sammeln, entsteht eine Spannung, die mit der Bestrahlungsstärke E und der Integrationszeit dt steigt. Deshalb geben Sensorhersteller die Empfindlichkeit als Spannung U , die bei der Bestrahlung $H = E \cdot dt$ des Sensors entsteht, in der Einheit $1 \text{ V}/(\text{lx} \cdot \text{s})$ an.

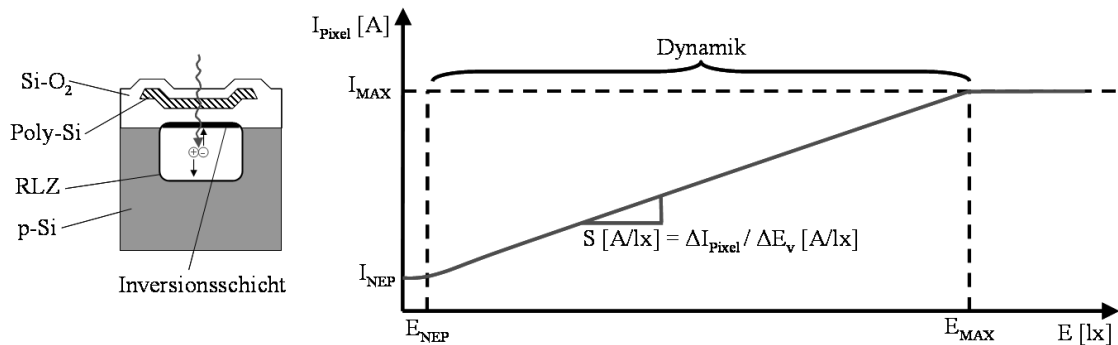


Bild 2.9 : Aufbau und lineare Empfindlichkeitskennlinie eines Bildsensors

Kameras versuchen, die gesamte Dynamik der Szene zu erfassen. Ist die Dynamik der Umwelt größer als die Dynamik der Kamera, muss der Sensor seine Integrationszeit dt anpassen, um den interessierenden Signalbereich abbilden zu können: strahlungsempfindliche Sensoren erzeugen auch bei geringen Bestrahlungsstärken viele Ladungen und liefern Informationen von schwach bestrahlten Szenen. Wenn die Bestrahlungsstärke über E_{MAX} steigt, erreicht die Ladungsgenerierung die Sättigung, so dass die Bildpunkte die Informationen des entsprechenden Bildbereichs nicht vollständig wiedergeben können. Da die erzeugten Ladungen $dQ = I_{Pixel} \cdot dt$ proportional zur Integrationszeit sind, kann der Sensor die Sättigung der Ladungsgenerierung durch die Reduzierung der Integrationszeit dt auf höhere Bestrahlungsstärken E_{MAX} verschieben. Dadurch erzeugen jedoch schwach bestrahlte Bildregionen nur geringe Ladungsmengen, so dass der Sensor die Informationen dieser Bildbereiche nicht abbilden kann. Für NightVision ist eine hohe Empfindlichkeit von mindestens $S = 15 \text{ V/lx}\cdot\text{s}$ sowie eine hohe Dynamik der Kamera von mindestens $D = 120 \text{ dB}$ notwendig, da der Sensor bei hellen Scheinwerfern entgegenkommender Fahrzeuge nicht übersteuern darf und gleichzeitig Informationen aus schwach bestrahlten Bereichen des Vorfelds erfassen muss.

CCD-Sensoren haben eine hohe Empfindlichkeit, so dass sie schwach bestrahlte Bereiche gut darstellen können. Ihre konstante Empfindlichkeit bedingt jedoch eine geringe Dynamik von etwa $D = 60 \text{ dB}$ und führt bei retroreflektierenden Objekten und aktiven Strahlungsquellen zu so genannten Blooming-Effekten [Hol96, RBR04]. Blooming entsteht, wenn der Sensor mehr Ladungsträger generiert als die Potenzialtöpfe der einzelnen Bildpunkte aufnehmen können. Die überschüssigen Ladungsträger laufen in die umliegenden Bildpunkte über und zerstören deren Bildinformation [Die06, RBR04]. Bild 2.10 zeigt ein NIR-Bild, in dem die Bremsleuchten eines vorausfahrenden Fahrzeugs und die Ampelanlage das Bild überstrahlen, so dass der Radfahrer in der ovalen Markierung nicht mehr sichtbar ist. Die Reduzierung der Integrationszeit verringert diesen Effekt zwar, jedoch kann die CCD-Kamera dunkle Bereiche des Bildes nicht mehr darstellen.



Bild 2.10 : NIR-Bild mit Blooming

CMOS-Kameras vermeiden Blooming, indem sie überschüssige Ladungsträger mit Hilfe direkt auf dem Sensor integrierter Schaltungen ableiten [RBR04, Göh02]. Überstrahlungen treten dann nur noch durch Streuung der IR-Strahlung an der Frontscheibe und der Kameralinse auf. Die zusätzliche Elektronik auf dem Sensor ermöglicht es, den Inhalt jedes Bildpunkts direkt auszulesen [Die06]. CMOS-Kameras können quasi-logarithmische Empfindlichkeitskennlinien nach Bild 2.11 annehmen und ihre Dynamik auf $D \geq 120$ dB erweitern. Die integrierte Elektronik verringert jedoch auch die strahlungsempfindliche Fläche der Bildpunkte, so dass CMOS-Sensoren auf Grund des kleineren Füllfaktors eine geringere Empfindlichkeit als CCD-Sensoren haben.

Die Aufzeichnung und Mischung von zwei unterschiedlich belichteten Bildern kann die Bilder einer Kamera mit extrem hoher Dynamik und geringer Empfindlichkeit simulieren: Dabei ist jeweils ein Bild schwach belichtet und beinhaltet lediglich sehr stark reflektierende und helle Objekte der Szene, während das andere Bild stark belichtet ist und Objekte aus schwach belichteten Bereichen aufzeichnet [Fle02]. Das Mischverfahren muss die übersteuernden Bildanteile des stark belichteten Bildes durch die entsprechenden Bildanteile des schwach belichteten Bildes ersetzen. Die beiden Teilbilder können aus zwei verschiedenen Kameras mit unterschiedlicher Empfindlichkeit und Integrationszeit oder aus einer einzigen Kamera mit doppelter Bildaufnahmefrequenz von mindestens 50 Hz stammen. Bei der Mischung der Bilder von zwei Kameras kann beispielsweise eine CMOS-Kamera das schwach belichtete und eine CCD-Kamera das stark belichtete Bild liefern. Bei der doppelten Bildaufzeichnung mit einer Kamera muss sich zwischen zwei

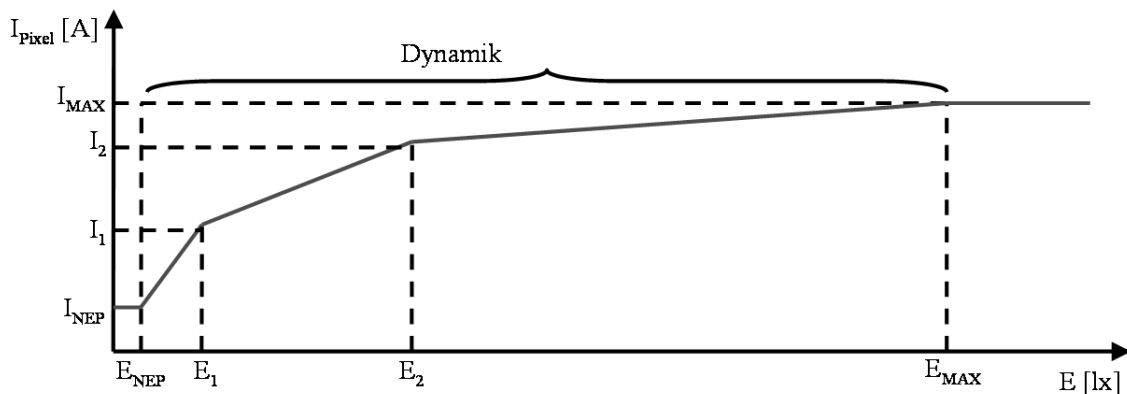


Bild 2.11 : Quasi logarithmische Empfindlichkeitskennlinie eines CMOS-Bildsensors

Bildaufzeichnungen die Empfindlichkeit der Kamera oder die Bestrahlungsstärke ändern. Die Mischung der Teilbilder erzeugt an den Übergangsbereichen störende Artefakte.

Ähnliche Artefakte entstehen, wenn Bildverarbeitungsalgorithmen Histogrammanpassungen vornehmen, um das Bild einer hochdynamischen Kamera auf die geringere Dynamik einer Anzeige zu komprimieren und dabei versuchen, die Helligkeit dunkler Bildbereiche anzuheben. Bild 2.12 zeigt ein Beispiel einer Bildmischung (links) und einer lokalen Histogrammanpassung (rechts) mit Übergangsartefakten im Bereich der Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge.



Bild 2.12 : Übergangsartefakte bei hochdynamischen Bildinhalten

Die Darstellung eines Bildbereiches hängt wie beschrieben von der NEP, der Empfindlichkeit S der Kamera und der Bestrahlung $H = E \cdot dt$ ab. Ist die maximale Integrationszeit des Sensors mit der gegebenen Empfindlichkeit S erreicht, muss die Bestrahlungsstärke steigen, um dunkle Bildbereiche abzubilden. Dabei besteht die Möglichkeit, die strahlungsempfindliche Fläche A der Pixel und damit auch die gesamte Kamera zu vergrößern oder die Bestrahlungsintensität zu steigern.

Die Strahlungsquelle muss dabei jedoch augensicher bleiben: Da die Rezeptoren im Auge im Wellenlängenbereich der NIR-Strahlung nur eine sehr geringe Restempfindlichkeit aufweisen [HBG01], ist NIR-Strahlung für das menschliche Auge kaum sichtbar. Dadurch setzt der Lidschlussreflex aus, der bei sichtbarem Licht bei Blendung eintritt und die Rezeptoren vor zu hohen Lichtenergien schützt. Die auf die Netzhaut treffende Energie der NIR-Strahlung kann das Auge schädigen. Bei infraroter Strahlung kann insbesondere eine thermische Überlastung der vorderen Augenpartien und eine Verbrennung der Netzhaut eintreten. Internationale Kommissionen und Berufsgenossenschaften, die sich mit nicht-ionisierender Strahlung sowie Sicherheit und Gesundheit am Arbeitsplatz befassen, sprechen Empfehlungen für Intensitätsgrenzwerte aus [Int97, Ber04, BBR⁺05]. Strahlungsquellen sollten diese Grenzwerte nicht überschreiten, um Schädigungen des Auges zu vermeiden. Die maximale Betrachtungszeit hängt dabei von der Strahldichte der Quelle und ihrer Größe ab.

Im Wellenlängenbereich zwischen $\lambda = 380 \text{ nm}$ und $\lambda = 1400 \text{ nm}$ sollte die Strahlungsquelle eine maximale Strahldichte $L_{R(GW)}$ von

$$L_{R(GW)} = \begin{cases} \frac{2,8 \cdot 10^4}{C_\alpha} \frac{W}{m^2 sr} & \text{für Betrachtungszeiten} > 10 \text{ s,} \\ \frac{5 \cdot 10^4}{C_\alpha t^{1/4}} \frac{W \sqrt[4]{s}}{m^2 sr} & \text{für Betrachtungszeiten zwischen } 18 \mu\text{s} \text{ und } 10 \text{ s und} \\ \frac{41,2}{C_\alpha t^{0,9}} \frac{W s^{0,9}}{m^2 sr} & \text{für Betrachtungszeiten} < 18 \mu\text{s} \end{cases}$$

nicht überschreiten, um eine thermische Überlastung der Netzhaut zu vermeiden.

Die Strahldichte L_R berechnet sich aus der Gewichtung der spektralen Strahldichte $L(\lambda)$ der Quelle mit der relativen spektralen Wirksamkeit für die thermische Netzhautgefährdung $R(\lambda)$ über den relevanten Spektralbereich

$$L_R = \int_{380 \text{ nm}}^{1400 \text{ nm}} L(\lambda) \cdot R(\lambda) d\lambda. \quad (2.3)$$

$L(\lambda)$ muss die spektrale Strahldichte des so genannten “Hot-Spots”, also des Punktes mit maximaler Strahldichte der Quelle wiedergeben. Für den NIR-Scheinwerfer reicht die Integration zwischen $\lambda = 780 \text{ nm}$ und $\lambda = 1400 \text{ nm}$ aus, da der Interferenzfilter im Scheinwerfer den sichtbaren Anteil des Lichts herausfiltert (siehe Bild 2.5).

C_α beschreibt die Winkelausdehnung der Strahlungsquelle in Bogenmaß vom Betrachter aus. Bei direktem Blick in die Quelle von vorne ist

$$C_\alpha = \begin{cases} \alpha_{min} & = 0,15 \text{ mrad} & \text{für } \alpha \leq \alpha_{min} \\ \alpha & = 2 \cdot \arctan \frac{r}{d} & \text{für } \alpha_{min} < \alpha < \alpha_{max} \\ \alpha_{max} & = 100 \text{ mrad} & \text{für } \alpha \geq \alpha_{max}. \end{cases}$$

Dabei beschreibt r den Radius der Strahlungsquelle und d den Abstand des Betrachters zur Quelle. H7-Halogenlampen bei einer Betriebsspannung von $U = 13,2 \text{ V}$ und mit einem Lichtstrom von $\Phi = 1500 \text{ lm}$ überschreiten die Grenzwerte erst bei Blickdauern von mehr als 25 Minuten. Höhere Betriebsspannungen der Halogenlampe und höhere Strahlungsleistungen, wie etwa die einer H9-Lampe, verkürzen zwar die maximal zulässige Blickdauer, sie bleibt jedoch im unkritischen Bereich.

Viel kritischer sind die thermischen Schäden am Auge durch Wellenlängen im Bereich von $\lambda = 780 \text{ nm}$ bis $\lambda = 3000 \text{ nm}$. Hier darf die Bestrahlungsstärke

$$E_{IR} = \int_{780 \text{ nm}}^{3000 \text{ nm}} E_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (2.4)$$

über den Spektralbereich den Grenzwert von

$$E_{IR(GW)} = \frac{18000 \text{ W s}^{3/4}}{t^{3/4} \text{ m}^2} \quad (2.5)$$

nicht überschreiten.

Bei einer Bestrahlungsstärke E_{IR} der NIR-Quelle in einer Entfernung d ergeben sich die maximalen Blickdauern in Abhängigkeit der Entfernung zur Strahlungsquelle zu

$$t = \left(\frac{18000 \text{ W s}^{3/4}}{E_{IR}(d) \text{ m}^2} \right)^{4/3}. \quad (2.6)$$

Bild 2.13 zeigt die maximale Blickdauer in einen NIR-Strahler mit H7-Lampe bei einer Spannung von $U = 12,5 \text{ V}$ in Abhängigkeit des Betrachtungsabstands zur Strahlungsquelle. Die Darstellung basiert auf dem Ergebnis einer Bestrahlungsstärkemessung eines für ein NIR-NightVision ausgelegten IR-Scheinwerfer [Fac03].

Nach Bild 2.13 können bereits Betrachtungszeiten von 10 s kritisch sein. Dadurch ist die Reichweite des Systems durch die Augensicherheit und die maximal zulässige Bestrahlungsstärke begrenzt. Um auch kurze Betrachtungszeiten in die Strahlungsquelle bei geringem Abstand zu vermeiden, sollten NIR-Scheinwerfer bei geringer Geschwindigkeit

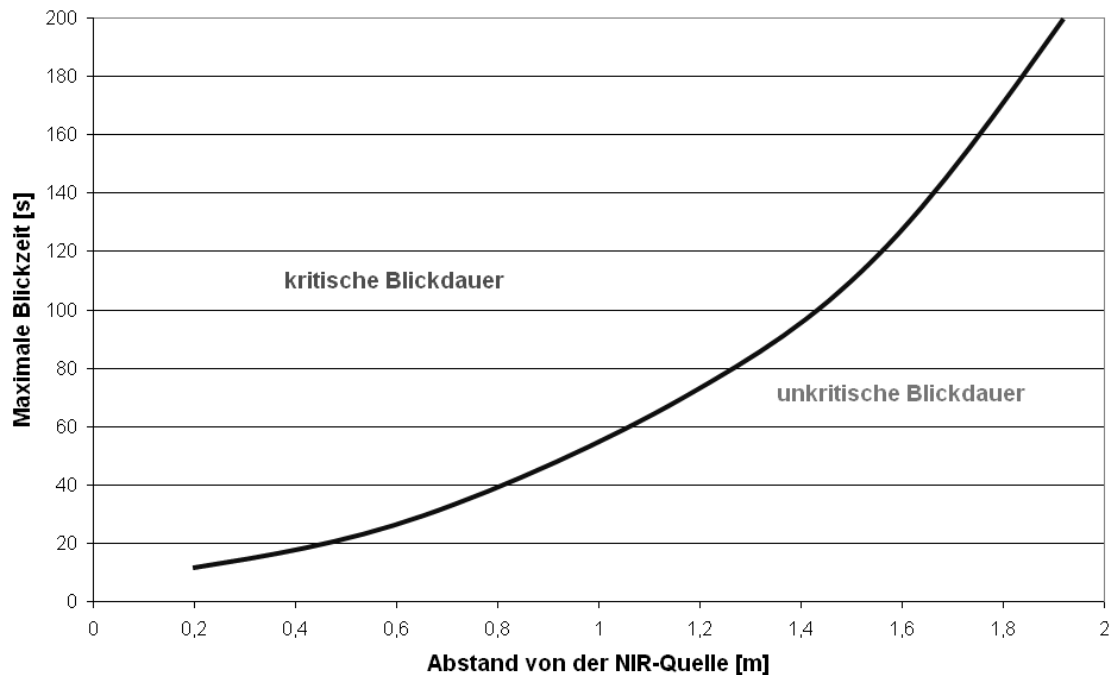


Bild 2.13 : Blickzeiten in eine NIR-Quelle in Abhängigkeit vom Betrachtungsabstand

und im Stand abgeschaltet werden. Die Abschaltung der IR-Scheinwerfer im Stand ist insbesondere wichtig, da der Interferenzfilter nicht das gesamte sichtbare Licht herausfiltern kann und der Scheinwerfer je nach Blickrichtung in verschiedenen Farben schillert [IY03]. Gerade dieser Farbeffekt weckt großes Interesse bei Passanten, die daraufhin den Scheinwerfer genauer aus der Nähe betrachten möchten.

Je nach Empfindlichkeit der verwendeten Kamera und der Intensität der Bestrahlung erreichen NIR-Systeme Reichweiten von 80 bis 120 m und bleiben unter der Reichweite des Fernlichts (Bild 1.7). Hersteller von NIR-Systemen geben höhere Reichweiten für ihre Systeme an, wobei hier die Art der Reichweitenbestimmung entscheidend ist [Ols87], da reflektierende Leiteinrichtungen höhere Sichtweiten suggerieren [Lan95, Rum02].

Die Helligkeit eines Objektes im Bild eines NIR-Systems hängt neben der Leistung der Strahlungsquelle und der Bestrahlung der Kamera von der atmosphärischen Dämpfung, der wirksamen Reflexionsfläche und der Richtcharakteristik des Objektes in der Szene ab. Diese Parameter sind gegeben und liegen außerhalb des Einflussbereichs des Systems, können jedoch die Reichweite des Systems extrem beeinflussen, wenn beispielsweise durch Regen oder Nebel die atmosphärische Dämpfung auf Grund der Streuung und Reflexion der IR-Strahlen an Wassertropfen steigt [Ekb70] oder Kleidung von Menschen und Fell von Tieren geringe Reflexionsgrade aufweisen. Der einzige zur Optimierung verbleibende Parameter ist die Bestrahlung der Kamera.

NIR-Systeme mit gepulster Ausstrahlung versuchen, die Hervorhebung fremder Lichtquellen und die Blendung durch entgegenkommende Fahrzeuge zu reduzieren. Sie nutzen eine Halbleiterbestrahlung anstatt eines statisch strahlenden Halogenscheinwerfers mit Interferenzfilter. Diese kann aus einem oder mehreren NIR-Lasern oder aus Infrarot-emittierenden Dioden (IREDs) bestehen, die schmalbandig nur im NIR-Bereich Strahlung aussenden [Moi05, BAE01]. Ziel der Pulsung ist die Konzentration der maximal zulässigen Leistung auf kurze Integrationszeiten, um in diesen Phasen eine möglichst gute Bestrahlung der Szene zu erreichen und den Einfluss von anderen in der Szene vorhandenen Strahlungsquellen zu minimieren. Bild 2.14 zeigt eine gepulste Ausstrahlung im Vergleich zur statischen Ausstrahlung.

Die Pulsung führt nur zum Ziel, wenn die Kamera zur Ausstrahlung synchronisiert ist und nur dann ein Bild aufnimmt, wenn die Strahlungsquelle einen Puls aussendet und kein Bild aufnimmt, wenn sie aus ist. Der Sensor muss die Szene deshalb in der kurzen Zeit erfassen, in der die Quelle einen Puls aussendet. Die meisten Kameras bilden die Szene zeilenweise ab und lesen die erfasste Bildzeile aus, während die nächste Bildzeile zur Informationsaufnahme freigegeben ist. Dieses so genannte Rolling-Shutter-Prinzip ist für ein gepulstes NightVision-System ungeeignet, da die zeilenweise Integration der Ladungsträger viel Zeit in Anspruch nimmt und ein kurzer Puls der Strahlungsquelle nicht ausreicht, um alle Bildzeilen zu erfassen. Die NIR-Quelle müsste mehrere Pulse aussenden und wäre dann praktisch immer an. Kameras mit einem so genannten Global-Shutter bilden die Szene auf allen Bildpunkten des Sensors gleichzeitig ab [Göh02] und eignen sich aus diesem Grund besser für gepulste Systeme. Bild 2.15 vergleicht die Integrationsladungen, die bei der gepulsten und statischen Ausstrahlung nach Bild 2.14 in der Kamera entstehen.

Da die beim Detektor eintreffende Strahlungsenergie Q_e aus dem Integral aus ausgestrahlter Strahlungsleistung Φ_e über der Integrationszeit im gepulsten und statischen Fall gleich ist, entsprechen sich auch die Reichweiten der Systeme. Die Blendung der Kamera durch andere Strahlungsquellen ist jedoch bei gepulsten Systemen deutlich geringer, da fremde Strahlungsquellen nur in den kurzen Pulsphasen der Halbleiterbestrahlung Integrationsladungen in der Kamera erzeugen können.

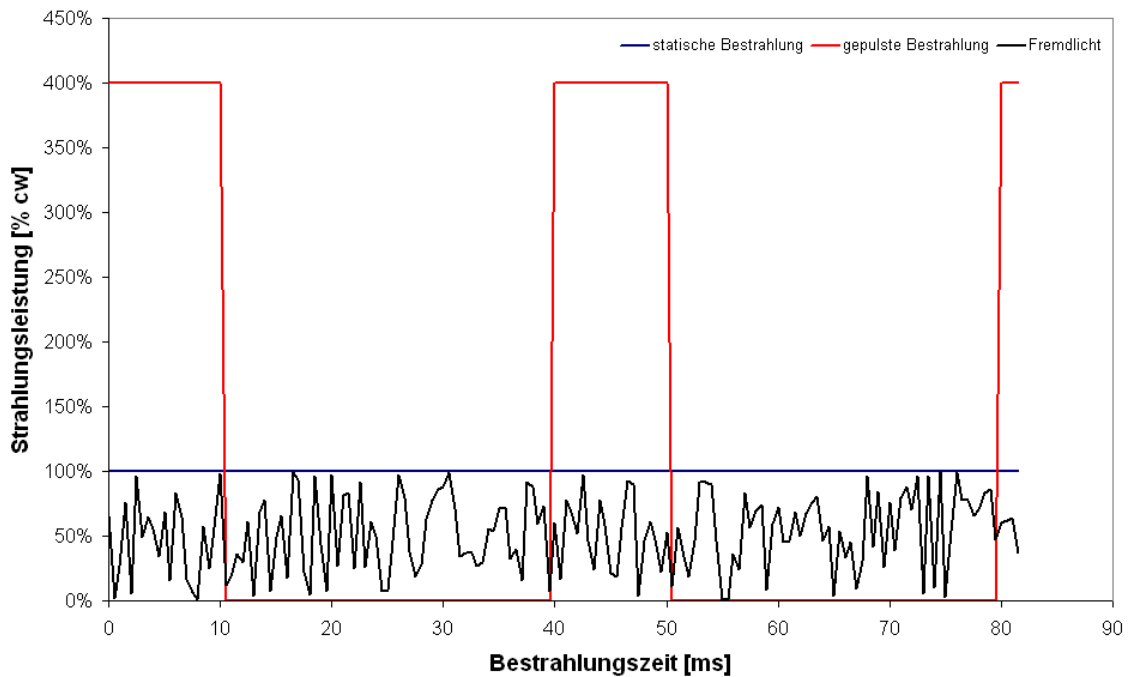


Bild 2.14 : Vergleich einer gepulsten und statischen Ausstrahlung

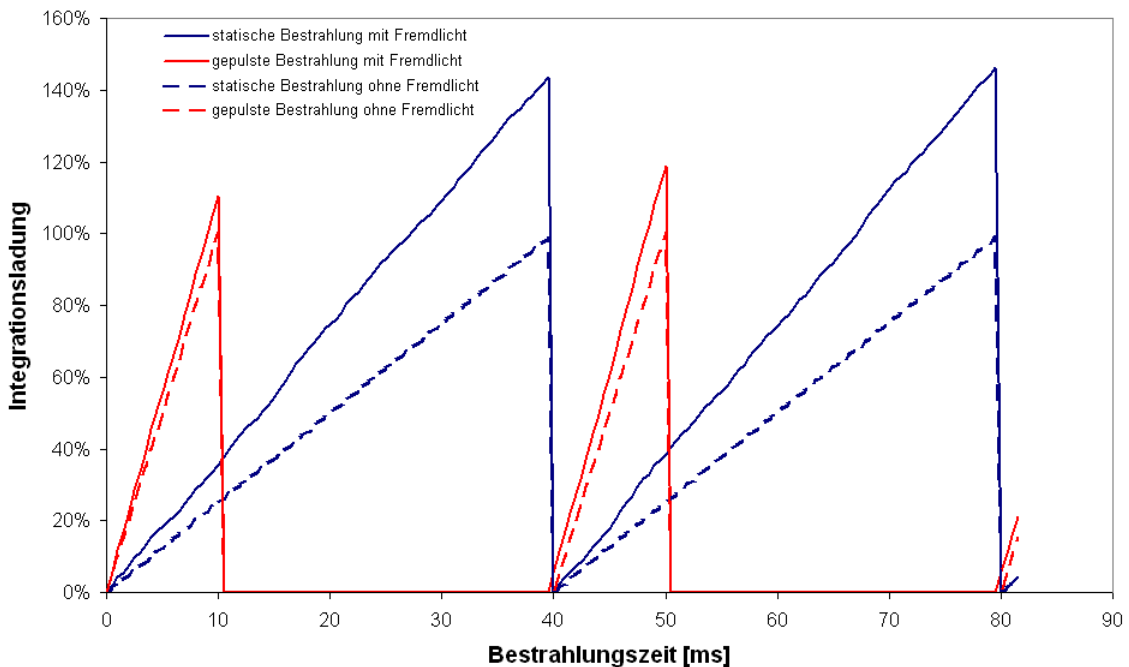


Bild 2.15 : Ladungsgenerierung bei gepulster und statischer Bestrahlung

Eine Kamera mit der spektralen Empfindlichkeit $S(\lambda)$ nimmt im statischen Fall während der Integrationszeit t_s über das für NIR-Systeme typische Wellenlängenspektrum die Leistung $\Phi_{r,stat.}$ mit

$$\Phi_{r,stat.} \propto \int_0^{t_s} \int_{780nm}^{1100nm} S(\lambda) \cdot (E_{stat.}(\lambda) + E_{fremd}(\lambda)) d\lambda dt \quad (2.7)$$

auf. Auf Grund der zeitlichen Unabhängigkeit der spektralen Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ der Strahlungsquellen innerhalb der Integrationszeit gilt

$$\Phi_{r,stat.} \propto t_s \cdot \int_{780nm}^{1100nm} S(\lambda) \cdot E_{stat.}(\lambda) d\lambda + t_s \cdot \int_{780nm}^{1100nm} S(\lambda) \cdot E_{fremd}(\lambda) d\lambda. \quad (2.8)$$

Dabei enthält das erste Integral die von der eigenen Strahlungsquelle ausgesandte und an den Objekten reflektierte Bestrahlungsstärke $E_{stat.}$ und das zweite Integral die von Fremdquellen meistens direkt auf den Detektor treffende Bestrahlungsstärke E_{fremd} . Für den gepulsten Fall nach Bild 2.14 mit einer Impulsüberhöhung um den Faktor k nimmt die Kamera nur noch

$$\Phi_{r,puls.} \propto \int_0^{t_s/k} \int_{780nm}^{1100nm} S(\lambda) \cdot k \cdot E_{stat.}(\lambda) d\lambda dt + \int_0^{t_s/k} \int_{780nm}^{1100nm} S(\lambda) \cdot E_{fremd}(\lambda) d\lambda dt \quad (2.9)$$

oder

$$\Phi_{r,puls.} \propto \frac{t_s}{k} \cdot k \int_{780nm}^{1100nm} S(\lambda) \cdot E_{stat.}(\lambda) d\lambda dt + \frac{t_s}{k} \int_{780nm}^{1100nm} S(\lambda) \cdot E_{fremd}(\lambda) d\lambda dt \quad (2.10)$$

auf und verringert den Einfluss fremder Strahlungsquellen um den Faktor k , ohne dabei das Ergebnis der eigenen Ausstrahlung zu mindern. Ein zusätzlicher Passfilter vor dem Detektor (Kamerafilter), der nur das schmalbandige Wellenlängenspektrum der Halbleiterbestrahlung durchlässt und alle anderen Wellenlängen sperrt, kann den Einfluss anderer aktiver Quellen durch die Verkleinerung der Intervallgrenzen weiter reduzieren. Das Spektrum von IREDs für NIR-NightVision-Systeme befindet sich üblicherweise im Bereich von $\lambda = 850 \text{ nm}$ bis $\lambda = 880 \text{ nm}$, so dass ein Kamerafilter zwischen $\lambda = 800 \text{ nm}$ und $\lambda = 930 \text{ nm}$, der die Empfindlichkeit $S(\lambda)$ der Kamera künstlich auf den Durchlassbereich beschränkt, gut geeignet ist. Der Einfluss der eigenen Ausstrahlung ist auch hier nicht beeinträchtigt, so lange die Ausstrahlung der LEDs im Durchlassbereich des Filters ist. Der Einfluss fremder Strahlungsquellen reduziert sich jedoch erheblich, da die meisten Störquellen breitbandig sind und nur ein kleiner Teil ihres Leistungsspektrums

in den Durchlassbereich des Filters fällt. Ein solcher Passfilter nimmt jedoch die Möglichkeit, die Kamera gleichzeitig für andere Systeme zu verwenden, die Informationen aus dem sichtbaren Spektralbereich benötigen. Bild 2.16 zeigt die spektrale Empfindlichkeit einer CMOS-Kamera, die Strahldichte eines statischen Halogen- und eines gepulsten IRED-Strahlers, die Durchlassbereiche des Kamerafilters und des Interferenzfilters in der statischen Bestrahlung und die sich daraus ergebenden wirksamen Spektralanteile bei gepulsten und ungepulsten Systemen.

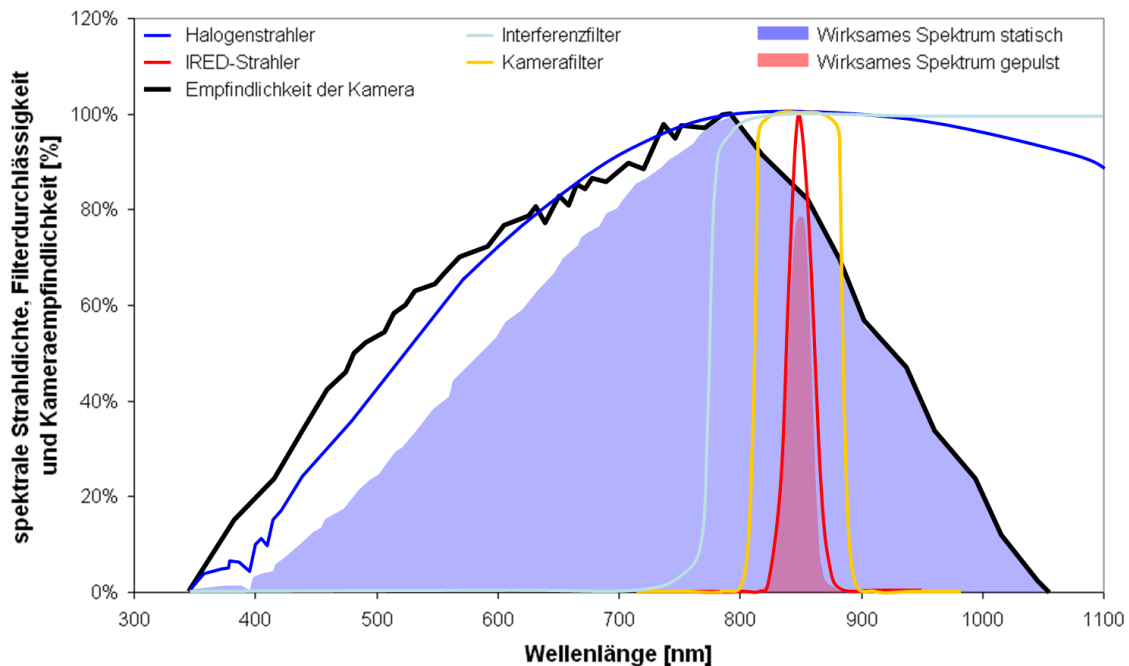


Bild 2.16 : Strahldichte gepulster und ungepulster Strahlungsquellen, Durchlassbereiche des Interferenz- und Kamerafilters, Empfindlichkeit einer CMOS-Kamera und wirksame Spektralanteile bei gepulsten und ungepulsten Systemen

Ein gepulstes System mit Passfilter kann die Blendung durch andere Verkehrsteilnehmer und den Einfluss anderer aktiver Strahlungsquellen in der Szene verringern, so lange entgegenkommende Fahrzeuge nicht dasselbe System besitzen, das mit IR-Strahlung derselben Wellenlänge ausstrahlt. Für diese Fälle ist eine intelligente Steuerung der Integrationszeit notwendig, die den Fall der Blendung erkennt oder durch stochastische Puls-generierung praktisch ausschließt [TGR06]. Bild 2.17 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf der Pulse von zwei sich entgegenkommenden NIR-NightVision-Fahrzeugen, die auf gleicher Wellenlänge arbeiten. Bild 2.18 stellt die zugehörige Ladungsgenerierung des zeitlich zuerst pulsierenden Fahrzeugs dar. Bilder 2.19 und 2.20 zeigen die Pulse und die Ladungsgenerierung bei stochastischer Ausstrahlung für den Fall, dass die Kamera vor dem Auslesen mehrmals Ladungen integrieren kann [TGR06].

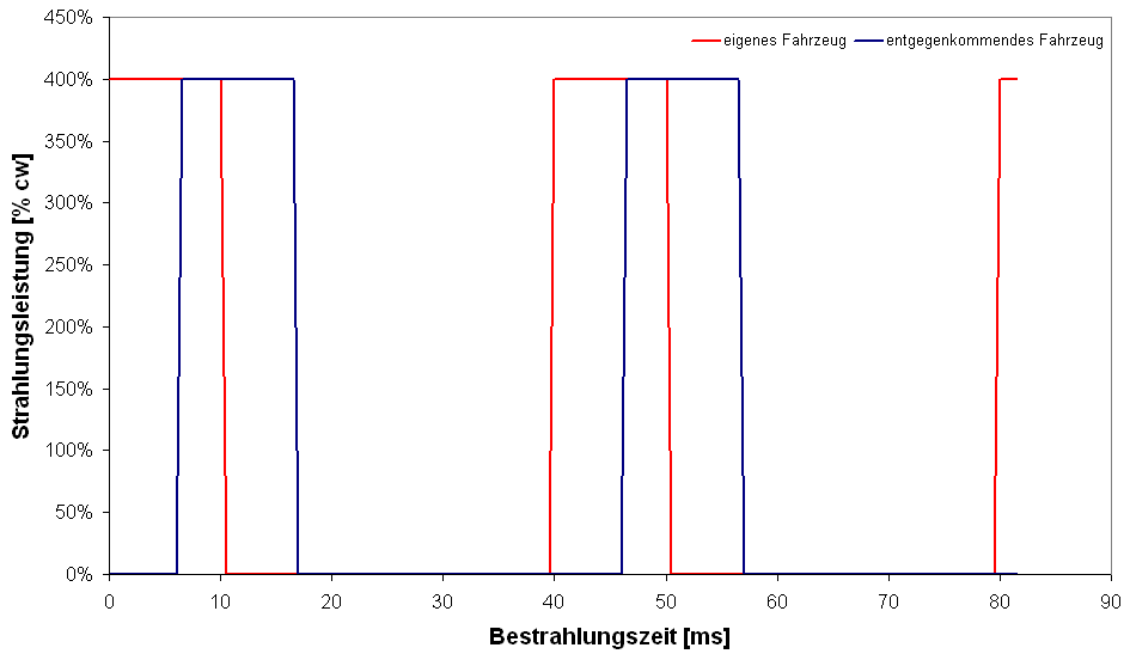


Bild 2.17 : Überlagerung von Pulsen gleicher Wellenlänge

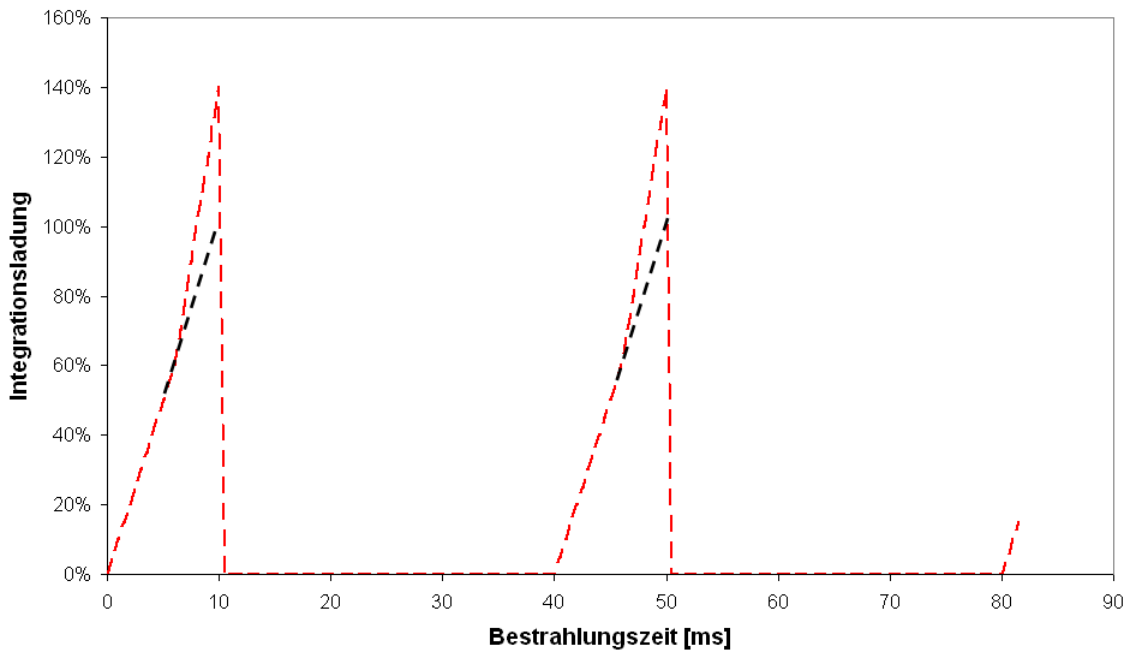


Bild 2.18 : Ladungsgenerierung bei überlagerten Pulsen

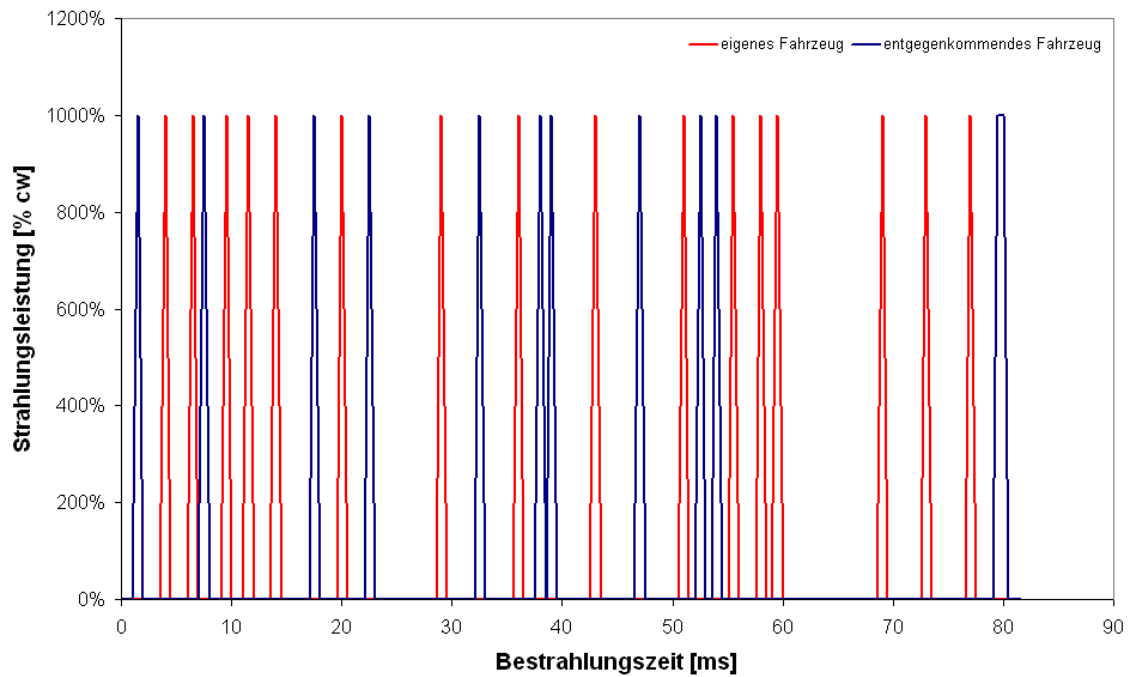


Bild 2.19 : Pulse bei stochastischer Ausstrahlung

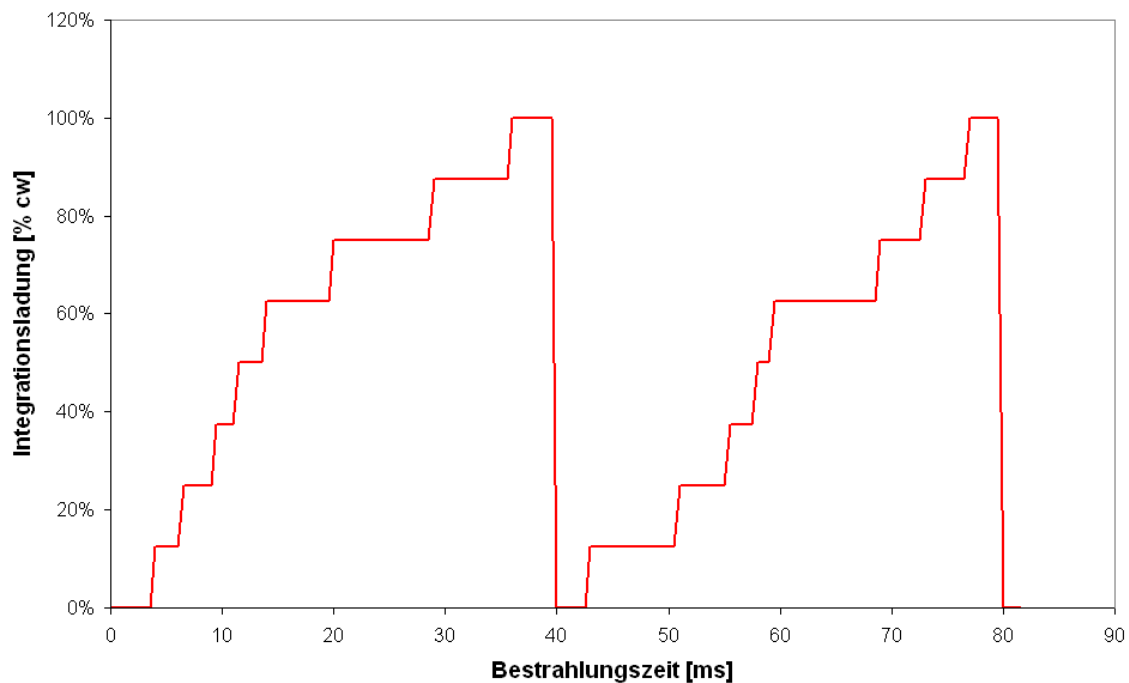


Bild 2.20 : Ladungsgenerierung bei stochastischer Bestrahlung

Da der Bildinhalt von NIR-Systemen die Reflexionsgrade der angestrahlten Objekte wiedergibt und diese unabhängig von der Integrationszeit sind, reflektieren beispielsweise Straßenschilder immer stärker als Menschen oder Tiere. Die Pulsung kann demnach nicht verhindern, dass das System Straßenschilder, Begrenzungspfosten und andere Reflektoren heller darstellt als Lebewesen.

Bei gepulsten Strahlungsquellen ist die Augensicherheit ebenfalls zu beachten. Hier gilt neben dem Grenzwert der maximalen Bestrahlungsstärke für die gemittelte Impulsfolge auch ein um den Faktor $k = N^{-0,25}$ reduzierter Grenzwert für den Einzelimpuls. Dabei beschreibt N die Anzahl der Einzelpulse in der Expositionsdauer [DIN97].

Der Öffnungswinkel einer Kamera bestimmt den Ausschnitt der Umwelt, den das Kameraobjektiv auf den Sensor abbildet. Bei konstanter Sensorauflösung und steigendem Öffnungswinkel muss jedes Sensorelement einen größeren Bildausschnitt erfassen. Dadurch bilden sich Objekte auf weniger Bildpunkten ab und erscheinen kleiner, wenn der Öffnungswinkel steigt. Umgekehrt bilden sich Objekte auf mehr Bildpunkten ab und erscheinen dadurch größer und näher, wenn der Öffnungswinkel der Kamera sinkt.

Der optimale Öffnungswinkel für NIR-Kameras liegt bei 22 bis 24° [Fle01]. Grundsätzlich möchte das System einen großen Erfassungsbereich anbieten, um auch Objekte, die sich vor dem Fahrzeug im seitlichen Nahbereich befinden, anzeigen zu können. Größere Öffnungswinkel erschweren jedoch die Erkennbarkeit der Bildinhalte und die Orientierung im Bild, da die Bildinhalte kleiner und weiter entfernt erscheinen. Bei einem Öffnungswinkel von 22 bis 24° kann der Mensch Entfernungen und Größen am besten einschätzen, sofern die Kamera das Bild der Szene nicht verzerrt.

Bei Regen, Schnee und Nebel sinkt die Reichweite des NIR-Systems, da Wassermoleküle in der Luft die ausgesandte NIR-Strahlung absorbieren und streuen sowie die Strahlung zur Kamera zurückreflektieren, bevor sie ein Objekt der Szene treffen kann [Ekb70]. Bei Regen und Gischt verzerren Wassertropfen auf der Frontscheibe das Abbild des Fahrzeugvorfelds, da sie die einfallenden Strahlen brechen und damit die Bildaufzeichnung stören. Zwar überstreicht der Scheibenwischer den Sichtbereich der Kamera, dennoch stören die sich auf der Scheibe sammelnden Tropfen die Bildaufnahme.

NIR-Systeme bieten eine größere Reichweite als das Abblendlicht, ohne dabei den Gegenverkehr zu blenden. Sie liefern ein sehr detailreiches Bild, das der visuellen Wahrnehmung des Menschen entspricht und in dem sich der Nutzer gut orientieren kann [TKM⁺04]. Das technische Prinzip hebt besonders stark reflektierende Objekte und aktive Lichtquellen im Bild hervor, die auch ohne NightVision-System gut sichtbar sind. Diese Objekte dominieren im Gegensatz zu Menschen und Tieren das Bild und ziehen die Aufmerksamkeit des Fahrers auf sich [TKM⁺04].

2.1.3 Passive NightVision-Systeme

Passive NightVision-Systeme [KB03] nutzen die Plancksche Strahlung, die von jedem Körper mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt ausgeht [Pau95, Pau92]. Alle Objekte senden in Abhängigkeit von ihrer Temperatur und ihrer Oberflächenbeschaffenheit Strahlung aus. Bild 2.21 zeigt den spektralen Verlauf der ausgesandten Strahlung in Abhängigkeit von der Temperatur in doppelt-logarithmischer Darstellung.

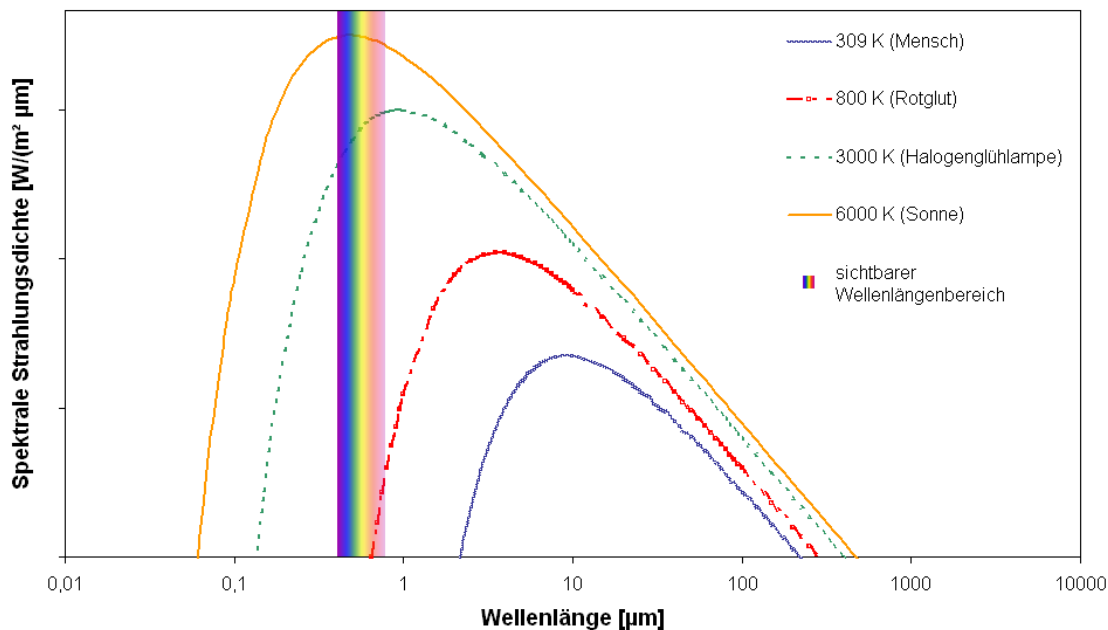


Bild 2.21 : Plancksche Strahlung

Bei der Strahlung von $\lambda = 8 \mu\text{m}$ bis $\lambda = 12 \mu\text{m}$ handelt es sich um einen Teilbereich der Wärmestrahlung oder der so genannten Ferninfrarot-Strahlung (FIR). Das Wort “Fern” beschreibt den spektralen Abstand der Wärmestrahlung zum sichtbaren Licht. Wärmebildkameras empfangen und zeichnen die FIR-Strahlung auf und sind vollkommen unabhängig von der Umgebungshelligkeit und der Beleuchtung. Da FIR-Systeme keine Beleuchtung benötigen, werden sie auch als “passive NightVision-Systeme” bezeichnet.

Bild 2.22 zeigt ein typisches Wärmebild. Die Kamera bildet die Temperaturverteilung des Fahrzeugvorfelds ab und stellt warme Objekte hell und kalte Objekte dunkel dar. Menschen, Tiere und aufgeheizte Objekte wie Fahrzeugreifen, Kamine und Beleuchtungen senden mehr Wärme aus als beispielsweise Straßen, Häuser und Bäume und erscheinen deshalb heller im Bild. Die Kamera stellt Objekte mit gleicher Temperaturausstrahlung gleich hell dar, so dass beispielsweise Leitpfosten, die die Umgebungstemperatur angenommen haben oder Aufschriften von Verkehrsschildern im Wärmebild nicht sichtbar sind. Erreicht die Umgebungstemperatur die Körpertemperatur von Lebewesen, sind

auch diese nicht mehr im Bild sichtbar. Da die Wärmebildkamera im Spektralbereich des sichtbaren Lichts unempfindlich ist, stellt sie das Licht von Scheinwerfern nicht dar.

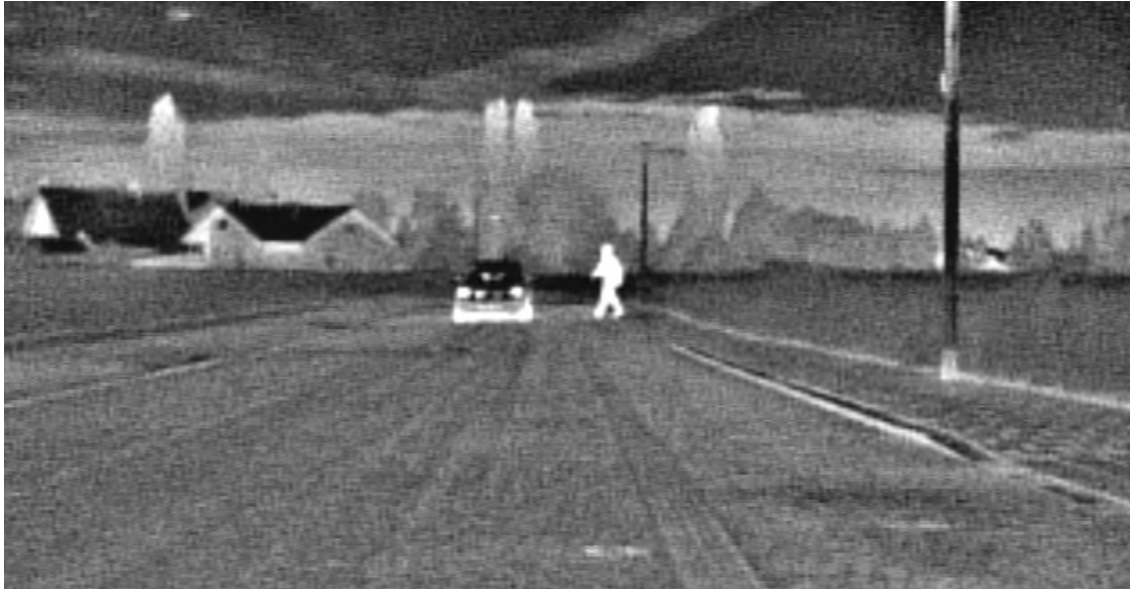


Bild 2.22 : Typisches FIR-Bild

Das Wärmebild wirkt verfremdet, da es nicht der menschlichen Wahrnehmung der Umwelt entspricht. Die Tatsache, dass mit dem Auge sichtbare Objekte und Lichtstrahlen im Bild nicht auftauchen, erschwert dem Fahrer die Orientierung im Bild und führt beim Abgleich zwischen Realität und NightVision-Inhalten zu Irritationen [TKM⁺04]. Der Vorteil des Systems ist die Hervorhebung warmer Objekte. Die Kamera stellt insbesondere bei Nacht, wenn die meisten Objekte abkühlen, Lebewesen besonders hell dar.

Die in der Automobilindustrie eingesetzten Wärmebildkameras folgen grundsätzlich zwei verschiedenen Sensorprinzipien. Gleichstrom- oder DC-Detektoren aus Vanadium-Oxid (VO_x) oder amorphem Silizium (α -Si), wie sie in Mikrobolometer-Kameras verbaut sind, basieren auf Sensorelementen, die auf Temperaturänderungen durch die einfallende Wärmestrahlung reagieren [Wal97]. Die Wärmeaufnahme bewirkt eine Änderung des elektrischen Widerstands des Bildelements. Dieser Widerstand führt wiederum zu einem Spannungsabfall, den die Ausseelektronik der Kamera in einen Helligkeitswert umsetzt. Die temperaturabhängigen Widerstandskoeffizienten der Detektorelemente sind unterschiedlich. Aus diesem Grund müssen Mikrobolometer-Kameras ihre Sensorelemente in regelmäßigen Abständen neu aufeinander abgleichen. Dies geschieht durch eine kamerainterne Blende, die eine homogene Temperatur aufweist und vor der Kalibrierung vor den Sensor schwenkt. Die Sensorelemente empfangen während der Kalibrierung nur die Wärmestrahlung der Blende, so dass die Kameraelektronik die erzeugten Bildwerte

miteinander abgleichen und homogenisieren kann. Die Zeitdifferenz zwischen zwei Kalibrierungen sinkt mit steigendem Temperaturgradienten, da die Empfindlichkeiten der Sensorelemente bei großen Temperaturschwankungen schneller auseinanderdriften. Die Kalibrierung selbst dauert etwa 0,3 Sekunden. Während der Kalibrierung empfängt der Sensor das Bild der Blende, so dass die Kamera dieses Bild oder das letzte aufgezeichnete Bild vor der Kalibrierung anzeigen muss. Sowohl das Bild der Blende als auch das stehende Bild des Vorfelds wirkt wie ein Defekt der Kamera.

Das Prinzip der Wechselstrom- oder AC-Detektoren, wie sie beispielsweise pyroelektrische Wärmebildkameras aus Barium-Strontium-Titanat (BST) oder ferroelektrischen Dünnschichten (TFFE: Thin Film Ferro Electric) nutzen, haben kapazitive Sensorelemente [Wal97]. Ein sich drehendes Flügelrad moduliert die einfallende Wärmestrahlung zu einem Wechselsignal, bevor sie auf den Detektor trifft. Das Flügelrad besteht aus streuenden Mikrolinsen, die den Mittelwert der lokalen Umgebung auf die entsprechenden Bildelemente geben. So empfängt der Detektor abwechselnd den lokalen Mittelwert der Umgebung und die direkte Wärmestrahlung der Objekte in der Szene, je nachdem ob sich das Flügelrad über den entsprechenden Bildelementen befindet oder die Wärmestrahlung ungestreut auf den Detektor trifft [Köp97]. Die Elektronik setzt die Differenz zwischen dem Mittelwert und der direkten Objektstrahlung in eine Spannung um. Die Modulation des Flügelrads entspricht einer Kalibrierung des Systems vor jeder Bildaufnahme und erübrigt eine Kalibrierung wie bei Mikrobolometer-Kameras. Mikrobolometer-Kameras können dieses Verfahren auf Grund der Trägheit ihrer Sensorelemente nicht anwenden: Die thermische Zeitkonstante, die ein Maß für die Geschwindigkeit der Anpassung der elektrischen Eigenschaften an die vorhandene Temperatur darstellt, ist bei Mikrobolometer-Kameras zu groß, so dass die Empfindlichkeit der Mikrobolometer-Kamera bei der Verwendung eines Flügelrads deutlich sinkt.

Ein weiterer Vorteil des Flügelrads ist eine lokale Anpassung der Kontraste: Da der Detektor abwechselnd eine mittlere Strahlungsenergie und die Wärmeenergie der Objekte empfängt und die relative Temperaturdifferenz zwischen Objekt und dessen lokalem Mittelwert in eine Spannung umsetzt, kann der Detektor auch in Bildbereichen mit geringen Temperaturunterschieden Details auflösen. Warme Objekte liefern zwar einen hohen lokalen Mittelwert, doch der Detektor kann Details innerhalb des Objekts in der durchlässigen Phase des Flügelrads detektieren und auf Basis der Temperaturdifferenz zum Mittelwert mit hohem Kontrast anzeigen. Ebenso verhält es sich bei kalten Objekten. Dies entspricht einer Hardwareumsetzung der lokalen Kontrastanpassung, wie sie auch hochdynamische CMOS-Systeme mit Hilfe von Bildverarbeitungssoftware einsetzen. Auch hier treten Artefakte an den Übergängen zwischen hellen (warmen) und dunklen (kalten) Objekten auf: In Bild 2.22 sind die Baumkronen hell, obwohl sie nicht besonders warm sind, jedoch an den kalten Himmel grenzen. Die helle Darstellung der Baumkronen ergibt sich aus der hohen Differenz zwischen den direkten Objektsignalen und dem gemittelten Signal der Bäume und des Himmels.

Bild 2.23 vergleicht die Bilder einer DC- und einer AC-Kamera für den Fall, dass die Umgebungstemperatur nahe der Körpertemperatur von Menschen ist: Der Fußgänger auf dem Bürgersteig ist im Bild der DC-Kamera kaum sichtbar, während die AC-Kamera noch ausreichenden Kontrast bietet, um die Person darzustellen.



Bild 2.23 : Bild einer Szene einer DC- und einer AC-Kamera bei 30°C Lufttemperatur

Die Reichweite von FIR-Systemen liegt im Bereich von etwa 300 m und übersteigt damit sowohl die Reichweite von NIR-Systemen als auch die des Fernlichts. Dabei ist der limitierende Faktor nicht die Intensität der Wärmestrahlung sondern die Auflösung der Kamera, so dass große Objekte wie aufgeheizte Betonbrücken oder Gebäude auch über deutlich größere Entfernungen im FIR-Bild sichtbar sind.

Der optimale Öffnungswinkel von 22° bis 24° gilt auch für Wärmebildkameras. Die schlechtere Orientierung im Wärmebild spricht jedoch für einen größeren Öffnungswinkel der Kamera: Sie erfasst auf diese Weise mehr Objekte aus den seitlichen Bereichen vor dem Fahrzeug, an denen sich der Nutzer orientieren kann. Objekte im Kamerabild erscheinen dann auf Grund des größeren Öffnungswinkels kleiner und weiter entfernt.

Die wärmeisolierende Eigenschaft von Glas verbietet den Einbau der Wärmebildkamera hinter der Frontscheibe [III91]. Die Linse der Kamera darf während des Betriebs weder durch Blech- oder Verkleidungsteile noch durch andere Objekte verdeckt sein und ist somit vor Regen, Schmutz und Steinschlag nicht geschützt.

Wärmebildkameras reagieren empfindlich auf Regen und Schnee, da Wasser die Temperaturdifferenzen der Objekte aneinander angleicht, so dass der Kontrast des Bildes und damit die Orientierbarkeit im Bild sinkt. Bei starkem Regen dämpft der Wassergehalt in der Luft zudem die Wärmestrahlung von Lebewesen, so dass auch deren Erkennbarkeit abnimmt [Ekb70, Tan88]. Die Dämpfung durch Nebel ist bei Wärmestrahlung deutlich geringer als bei sichtbarem Licht [Wal97, Tan88]. Aus diesem Grund können FIR-Systeme durch leichten Nebel durchsehen.

FIR-Kameras stammen aus der Militärtechnik, wo sie für die Umfelderkennung bei Nacht eingesetzt werden. Ihre Stückzahlen sind im Vergleich zu Kameras der Unterhaltungselektronik sehr gering. Der Aufbau der Kameras ist kompliziert und erfordert einen hohen technischen Aufwand, um beispielsweise den Wärmebildsensor in ein Vakuumgehäuse zu integrieren. Schwierige Produktionsprozesse steigern den Preis zusätzlich, da bei der Herstellung des Detektors viel Ausschussware entsteht, deren Kosten die erfolgreich gefertigten Sensoren mittragen. Dieser Preisfaktor wird sich vermutlich in den nächsten Jahren verringern, wenn die Detektoren kleiner werden und auf preisgünstigeren Materialien basieren, deren Fertigungsprozesse bekannt und bereits optimiert sind, und die Stückzahlen der FIR-Kameras steigen. Die Anforderungen der Automobilindustrie, wie beispielsweise ein langer Lebenszyklus und Robustheit gegenüber stark schwankenden Temperaturen, erhöhen den Aufwand und die Kosten der Kameras. Preislich unterscheiden sich Mikrobolometer- und pyroelektrische Kameras bisher kaum.

Die Herkunft von FIR-Kameras aus der Militärtechnik bringt einen weiteren Nachteil mit sich: Sie unterliegen grundsätzlich besonderen Exportbedingungen, die mit dem Handelsamt des ausführenden Landes vereinbart werden müssen. Diese Exportbedingungen verpflichten den Automobilhersteller, dafür Sorge zu tragen, dass alle erhaltenen Kameras in einem Fahrzeug verbaut und vor Diebstahl geschützt sind. Die Exportlizenz soll den Erwerb von Militärtechnik durch nicht berechnigte Staaten über Dritte vermeiden. Grundsätzlich ist ein Diebstahlschutz im Sinne des Automobilherstellers, jedoch beziehen die Lieferanten von FIR-Kameras ihre Detektoren aus den Vereinigten Staaten von Amerika, so dass der Erwerb eines FIR-basierten NightVision-Systems eine Exportlizenz des Department of Commerce (DoC) nach den Vorgaben des Department of Defence (DoD) erfordert. Für einen Automobilhersteller ist die Unterzeichnung einer Exportlizenz unter Beachtung der Strafforderungen bei Verletzung dieser Lizenz und der für europäische Verhältnisse undurchsichtigen Rechtsprechung der USA ein schwer zu akzeptierender Schritt. Inzwischen verzichten das DoC und DoD auf eine Exportlizenz, wenn der Automobilhersteller nachweisen kann, dass die Kamera durch einen integrierten Diebstahlschutz nur funktionsfähig ist, wenn sie sich im Fahrzeug befindet und mit anderen Komponenten des Fahrzeugs kommunizieren kann. Dennoch bleibt die Gefahr, dass die USA ihre Exportbedingungen wieder verschärfen und eine reibungslose Lieferung der Kameras gefährdet ist.

FIR-Systeme heben insbesondere relevante Objekte wie Menschen und Tiere hervor und weisen in diesem Punkt einen Vorteil gegenüber NIR-Systemen auf. Auf Grund der verfremdeten Darstellung der Bildinhalte fällt die Orientierung im Bild jedoch schwer und die Transformation der Information in die Realität erfolgt nicht intuitiv [TKM⁺04]. Die externe Integration am Fahrzeug, der hohe Preis der Kamera und die Exportbedingungen verringern die Attraktivität des Systems für den Automobilhersteller.

2.1.4 Vergleich zwischen aktiven und passiven Systemen

Die Kosten für NIR-Systeme sind deutlich geringer als für FIR-Systeme. Grund dafür ist die Nutzbarkeit von CMOS- und CCD-Kameras, die die Unterhaltungsindustrie in Massen herstellt. FIR-Kameras hingegen stammen aus der Militärtechnik, bei der eine kostengünstige Produktion von untergeordneter Bedeutung ist. Der Vergleich der Sensorik beider Systeme zeigt, dass der Preis einer FIR-Kamera etwa beim doppelten Preis einer NIR-Sensorik, bestehend aus Bestrahlungsmodul und Kamera, liegt.

Die Integration der Systeme ins Fahrzeug ist bei beiden Ansätzen anspruchsvoll und kostenintensiv, da NIR-Systeme besondere Klarglasscheiben sowie eine augensichere Strahlungsquelle und FIR-Kameras einen freien Blick auf das Vorfeld des Fahrzeugs benötigen. Die FIR-Kamera erfordert unter diesen Bedingungen eine Linsenheizung zur Enteisung der Kamera bei Schneefall und tiefen Temperaturen und eine Reinigung zur Entfernung von Schmutzablagerungen auf der Linse. Weiterhin ist eine Härtung der Keralinse sinnvoll, um ihre Robustheit gegen Steinschlag zu erhöhen.

FIR-Systeme bieten dem Fahrer eine Darstellung des Fahrzeugvorfelds, die dem menschlichen Auge verborgen bleibt: Der Fahrer hat mit FIR-Systemen die Möglichkeit, Wärme zu sehen. Die Darstellung wirkt auf den ungeübten Fahrer verfremdet, da er ein Bild erwartet, das bei entsprechender Ausleuchtung der menschlichen visuellen Wahrnehmung ähnlich ist. Das System erfüllt jedoch auf diese Weise das Kriterium "mehr sehen" - sowohl bezüglich der Reichweite als auch der nutzbaren Bildinformation. Die Hervorhebung von Lebewesen und die Blendfreiheit des Sensors sind für die Anwendung im Fahrzeug besonders vorteilhaft.

NIR-Systeme hingegen geben dem Fahrer ein Abbild des Vorfelds, das dem Blick durch die Frontscheibe ähnelt. Das NIR-Bild zeigt hauptsächlich Objekte, die bereits im Streulicht des Abblendlichts sichtbar sind. "Mehr sehen" erstreckt sich hier lediglich auf die Reichweite. Zudem generiert das System ein sehr detailreiches Bild der Umwelt. Dies hat den Vorteil, dass der Nutzer sich schnell im Bild orientieren kann und ihm die Zuordnung des Bildinhalts zur Realität leicht fällt. Die Detailtreue hat jedoch auch den Nachteil, dass der Nutzer den Bildinhalt lange betrachten muss, bis er bewerten kann, ob eines der vielen Objekte in der Szene eine potenzielle Gefahr darstellt [TBMF04]. Die Blendung der Kamera, insbesondere bei entgegenkommenden Fahrzeugen mit eingeschaltetem Fernlicht oder NIR-System, widerspricht der Anwendung.

Die Wetterbedingungen beeinflussen die Leistungsfähigkeit beider Systeme: Während die Bilddarstellung bei FIR-Systemen sehr temperaturabhängig ist, ändert sie sich bei leichter bis mittlerer Nebeldichte kaum. NIR-Systeme hingegen sind bereits bei leichtem Nebel unbrauchbar, da Nebel NIR-Strahlung stark dämpft. Bei Regen verlieren FIR-Bilder durch die Angleichung der Oberflächentemperaturen an Kontrast und NIR-Systeme durch Reflexion der NIR-Strahlen an Regentropfen an Reichweite.

Um Kosten zu reduzieren, ist es sinnvoll, die NightVision-Kamera auch für andere Fahrerassistenzsysteme zu nutzen. NIR-Systeme bieten Synergiepotenziale zu Fahrerassistenzsystemen wie dem Spurhalteassistenten (SHA), der automatischen Notbremse (ANB) und dem Adaptive Cruise Control (ACC), die eine Kamera für den sichtbaren Spektralbereich verwenden oder in Zukunft verwenden werden. Die FIR-Kamera ist für die genannten Fahrerassistenzsysteme ungeeignet, da sie weder die Fahrbahn noch andere Fahrzeuge oder Objekte mit variabler Temperatur verlässlich genug darstellen kann. Doch auch die Nutzung einer NIR-Kamera für alle Assistenzsysteme bringt technische Herausforderungen und finanzielle Nachteile mit sich, da diese Kamera die Anforderungen aller Systeme erfüllen muss. Teilweise divergieren die Anforderungen der Systeme an die Bildaufnahmeinheit: So verlangt NightVision einen Öffnungswinkel von etwa 24° und eine hohe Infrarotempfindlichkeit, während ACC, SHA und ANB einen Öffnungswinkel von mehr als 40° und geringe Infrarotempfindlichkeit benötigen, um seitliche Objekte erfassen zu können und unempfindlich gegen Blendung bei tief stehender Sonne zu sein. Um beide Bedingungen erfüllen zu können, muss die Kamera eine sehr hohe Dynamik aufweisen. Die Anforderungen an den Öffnungswinkel kann die Kamera unter Qualitätseinbußen beim NightVision-Bild vereinen, da ein Objektiv mit 40° Öffnungswinkel auch den für NightVision relevanten Bereich erfasst, der Sensor diesen Bereich jedoch mit einer geringeren Auflösung abbildet. Um eine ausreichende Auflösung im NightVision-Bild zu erhalten, muss die Kamera eine höhere horizontale Auflösung aufweisen, so dass die Anzahl der Bildelemente pro Winkelgrad auf Kosten der Sensorgröße konstant bleibt. Diese Anforderungen machen die Entwicklung von speziellen Sensoren notwendig, die den Kamerapreis und damit auch den Preis der einzelnen Systeme steigern.

Wahrscheinlich werden die genannten Systeme auf Farbkameras zurückgreifen, um die Erkennung von farbigen Fahrspurmarkierungen an Baustellen und die Unterscheidung zwischen vorausfahrenden und entgegenkommenden Fahrzeugen anhand der Farbe der Beleuchtung zu vereinfachen. Spätestens zu diesem Zeitpunkt sind für NightVision und die anderen Systeme unterschiedliche Kameras notwendig, da Farbkameras durch die integrierten Farbfilter eine geringere Empfindlichkeit im Infraroten aufweisen und für Nachtsichtapplikationen unbrauchbar sind [Kod07a, Kod07b]. Vielmehr werden NIR-NightVision-Systeme dann mit den anderen Kamerasystemen um den Bauraum hinter der Frontscheibe konkurrieren.

Die FIR-Kamera eignet sich auf Grund der Hervorhebung von Lebewesen für den vorausschauenden Fußgängerschutz. Während die verlässliche Detektion und Verfolgung von Personen in Bildern einer Monokamera aus dem sichtbaren Spektralbereich aufwändig ist [FYN⁺03], trennt das Wärmebild potenziell interessante Objekte vom Hintergrund. Der Erkennungsalgorithmus muss die besonders warmen Objekte im Bild, bei denen es sich um Personen, Tiere, Auspuffrohre, Fahrzeugteile und aufgeheizte Steine handeln kann, zwar noch klassifizieren, jedoch nicht mehr extrahieren. Dies verspricht eine höhere Verlässlichkeit als die Personenerkennung mit vorheriger Detektion potenziell gefährlicher Objekte in einem NIR-Bild oder einem Bild aus dem sichtbaren Spektralbereich mit viel

Hintergrundinformation. Auch hier divergieren die Anforderungen der beiden Funktionen an den Öffnungswinkel der Kamera, so dass NightVision nur unterstützend wirken kann: Sind die Systeme miteinander vernetzt, so kann NightVision der Fußgängerschutzfunktion frühzeitig die Koordinaten der im Bild entdeckten Personen mitteilen und zu einer Verbesserung der Fußgängerschutzfunktion beitragen.

Das Diagramm in Bild 2.24 vergleicht die NIR- und die FIR-Sensorik graphisch. Die Bewertungen fassen die Aussagen dieses Abschnitts zusammen. Dieser Vergleich beinhaltet nicht die Anzeige der resultierenden Bilder auf unterschiedlichen Bildschirmen und die Möglichkeiten der Bildverarbeitung. Das Zusammenspiel von Sensorik, Anzeige und Bildverarbeitung behandelt Kapitel 3 gesondert.

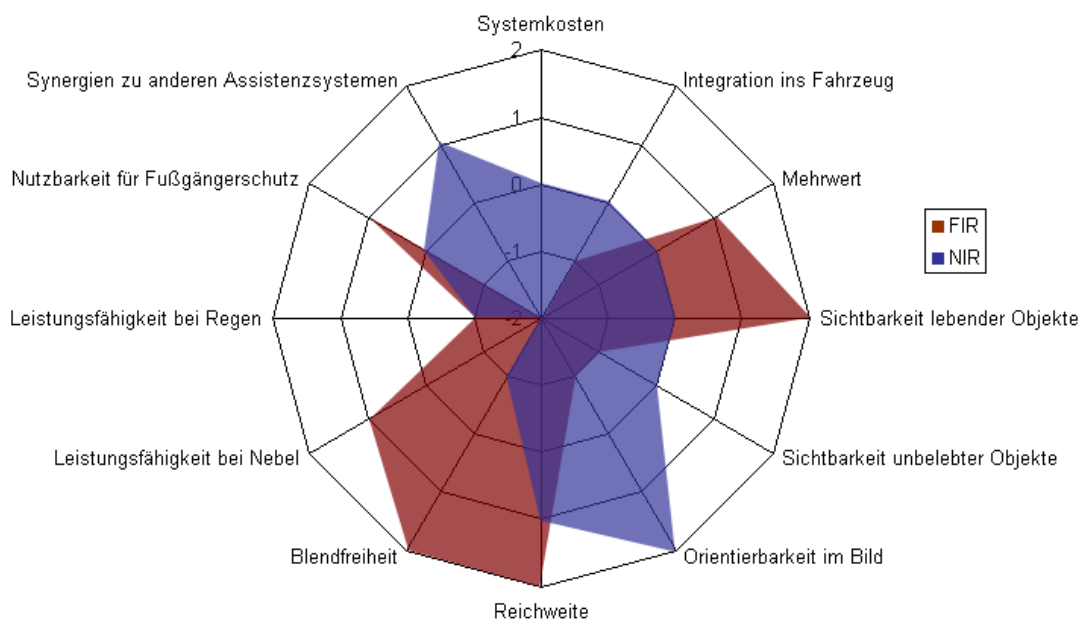


Bild 2.24 : Qualitativer Vergleich der NIR- und FIR- Sensorik

Die Bewertungen aus Bild 2.24 bedeuten:

- | | | | |
|---|----------|----|---------------|
| 2 | sehr gut | -2 | sehr schlecht |
| | | 0 | neutral |
| 1 | gut | -1 | schlecht |

2.1.5 Mischsysteme

Auf Grund der guten Orientierbarkeit und der Sichtbarkeit von Scheinwerfern im NIR-Bild sowie der guten Erkennbarkeit von Lebewesen im FIR-Bild ist es naheliegend, beide Ansätze in einem System zu vereinen. Dieses Mischsystem erfasst dabei die Umfelddaten sowohl mit einer FIR- als auch mit einer NIR-Kamera. Die Bilder werden mit dem Ziel, die Vorteile beider Systemansätze zu nutzen, fusioniert [WHW04, JFRT97]. Dabei überlagern, wie in Bild 2.25 c dargestellt, markante Orientierungspunkte aus dem NIR-Bild (Bild 2.25 b), wie beispielsweise Scheinwerfer anderer Fahrzeuge, Ampeln und Straßenschilder, das FIR-Bild (Bild 2.25 a). Der umgekehrte Ansatz überlagert dem NIR-Bild hervorgehobene Objekte aus dem FIR-Bild und ergibt die Darstellung nach Bild 2.25 d.

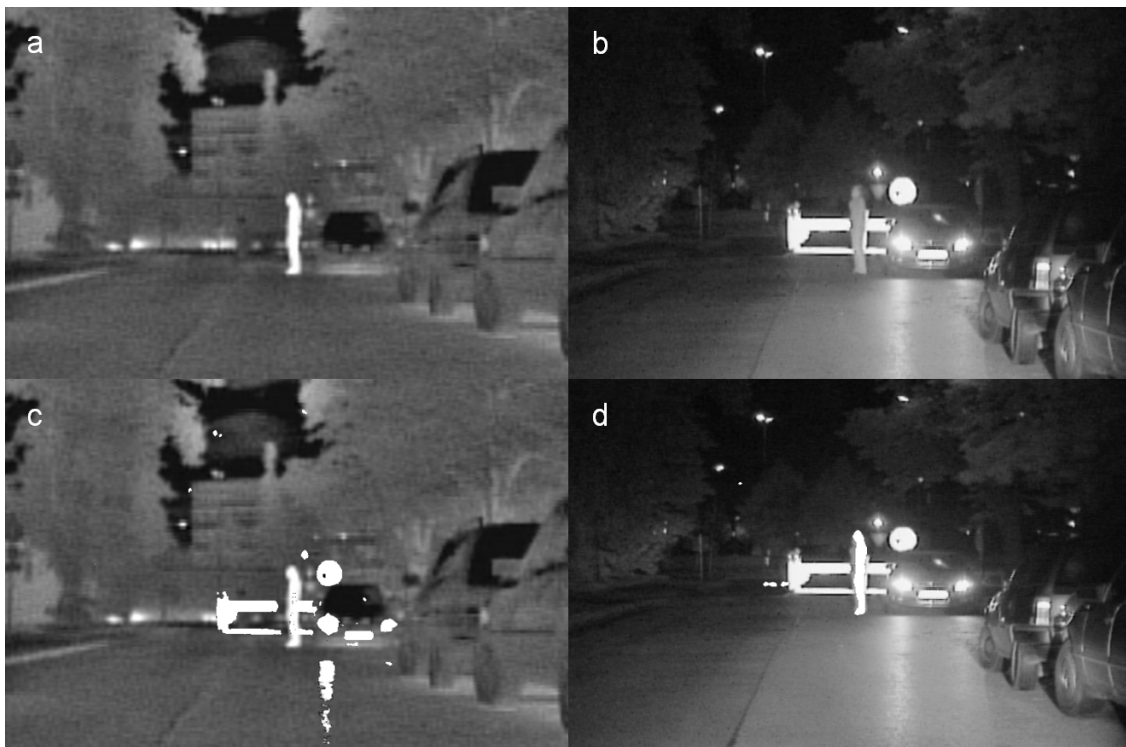


Bild 2.25 : Fusionierte Bilder aus NIR- und FIR- Anteilen

Theoretisch vereinen Mischsysteme die Vorteile beider Systeme, jedoch wirkt das fusionierte Bild verfremdeter als das FIR-Bild für sich und ist schwerer zu verstehen, da die Bildinformation nicht mehr eindeutig ist und helle Punkte sowohl Wärmequellen als auch Lichtquellen oder Reflektoren darstellen können. Auch hier treten an Übergängen der Teilbilder störende Artefakte auf. Durch die doppelte Auslegung der Systeme entstehen so hohe Kosten, dass diese Ansätze bisher theoretischer Natur bleiben.



2.2 Anzeigen

Abschnitt 2.1 beschrieb die beiden in der Automobilindustrie verfolgten Ansätze für Nachtsichtsysteme mit ihren unterschiedlichen Sensoren und deren Vor- und Nachteilen. Da es sich bei beiden Ansätzen um bildaufnehmende Systeme handelt, liegt es nahe, dem Fahrer das Bild in einem Monitor darzustellen.

Die Anzeige kann und soll den Blick durch die Frontscheibe keinesfalls ersetzen. Die Kamera zeichnet eine zweidimensionale Abbildung der Umgebung auf, in der es schwer fällt, die Entfernungen der Objekte abzuschätzen. Zusätzlich ist der Blickwinkel der Kamera geringer als das Sichtfeld des Menschen: Informationen, die der Mensch im peripheren Blickfeld wahrnimmt, sind beim Blick in den Monitor nicht sichtbar. Die Bildinformation reicht nicht aus, um ein Fahrzeug sicher in der Spur zu halten oder den Verkehr zu beobachten und angemessen zu reagieren. Aus diesem Grund muss der Nutzer die Anzeige als zusätzliche Informationsquelle betrachten und seinen Blick abwechselnd auf die reale Straßenszene und auf den Bildschirm richten.

Autofahrer nehmen vor einer Blickabwendung von der Straße Informationen über das Verkehrsgeschehen vor ihnen auf [Gen97]. Dabei setzt sich die Blickabwendung aus dem Blicksprung von der Straße zu einer anderen Informationsquelle, der Betrachtungszeit und dem Blicksprung zurück auf die Straße zusammen. Während der Blickabwendung veraltet die zuletzt aufgenommene Information und das Informationsdefizit des Fahrers steigt. Nach etwa 2 Sekunden ist der Drang, neue Informationen aus dem Vorfeld aufzunehmen so groß, dass der Fahrer seinen Blick wieder auf den Verkehr richtet [Coh87, Gen97]. Zwar liefert das NightVision-Bild Informationen aus dem Fahrzeugvorfeld, jedoch reichen diese aus oben genannten Gründen nicht aus, um das Defizit auszugleichen. Damit ist die Zeit, in der sich der Fahrer dem NightVision-Bild zuwenden kann, auch auf etwa 2 Sekunden begrenzt. Die Bilddarstellung muss deshalb eine schnelle Informationsaufnahme und kurze Betrachtungszeiten ermöglichen, während die Position der Anzeige kurze Blicksprungszeiten unterstützen muss.

2.2.1 Das Auge und Anforderungen an die Anzeige

Bildschirme dienen in den unterschiedlichsten Geräten als Informationsquelle für den Nutzer. Die Anzeigeeinheit muss dabei neben technischen Anforderungen wie Leistungsaufnahme, Lichtausbeute, Robustheit, Zuverlässigkeit, Bildwiederholrate, Schockfestigkeit, Gewicht und Volumen auch ergonomische Anforderungen erfüllen [Kno86]. Bevor die nächsten Unterkapitel verschiedene Bildschirme für NightVision-Systeme vorstellen und bewerten, erläutert folgende Zusammenstellung einige Eigenschaften des menschlichen Auges und ergonomische Anforderungen an Anzeigen [Sch93, Kno86].

Allgemeiner Aufbau des Auges: Das Auge erfasst optische Informationen der Umwelt. Licht von Objekten tritt durch die Hornhaut, die das Auge schützt, und das Kammerwasser in das Auge. Die Linse bündelt das eintretende Licht zu einem Abbild der Objekte auf der Netzhaut. Die Netzhaut enthält zwei Arten von Rezeptoren: “Stäbchen” sind lichtempfindlich und für das Kontrastsehen verantwortlich, während “Zapfen” eine frequenzabhängige Empfindlichkeit haben und das Farbsehen ermöglichen. Im gelben Fleck ist die Dichte der Zapfen und damit auch die Sehschärfe am größten, so dass das Auge Objekte, die es fokussiert, auf dem gelben Fleck abbildet. Die maximale Sehschärfe des Menschen beträgt etwa eine Winkelminute. Vom gelben Fleck zu den Randbereichen der Netzhaut sinkt die Anzahl der Zapfen, während die Dichte der Stäbchen steigt. Dieser äußere Bereich der Netzhaut hat eine geringere Rezeptordichte und ist damit zwar weniger für das Scharfsehen geeignet, jedoch empfindlich für Bewegungs- und Lichtreize. Nervenbahnen transportieren die Informationen der Rezeptoren über den Sehnerv an das Gehirn. Der Sehnerv selbst ist nicht lichtempfindlich und bildet deshalb den blinden Fleck des Auges. Sind beide Augen funktionsfähig, berechnet das Gehirn mit Hilfe der versetzten Abbildungen der Augen ein dreidimensionales Abbild der Umwelt.

Akkommodation: Die Akkommodation bezeichnet die Anpassung des Auges an Betrachtungsentfernungen. Bei Kontraktion des Ziliarmuskels entlastet sich die Linse und wölbt sich. Dadurch steigt die Brechung des Lichts im Auge, so dass es auch Objekte in geringer Entfernung scharf auf der Netzhaut abbilden kann. Entlastet sich der Ziliarmuskel vollständig, streckt sich die Linse und flacht so weit ab, dass sich weit entfernte Objekte scharf auf der Netzhaut abbilden. Je größer der Akkommodationsabstand zwischen zwei Betrachtungsebenen ist, umso länger ist die Akkommodationszeit. Das Auge kann nicht auf mehrere Entfernungen gleichzeitig akkommodieren, wobei die Fernakkommodation, bei der die Linse völlig abgeflacht ist, bei etwa 5 m liegt.

Adaption: Die Adaption beschreibt die Anpassung des Auges an die Umgebungshelligkeit. Die Iris bestimmt die Größe der Pupille und wirkt wie eine Lochblende. Geringe Umgebungshelligkeiten führen zu einer Vergrößerung der Pupillenöffnung und damit zu einer Verringerung der Sehschärfe.

Kontrast: Für die Erkennbarkeit der Bildinhalte muss eine Anzeige einen ausreichenden Kontrast zwischen 200:1 und 1000:1 besitzen.

Auflösung: Die Auflösung eines Bildschirms muss groß genug sein, so dass das menschliche Auge bei der üblichen Betrachtungsentfernung einzelne Bildelemente und deren Abstand zueinander nicht mehr auflöst.

Leuchtdichte: Die Leuchtdichte eines Bildschirms muss zwischen 3 und 10000 cd/m^2 regulierbar sein, damit die Bildinhalte sowohl bei Dunkelheit ohne Blendung als auch bei hoher Umgebungshelligkeit ablesbar sind. Dabei sollte die Leuchtdichte des Bildschirms beim Blick auf die Anzeige keine oder nur eine geringe Adaption erfordern.

Positionierung: Der Bildinhalt einer Anzeige darf weder durch feststehende noch bewegliche Objekte verdeckt sein. Weiterhin sollte sie einen Mindestabstand vom Betrachter einhalten, da die Akkommodation auf eine nahe Oberfläche mit der Kontraktion des Ziliarmuskels verbunden ist.

Abstrahlcharakteristik: Farbe und Kontrast der Bildinhalte eines Bildschirms müssen unabhängig von der Blickrichtung konstant bleiben.

Flackerfreiheit: Der Anzeigehalt eines Bildschirms muss stabil und frei von Helligkeitsschwankungen und Einzelbildausfällen sein.

Verzerrungsfreiheit: Die Anzeige muss die Inhalte unverzerrt wiedergeben.

Gleichmäßigkeit: Helligkeit, Farben und Kontraste des Bildschirms müssen über die gesamte Fläche homogen sein.

Farbdarstellung: Der Bildschirm darf keinen Farbstich aufweisen.

Bildtiefe: Die Bildtiefe bestimmt die Anzahl der darstellbaren Graustufen. Sie muss Helligkeitsunterschiede in ausreichender Auflösung abstufen. Typisch sind 256 Graustufen beziehungsweise eine Bildtiefe von 8 Bit.

2.2.2 Kombidisplay

Das Kombidisplay befindet sich im Kombiinstrument des Fahrzeugs. In den meisten Fällen ist es, wie in Bild 2.26 gezeigt, zwischen Geschwindigkeits- und Motordrehzahl-Anzeige positioniert und hat eine entsprechend geringe Bildgröße. Es zeigt hauptsächlich fahrzeugrelevante Informationen an.

Das Kombidisplay im Audi A8 ist ein TFT-LCD-Bildschirm mit einer Auflösung um 320 x 240 Bildpunkte und einer Bildgröße von 5 Zoll. Vorteil dieser Anzeige ist die gute Bildqualität und die Verfügbarkeit beziehungsweise einfache Integrierbarkeit im Fahrzeug. Die Anzeige eines NightVision-Bildes in einem vorhandenen Kombidisplay erfordert nur geringen Mehraufwand und Mehrkosten.

Der Blicksprung zum Kombidisplay setzt sich aus der Bewegung der Augen zur Anzeige, eventuell gekoppelt mit einer vertikalen Bewegung des Kopfes, der Adaptionszeit auf die Helligkeit der Bildinhalte und der Akkommodationszeit auf die Entfernung der Anzeige zusammen. Nach der Aufnahme und Interpretation des Bildes folgt der Blicksprung mit der Bewegung der Augen zurück auf die Straße, die Adaption auf die Helligkeitsverhältnisse vor dem Fahrzeug und die Akkommodation der Augen in die Ferne.

Auf Grund des häufigen Wechsels zwischen dem Blick durch die Frontscheibe und dem Blick auf den Bildschirm ist der Akkommodationsaufwand sehr groß. Die Akkommodation ist bei Dunkelheit besonders aufwändig, da die Sehschärfe bei Nacht geringer ist.

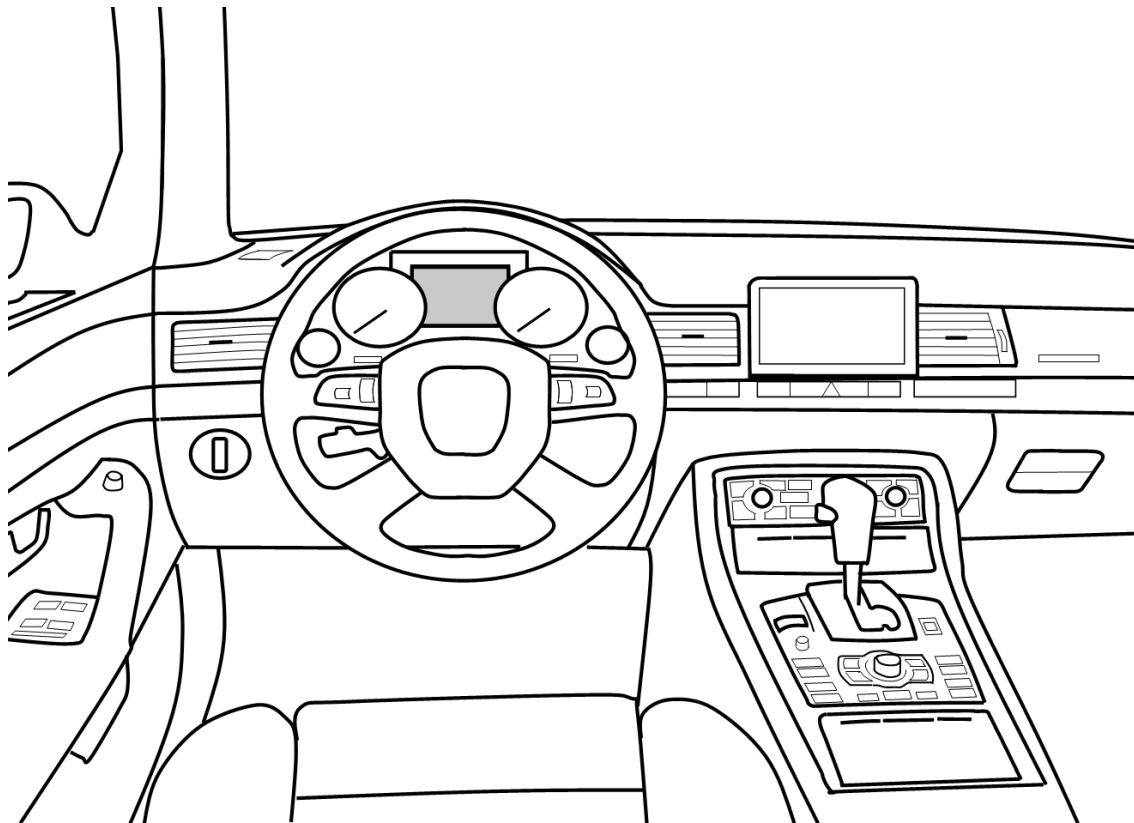


Bild 2.26 : Kombiinstrument mit Kombidisplay

Dadurch wirkt die Akkommodation körperlich besonders belastend und kann zu Kopfschmerzen führen. Bei älteren Menschen erschwert die nachlassende Elastizität der Linse und der eintretende Verlust der vollen Akkommodationsfähigkeit zudem die Informationsaufnahme [Coh86].

Ein weiterer Nachteil des Kombidisplays ist die Verdeckung der Bildinformation durch das Lenkrad. Zum einen kann eine ungünstige Kombination aus Sitz- und Lenkradposition die Sicht auf das Display generell erschweren, zum anderen können die Speichen des Lenkrads durch den Einschlag in Kurven den Bildschirm verdecken. Zwar wird der Fahrer im Allgemeinen das NightVision-Bild in komplexen Situationen wie dem Durchfahren einer Kurve nicht betrachten, da seine Blickaktivität zur Erfüllung der Querführungsaufgabe auf die Straße und die Fahrbahnrande konzentriert ist [Die04], jedoch sollte selbst dann der Blick auf das Display möglich sein.

2.2.3 Zentrales Mitteldisplay

Eine weitere bereits in den meisten Oberklasse-Fahrzeugen verfügbare Anzeige ist das zentrale Mitteldisplay. Es zeigt hauptsächlich Informationen aus Infotainmentsystemen, Navigationssystemen oder sonstige Fahrzeugdaten an und befindet sich über der Mittelkonsole des Fahrzeugs. Bild 2.27 zeigt den Bildschirm des Audi Multi Media Interface (MMI-Display) im Audi A8, das sich auf Höhe der Instrumententafeloberfläche befindet.

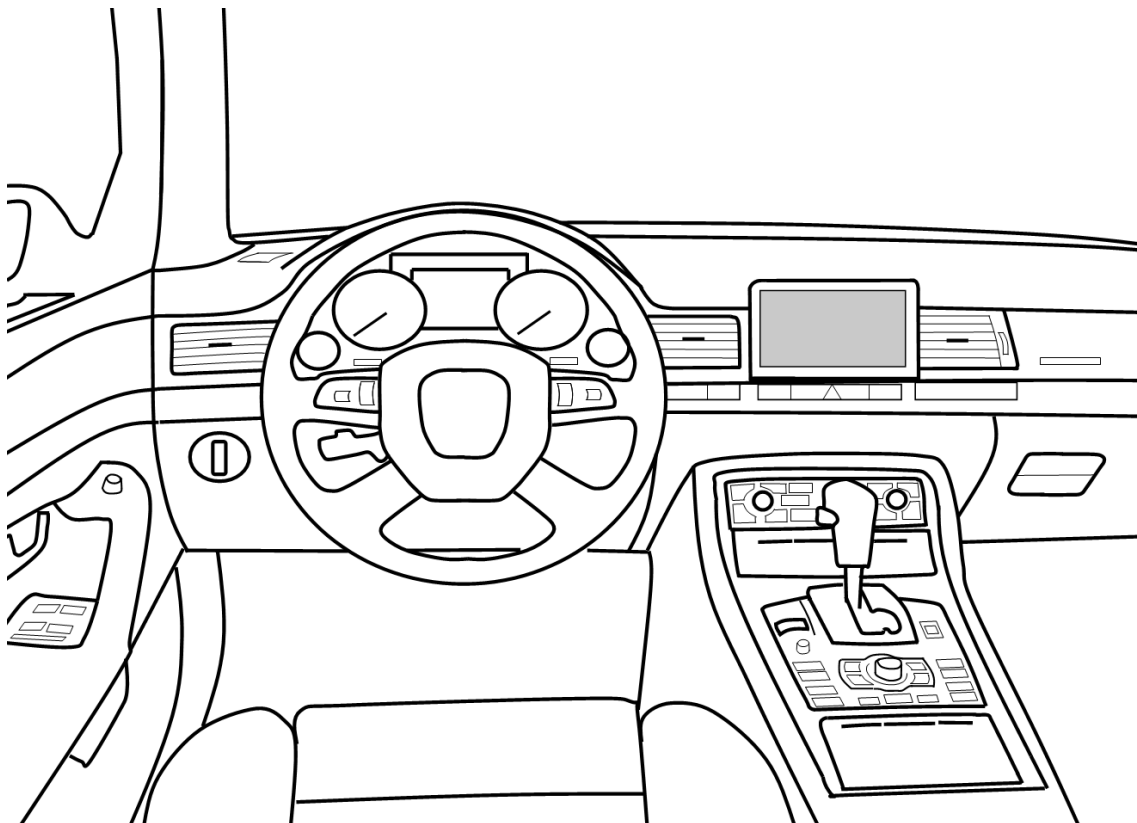


Bild 2.27 : MMI-Display im Audi A8

Das MMI-Display ist ein TFT-Display mit guter Bildqualität und einer Auflösung von 480 x 240 Bildpunkten. Es bietet mit einer Bilddiagonalen von 7 Zoll eine deutlich größere Fläche zur Anzeige von Videoinformationen als das Kombidisplay. Die Anzeige eines NightVision-Bildes ist auch hier kostengünstig, da das Mitteldisplay bereits heute Video- und videoähnliche Daten wie die Bildausgabe des DVD-Spielers, des Fernsehempfängers, der Rückfahrkamera oder des Navigationssystems anzeigt.

Im Vergleich zum Kombidisplay ist die Informationsaufnahme aus dem Mitteldisplay schwieriger: Während der Fahrer für den Blick in das Kombiinstrument die Augen und

den Kopf nur geringfügig bewegen muss, ist für die Aufnahme der Bildinhalte aus dem Mitteldisplay eine deutliche Kopfbewegung und eine kleine Oberkörperbewegung notwendig. Der Blicksprung mit Kopfbewegung nimmt viel Zeit in Anspruch, so dass dem Fahrer weniger Zeit bleibt, das NightVision-Bild innerhalb der maximal zur Verfügung stehenden Blickabwendungszeit zu betrachten. Die Akkommodation der Augen auf den Bildschirm und die Adaption des Auges an die Beleuchtungsverhältnisse im Fahrzeug verkürzen die effektive Blickzeit auf das Bild. Da das MMI-Display abseits der Sichtachse des Fahrers liegt, muss er die Information in die Fahrtrichtung transformieren. Der Abgleich des Bildes mit der Realität fällt dadurch schwerer und dauert länger.

2.2.4 HeadUp-Display

Der Begriff “HeadUp-Display” umfasst alle Bildschirme, die kein Absenken des Kopfes oder des Blickes zur Informationsaufnahme erfordern. Dieser Abschnitt stellt verschiedene HeadUp-Anzeigen vor. Zur genauen Unterscheidung nutzt diese Arbeit die Bezeichnung “HeadUp-Display” (HUD) nur für Anzeigen, die die Bildinformation transparent und in einem virtuellen Abstand anzeigen.

Ein HUD reflektiert die Inhalte eines Bildschirms über ein Spiegelsystem und die Frontscheibe des Fahrzeugs ins Sichtfeld des Fahrers. Bild 2.28 zeigt den Strahlengang, über den der Fahrer die Information aufnimmt. Es entsteht ein virtuelles Bild, das in einer der Länge des Strahlengangs entsprechenden Entfernung über der Motorhaube zu schweben scheint [MB03]. Die virtuelle Distanz liegt bei 2,5 m. Durch die Reflexion des Bildes an der Scheibe entsteht ein transparentes Bild mit einer Größe von 8 Zoll, das jedoch durch die virtuelle Entfernung kleiner wirkt.

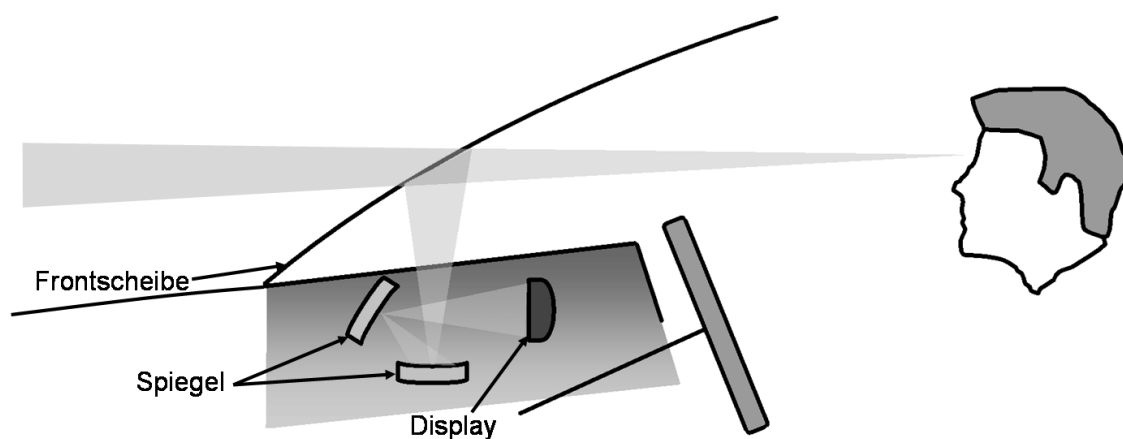


Bild 2.28 : Funktionsprinzip eines HUD



Bild 2.29 : Anzeige der Geschwindigkeit im HUD

Die im HUD angezeigte Information, bei der es sich in heutigen Fahrzeugen hauptsächlich um die Fahrtgeschwindigkeit, Navigationspfeile und Warnsymbole handelt, überlagert die Umwelt. Bild 2.29 stellt die Anzeige der Geschwindigkeit im HUD dar.

Bild 2.28 lässt bereits erkennen, dass die Integration eines HUDs in ein Fahrzeug sehr aufwändig, kompliziert und kostenintensiv ist. Der Einbauort des HUDs ist durch die Kopfposition des Fahrers und die Einbaulage der Scheibe definiert und muss hinter dem Kombiinstrument unter der Instrumententafel liegen. Dieser Bauraum ist durch Querträger, Belüftungsschläuche der Klimaanlage und die Pedalerie begrenzt. Der optische Weg des Bildes führt durch eine Öffnung auf der Oberfläche der Instrumententafel. Diese bestimmt den Austrittswinkel der Information und damit die Größe des Bildes und der Head-Motion-Box beziehungsweise der Eye-Box [MB03]. Die Eye-Box gibt den Bereich an, in dem sich der Nutzer bewegen darf, um das Bild mit beiden Augen sehen zu können. Die Head-Motion-Box beschreibt das "Fenster", in dem sich der Betrachter bewegen darf, um das Bild noch mit mindestens einem Auge sehen zu können. Bewegt sich der Nutzer aus der Head-Motion-Box heraus, befindet er sich außerhalb des optischen Strahls des Bildes. Eine größere Head-Motion-Box verbessert zwar die Einsehbarkeit des HUDs, verkleinert jedoch das virtuelle Bild, da der für eine große Head-Motion-Box notwendige divergente optische Weg der Bildinformation auf der anderen Seite der Scheibe konvergiert und zu einem kleineren HUD-Bild führt. Um sowohl die Head-Motion-Box als auch das HUD-Bild zu vergrößern, muss das HUD und die Öffnung in der Instrumententafel wachsen, was aus Bauraumgründen kaum möglich ist.

Die Frontscheibe des Fahrzeugs ist ein optisches Element der Projektion und bildet eine gekrümmte Freiformfläche, die das Displaybild bei der Spiegelung stark verzerrt. Um diese Verzerrungen auszugleichen, muss ein Spiegel des optischen Systems das Displaybild vorverzerrten [MB03]. Die Vorverzerrung gilt im Allgemeinen nur für eine Blickposition auf das HUD. Verändert sich diese Blickposition, verlagert sich die Spiegelung in einen anderen Bereich der Scheibe. Im Allgemeinen hat dieser Bereich der Scheibe eine andere Krümmung und entsprechend eine andere Verzerrung. Ein zweiter entzerrender Spiegel kann auch die dynamischen Verzerrungen durch die Kopfbewegung des Nutzers und der unterschiedlichen Verzerrung der Scheibenbereiche ausgleichen. Auf diese Weise entsteht ein optisches System, das sehr empfindlich auf Änderungen der optischen und mechanischen Parameter reagiert. Die Frontscheibe ist jedoch vergleichsweise großen Fertigungstoleranzen von ± 2 mm unterworfen, so dass die auf eine Scheibe eines bestimmten Fahrzeugtyps berechneten Spiegeloberflächen nicht zu allen Scheiben dieses Fahrzeugtyps passen und das Bild angemessen entzerren können.

Da die Frontscheibe aus Verbundglas mit zwei übereinander liegenden Scheiben besteht, entstehen bei der Spiegelung der Bildinformation an der Frontscheibe zwei Bilder. Auf Grund des flachen Einfallswinkels der Bildinformation und der Reflexion des Lichtstrahls an der inneren und der äußeren Scheibe verschieben sich die beiden Bilder und ergeben ein Doppelbild [MB03]. Das Doppelbild reduziert die Schärfe der Bildinhalte, da der Betrachter entweder tatsächlich beide Bilder sieht oder die Verdopplung des Bildes zwar nicht auflösen kann, aber dennoch die Verschiebung der Teilbilder wahrnimmt. Um auch diesen Effekt zu verhindern, brauchen die Frontscheiben von Fahrzeugen mit HUD eine keilförmig zulaufende Verbundfolie. Der sehr kleine Keilwinkel von etwa 36 mrad erzwingt die Überlagerung beider Bilder, so dass der Nutzer nur noch ein Bild in voller Schärfe sieht. Die beiden Teilbilder fallen jedoch nur in einem bestimmten Abstand und Blickwinkel auf das HUD-Bild zusammen.

Das HeadUp-Display bietet ergonomische Vorteile, die das Kombi- und Mitteldisplay nicht erfüllen können. Aus diesem Grund wird es häufig als potenziell bester Anzeigeort für das NightVision-Bild gehandelt. Wesentlicher Vorteil des HUDs ist die Anzeige der Information in einer virtuellen Entfernung von etwa 2,5 m. Das Auge akkommodiert auf die virtuelle Distanz, wodurch der Akkommodationsunterschied zwischen Fahrzeugvorfeld und HUD-Information deutlich sinkt.

Da das HUD die Informationen optisch transparent und im direkten Sichtfeld des Fahrers anzeigt, sind keine Kopfbewegungen und nur geringe Blickabwendungen von der Straße notwendig, um das Bild zu beobachten. Die Adaption ist gering, da sich die Blickrichtung und damit auch die Helligkeit des Sichtfeldes kaum ändert.

Heute zeigen HUDs hauptsächlich einfache und unbewegliche Symbole an, die nur einen kleinen Teil der Displayfläche füllen und nur temporär erscheinen. Das Bild einer Kamera füllt die gesamte Displayfläche dauerhaft mit dem bewegten Abbild der Szene mit zahlreichen und komplexen Inhalten. Dadurch entsteht eine "Bild-in-Bild"-Darstellung,

die bei längerer Nutzung stört. Die Transparenz des Bildes führt zu einem schlechteren Kontrast und zu einer geringeren Erkennbarkeit der Bildinhalte. Bei Nacht verringert die Ausleuchtung des Fahrzeugvorfelds mit dem Abblendlicht die Erkennbarkeit der Videobilder im HUD. Um auch Details erkennen zu können, muss der Nutzer die Helligkeit des Displays so weit anheben, dass die Anzeige ihre Transparenz verliert und unter Umständen sogar eine Adaption auf das helle Displaybild notwendig wird.

Das HUD verkürzt die Blicksprungszeit [Gen97] und ermöglicht damit eine längere Blickzeit auf die Bildinformation. Da der Mensch nur kleine Winkelbereiche scharf sehen kann, hat der Fahrer beim Blick auf das HUD-Bild das Fahrzeugvorfeld zwar im peripheren Blickfeld, kann dem Verkehrsgeschehen jedoch nicht folgen. Umgekehrt kann der Fahrer beim Blick auf die Straße nicht gleichzeitig die Bildinformation im HUD aufnehmen. In beiden Fällen können aber Reize im peripheren Blickfeld die Aufmerksamkeit auf sich ziehen. Bild 2.30 vergleicht den Verlauf der Blickabwendungszeit zur Aufnahme der Geschwindigkeitsinformation im Kombiinstrument und im HUD [Gen97].

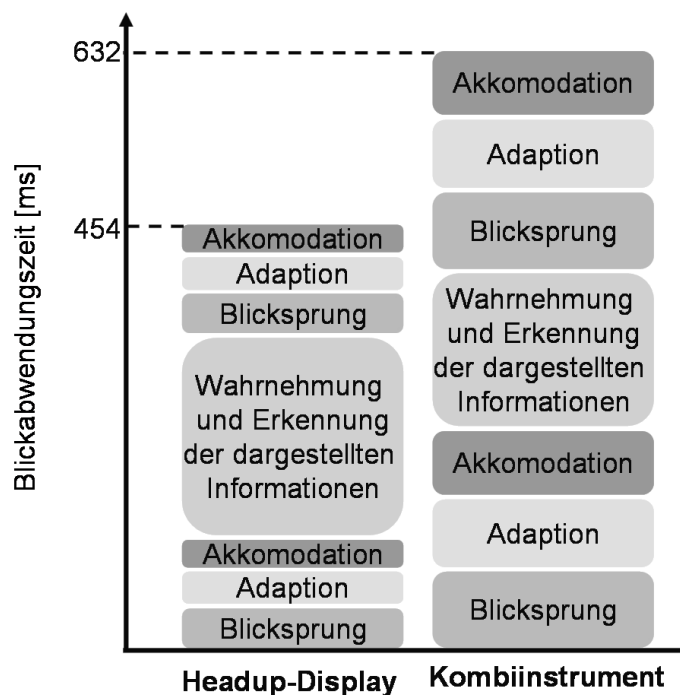


Bild 2.30 : Vergleich der Blickabwendungszeiten zum Kombidisplay und zum HUD

2.2.5 Combiner

Das Combiner spiegelt die Informationen eines Bildschirms, der in der Instrumententafel verbaut ist, über einen Hohlspiegel, der aus der Instrumententafel klappbar ist, in das

Sichtfeld des Fahrers. Durch die Spiegelung entsteht auch hier ein virtuelles Bild, dessen virtuelle Distanz aber deutlich geringer ist als beim HUD. Zur Betrachtung der Bildinhalte ist nur eine geringe Blickabwendung auf den Spiegel notwendig, wobei die Straße im peripheren Blickfeld bleibt. Das Bild des Combiners ist nicht transparent und zeigt die Bilder in einem guten Kontrastverhältnis an. Um die virtuelle Distanz zu erweitern, muss der Hohlspiegel die Bildinformation vergrößern. Dadurch entsteht ein derart vergrößertes Bild, dass selbst die einzelnen Bildpunkte des Bildschirms sichtbar werden und die Bildqualität abnimmt.

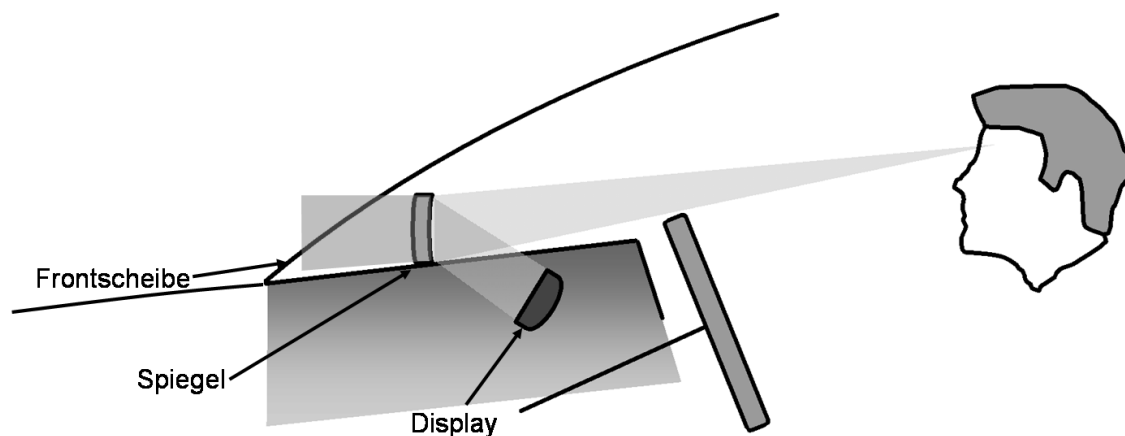


Bild 2.31 : Funktionsprinzip eines Combiners

Bild 2.31 verdeutlicht, dass ein Combiner bei der Integration im Fahrzeug weniger Platz beansprucht als ein HUD. Auch das Combiner hat eine Head-Motion-Box, aus der sich der Fahrer herausbewegt, wenn sein an dem Hohlspiegel reflektierter Blick nicht den Bildschirm unter der Hutze trifft, sondern die Seitenwände des Ausschnitts, in dem sich der Bildschirm befindet. Der Fahrer sieht dann anstelle der Bildinhalte das Innenleben des Combiners. Auf Grund der Vergrößerung der Bildpunkte und der kleinen Head-Motion-Box wirkt das Combiner weniger hochwertig als ein HUD.

Das Combiner muss einige Bedingungen an seine geometrischen Ausmaße erfüllen, um eine Zulassungsfähigkeit zu erhalten: Der Gesetzgeber definiert das Sichtfeld des Fahrers und teilt es in verschiedene Bereiche ein. Die so genannten Sichtbereiche A und B sind in Bild 2.32 und 2.33 grafisch verdeutlicht. Als Referenzpunkte für die Sichtbereiche dienen die so genannten V-Punkte V1 und V2 [Eur77].

Der Sichtbereich des Fahrers muss, abgesehen von ein paar Ausnahmen wie A-Säule, Innenspiegel, Scheibenwischer, Heiz- und Antennendrähte, frei von Gegenständen sein und transparent bleiben. Das Sichtfeld B darf jedoch so weit verdeckt sein, wie es durch das Lenkrad ohnehin verdeckt würde, wenn es bis auf die untere Grenzfläche des Sichtbereichs A angehoben wird. Das Combiner muss sich also vollständig innerhalb der schraffierten Fläche in Bild 2.33 befinden.

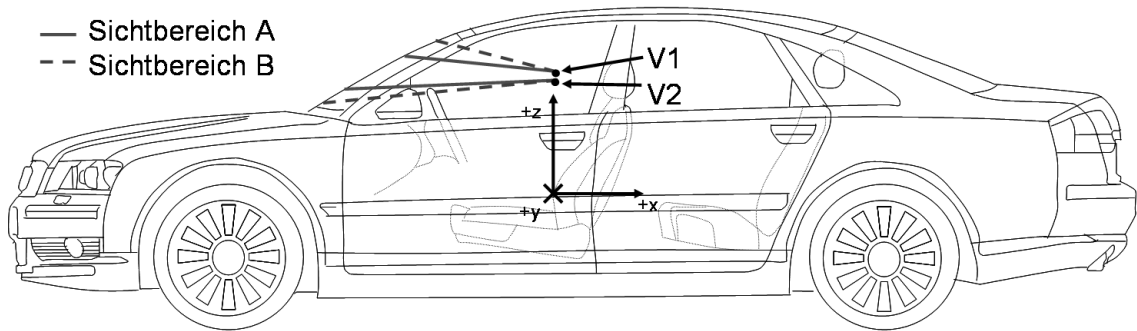


Bild 2.32 : Sichtbereiche A und B von der Seite

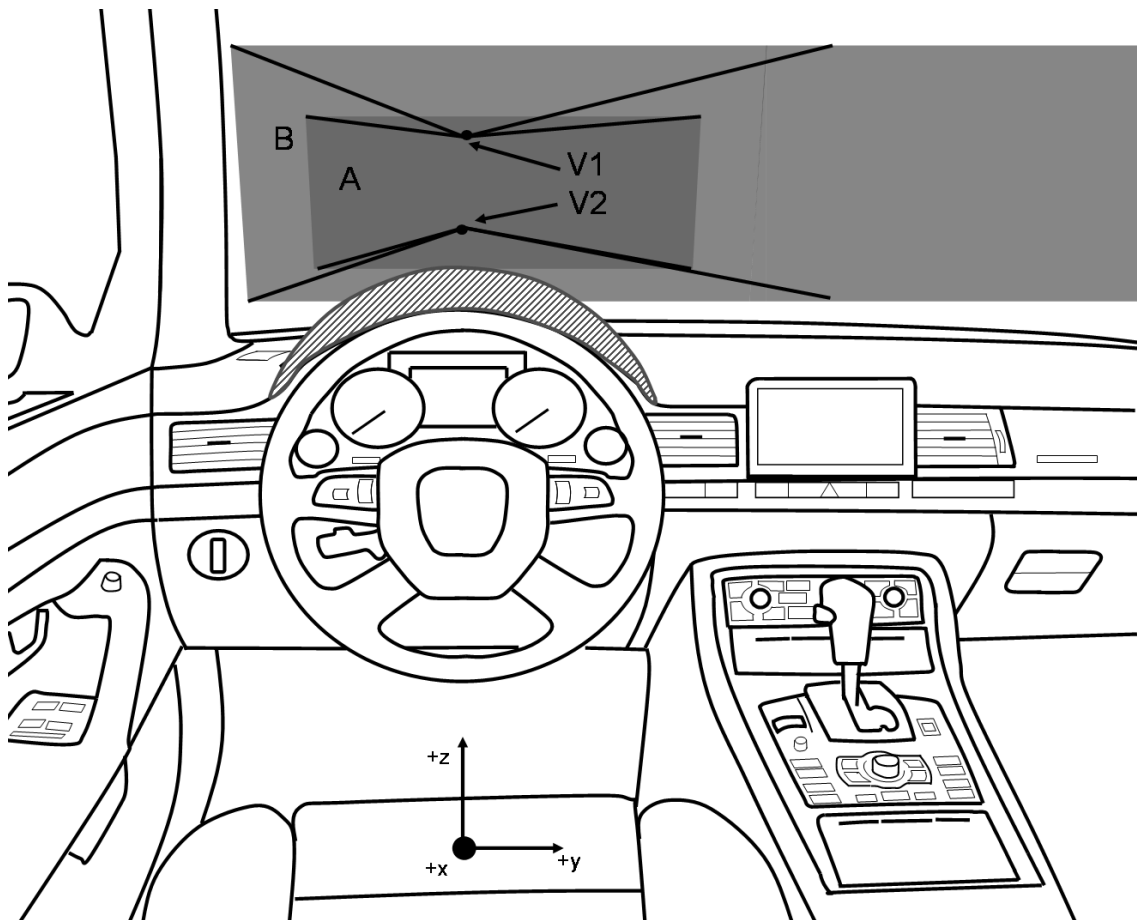


Bild 2.33 : Sichtbereiche A und B aus der Perspektive des Fahrers

2.2.6 TFT-Klappdisplay

Das Klappdisplay leitet sich aus dem Combiner ab: Ein TFT-Bildschirm schwenkt aus der Instrumententafel heraus, so dass dem Nutzer die Information direkt auf dem Bildschirm zur Verfügung steht. Durch die geringe Entfernung des Bildes zum Fahrer ist der Akkommodationsaufwand ähnlich groß wie beim Kombidisplay und dem MMI-Display. Da das Bild nicht gespiegelt wird, ist die Bildqualität besser als beim Combiner und wirkt durch die direkte Anzeige hochwertiger. Diese Anzeige bleibt wie das HUD und das Combiner beim Blick auf die Straße im peripheren Blickfeld. Für die Zulassungsfähigkeit gelten dieselben Voraussetzungen wie für das Combiner.

2.2.7 Weitere Anzeigevarianten

Dieser Abschnitt führt Anzeigen auf, die visionären oder theoretischen Charakter haben. Einige dieser Displays lassen sich heute technisch noch nicht umsetzen oder sind für die Darstellung eines NightVision-Bildes nicht sinnvoll.

Kontaktanaloges HUD

Das kontaktanaloge HUD überlagert die Bildinhalte der Umwelt positionsgenau, so dass es die angezeigten Objekte an beliebigen Stellen im Vorfeld des Fahrzeugs darstellen kann. Die Kontaktanalogie entspricht der Augmented Reality, da das HUD die Realität um die Bildinhalte erweitert. Um diese in der richtigen Entfernung anzeigen zu können, muss es die virtuelle Distanz jedes einzelnen Bildpunktes variieren.

Da bei der kontaktanalogen Anzeige das Displaybild und die Realität zusammenfallen, muss der Fahrer bei der kontaktanalogen Darstellung von NightVision die Bildinformation nicht von der Anzeige in die Realität übertragen. Für die kontaktanaloge Darstellung müssen jedoch auch die Entfernungen der Objekte im Bild bekannt sein. Heute existieren zwar HUDs, die einfache Warnungen, Symbole und Markierungen positionsgenau der Straßenebene überlagern können [Ass85], jedoch keine, die das komplexe und detaillierte Bild einer Kamera in Kontaktanalogie zur Realität bringen.

Panorama-HUD in einer virtuellen Ebene

Im Gegensatz zum kontaktanalogen HUD überlagern die Bildinhalte des Panorama-HUDs das Fahrzeugvorfeld nicht in beliebiger Entfernung, sondern in einer Ebene. Das Bild entsteht in einer virtuellen Projektionsentfernung, wobei die im Bild dargestellten Objekte

das Vorfeld aus der Perspektive des Fahrers deckungsgleich überlagern. Auch hier muss der Fahrer die Bildinformation nicht in die Realität übertragen.

Die Darstellung eines derart großen HUD-Bildes in einem Fahrzeug erfordert eine sehr große Austrittsöffnung in der Instrumententafel. Zur Überdeckung von Anzeige und realem Vorfeld ist ein Blickerfassungssystem notwendig, das die virtuelle Anzeige der Blickrichtung des Fahrers nachführt. Nach Untersuchungen von MCCANN, FOYLE und JOHNSTON bleiben bei der überlagerten Anzeige von Informationen in verschiedenen Fokalebene auch die Aufmerksamkeitsebenen getrennt [MFJ93], selbst wenn sich die Bilder deckungsgleich überlagern. Da das Auge des Fahrers beim Blick durch die Frontscheibe auf unendlich akkommodiert ist und die Fernakkommodation erst ab einer Entfernung von etwa $d = 5\text{ m}$ beginnt, muss die virtuelle Distanz des Bildes die Grenze zur Fernakkommodation überschreiten, damit die Fokalebene zusammenfallen und der Nutzer die Realität und das NightVision-Bild gleichzeitig betrachten kann. Bei einem großen virtuellen Abstand können jedoch reale Objekte im Vorfeld des Fahrzeugs die virtuelle Bildebene durchdringen. Dabei besteht die Gefahr von Übelkeitserscheinungen.

Transparente kopffeste Anzeigen

Kopffeste Anzeigen bewegen sich mit den Kopfbewegungen des Nutzers mit und stellen so ständig die Einsehbarkeit des Bildes sicher. Ist die Kamera nicht fest mit dem Kopf verbunden, ist eine Blickrichtungserkennung zur Nachführung der angezeigten Bildinhalte notwendig. Brillen mit halbdurchlässigen Gläsern sind eine bequeme Variante von kopffesten Anzeigen. Sie können selbst mit einer kleinen Anzeigefläche das gesamte Sichtfeld des Nutzers mit Informationen überlagern.

Die Displaybrille muss bei Brillenträgern ihren Sehfehler ausgleichen, da diese nicht zwei Brillen aufsetzen können. Damit ist die Brille teilweise personenabhängig und teuer. Eine Leitung zur Übertragung der Bilddaten in die Displaybrille würde den Nutzer stören, so dass die Daten drahtlos in die Brille eingespeist werden müssen.

Großflächige Anzeigen in der Scheibe

Fluoreszierende Stoffe, die im Grundzustand durchsichtig sind und bei Anregung Licht aussenden, ermöglichen großflächige Anzeigen in der Frontscheibe: Ein Laser-Projektor, der beispielsweise auf der Instrumententafel des Fahrzeugs installiert ist, kann die in die Frontscheibe eingearbeiteten Leuchtstoffe anregen und zur Anzeige der mit dem Laser gerasterten Informationen auf der Scheibe bringen. Wellenlängenempfindliche Fluoreszenz ermöglichen die Herstellung von vollfarbigen Anzeigen. Bei einer vollständigen Beschichtung der Scheibe mit diesem Material hängt die Größe und Auflösung des Bildes von der Rasterung und dem Erfassungsbereich des Laser-Projektors ab. Die Anzeige

eines großen NightVision-Bildes in einem solchen Display scheint nicht sinnvoll, da die Akkommodationsebene auf der Scheibenoberfläche liegt. Diese ist zum einen sehr nah am Fahrer und zum anderen so stark geneigt, dass der Fahrer nur wenige Zeilen des Bildes scharf sieht. Weiterhin verdeckt die leuchtende Information auf der Frontscheibe den Blick nach außen und ist zudem von außen sichtbar, was zur Ablenkung anderer Verkehrsteilnehmer führen könnte.

2.2.8 Vergleich der Anzeigevarianten

Tabelle 2.1 vergleicht qualitativ die Vor- und Nachteile der verschiedenen Anzeigen und fasst die Aussagen der Abschnitte 2.2.2 bis 2.2.6 zusammen.

	Kombidisplay	Mitteldisplay	HUD	Combiner	TFT-Klappdisplay
Bildqualität	++ sehr gut	++ sehr gut	-- sehr schlecht	- schlecht	++ sehr gut
Kontrast	++ sehr gut	++ sehr gut	- schlecht	+ gut	++ sehr gut
Bildgröße	- klein	+ groß	- klein	- klein	- klein
Auflösung	+ hoch	+ hoch	- niedrig	-- sehr niedrig	+ hoch
Blickabwendung von der Straße	-- notwendig	-- notwendig	+ gering	+ gering	+ gering
Kopfbewegung	+ gering	-- notwendig	++ keine	++ keine	++ keine
Position	- in Sichtachse des Fahrers, aber zu tief	-- abseits gelegen und zu tief	++ im Sichtfeld	++ im Sichtfeld	++ im Sichtfeld
Adaptionsaufwand	- hoch	- hoch	++ sehr gering	+ gering	+ gering
Akkommodationsaufwand	- hoch	- hoch	++ sehr gering	+ gering	- groß
Bauraum	++ sehr gering	++ sehr gering	-- sehr groß	- groß	+ gering
Verfügbarkeit	++ bereits im Fahrzeug vorhanden	++ bereits im Fahrzeug vorhanden	-- nur mit viel Aufwand integrierbar	- mit Aufwand integrierbar, Zulassung	- mit Aufwand integrierbar, Zulassung
Zusatzkosten	++ keine	++ keine	-- sehr hoch	- hoch	+ niedrig

Tabelle 2.1: Vergleich der Anzeigevarianten

Die Tabelle zeigt, dass keines der heute verfügbaren Displays alle Anforderungen der Ergonomie an einen NightVision-Bildschirm erfüllen kann. Virtuelle Anzeigen können zwar die physiologischen Anforderungen, jedoch nicht die Ansprüche an die Bildqualität erfüllen und erschweren auf diese Weise den wahrnehmungspsychologischen Vorgang der Informationsaufnahme. Umgekehrt bieten klassische Anzeigen eine sehr gute Bildqualität, können aber die physiologischen Anforderungen nicht erfüllen.



3 Systemausprägungen

Kapitel 2 gab einen Überblick über verschiedene NightVision-Sensoren und Displayvarianten zur Anzeige der aus den Sensoren gewonnenen Informationen. Dieses Kapitel behandelt die Möglichkeiten, das Gesamtsystem umzusetzen und nennt, beschreibt und bewertet neben den bereits heute verfügbaren rein bildgebenden Systemen auch Systemausprägungen, die den nächsten Generationen der NightVision-Systeme angehören und erst in Zukunft verfügbar sein werden. Ziel zukünftiger Systeme ist es, Gefahren automatisch zu erkennen und den Fahrer vor diesen zu warnen.

3.1 Rein bildgebende NightVision-Systeme

Rein bildgebende Systeme bestehen, wie bereits in Kapitel 2 aufgezeigt, in ihren Hauptkomponenten aus einem Sensor und einer Anzeige. Eine NIR- oder FIR-Kamera zeichnet das Bild des Fahrzeugvorfelds auf und zeigt es in einem der in Kapitel 2.2 vorgestellten Bildschirme an. Zwischen der Kamera und der Anzeige kann eine Bildverarbeitungseinheit liegen, die das Bild optimiert, jedoch kein zentraler Bestandteil des Systems ist.

Solche Systeme sind seit der Einführung von NightVision im Cadillac “DeVille” aus dem Jahre 1999 in den Vereinigten Staaten von Amerika bekannt [MB00]. Dieses Fahrzeug zeigt das Bild einer FIR-Kamera in einem HUD an. Anfang 2003 brachte Toyota im “Land Cruiser” und “Crown” sowie beim Tochterunternehmen Lexus im “LX470” ein NIR-basiertes System auf den japanischen Markt, das eine mäßige bis schlechte Bildqualität hat und das Bild der Kamera ebenfalls in einem HUD anzeigt [Rom02]. BMW und Mercedes führten 2005 zeitgleich das erste FIR- beziehungsweise NIR-System in Europa ein. Das NIR-System von Mercedes verwendet zur Anzeige der Bildinformation ein Kombidisplay mit einer Größe von 8 Zoll. BMW zeigt das Bild der FIR-Kamera im Mitteldisplay an. Interessant ist, dass BMW bei der Einführung seines Systems bereits Fahrzeuge mit HUD auf dem Markt hatte, aber das NightVision-Bild nicht dort anzeigt.

Vier Jahre nach Einführung von NightVision im “DeVille” stellte Cadillac das System auf Grund stark sinkender Verkaufszahlen wieder ein [Mei04]. Nach Aussagen des Unternehmens ist kein Nachfolgesystem geplant. Die Verkaufszahlen der beiden deutschen Anbieter sind nach eigener Aussage zufrieden stellend, doch die Presse konstatierte in ihren Berichten, dass beide Systeme noch verbesserungswürdig sind [All06, Blo06].

Die schlechten Verkaufszahlen bei Cadillac und die Kritik an den Systemen von BMW und Mercedes liegen neben dem hohen Preis in den Mensch-Maschine-Schnittstellen der Systeme begründet. Bei der Nutzung des Systems hat der Fahrer die Wahl zwischen seinem realen Vorfeld, das er durch die Frontscheibe wahrnehmen kann, und der Bildschirminformation, die ihn weiter sehen lässt. Eine mögliche Nutzungsstrategie ist, nach dem NightVision-Bild zu fahren und auf den Blick durch die Frontscheibe zu verzichten. Dies ist weder gewollt noch sinnvoll. Die Bildinformation im Display kann den Blick durch die Frontscheibe nicht ersetzen, da in einer zweidimensionalen Bildaufnahme und Anzeige keinerlei Entfernungsinformation vorhanden ist. Weiterhin weisen die Kameras ein kleineres Blickfeld als das Sichtfeld des Menschen auf, so dass Informationen, die der Mensch im peripheren Blickfeld wahrnimmt, im Bildschirm nicht enthalten sind. Folglich kann der Fahrer nicht auf den Informationsgehalt der realen Szene verzichten und muss seine Aufmerksamkeit zwischen Displaybild und Realität wechseln. Dabei kommen die in Abschnitt 2.2.1 genannten Anforderungen an den Bildschirm zum Tragen: Die Auslegung der Anzeige muss einen schnellen und einfachen Wechsel zwischen beiden Informationsquellen ermöglichen und eine sinnvolle Blickstrategie unterstützen. Die Anzeige muss möglichst einen direkten Blick ohne Kopfbewegung, eine geringe Blickabwendung, geringe Adaption, geringe Akkommodation und eine gute Erkennbarkeit der Bildinhalte unterstützen. Wie bereits in Abschnitt 2.2.8 ausgeführt, kann keine der genannten und bisher bekannten Anzeigen alle Anforderungen erfüllen.

Bereits die Positionierung des Bildschirms lässt keine optimale Lösung zu: NightVision-Systeme liefern kontinuierlich Bilddaten, die der Nutzer jedoch nicht ständig aufnehmen kann, da er seine Aufmerksamkeit zwischen Bildschirm und Realität teilen muss. Bei kurzzeitigen und unregelmäßigen Blicken in den Bildschirm ist es dem Zufall überlassen, ob der Fahrer eine Gefahr in der Anzeige erkennt. Die Folgerung hieraus ist eine Darstellung des Bildes im direkten Blickfeld des Fahrers. Eine Anzeige, deren Bildinhalte sich kontinuierlich bewegen und vom Fahrer wahrgenommen werden, ist in dieser Position für den Nutzer belastend, da die Bewegung im Bild die Aufmerksamkeit ständig auf den Bildschirm lenkt - unabhängig davon, ob die Bildinhalte relevant sind.

Studien mit rein bildgebenden NightVision-Systemen haben gezeigt, dass die Nutzung heutiger Systeme die Müdigkeit des Fahrers zwar verringert, ihn im Gegenzug aber mental und körperlich stark belastet [JKR03]. Obwohl die Systeme die Aufmerksamkeit des Fahrers auf sich ziehen und dieser die Anzeige in seine Blickstrategie aufnimmt, reduziert sich die Fahrsicherheit der Probanden interessanterweise nicht [JKR03, TKM⁺04].

Die Anzeige eines bewegten Videobilds in einem kleinen Bildschirm, das ständige Umfokussieren der Augen und der Wechsel der Aufmerksamkeit zwischen Realität und Displayinformation kann nicht die Lösung einer Sichtverbesserung bei Nacht sein. Die Anbieter der heute auf dem Markt verfügbaren Systeme preisen ihre Produkte zwar als sicherheitssteigernde Komfortsysteme an, diese bieten dem Fahrer jedoch kaum einen zusätzlichen Nutzen und halten ihn lediglich auf Grund der höheren Belastung wach.

Diese Erkenntnis führt schnell zur Forderung nach einem System, das automatisch Gefahren erkennt und nur dann ein Bild anzeigt, wenn eine Gefahr vorhanden ist oder sogar ganz auf die Anzeige eines Bildes verzichtet. Ein so genanntes warnendes NightVision-System setzt eine sichere Objekterkennung voraus.

3.2 Erkennung von Objekten

Ein System, das den Fahrer vor Gefahren warnt, muss im Stande sein, Gefahren zu erkennen. Die Objekterkennung in Bildern und Videosequenzen ist ein Schwerpunktthema, mit dem sich viele Arbeiten befassen [YTC92, Reg93, Kin93, CEK⁺00, GG02, RBW04].

Die Objekterkennung lässt sich grundsätzlich in zwei hierarchische Ebenen unterteilen: Die Objektdetektion liefert Bildbereiche, die potenzielle Kandidaten für das gesuchte Objekt beinhalten, während die Objektklassifikation diese Kandidaten als das gesuchte Objekt bestätigt oder verwirft [Jäh05].

Um Objekte im Bild zu detektieren, durchsuchen Algorithmen das Bild nach Merkmalen des zu findenden Objekts. Als Merkmale dienen oft einfache Eigenschaften des gesuchten Objekts wie beispielsweise die Helligkeit, die Farbe, bei NIR-Bildern der Reflexionsgrad oder bei FIR-Bildern die Temperatur. Sind die Eigenschaften des gesuchten Objektes bekannt, kann sie der Detektionsalgorithmus direkt mit den Eigenschaften der Bildinformation vergleichen.

Ist mindestens eines der erforderlichen Merkmale im Bild gefunden, so könnte sich das gesuchte Objekt in diesem Bildbereich befinden. Sofern erforderlich, lässt sich dieser Bildbereich durch geeignete Segmentierungsverfahren wie dem Region-Growing oder dem Watershed-Algorithmus vom restlichen Bild trennen und bildet damit eine so genannte Region of Interest (RoI) [Pra91]. Die RoI kann weitere Eigenschaften des gesuchten Objekts enthalten und liefert eine bildliche und eigenschaftsbasierte Beschreibung des Kandidaten, die in einer erweiterten Detektionsphase weitere Eigenschaften liefern kann. Beispiele hierfür sind die Form und Symmetrien bei zusammenhängenden Bildpunkten, die Größe aus der Höhe und Breite der RoI oder die Bewegung des Kandidaten aus seinen Positionen in den vorhergehenden Bildern.

Zur Detektion beliebiger Hindernisse auf der Fahrbahn bieten sich zwei Ansätze an. Der erste Ansatz nutzt die Bewegung des Fahrzeugs und den sich daraus ergebenden optischen Fluss [EGK⁺94]: Der optische Fluss beschreibt, wie sich die Bewegung der Umwelt und der Objekte in der Szene im Bild der Kamera auswirkt. Detektionssysteme berechnen ein Vektorbild des optischen Flusses zwischen zwei Bildern und vergleichen die Längen und Richtungen der Vektoren der einzelnen Punkte. Auffällige Vektorrichtungen und

-längen geben einen Hinweis darauf, dass sich Objekte im Erfassungsbereich auf unerwartete Weise bewegt haben oder eine Höhe gegenüber der Auflagefläche besitzen. Die auffälligen Vektoren definieren zugleich den Aufenthaltsort der Objekte.

Um Unterschiede in den Bildern detektieren zu können, müssen sich die Objekte im Bild mindestens um einen Bildpunkt weiterbewegt haben. Je mehr sich die Objekte der Kamera nähern, umso schneller scheinen sie sich zu bewegen, so dass die Berechnung des optischen Flusses im Nahbereich der Kamera verlässlich ist, jedoch mit steigender Entfernung der Objekte ungenauer wird. Gerade für den Bereich jenseits des Abblendlichts bietet der optische Fluss bei heutigen Auflösungen und einem Öffnungswinkel von 24° eine geringe Detektionssicherheit. Die Berechnung des optischen Flusses ist ressourcen- und rechenzeitintensiv, so dass höhere Auflösungen zwar die Detektionsreichweite und -sicherheit erhöhen, aber auch mehr Rechenzeit und Ressourcen benötigen.

Der zweite Ansatz nutzt eine Stereo-Bildaufzeichnung, bei der zwei Kameras das Vorfeld des Fahrzeugs aus verschiedenen Perspektiven erfassen. Das System erzeugt mit Hilfe der unterschiedlichen Bildpositionen derselben Objekte in den Bildern ein dreidimensionales Abbild des Fahrzeugvorfelds. So ist es möglich, die Entfernung, die Größe und die Höhe von Objekten im Bild zu berechnen. Auch hier sinkt die Leistungsfähigkeit des Systems mit zunehmender Entfernung der Objekte, da sich ihre Positionen in den beiden Bildern weniger unterscheiden, je weiter sie von der Kamera entfernt sind. Die Detektionsmöglichkeiten der Stereo-Kamera sind damit ebenfalls auflösungsabhängig und bei heute verwendeten Auflösungen auf den Bereich des Abblendlichts beschränkt.

Zur Bestätigung beziehungsweise Verwerfung der Kandidaten vergleichen Objektklassifikatoren die gefundenen Eigenschaften mit Modellannahmen des gesuchten Objekts. Je größer die Übereinstimmung zwischen den Eigenschaften des Kandidaten und der Modellannahme ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei dem Kandidaten tatsächlich um das gesuchte Objekt handelt. Häufig genutzte Klassifikatoren sind Support Vector Machines und polynomiale Klassifikatoren.

Bei der Klassifikation von Personen in Bildern verwendet die Bildverarbeitung oft Bildmuster von Personen und Körperteilen, die sie mit den Informationen in dem zu durchsuchenden Bild vergleicht. Für die Erkennung von variablen Geometrien, wie sie der menschliche Körper und einzelne Körperteile darstellen, haben sich lernfähige Neuronale Netze bewährt [Rig94]. Dennoch ist die Klassifikation von Personen mit Hilfe von Bildmustern schwierig, da Menschen viele Körperformen annehmen können: Ihre Erscheinungsform im Bild ändert sich abhängig von der Statur, der Größe und der zur Kamera gewandten Seite des Menschen. Selbst eine einzelne Person ändert ihr Erscheinungsbild, je nachdem ob sie steht, liegt, sitzt, Arme oder Beine ausstreckt, läuft, rennt, eine Tasche, einen Schirm oder einen Hut trägt. Um alle Menschen in einem Bild finden zu können, müssen die Algorithmen auf Merkmale ansprechen, die in allen Körperformen vorhanden sind. Da dies kaum möglich ist, liegen den meisten Algorithmen die wichtigsten menschlichen Erscheinungsformen als Muster vor. Das Erkennungssystem gleicht diese

mit dem Bildinhalt ab und versucht über Kontrast- Helligkeits- und Größenanpassungen die Beleuchtungs- und Entfernungsvariabilität auszugleichen. Die Beschränkung auf einige Erscheinungsformen zugunsten der Rechenzeit geschieht aber dennoch auf Kosten der Erkennungswahrscheinlichkeit.

Wenn die Objekterkennung zusätzlich Tiere und all ihre möglichen Erscheinungsformen abdecken soll, entsteht eine Mustersammlung, deren Abarbeitung mit heutigen Rechnern so viel Zeit beansprucht, dass die Warnungen des Systems bei üblichen Geschwindigkeiten auf Landstraßen viel zu spät ausgelöst würden.

Grundsätzlich ist es bei der Klassifikation von Objekten über den Formvergleich möglich, den Detektionsschritt entfallen zu lassen und direkt im Bild nach dem Objekt zu suchen. Dieser so genannte Brute-Force-Ansatz verschwendet jedoch Rechenressourcen und lässt Eigenschaften aus der erweiterten Detektionsphase ungenutzt.

In Bildern mit viel Hintergrundinformation können einzelne oder verschiedene Objekte Formen annehmen, die dem Modell des gesuchten Objekts ähnlich sind. Diese werden dann als Objekt erkannt, obwohl das tatsächlich gesuchte Objekt nicht im Bild enthalten ist oder sich an einer anderen Stelle befindet (Bild 3.1). Diese Art von Fehlererkennung heißt “false positive” oder “Falscherkennung”, da die Suche fälschlicherweise ein positives Ergebnis liefert. Eine Fehlererkennung der Art “false negative” oder “Nichtererkennung” beschreibt den Fall, dass die Bildverarbeitung ein Objekt nicht finden kann, obwohl es im Bild enthalten ist. Die Anzahl der false positives und negatives hängt stark von der geforderten Übereinstimmung zwischen Muster und gesuchtem Objekt ab: Je kleiner die Toleranz ist, umso weniger Falscherkennungen, aber auch mehr Nichterkennungen treten auf. Eine höhere Toleranz bewirkt weniger Nichterkennungen, aber auch mehr Falscherkennungen. Dabei ist eine gute Beschreibung des gesuchten Objekts wichtig, damit nicht die Modellannahme selbst Fehldetektionen verursacht.



Bild 3.1 : Beispielbild für die Verwechslung eines Verkehrsschilds mit einer Person

Die Ergonomie verlangt eine Minimierung der Falscherkennungen und der Nichterkennungen. Unberechtigte Warnungen durch Falscherkennung führen dazu, dass der Nutzer sich durch die unnötigen Warnungen gestört fühlt und beginnt, diese zu ignorieren [Hal01]. Das System verliert dabei an Akzeptanz und Nutzen. Beim Ausbleiben einer Warnung durch Nichterkennung wiederum verliert der Nutzer das Vertrauen in das System und nutzt es in Zukunft nicht mehr.

Die Produktsicherheit fordert, dass das System alle Objekte erkennt. Da das nicht möglich ist, befürwortet sie sogar eine Erhöhung der Fehlwarnungen durch Falscherkennung, um darzustellen, dass das System nicht perfekt ist und der Fahrer mit Falscherkennungen und Nichterkennungen rechnen muss.

3.3 Hervorhebende NightVision-Systeme

Ende 2005 führte Honda ein hervorhebendes NightVision-System in Japan ein. Es besteht aus zwei FIR-Kameras, die ein Stereo-Wärmebild der Umgebung erzeugen. Ein ins Fahrzeug integrierter Combiner zeigt eines der beiden Kamerabilder an. Die Besonderheit des Systems ist die automatische Warnung vor Fußgängern, die sich auf Kollisionskurs mit dem eigenen Fahrzeug befinden. Mit Hilfe einer Personenerkennung entdeckt das System Fußgänger im Stereobild, analysiert ihre Bewegung und gleicht sie mit der Bewegung des eigenen Fahrzeugs ab. Stellt der Fußgänger eine Gefahr dar, so wird er im Bild markiert und der Fahrer erhält ein akustisches Warnsignal [Hon04].

Das System senkt die Belastung des Fahrers durch die unterstützende Erkennungsleistung. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle birgt jedoch die Gefahr, dass der Fahrer die Erkennungsleistung ganz an das System abgibt: Da es akustisch auf Gefahren hinweist, ist der Blick in die Anzeige nicht zwingend notwendig. Wenn der Nutzer nur auf die akustischen Signale und nicht auf das Bild achtet, entgehen ihm alle Gefahren, die das System nicht erkennen konnte. Hervorhebende Systeme, die keine vollständige Erkennungssicherheit bieten, sollten ihre Warnungen deshalb nur im NightVision-Bild darstellen und andere akustische oder optische Warnungen vermeiden. Auf diese Weise muss der Fahrer das NightVision-Bild betrachten, um die Warnung zu sehen und entdeckt dort auch die Objekte, die das System nicht finden konnte.

3.4 Warnende NightVision-Systeme ohne Bild

Ein warnendes NightVision-System geht den entscheidenden Schritt zur größtmöglichen Entlastung des Fahrers und verzichtet auf die Anzeige des Bildes. Ziel eines warnenden Systems ist es, alle für den Fahrer relevanten Informationen aus dem Bild zu extrahieren

und sie ihm aufbereitet zur Verfügung zu stellen. Diese Systeme ermöglichen die abstrakte Anzeige von Gefahren und können den Fahrer durch den Verzicht auf ein ablenkendes Bild zusätzlich entlasten.

Warnende Systeme, die ganz auf die Anzeige eines Bildes verzichten, nehmen dem Fahrer die Möglichkeit, Fehldetektionen des Systems zu erkennen und darauf zu reagieren. Dadurch sinkt die Transparenz des Systems und die Nachvollziehbarkeit der Warnungen. Das System benötigt eine Statusanzeige, die dem Fahrer meldet, ob das System aktiv oder inaktiv ist, da der Nutzer nie sicher sein kann, ob das System beispielsweise sehr lange keine Warnung ausgegeben hat, weil keine Gefahr bestand, oder ob es sich auf Grund einschränkender Bedingungen, wie beispielsweise einer verschmutzten Kamera, abgeschaltet hat. Der Fahrer muss dann anstelle des Bildes regelmäßig die Statuslampe beobachten [Grü05]. Ist die Objekterkennung inaktiv, hat der Fahrer keine Möglichkeit, selbst die Erkennungsleistung zu erbringen. Warnende Systeme erfordern deshalb eine extrem hohe Erkennungswahrscheinlichkeit bei einer geringen Anzahl an Falscherkennungen, zumal auch abstrakte Anzeigen den Fahrer stören und der Akzeptanz des Systems schaden, wenn die Warnungen unberechtigt sind [KFD04].

Vermutlich werden Objekterkennungsalgorithmen die geforderte Verlässlichkeit innerhalb der nächsten Jahre nicht erfüllen. Da der Fahrer berechtigte Warnungen nicht von unberechtigten unterscheiden kann, werden rein warnende Systeme erst auf dem Markt verfügbar sein, wenn viele unterschiedliche Sensoren und Systeme nach Objekten suchen und ihre Suchergebnisse untereinander austauschen. Nur eine Sensorfusion kann eine derart hohe Erkennungswahrscheinlichkeit und eine geringe Ausfallwahrscheinlichkeit garantieren, die ein warnendes NightVision-System benötigt.

3.4.1 Abstrakte Anzeigen

Die Aufgabe der abstrakten Anzeige eines NightVision-Systems ist die Warnung vor einer drohenden Gefahr, ohne dabei das NightVision-Bild anzuzeigen.

LED-Leiste

Eine im Fahrzeuginnenraum im Bereich der Scheibenwurzel positionierte LED-Leiste kann die Richtung anzeigen, in der sich erkannte Objekte befinden. Die LEDs, die sich in der Sichtlinie zwischen Fahrer und Objekt befinden, leuchten auf und zeigen dem Fahrer die Richtung des Objekts an (Bild 3.2). Die Entfernung des Objekts ist farblich kodiert, so dass beispielsweise grüne LEDs Objekte anzeigen, die noch weit vom eigenen Fahrzeug entfernt sind, während die Farbe der LEDs über gelb und orange in rot umschlägt, je mehr sich die Objekte dem Fahrzeug nähern.

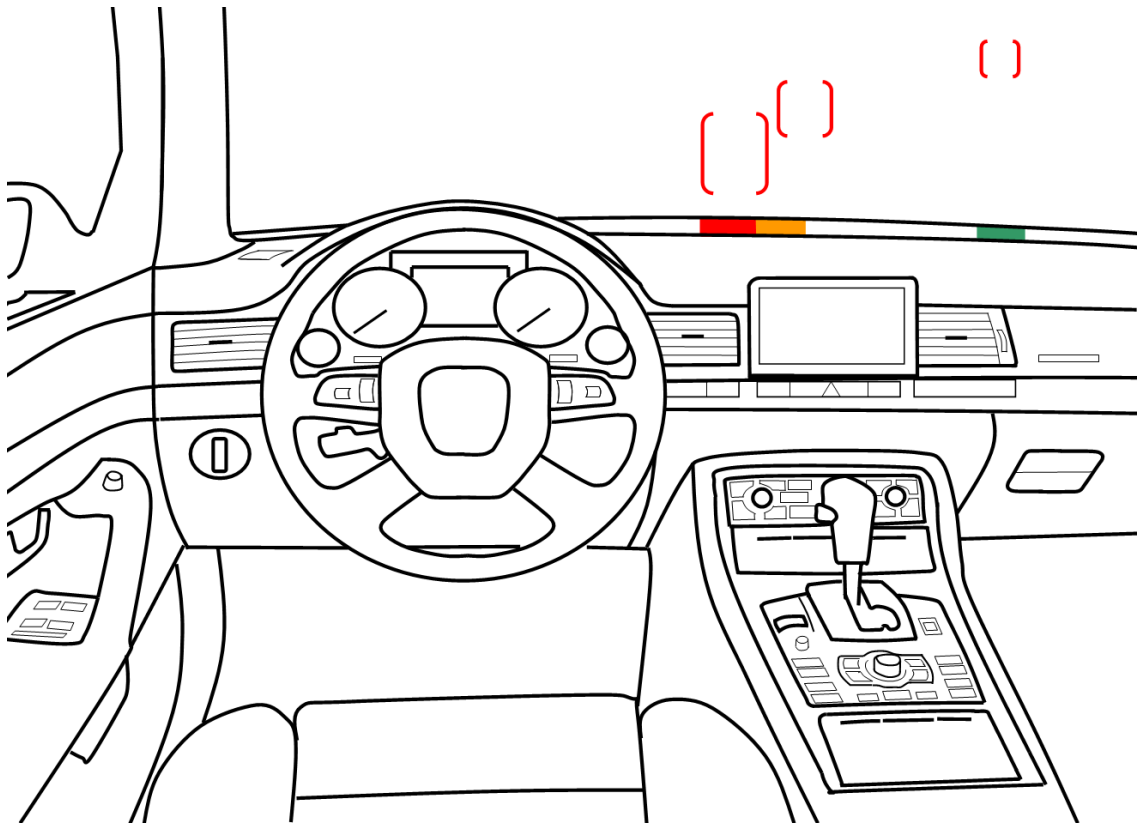


Bild 3.2 : Richtungsanaloge LED-Leiste und überlagernde Markierung in der Scheibe

Die farbliche Kodierung der Entfernung ist nicht intuitiv genug, da der Nutzer jeder Farbe einen Entfernungsbereich zuordnen muss. Zudem ist das Objekt nicht sichtbar, da es sich in der Regel außerhalb des Abblendlichts befindet. Somit kann der Fahrer nicht beurteilen, ob es sich um eine Fehldetektion des Systems handelt.

Forschungsabteilungen von Automobilherstellern stellen diese Anzeige bereits in Versuchsfahrzeugen dar. Die Systeme können Fußgänger erkennen und ihre Richtung mit Hilfe der LED-Leiste anzeigen [GSMS05].

Markierung in der Frontscheibe

Die Markierung einer Gefahr in der Frontscheibe zeigt nicht nur die Richtung des erkannten Objekts, sondern auch seine Entfernung intuitiv an: Befindet sich das Objekt hinter dem markierten Bereich, gibt die Position und Größe der Markierung in der Scheibe die Entfernung des Objekts wieder.

Wie in Abschnitt 2.2.7 erläutert, können ein Laser-Projektor und ein bei Anregung leuchtender Stoff in der Frontscheibe die Markierung umsetzen. Der Nachteil der Anzeige ist die Markierung eines weit entfernten Objekts im geringen Abstand der Scheibe. Im Falle einer Warnung akkommodiert der Fahrer zuerst auf die Markierung auf der Scheibe und muss dann den Fokus aufgeben und in den Bereich hinter der Markierung sehen. Während der Fahrer durch die Markierung sieht, nimmt er diese auf Grund der Parallaxe doppelt wahr [Sch93]. Das Objekt selbst ist nicht sichtbar, so dass der Fahrer nicht bewerten kann, ob es sich um eine berechtigte Warnung handelt.

Diese Anzeigevariante erfordert ein Blickrichtungserfassungssystem, da die Blickrichtung entscheidend für die überdeckende Markierung der Gefahr ist. Systeme mit ausreichender Genauigkeit sind heute noch nicht serienmäßig im Fahrzeug verfügbar und bedeuten einen finanziellen und konstruktiven Mehraufwand.

Anleuchten der erkannten Gefahr

Beide zuletzt genannten abstrakten Anzeigen können das erkannte Objekt selbst nicht anzeigen und für den Fahrer sichtbar machen. Die Anzeige kann in beiden Fällen nur auf den Aufenthaltsort des Objekts hinweisen.

Ein Spot-Scheinwerfer, der einzelne Bereiche des Fahrzeugvorfelds beleuchtet, kann erkannte Objekte aktiv anleuchten. Dabei zeigt er dem Fahrer neben dem Aufenthaltsort des Objekts auch das Objekt selbst an. Das zusätzliche Licht lenkt dabei die Aufmerksamkeit des Fahrers auf das angeleuchtete Objekt. Da es aber vorkommen kann, dass sich das Objekt in der Nähe anderer Verkehrsteilnehmer befindet und das Anleuchten des Objekts zu einer Blendung des besagten Verkehrsteilnehmers führt, ist die Erfassung anderer Verkehrsteilnehmer notwendig, um im Falle einer möglichen Blendung dieser Verkehrsteilnehmer das Anleuchten des erkannten Objekts unterdrücken zu können.

Das Kraftfahrtbundesamt muss neuen Lichtquellen am Fahrzeug grundsätzlich eine Zulassung erteilen, bevor sie der Hersteller in seine Fahrzeuge integrieren darf. Auf Grund der Blendungsproblematik ist die Zulassungsfähigkeit dieser Anzeige ungewiss.

3.4.2 Vergleich der abstrakten Anzeigen

Tabelle 3.1 vergleicht die abstrakten Anzeigen miteinander und verdeutlicht, dass ein Spot-Scheinwerfer, der erkannte Objekte anleuchtet, wohl die beste Mensch-Maschine-Schnittstelle eines warnenden NightVision-Systems darstellt. Im Vergleich zu den beiden anderen vorgestellten abstrakten Anzeigen ist die Warnung sehr einfach und intuitiv zu verstehen, da sie die Gefahr positionsrichtig und in der Realität anzeigt und dabei durch das Anleuchten des erkannten Objekts sogar die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die

	LED-Leiste	Markierung in der Frontscheibe	Spot-Scheinwerfer
Intuitivität	-- Entfernung farbcodiert, Gefahr nicht sichtbar	- Gefahr nicht sichtbar	++ Steuerung der Aufmerksamkeit auf die Gefahr
Einschbarkeit	-- Richtungswarnung positionsabhängig, nur für Fahrer positionskorrekt	-- Richtungswarnung positionsabhängig, nur für Fahrer positionskorrekt	++ Warnung für alle Insassen positionsrichtig sichtbar
Bauraum	+ klein, in der Scheibenwurzel	+ klein trotz schwenkbarer Laser- bzw. Spiegelmechanik	- groß, im Scheinwerfer
Verfügbarkeit	++ bereits verfügbar	-- noch nicht verfügbar	-- noch nicht verfügbar, Zulassungsfrage
Zusatzsysteme	++ keine	-- Blickrichtungserkennung	-- Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer
Zusatzkosten	+ gering	-- sehr hoch	-- sehr hoch

Tabelle 3.1: Qualitativer Vergleich abstrakter Anzeigen für NightVision-Systeme

Gefahr lenkt. Das System ist auf diese Weise für alle Insassen des Fahrzeugs erlebbar, während die beiden anderen Anzeigen nur für den Fahrer einen Sinn ergeben. Nachteil dieser Anzeigemöglichkeit sind jedoch die hohen Zusatzkosten durch die Integration eines Spot-Scheinwerfers im bereits dicht verbauten Scheinwerfer und die Zusatzsensorik zur Situationsanalyse, um Blendungen anderer Verkehrsteilnehmer zu verhindern. Bis die Bildverarbeitung die hohe Verlässlichkeit bietet, um eine abstrakte Anzeige zu ermöglichen, wird sich die LED-Technik weiterentwickeln, so dass Spot-Scheinwerfer mit Hilfe von LED-Arrays auch in kleinen Bauräumen möglich werden. Gleichzeitig werden viele neuartige Lichtfunktionen die gesetzlichen Rahmenbedingungen ausweiten und Möglichkeiten für bisher unbekannte Lichtverteilungen schaffen.

3.5 Vergleich der Systemausprägungen

Tabelle 3.2 gibt einen Überblick über Ausprägungen von NightVision-Systemen. Dabei unterscheidet die Darstellung, den vorangegangenen Abschnitten entsprechend, zwischen rein anzeigenden, hervorhebenden und warnenden Systemen.

Bildgebende Systeme stellen heute den Stand der Technik dar. Die Anzeige des Kamerabildes in einem Bildschirm erfordert die abwechselnde Beobachtung von Anzeige und realer Szene durch den Fahrer. Die heute verfügbaren Anzeigen können nur Teile der physiologischen Anforderungen der Ergonomie erfüllen. Die Betrachtung von zwei optischen Quellen mit hoher Informationsdichte und sich kontinuierlich veränderndem Inhalt belastet den Fahrer, so dass die Systeme zwar die Aufmerksamkeit des Fahrers aufrecht halten, der Fahrkomfort jedoch deutlich sinkt.

Hervorhebende NightVision-Systeme erkennen Objekte und markieren diese im Bild. Die Markierung hilft dem Fahrer, auch bei einem kurzen Blick in die Anzeige Gefahren

	rein anzeigend	hervorhebend	warnend
Sensorik	NIR-Kamera mit Beleuchtung oder FIR-Kamera	NIR-Kamera mit Beleuchtung oder FIR-Kamera	NIR-Kamera mit Beleuchtung oder FIR-Kamera
Bildverarbeitung	Helligkeits- und Kontrastanpassung	Personenerkennung	verlässliche Personenerkennung und Erkennung von Tieren
Zusatzsysteme	keine	keine	eventuell Blickrichtungserkennung, eventuell Umfelderkennung
Anzeige	Kombidisplay, HeadUp-Display, Mitteldisplay oder TFT auf Hutze	Kombidisplay, HeadUp-Display, Mitteldisplay oder TFT auf Hutze	LED-Leiste, Markierung in der Scheibe, Anleuchten der Gefahr

Tabelle 3.2: Überblick über NightVision-Systeme

zu erkennen. Objekte, die das System nicht markiert, sind beim Blick in den Bildschirm dennoch sichtbar. Hervorhebende Systeme stellen einen Kompromiss zwischen Produktsicherheit und Ergonomie her, da das System den Fahrer unterstützt, dieser aber auch selbständig Gefahren im Bild erkennen kann.

Warnende NightVision-Systeme nehmen dem Fahrer diese Erkennungsleistung ab. Voraussetzung ist eine Objekterkennung, die eine sehr geringe Anzahl an Fehldetektionen bei nahezu vollständiger Erkennungswahrscheinlichkeit von als gefährlich eingestuften Objekten aufweist. Je nach Anzeigevariante ist zusätzlich eine Umfelderkennung oder eine Blickrichtungserkennung notwendig. Mit der Übergabe der Erkennungsleistung an das System verliert der Nutzer die Möglichkeit, Fehldetektionen zu erkennen und Warnungen nachzuvollziehen. Durch den Verzicht auf das Bild sind Zusatzinformationen wie der Fahrbahnverlauf nicht mehr sichtbar.

Der Vergleich zeigt, dass hervorhebende NightVision-Systeme zwar nur wenige Anforderungen an das System optimal erfüllen, sie stellen jedoch nach dem heutigen Stand der Technik einen annehmbaren Kompromiss dar.

Die Akzeptanz der rein anzeigenden Systeme und die Einführung der warnenden Systeme werden zeigen, ob der Nutzer auf das Bild verzichten will. Immerhin sind die Preise der NightVision-Systeme vergleichsweise hoch, so dass der Käufer durchaus den Anspruch erheben kann, mehr von dem System zu sehen als eine abstrakte Warnung.



4 Bildanalyse

Kapitel 3 erläuterte den Interessenkonflikt zwischen Ergonomie und Produktsicherheit bei rein bildgebenden und warnenden NightVision-Systemen und leitete die Motivation für hervorhebende Systeme als Kompromisslösung her. Dieses Kapitel beschreibt die im Rahmen dieser Arbeit geleistete Entwicklung von Algorithmen zur Darstellung eines hervorhebenden Systems.

4.1 Ziele der Bildanalyse

Hervorhebende NightVision-Systeme sind mit dem heutigen Stand der Technik umsetzbar. Ziel der Arbeit ist es deshalb, den Fahrer bei der Erkennung von Gefahren im Bild zu unterstützen und dabei die Mensch-Maschine-Schnittstelle zu verbessern, ohne dem Fahrer die Möglichkeit zu entziehen, das System zu kontrollieren.

Gefahren im Sinne der Funktion NightVision sind alle Objekte, die sich in der Nähe des Fahrschlauchs des Fahrzeugs befinden und die der Fahrer nicht sehen kann. Dabei kann es sich um Menschen, Tiere, Gegenstände und andere unbeleuchtete Hindernisse handeln. Diese Definition von Gefahr legt eine Objekterkennung auf Basis von NIR-Bildern nahe, da diese grundsätzlich alle Objekte anzeigen und in FIR-Bildern besonders Gegenstände mit Umgebungstemperatur schlecht sichtbar sind. Kapitel 3 hat jedoch erläutert, dass die Erkennung von beliebigen Hindernissen nicht möglich ist, da die Bildverarbeitung keine Eigenschaften von unbekanntem Objekten nutzen kann.

Die Betrachtung des optischen Flusses und die Berechnung des dreidimensionalen Abbilds des Fahrzeugvorfelds mit der Stereo-Kamera ermöglichen die Detektion von Hindernissen im Erfassungsbereich des Abblendlichts. Das Hindernis ist demnach zum Zeitpunkt der Warnung bereits im Abblendlicht sichtbar, so dass die Sinnhaftigkeit der Warnung in Frage gestellt ist. Die Warnung kann sogar ihr Ziel verfehlen, wenn sie die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die NightVision-Anzeige lenkt und dieser dabei viel Zeit verliert und das Hindernis ohne Warnung früher gesehen und schneller reagiert hätte. Die beiden Ansätze scheinen aus diesem Grund vielmehr für das autonome Anfahren sowie für die Kollisionsvermeidung als für NightVision geeignet zu sein.

Damit beschränkt sich die Objekterkennung für NightVision auf Menschen und Tiere. Diese Vorgehensweise ergibt insbesondere mehr Sinn, da das System Unfälle mit Lebewesen verringern soll und Kollisionen mit Gegenständen auf der Fahrbahn eher selten sind und ein geringeres Todesrisiko mit sich bringen [Sta03, Lan95].

Diese Priorisierung legt eine Objekterkennung auf Basis von FIR-Bildern nahe, da diese Menschen und Tiere besonders hervorheben. Bei der Erkennung von Personen in einem NIR-Bild stehen Erkennungsalgorithmen vor ähnlichen Problemen wie Menschen: Das detaillierte NIR-Bild ermöglicht zwar eine schnelle und einfache Orientierung, die hohe Informationsdichte erschwert jedoch die Erkennung von Gefahren. Der Nutzer muss die Details einzeln betrachten und erkennen, bevor er entscheiden kann, ob sie eine Gefahr darstellen. Dadurch entstehen lange Blickzeiten auf die Anzeige [TBMF04] und es besteht Verwechslungsgefahr von Objekten mit menschen- oder tierähnlicher Form [TKM⁺04]. Dies trifft besonders auf Pflanzen und Sträucher zu, die über die umliegende Vegetation hinausragen und im nahen Infrarot stark reflektieren, so dass beispielsweise die Person in Bild 4.1 besonders bei einem kurzen Blick nur schwer von hoch wachsenden Pflanzen unterscheidbar ist.



Bild 4.1 : NIR-Bild mit Gegenverkehr und Pflanzen am Straßenrand

Das detailreiche NIR-Bild erschwert auch der Bildverarbeitung die fehlerfreie Erkennung von Personen und Tieren und verursacht zahlreiche Falscherkennungen. Um dies zu vermeiden, muss das System die geforderte Übereinstimmung zwischen Muster und Bildinhalt sehr hoch setzen und verursacht auf diese Weise eine größere Zahl an Nichterkennungen, die ebenfalls unerwünscht sind.

Im Bild eines FIR-Systems dagegen sind potenzielle Gefahren bereits vom Hintergrund getrennt, sofern sich ihre Temperatur von der Umgebungstemperatur unterscheidet. Da es sich bei diesen Objekten nicht nur um Menschen und Tiere, sondern auch um aufgeheizte Fahrzeugteile oder Steine handeln kann, muss ein Bildverarbeitungsalgorithmus diese klassifizieren. Das FIR-System verspricht eine verlässlichere Detektion von Menschen und Tieren und ist daher der bessere Ansatz. Die in dieser Arbeit entwickelten Algorithmen werden deshalb auf den Bilddaten eines FIR-Systems basieren.

Ziel der Bildanalyse ist zum einen die Reduzierung der Blickzeiten auf den Bildschirm durch die Markierung der als gefährlich eingestuften Objekte, zum anderen will diese Arbeit die oft kritisierte schlechte Orientierbarkeit im FIR-Bild verbessern. Dazu muss das System dem Fahrer eine Referenz geben, die auch den Aufenthaltsort eines markierten Objekts zum Fahrzeug und zum Vorfeld in Relation bringt. Als Referenzsystem bietet sich die Straße an, da sie ein zentrales Objekt zur Erfüllung der Fahraufgabe ist und der Fahrer sich ohnehin an der Straße und ihrem Verlauf orientiert [Die04]. Neben der Hervorhebung von potenziell gefährlichen Objekten ist also auch die Erkennung und Hervorhebung der Straße und des Straßenverlaufs aus dem Wärmebild notwendig. Ziel der Bildanalyse ist die in Bild 4.2 angedeutete Darstellung des NightVision-Bildes [TR06].

Die Abschnitte 4.2 und 4.3 erläutern die Vorgehensweise und die Algorithmen zur Umsetzung der Erweiterungen des Nachtsicht-Bildes nach Bild 4.2.

4.2 Fahrbahnerkennung in Wärmebildern

Die vielen verschiedenen Ansätze zur Erkennung von Fahrspurbegrenzungen mit kamerabasierten Systemen sind aus den Arbeiten an autonomen Fahrzeugen bekannt. BEHRINGER und LÜTZELER geben einen guten Überblick über die Aktivitäten auf diesem Gebiet [Beh97, Lüt02]. Spurhaltesysteme greifen die Ergebnisse der Arbeiten auf und entwickeln diese weiter. In den meisten Fällen handelt es sich um modellbasierte Ansätze, die eine mathematische Beschreibung des Straßenverlaufs heranziehen. Das Klothoidenmodell ist ein sehr beliebter Ansatz, da Straßen nach diesem Modell geplant und gebaut werden [For84]. Zur Erkennung des Fahrspurverlaufs suchen Kantenfilter im aufgezeichneten Bild nach Stützpunkten auf der Fahrspurmarkierung, deren Koordinaten zur Ermittlung der Modellparameter dienen.

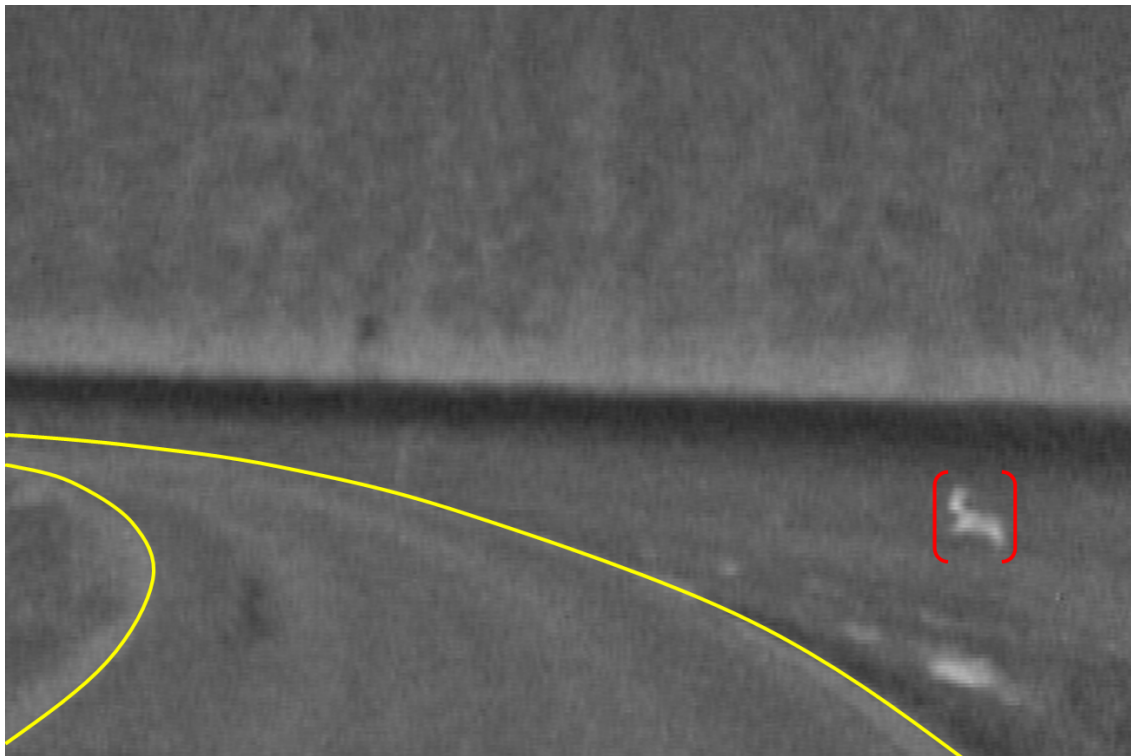


Bild 4.2 : Ziel der Bildaufbereitung

Bild 4.3 zeigt das Vorfeld eines Fahrzeugs aus der Perspektive eines Spurhaltesystems sowie den zugehörigen Kantenverlauf über der im Bild weiß eingezeichneten Linie. Der Kantenverlauf gibt neben der Position der Fahrbahnmarkierung auch Aufschluss über die Breite der Markierung und der Fahrspur. Die Zuordenbarkeit einer positiven und einer negativen Flanke in einem definierten Abstand ermöglicht es, ausgeprägte Kanten, die nicht zur Fahrspur gehören, wie beispielsweise Abbiegepefeile, Leitplanken, Begrenzungspfosten oder den Übergang zwischen Straße und Bebauung, zu ignorieren. Der Spurfindungsalgorithmus passt die Parameter des Straßenmodells an die auf der Fahrspurmarkierung gefundenen Stützpunkte an und bestimmt den Verlauf der Straße in Form von Krümmungskurven. Dabei fließen sogar Informationen über die nach der Straßenbauordnung maximal und minimal zulässige Krümmung einer Kurve und die maximale und minimale Breite einer Markierung in die Berechnung ein. Eine detaillierte Beschreibung des Spurfindungsalgorithmus gibt BEHRINGER [Beh97].

Zur Fahrbahnerkennung in Wärmebildern beschreiben FARDI und WANIELIK, dass die Suche nach Kantensprüngen an den Fahrbahnrandern im gesamten Wärmebild bei kleinen Kantenoperatoren nicht zum Ziel führt, da kleine Operatoren auf hochfrequentes Rauschen reagieren [FW04]. Das Ergebnis des Kantenoperators über das gesamte Bild liefert kaum ausgeprägte Kantensprünge, die sich eindeutig dem Fahrbahnrand zuord-



Bild 4.3 : Fahrbahnmarkierung und Kontrastverlauf zwischen Straße und Markierung

nen lassen. Da große Kantenoperatoren zwar weniger rauschanfällig sind, jedoch mehr Rechenzeit beanspruchen, reduzieren FARDI und WANIELIK die Auflösung des Bildes durch Unterabtastung, filtern damit die hochfrequenten Bildanteile aus und erhalten dadurch selbst mit kleinen Operatoren ausgeprägte Kanten. Unter der Annahme, dass sich der linke und der rechte Fahrbahnrand im Fluchtpunkt der Kamera schneiden, wenden sie eine Hough-Transformation auf das Kantenbild an und verwerfen alle Punkte des Bildes, die nicht auf einer Geraden durch den Fluchtpunkt liegen. Ein Tracking-System verfolgt die Bewegung des Fluchtpunkts.

Obige Beiträge bestimmen die Koordinaten der Fahrbahnränder, um die Position des Fahrzeugs in der Spur zu berechnen. Diese Arbeit möchte den Fahrbahnverlauf im Bild hervorheben, um dem Fahrer eine Orientierungshilfe im Bild zu geben [Tan05].

4.2.1 Randbedingungen

Bild 4.4 zeigt das typische FIR-Bild einer Straße aus der Perspektive einer am Fahrzeug montierten FIR-Kamera. Der Vergleich mit Bild 4.3 zeigt, dass die FIR-Kamera das Abbild des Vorfelds aus einer tieferen Blickposition aufzeichnet: Während CMOS-

und CCD-Kameras hinter der Frontscheibe unter dem Dachmodul Platz finden, müssen Wärmebildkameras auf Einbauorte ausweichen, die nicht von wärmeisolierenden Scheiben geschützt sind. Aus Gründen der Crash-Sicherheit und Aerodynamik des Fahrzeugs, der Säuberungsmöglichkeiten der Kamera und des Fahrzeugdesigns müssen Wärmebildkameras auf Einbauorte ausweichen, die maximal auf der Höhe der Scheinwerfer liegen.

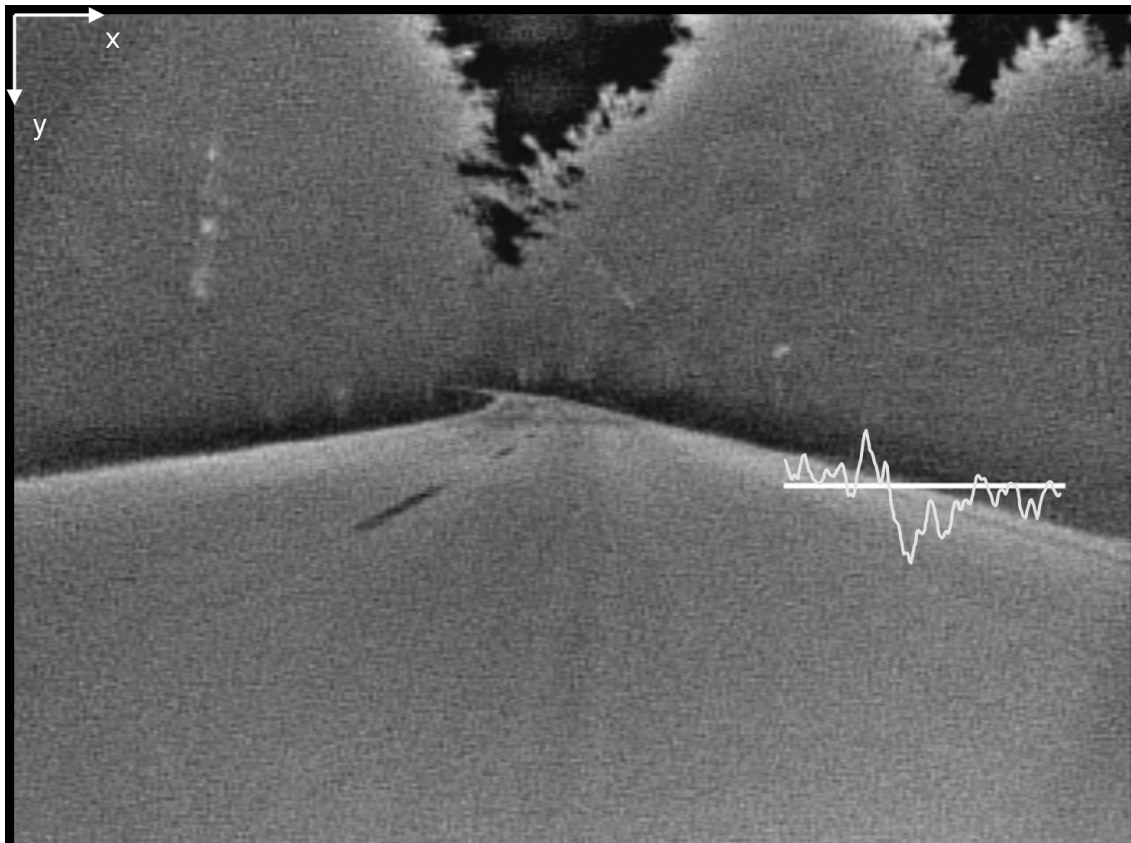


Bild 4.4 : Straße und Kontrastverlauf zwischen Straße und Begrenzung im FIR-Abbild

Weiterhin zeigt der Vergleich, dass die Fahrspurmarkierungen selbst kaum sichtbar sind, so dass sich ein Großteil der aus der Literatur bekannten Algorithmen, die auf einer im Bild vorhandenen Fahrspurmarkierung aufbauen, nicht anwenden lassen. Damit entfällt auch die Möglichkeit, Fahrspurmarkierungen anhand der Breite des Flankenwechsels zu validieren und von anderen Kanten zu unterscheiden. Um dennoch eine Erkennung des Fahrbahnverlaufs zu ermöglichen, muss der Erkennungsalgorithmus auf den Unterschied zwischen der Straße und der daneben gelegenen Bebauung zurückgreifen. Bild 4.4 zeigt den Kantenverlauf über der weiß eingezeichneten Linie und verdeutlicht, dass selbst die Grenze zwischen Straße und Bebauung im FIR-Bild erheblich schwächer ist als die Gren-

ze zwischen Markierung und Asphalt in Bild 4.3. Die aufgeführten Randbedingungen erschweren die Erkennung und die Bewertung der Stützpunkte.

4.2.2 Suche nach Stützpunkten auf den Fahrbahnrändern

Zur eindeutigen Orientierung im Bild beschreibt das kartesische Koordinatensystem nach Bild 4.4 die Positionen der einzelnen Bildpunkte. Der Erkennungsalgorithmus ist in verschiedene Phasen unterteilt, die aufeinander aufbauen: Dieser Abschnitt beschreibt die Initialisierungsphase, in der das Verfahren Stützpunkte auf den Fahrbahnrändern findet und deren Güte verbessert. Die zweite Phase erweitert die Stützpunktliste über den Initialisierungsbereich hinaus und bewertet die Güte der Stützpunkte.

Zum Auffinden der Fahrbahnränder muss ein Kantenfilter Helligkeitssprünge im Bild erfassen. Bild 4.5 zeigt die verschiedenen Antworten der im Folgenden beschriebenen Operatoren [Lan02, Pra91] bei Anwendung auf die in Bild 4.4 eingezeichnete Linie.

$$\begin{array}{cc}
 \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\
 \text{horizontal getrennte} & \text{vertikal getrennte} \\
 \text{Nachbardifferenz} & \text{Nachbardifferenz}
 \end{array} \quad (4.1)$$

$$\begin{array}{cc}
 \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \\
 \text{horizontaler} & \text{vertikaler} \\
 \text{Sobel-Operator} & \text{Sobel-Operator}
 \end{array} \quad (4.2)$$

$$\begin{array}{cc}
 \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} \\
 \text{nord-ost orientierter} & \text{süd-ost orientierter} \\
 \text{Robinson-Operator} & \text{Robinson-Operator}
 \end{array} \quad (4.3)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.4) \\
 \text{Laplace-Operator}$$

Der Verlauf der einzelnen Kurven in Bild 4.5 zeigt deutlich, dass der Sobel-Operator am empfindlichsten auf Helligkeitsgradienten im Wärmebild reagiert. Der folgende Algorithmus verwendet daher einen Kantenoperator, der die Wurzel der Quadratsumme der Antwort des vertikalen und des horizontalen Sobel-Filters berechnet.

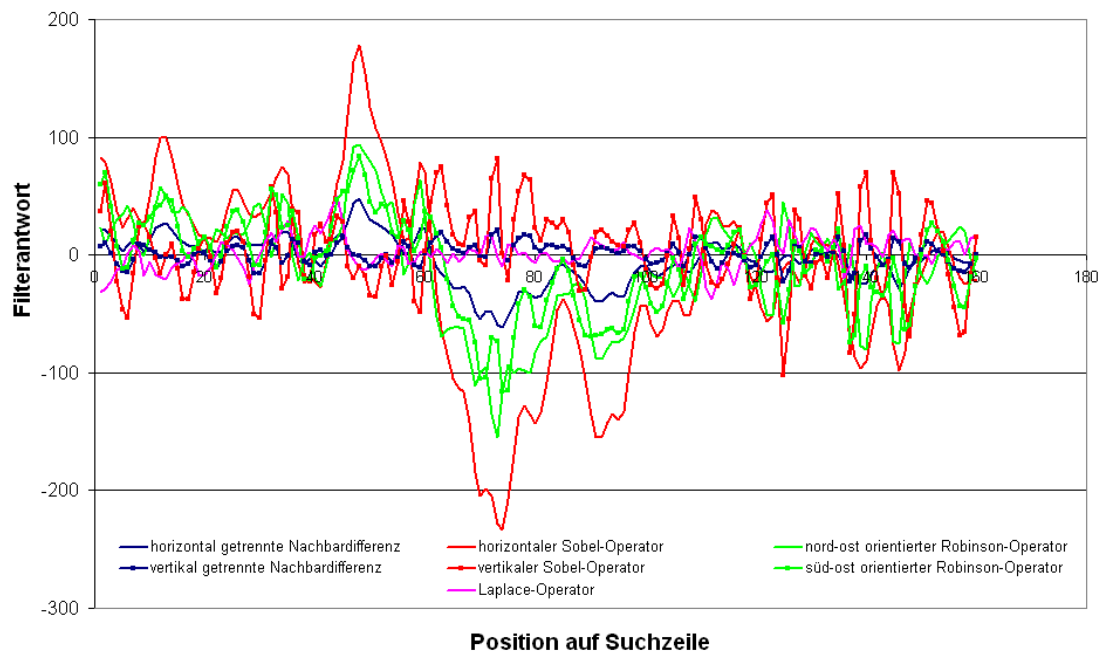


Bild 4.5 : Vergleich verschiedener Kantenoperatoren

Da die Suche nach Kanten im gesamten Bildbereich zu viel Rechenzeit in Anspruch nimmt, ist die Suche nach den Fahrbahnrändern auf Suchfenster nach Bild 4.6 reduziert. Die Einschränkung auf die Suchfenster in der Initialisierungsphase ist möglich, da die Kamera fest am Fahrzeug montiert ist und die Fahrbahnränder sich direkt vor dem Fahrzeug immer in diesen Bildbereichen befinden, sofern das Fahrzeug auf einer Straße steht und in Fahrtrichtung orientiert ist.

Um zusätzlich Rechenzeit zu sparen, sucht der Kantenoperator nur in einzelnen Zeilen z des Suchfensters. Die Abstände der Suchzeilen sind äquidistant und bleiben fest. Die jeweils stärkste Kante jeder einzelnen Suchzeile gilt als potenzieller Stützpunkt des Fahrbahnrandes und wird mit seinen Koordinaten in einer Liste von Stützpunkten gespeichert. Die Suche nach den Stützpunkten wiederholt sich während der Initialisierungsphase in gleicher Art auf den verbleibenden Suchzeilen. Auf diese Weise füllt der Algorithmus die Stützpunktlisten für den linken und rechten Fahrbahnrand mit Stützpunkten S_z aus der z -ten Suchzeile in der Form

$$S_z = \begin{pmatrix} x_z \\ y_z \end{pmatrix}. \quad (4.5)$$

Die Stützpunkte S_z im Bild repräsentieren reale Punkte P_i auf den Fahrbahnrändern, so dass S_z die Projektionen der P_i in die Bildebene zum Zeitpunkt t sind. Im Allgemeinen hat sich ein realer Punkt P_i bis zur Aufzeichnung des nächsten Bildes zum Zeitpunkt $t + 1$ durch die Bewegung des Fahrzeugs an einen anderen Ort im Bild bewegt. Bewegt



Bild 4.6 : Suchfenster und Suchzeilen während der Initialisierung

sich das Fahrzeug genau parallel zu den Fahrbahnrändern auf einer geraden Straße, so repräsentiert S_z mit genau denselben Koordinaten aus dem Zeitpunkt t zwar nicht mehr den ursprünglichen Punkt P_i aus dem Zeitpunkt t , jedoch immer noch einen Punkt auf dem Fahrbahnrand, da sich die Position des Fahrbahnrandes im Bild nicht ändert.

Diese Annahme setzt voraus, dass sich die Lage des Fahrzeugs in der Fahrspur nicht ändert, die Fahrbahnbreite konstant bleibt und das Fahrzeug frei von Nick-, Gier- und Wankbewegungen ist. Im realen Fahrbetrieb ist diese Annahme nicht gültig. Bild 4.7 zeigt, wie sich die Position der Fahrbahnbegrenzung und des Stützpunkts auf der Suchzeile in den oben genannten Fällen ändert.

Die Stützpunkte S_z bewegen sich demnach innerhalb einer Suchzeile. Durch die Entkopplung der Stützpunkte S_z im Bild von den realen Punkten P_i auf der Straße und durch die Fixierung der Suchzeile und damit der horizontalen Position der Stützpunkte S_z reduziert sich die Beschreibung der in Bild 4.7 angedeuteten Vorgänge auf eine eindimensionale Bewegung des Stützpunktes jeder einzelnen Suchzeile z in der Bildebene. Die einfache Bewegungsgleichung eines Stützpunktes S_z innerhalb einer Zeile z entspricht

$$x_{t+1} = x_t + \dot{x}_t \cdot \Delta t + w_t. \quad (4.6)$$

Dabei beschreibt x_t die vertikale Position des Stützpunktes zum Zeitpunkt t , \dot{x}_t die vertikale Geschwindigkeit der Bewegung auf der Suchzeile z , t den aktuellen Zeitpunkt und Δt die Zeitdifferenz zwischen zwei Bildern. Durch die Annahme einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit entsteht ein Fehler w_t , der die beschleunigte Bewegung des Stützpunktes beinhaltet. Da der Kantenoperator lediglich die vertikale Position des Stützpunktes, jedoch nicht seine Geschwindigkeit liefert, stellt

$$m_t = x_t + v_t \quad (4.7)$$

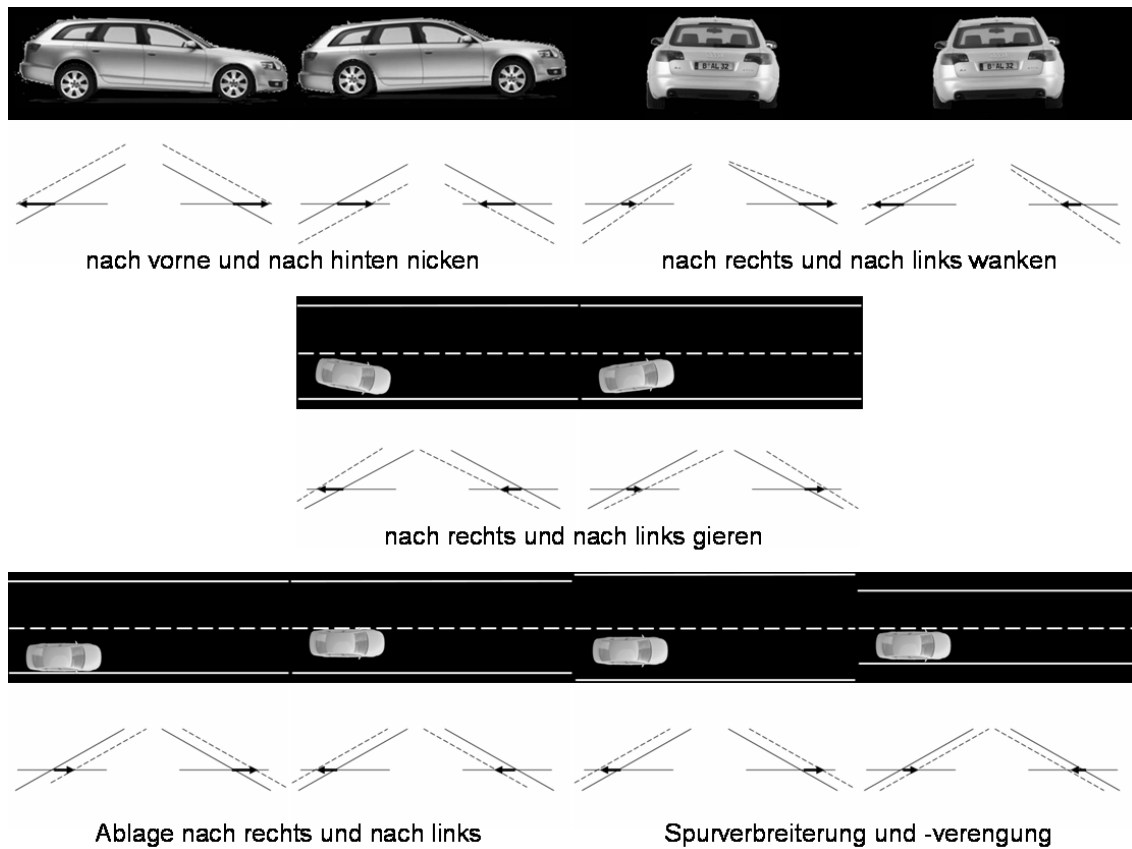


Bild 4.7 : Auswirkungen der Fahrdynamik auf das Abbild der Fahrbahnbegrenzungen

die Messung der vertikalen Position dar. Auch hier entsteht ein Messfehler v_t , die der Kantenoperator beispielsweise durch die Detektion von Kanten verursacht, die nicht zum Fahrbandrand gehören. Dabei kann es sich sowohl um Kanten von inhomogener Bebauung neben der Straße, wie beispielsweise Leitplanken, Fußwege, Bürgersteige oder Gartenzäune, als auch um inhomogene Temperaturverteilungen auf der Straße handeln, die durch ausgebesserte Teerflächen oder Spurrinnen verursacht werden.

Gleichungen 4.6 und 4.7 bilden die Grundlage eines zeitlichen Kalman-Filters [Kal60, Bro83, Bro98], der die lineare Bewegung eines Stützpunktes auf der Suchzeile über den Verlauf der Bilder beziehungsweise der Zeit verfolgt. Gleichungen 4.8 und 4.9 geben das Bewegungsmodell und die Messung in Matrixform wieder:

$$X_{t+1}^+ = \begin{pmatrix} x_{t+1}^+ \\ \dot{x}_{t+1}^+ \end{pmatrix} = A_t \cdot \hat{X}_t + W_t = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{x}_t \\ \hat{\dot{x}}_t \end{pmatrix} + W_t \quad (4.8)$$

$$M_{t+1} = C_{t+1} \cdot X_{t+1} + V_t = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{t+1} \\ \dot{x}_{t+1} \end{pmatrix} + V_t = x_{t+1} + v_t. \quad (4.9)$$

X_{t+1}^+ ist eine Voraussage des nächsten Zustands, also die Position und die Geschwindigkeit des Stützpunktes zum Zeitpunkt $t + 1$ auf Basis des letzten Zustands \hat{X}_t aus dem Zeitpunkt t . A_t ist die Zustandsübergangsmatrix, die das Bewegungsmodell beschreibt und die Voraussagen ermöglicht. Diese Voraussagen haben eine Ungenauigkeit, die der hier angewendete Kalman-Filter mit dem Systemfehler W_t , der aus der Annahme $\ddot{x}_t = 0$ resultiert, als normalverteilte statistische Größe mit verschwindendem Mittelwert und der Covarianz $COV(W_t) = Q_t$ modelliert. Diese Annahme für die Beschleunigung der Stützstellen ist gültig, da sich deren Geschwindigkeit in den meisten Fällen nicht ändert und Beschleunigungen im Bild nach links und nach rechts gleich wahrscheinlich sind. Auch die Messung M_{t+1} unterliegt einem Fehler, wobei die Annahme eines normalverteilten Messfehlers R_t mit verschwindendem Mittelwert und der Covarianz $COV(V_t) = R_t = \sigma_r^2$ realitätsferner ist, da Messfehler durch die bereits genannte inhomogene Bebauung nicht regelmäßig und häufiger neben als auf der Fahrbahn auftreten. Die Messfehler haben demnach in der Realität einen Mittelwert, der sie weiter vom Fahrbahnrand weg in Richtung der Bebauung positioniert. Für den Kalman-Filter ist der Messfehler dennoch mit verschwindendem Mittelwert anzunehmen. Daraus ergeben sich für die Ungenauigkeit der vorausgesagten Stützpunkte und der Messwerte die Kovarianzmatrizen

$$S_{t+1}^+ = A_t \cdot \hat{S}_t \cdot A_t^T + Q_t \quad (4.10)$$

und

$$R_t = \sigma_r^2. \quad (4.11)$$

Q_t ergibt sich nach LI und JILKOV [XJ03] zu

$$Q_t = G_t \cdot V \cdot G_t^T = \begin{pmatrix} \frac{t^2}{2} \\ t \end{pmatrix} \cdot \sigma_q^2 \cdot \begin{pmatrix} \frac{t^2}{2} & t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{t^4}{4} & \frac{t^3}{2} \\ \frac{t^3}{2} & t^2 \end{pmatrix} \cdot \sigma_q^2, \quad (4.12)$$

wobei hier $t = \Delta t$ gilt.

Mit den Kalmanfaktoren

$$K_{t+1} = \begin{pmatrix} k_{1,t+1} \\ k_{2,t+1} \end{pmatrix} = S_{t+1}^+ \cdot C_{t+1}^T \cdot (C_{t+1} \cdot S_{t+1}^+ \cdot C_{t+1}^T + R_t)^{-1} \quad (4.13)$$

kann der Filter den statistisch wahrscheinlichsten Zustand

$$\hat{X}_{t+1} = X_{t+1}^+ + K_{t+1} \cdot (M_{t+1} - C_{t+1} \cdot X_{t+1}^+) \quad (4.14)$$

mit der Ungenauigkeit

$$\hat{S}_{t+1} = (I - K_{t+1} \cdot C_{t+1}) \cdot S_{t+1}^+ \quad (4.15)$$

bestimmen.

Mit den Startwerten

$$\hat{X}_0 = \begin{pmatrix} x_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

und

$$\hat{S}_0 = \begin{pmatrix} \sigma_r^2 & 0 \\ 0 & \sigma_q^2 \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

und den zeitkonstanten Matrizen A , Q und R ergibt sich für jede einzelne Suchzeile z ein einfacher Kalman-Filter zweiter Ordnung, der die Bewegung des Stützpunktes S_z auf der Suchzeile z unabhängig von den anderen Stützpunkten auf den anderen Suchzeilen über die zeitliche Abfolge der Videobilder verfolgt (siehe Bild 4.8). Vorteil des Kalman-Filters ist hierbei, dass er auf Grund seiner rekursiven Eigenschaft kaum weitere Speicherressourcen in Anspruch nimmt, da der Algorithmus die Stützpunkte ohnehin für die Anwendung des Fahrbahnmodells speichern muss.

Um auch die Stützpunkte der einzelnen Suchzeilen zueinander in Relation zu bringen, verwendet der Algorithmus einen weiteren Kalman-Filter. Auf Grund der Einbauposition der Kamera sind im Bereich der Suchfenster nach Bild 4.6 grundsätzlich keine großen Krümmungen der Fahrbahn zu erwarten, so dass die Richtung einer Fahrbahnkante im Bild nahezu konstant, zumindest ohne Krümmungswechsel sein sollte. Dann sind die vertikalen Positionen x_z und x_{z+1} der Stützpunkte S_z und S_{z+1} benachbarter Suchzeilen z und $z+1$ in der Form

$$x_{z+1} = x_z + d_z + u_z \quad (4.18)$$

oder

$$X_{z+1} = \begin{pmatrix} x_{z+1} \\ d_{z+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_z \\ d_z \end{pmatrix} + U_z \quad (4.19)$$

miteinander verknüpft. x_z entspricht der vertikalen Position des Stützpunktes auf der Suchzeile z , während d_z den vertikalen Versatz zwischen dem Stützpunkt auf der Suchzeile z zum Stützpunkt auf der Zeile $(z-1)$ beschreibt. Hier entsteht durch eventuell vorhandene Krümmungen der Fahrbahn ein Fehler u_z mit Mittelwert 0 und einer Streuung von σ_u . Diese Annahme ist auch hier gegeben, da sowohl Krümmungsänderungen nach rechts als auch nach links gleich wahrscheinlich sind. Die "gemessene" Position entspricht dem Ergebnis der vorhergehenden zeitlichen Kalman-Filterung, so dass sich die Messgleichung zu

$$M_{z+1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{z+1} \\ d_{z+1} \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

ergibt, wobei auch hier ein Messfehler vorhanden ist, der der aktuellen Ungenauigkeit des Stützpunktes nach der Filterung mit dem zeitlichen Kalman-Filter entspricht.

Damit gilt

$$Q_z = \begin{pmatrix} \hat{s}_{11} & 0 \\ 0 & \sigma_u^2 \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

und

$$R_z = \hat{s}_{11}. \tag{4.22}$$

Ziel dieses örtlichen Kalman-Filters ist es, den Polygonzug, der aus den einzelnen Stützpunkten entsteht, zu glätten, Ausreißer in den Verlauf der anderen Stützpunkte einzugliedern und den Algorithmus zu stabilisieren. Die linke Seite von Bild 4.8 stellt die zeitliche und örtliche Kalman-Filterung graphisch dar.

Um letztendlich eine Güte für die Erkennung der Fahrbahnränder in der Initialisierungsphase zu erhalten, ermittelt der Algorithmus mit Hilfe einer Hough-Transformation für jede Fahrbahnseite eine Gerade, die den Fahrbahnverlauf im Suchbereich annähert [Hou62, Lan04, Pra91]. Dabei berücksichtigt die Transformation nur die ermittelten Stützpunkte einer Fahrbahnseite. Die Hough-Gerade der Form $g(x_h) = h \cdot x_h + c_h$ gibt die Richtung der Fahrbahnränder an, so dass die mittlere Abweichung F aller Stützpunkte von der Hough-Geraden ein Maß für die Güte der gesammelten Stützpunkte ist. Liegt die mittlere Abweichung

$$F = \sum_{z=1}^k (x_z - x_h)^2 = \sum_{z=1}^k \left(x_z - \frac{g(x_h) - c_h}{h} \right)^2 \tag{4.23}$$

lange genug unter einem bestimmten Toleranzwert, gilt die Initialisierung als erfolgreich abgeschlossen und der Algorithmus beginnt die Ausweitung der Stützpunktsuche über die Suchbereiche hinaus.

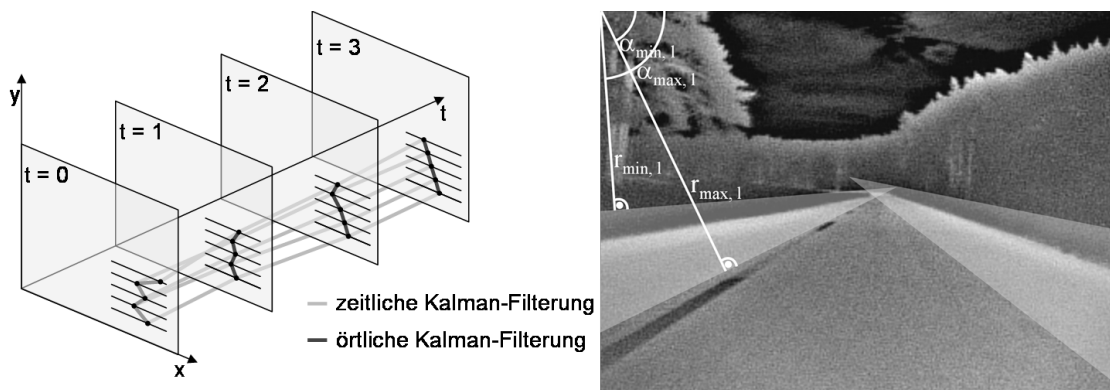


Bild 4.8 : Graphische Darstellung der zeitlichen und örtlichen Kalman-Filterung und Reduzierung des Zielbereichs der Hough-Transformation

Um zum einen nur für die Fahrbahnerkennung sinnvolle Geraden zu erhalten und zum anderen bei der aufwändigen Hough-Transformation Rechenzeit einzusparen, sind die möglichen Bereiche, in denen sich die Hough-Geraden befinden dürfen, auf die in Bild 4.8 rechts hervorgehobenen Flächen beschränkt. Diese Bereiche lassen sich durch jeweils zwei Geraden in Polarkoordinaten beschreiben und sind deshalb, wie in Bild 4.8 für die

linke Fahrbahnseite angedeutet, durch die Winkel $\alpha_{min,l}$ und $\alpha_{max,l}$ und die Abstände $r_{min,l}$ und $r_{max,l}$ definiert. Diese Winkel und Abstände bilden zugleich den zulässigen Zielbereich für die Hough-Transformation, so dass diese Einschränkung und die ausschließliche Nutzung der Stützpunkte die Rechenzeit deutlich senkt.

4.2.3 Erweiterung der Stützpunktliste

In der zweiten Phase der Suche reduziert sich die Breite der Suchzeilen aus der Initialisierungsphase auf die unmittelbare Umgebung des Stützpunktes aus dem letzten Bild der jeweiligen Zeile. Da die Position und die Bewegung der Stützpunkte nach der Initialisierungsphase bekannt sind, reichen kleinere Suchbereiche um die von den Kalman-Filtern vorausgesagten Stützpunkte aus. Große Suchzeilen sind in der Erweiterungsphase nicht notwendig und auf Grund des höheren Risikos der Detektion von Kanten, die nicht zur Fahrbahn gehören, sogar unerwünscht.

Ziel dieser zweiten Phase ist die Erkennung der Fahrbahnränder über das Suchfenster hinaus. Da die Initialisierungsphase die Richtung der Fahrbahnmarkierungen bereits vorgibt und die Abstände benachbarter Suchzeilen ebenfalls bekannt sind, schätzt der örtliche Kalman-Filter die Position des jeweils nächsten Stützpunktes auf der Suchzeile außerhalb des Suchfensters ab. Der Kantenoperator setzt dann in einer bereits reduzierten Suchzeile um den erwarteten Aufenthaltsort des nächsten Stützpunktes an und sucht nach ausgeprägten Kanten. Auf diese Weise erweitert sich die Liste der Stützpunkte sukzessive, bis der Horizont erreicht ist oder der Gradientenverlauf des Kantenoperators keine eindeutige Ermittlung eines neuen Stützpunkts zulässt. Die Erweiterung der Stützpunktliste vom unteren Bildbereich bis möglichst weit an den Horizont ähnelt dem Vorgehen von GRÄFE und TSINAS [GT92].

In der dritten Phase führt der Algorithmus die Suchzeilen den vertikalen Positionen der im letzten Bild gefundenen Stützpunkte nach und verfolgt sowohl mit dem zeitlichen als auch mit dem örtlichen Kalman-Filter die Bewegung der Stützpunkte der jeweiligen Zeilen und damit den Verlauf der Fahrspur. Im Hintergrund berechnet das System die Güte der Erkennung mit Hilfe der Hough-Geraden und startet bei Bedarf eine neue Initialisierung. Diese drei Phasen bilden zusammen den Algorithmus zur Sammlung von Stützpunkten. Bild 4.9 zeigt eine typische Szene mit den Suchfenstern aus der Initialisierungsphase und den bereits reduzierten Suchzeilen nach der Initialisierungsphase.

Auf Basis dieser Stützpunkte kann der Algorithmus nun den Verlauf der Fahrbahn abschätzen. Vorher soll jedoch eine Alternative zum zeitlichen Kalman-Filter zur Sprache kommen, die insbesondere auf Grund der nicht gegebenen, aber dennoch verwendeten Annahme eines normalverteilten Messfehlers seine Berechtigung hat.



Bild 4.9 : Suchfenster der Initialisierungsphase und reduzierte Suchzeilen während der Verfolgung der Stützpunkte

4.2.4 Der Condensation-Algorithmus

Vorhergehender Abschnitt deutete bereits an, dass die Annahme eines normalverteilten Messfehlers mit verschwindendem Mittelwert nicht der Realität entspricht. Die Wahrscheinlichkeitsdichte der Messung hat vielmehr eine Häufung um den Bereich des Fahrbahnrandes und mehrere Häufungen neben der Straße, da der Kantenfilter hier immer wieder starke Gradienten von Leitplanken, Gehwegen und Gräben detektiert. Auf der Straße können ausgebesserte Straßenteile, Risse im Asphalt, Temperaturgradienten in Fahrbahnebenenheiten und Straßenmarkierungen zu Fehldetektionen führen. Insgesamt resultiert daraus ein nicht normalverteilter Messfehler, so dass die Voraussetzung für die Anwendung des Kalman-Filters nicht erfüllt ist und beispielsweise der Condensation-Algorithmus, der keines normalverteilten Messfehlers bedarf, besser geeignet scheint [IB98]. Die Bezeichnung “Condensation” setzt sich aus **Conditional density propagation** zusammen und beschreibt die Ausbreitung bedingter Wahrscheinlichkeiten.

Ändert sich der Zustand eines Prozesses zwischen zwei Zeitpunkten, so ändert sich auch die Wahrscheinlichkeitsdichte des Zustands. Der Condensation-Algorithmus behandelt die Änderung der Wahrscheinlichkeitsdichte als aufeinander folgende Prozesse in Form einer deterministischen Verschiebung, einer stochastischen Streuung und einer Messung. Die Verschiebung der Verteilungsdichte stützt sich auf die Voraussage des nächsten Zustands auf Basis einer Modellannahme, während die Streuung eine Spreizung der Verteilungsdichte durchführt und den Fehler der Modellannahme berücksichtigt. Die Messung korrigiert die vorausgesagte Verteilungsdichte des neuen Zustands mit Hilfe der neuen Messdaten. Diese Prozesse erinnern an den Kalman-Filter, der jedoch zur Berechnung der

Wahrscheinlichkeitsdichte normalverteilte Zustände und Messdaten sowie eine lineare Dynamik des Prozesses verlangt. Der Condensation-Algorithmus hingegen kann Zustände und Messungen mit beliebigen Wahrscheinlichkeitsdichten beobachten [Isa98]. Der Algorithmus trifft lediglich die Annahme, dass der dynamische Prozess, den der Zustand durchläuft, eine Markovsche Kette bildet und die Wahrscheinlichkeitsdichte eines Zustands nur von der Wahrscheinlichkeitsdichte des vorhergehenden Zustands abhängt.

Die Aufgabe des Condensation-Algorithmus besteht darin, auf Basis einer Messung Z_t die Wahrscheinlichkeitsdichte des Zustands X_t zum Zeitpunkt t zu ermitteln. Da die Wahrscheinlichkeitsdichte des Zustands X_t von der Messung Z_t abhängt, handelt es sich um die bedingte Wahrscheinlichkeit $p(X_t|Z_t)$. Nach der Bayesschen Regel [BSMM97] ist die bedingte Wahrscheinlichkeit $p(X_t|Z_t)$ proportional zum Produkt aus der ursprünglichen Wahrscheinlichkeitsdichte $p(X_t)$ des Zustands X_t vor der Messung und der Wahrscheinlichkeitsdichte aus der Messung $p(Z_t|X_t)$:

$$p(X_t|Z_t) = \frac{p(Z_t|X_t) \cdot p(X_t)}{p(Z_t)} = k \cdot p(Z_t|X_t) \cdot p(X_t) = k \cdot p(Z_t|X_t) \cdot p(X_t|Z_{t-1}). \quad (4.24)$$

k ist eine von X_t unabhängige Proportionalitätskonstante. $p(X_t)$ ist die Wahrscheinlichkeitsdichte der bereits mit einem Rauschen überlagerten Voraussage vor der neuen Messung, so dass sie auch in der Form $p(X_t|Z_{t-1})$ angegeben werden kann.

Beschreibung des Condensation-Algorithmus

Der Condensation-Algorithmus nähert die Wahrscheinlichkeitsdichte $p(X_t|Z_t)$ mit Hilfe von N Stützstellen $s_t^{(n)}$, $n = 1 \dots N$ oder so genannten Partikeln an. Dazu verteilen sich die Stützstellen im Initialisierungsschritt rein zufällig oder gegebenenfalls nach einer bekannten Startverteilung im Zustandsraum. Mit der ersten Messung erhalten alle Stützstellen $s_t^{(n)}$ Gewichtungsfaktoren $\pi_t^{(n)}$, $n = 1 \dots N$, die sich aus dem Wert der Wahrscheinlichkeitsdichte der Messung $p(Z_t|X_t = s_t^{(n)})$ berechnen:

$$\pi_t^{(n)} = \frac{p(Z_t|X_t = s_t^{(n)})}{\sum_{j=1}^N p(Z_t|X_t = s_t^{(j)})}. \quad (4.25)$$

Je größer die Wahrscheinlichkeit $p(Z_t|X_t = s_t^{(n)})$ ist, dass ein Partikel an der Stelle $s_t^{(n)}$ den gesuchten Zustand darstellt, umso größer ist $\pi_t^{(n)}$. Damit repräsentiert das Partikel $s_t^{(n)}$ einen möglichen Zustand im Zustandsraum, während $\pi_t^{(n)}$ die Wahrscheinlichkeit angibt, dass dieses Partikel dem gesuchten Zustand entspricht. Da $\sum_{k=1}^N \pi_t^{(k)} = 1$ gesichert ist, berechnet sich die Verteilungsfunktion des Zustands zu

$$c_t^{(n)} = \sum_{l=1}^n \pi_t^{(l)}. \quad (4.26)$$

Der erste Schritt des Condensation-Algorithmus verteilt die Partikel mit Hilfe der Verteilungsfunktion neu. Dabei fallen auf Stützstellen mit hohem Gewicht viele Partikel, während auf Stützstellen mit geringem Gewicht eventuell gar keine Partikel fallen. Der zweite Schritt sagt, der Modellannahme des dynamischen Prozesses entsprechend, den nachfolgenden Zustand der neu verteilten Partikel voraus. Da die Voraussage deterministisch ist, bewegen sich Partikel, die auf derselben Stützstelle sind, auch in dieselbe Richtung. Durch die anschließende stochastische Streuung der Partikel, die den Modellfehler berücksichtigt, diffundieren auch Partikel auf denselben Stützstellen voneinander. Der dritte und letzte Schritt bezieht neue Messdaten in die Berechnung mit ein und bestimmt die neuen Gewichtungsfaktoren, die eine neue Verteilungsfunktion bilden. Diese drei Schritte wiederholen sich und verfolgen auf diese Weise die Annäherung der Wahrscheinlichkeitsdichte $p(X_t|Z_t)$ durch die Partikel mit den Wertepaaren $s_t^{(n)}$ und $\pi_t^{(n)}$.

Vorteil des Condensation-Algorithmus ist neben der Verteilungsfreiheit seine Fähigkeit, durch die Ausprägung unabhängiger Partikelanhäufungen mehrere Ziele zu verfolgen. Ergibt die Messung verschiedene mögliche Zustände, so entstehen entsprechend viele Häufungszentren, die der Algorithmus weiterverfolgt, bis die Messung eindeutig ist.

Nachteil des Partikel-Filters ist der große Bedarf an Speicher- und Rechenkapazität, da er für jeden Partikel den Zustand und die Wahrscheinlichkeit speichern muss und der Filter umso leistungsfähiger ist, je mehr Partikel zur Verfügung stehen. Je nach Anwendung sieht der Filter zwischen 100 und 1000 Partikel für die Abschätzung eines Zustands vor, so dass die Rechenzeit zur Berechnung der Voraussagen, der Abstände, der Wahrscheinlichkeiten und der neuen Dichtefunktion relativ viel Zeit in Anspruch nimmt.

Anwendung des Condensation-Algorithmus zur Ermittlung der Stützpunkte auf der Fahrbahn

Die hier entwickelte Fahrbahnerkennung kann den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen zeitlichen Kalman-Filter durch einen Partikel-Condensation-Filter mit etwa 400 Partikeln pro Suchzeile ersetzen. Die Anzahl der Partikel richtet sich nach der Anzahl der Bildpunkte innerhalb der Suchzeile. Der Filter arbeitet in oben beschriebener Weise und positioniert zuerst die Partikel in gleichen Abständen auf der Suchzeile, da sich die Fahrbahnkante innerhalb dieser befinden sollte und vorab keine Startverteilung bekannt ist. Nach der ersten Messung gewichtet der Partikel-Filter alle Partikel mit Hilfe des gemessenen Helligkeitsgradienten $W_t^{(n)}$ an ihrem Aufenthaltsort.

Die Wahrscheinlichkeit $\pi_t^{(n)}$, dass das Partikel n die gesuchte Kante repräsentiert, ist

$$\pi_t^{(n)} = \frac{W_t^{(n)}}{\sum_{i=1}^N W_t^{(i)}}, \quad (4.27)$$

wobei N die Anzahl aller Partikel ist. Die Verteilungsfunktion $c_t^{(n)}$ verteilt die Partikel neu über der Suchzeile. Die Modellannahme für die Bewegung der Partikel geht davon aus, dass sich die gesuchte Kante nicht bewegt. Diese Vereinfachung gleicht eine normalverteilte Streuung mit einem verschwindenden Mittelwert und einer größeren Varianz als notwendig aus. Bild 4.10 stellt den Vorgang für eine Suchzeile graphisch dar.

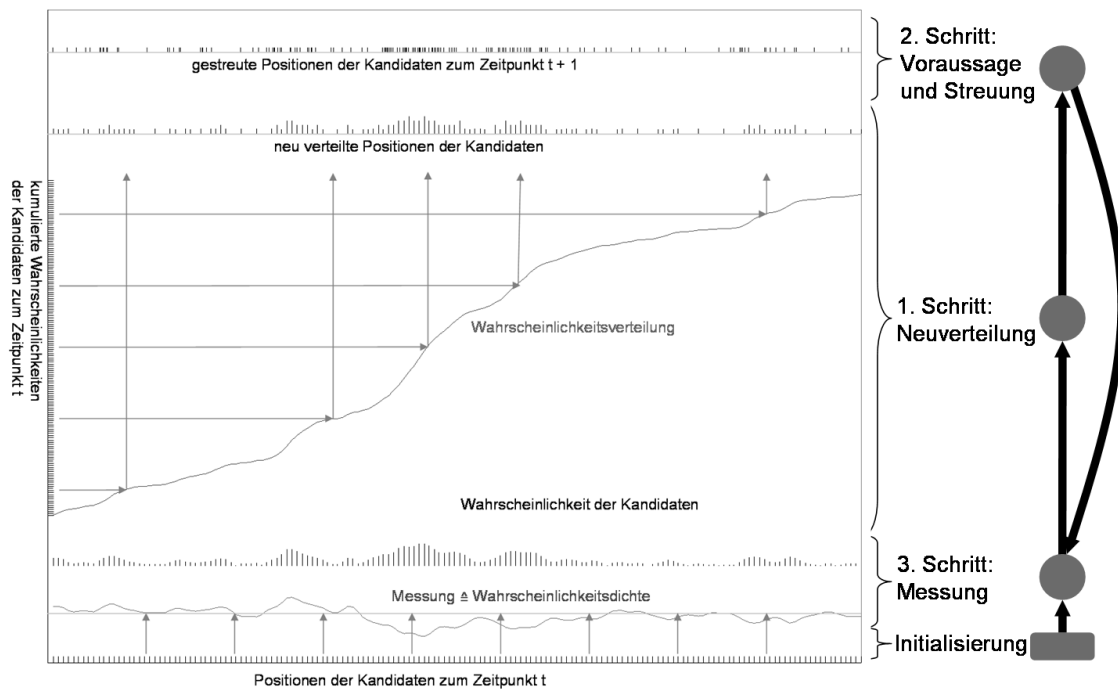


Bild 4.10 : Partikel-Condensation-Filter auf einer Suchzeile

Als Position der gesuchten Kante kann beispielsweise die Position mit den meisten Partikeln, die mittlere Position aller Partikel oder das Mittel der Positionen mit der größten Anzahl an Partikeln dienen.

Die folgenden Abschnitte erläutern Testverfahren zur Bewertung der durch die Filter und deren Kombinationen ermittelten Stützpunkte und vergleichen dabei auch den Partikel-Condensation-Filter mit dem zeitlichen Kalman-Filter.

4.2.5 Objektive Bewertung der ermittelten Stützpunkte

Um eine Bewertung der Ansätze vornehmen zu können, müssen die Filterkombinationen ihre Leistungsfähigkeit unter verschiedenen Bedingungen beweisen. Dieser Abschnitt stellt die dazu durchgeführten Tests und die Testbedingungen vor.

Synthetisch erzeugte Fahrbahnen ermöglichen eine objektive und messbare Bewertung der Filter. Hierzu entwickelte die vorliegende Arbeit Funktionen, die künstliche Fahrbahnen nach dem Klothoidenmodell erstellen. Der Vorteil von künstlichen Bildern ist, dass die Fahrbahnen mit ihrer Breite und Krümmung genau bekannt und beeinflussbar sind, der Test immer wieder reproduzierbar ist und echte Fehldetektionen das Ergebnis nicht verfälschen können. Auf diese Weise ermöglichen die Testfunktionen eine automatisierte Berechnung der Erkennungsqualität der Stützpunkte.

Die Testfunktion zur Erstellung der Fahrbahn berechnet in Abhängigkeit der möglichen Fahrbahnradien, der Ablage des Fahrzeugs vom Straßenrand und der virtuellen Geschwindigkeit des Fahrzeugs den Verlauf der Fahrbahnänder nach dem Klothoidenmodell und erstellt Bilder des Fahrbahnverlaufes aus der Perspektive der Kamera in entsprechender Einbauhöhe im Fahrzeug. Die erzeugte synthetische Bildfolge stellt eine 43 Sekunden lange Fahrt dar, die an einer geraden Strecke beginnt, in eine Rechtskurve mit einem Radius von 800 m übergeht, anschließend in eine Linkskurve mit 800 m übergeht und dann wieder in einer geraden Strecke endet. Die Stützpunkte auf der synthetischen Kurve werden nach einer Normalverteilung mit verschwindendem Mittelwert und einstellbarer Varianz gestreut, bevor der Algorithmus sie detektiert (Bild 4.11).



Bild 4.11 : Momentaufnahme der Stützpunkte einer synthetischen Kurve

Ziel der verschiedenen Filter ist es, die künstlich gestreuten Stützpunkte so nah wie möglich an die vor der Streuung berechnete Klothoide anzuschmiegen. Bild 4.12 gibt einen Überblick über die getesteten Filter.

Bild 4.13 zeigt das quadratische Mittel der synthetisch gestreuten und der gefilterten Stützpunkte, die der Algorithmus nach der Anwendung des zeitlichen Kalman-Filters ermitteln konnte. Die Graphik stellt den Fall $\sigma_q = 0$ und $\sigma_r = 0, \sigma_r = 2, \sigma_r = 10$ und $\sigma_r = 20$ bei einer Streuung der Stützpunkte von 10 Bildpunkten dar. Aus diesen Parametern ergeben die Kalman-Faktoren bei der n -ten Schrittfolge

$$k_{1,n} = \frac{1}{n+1} \quad (4.28)$$

und

$$k_{2,n} = 0 \quad (4.29)$$

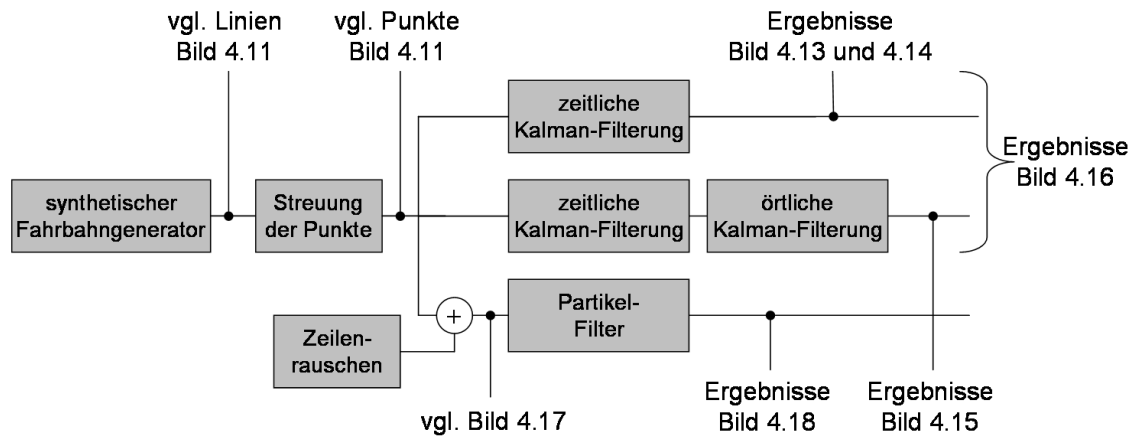


Bild 4.12 : Überblick über die getesteten Filter

bei

$$\hat{S}_n = \begin{pmatrix} \sigma_r^2 / (n + 1) & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \tag{4.30}$$

$\sigma_q = 0$ erzwingt demnach Kalman-Faktoren, die unabhängig von den Rauschparametern sind und in vordefinierter Weise abklingen. Aus diesem Grund liegen die Kurven für $\sigma_r = 2$, $\sigma_r = 10$ und $\sigma_r = 20$ genau übereinander. Für den Fall $\sigma_r = 0$, verschwindet auch der Kalman-Faktor $k_{1,n}$, so dass die Messung der Stützpunkte keinen Einfluss mehr auf die Berechnung der wahrscheinlichsten Positionen der Stützpunkte hat und der Kalman-Filter nur noch die vorausgesagten Positionen ausgibt. Dies führt wiederum dazu, dass die Voraussagen immer konstant bleiben, die Stützpunkte sich nicht mehr bewegen und immer an derselben Stelle bleiben. Aus diesem Grund sind in Bild 4.13 die Krümmungen der synthetischen Kurve deutlich zu erkennen, da das mittlere Abstandsquadrat der Stützpunkte zuerst steigt, während die synthetische Kurve in eine Rechtskurve übergeht und wieder fällt, wenn sie in eine Gerade zurückläuft.

Bild 4.14 zeigt die mittleren Abstandsquadrate nach der Filterung mit dem zeitlichen Kalman-Filter mit verschiedenen $\sigma_q \neq 0$ und $\sigma_r \neq 0$ und verdeutlicht, wie der zeitliche Kalman-Filter auch in Kurvenfahrten die Abweichung deutlich verringern kann.

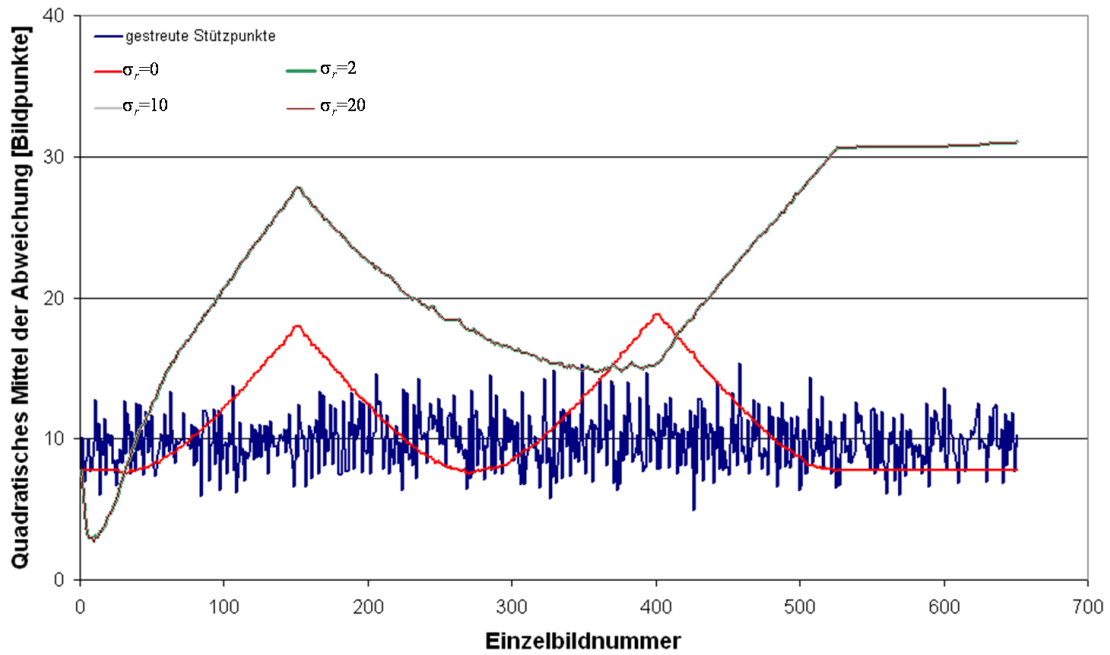


Bild 4.13 : Quadratisches Mittel vor und nach zeitlicher Kalman-Filterung mit $\sigma_q = 0$

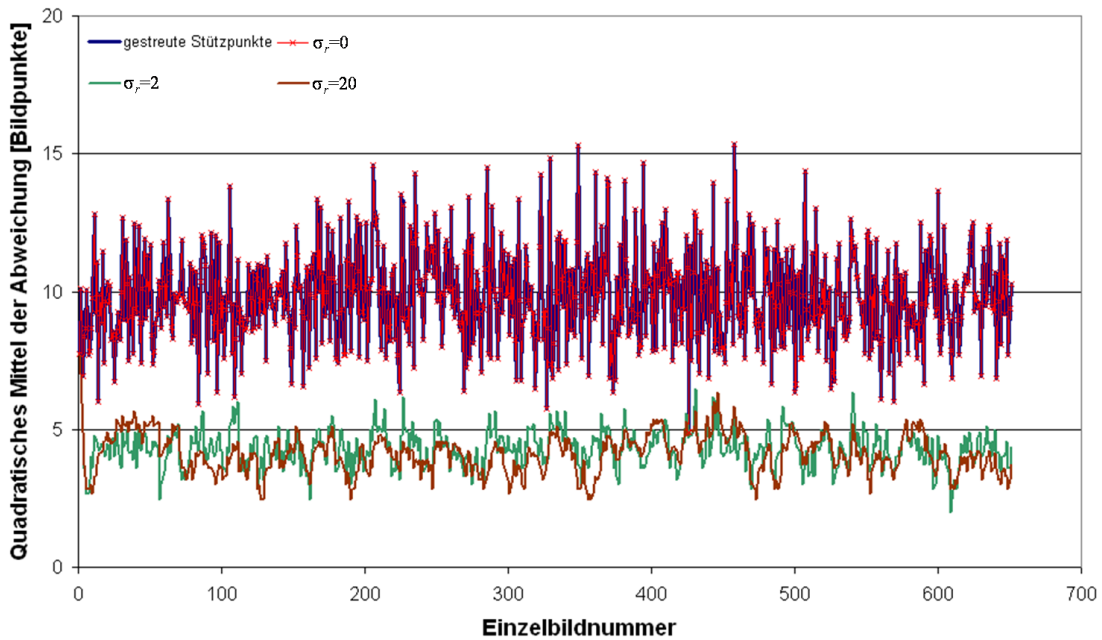


Bild 4.14 : Quadratisches Mittel vor und nach zeitlicher Kalman-Filterung

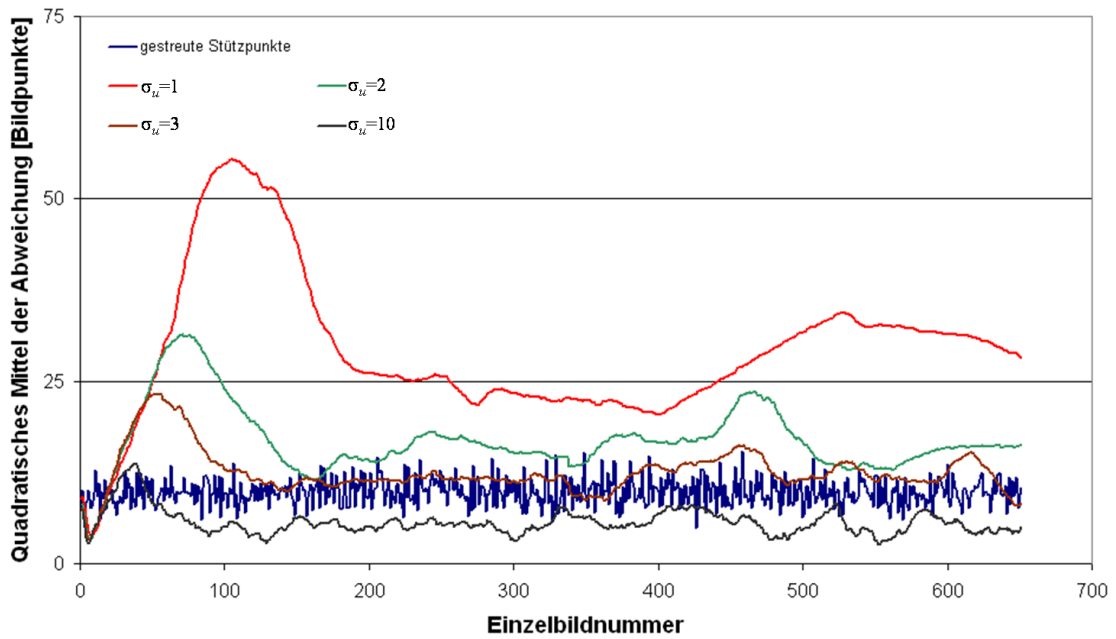


Bild 4.15 : Quadratisches Mittel nach zeitlicher und örtlicher Kalman-Filterung

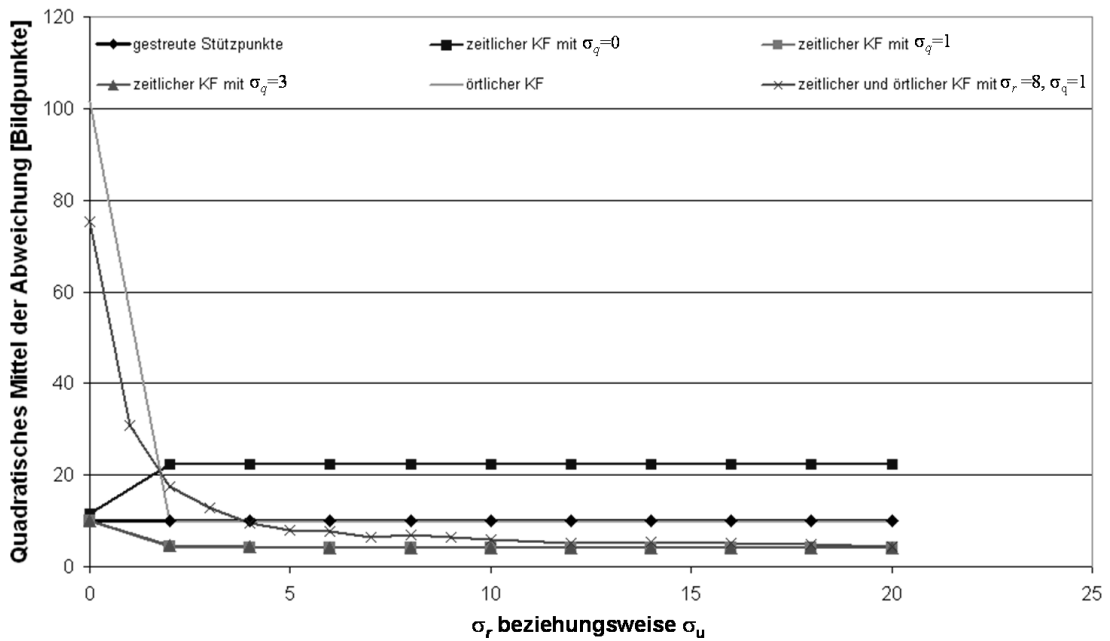


Bild 4.16 : Quadratisches Mittel nach Kalman-Filterung

Bild 4.15 zeigt, dass der örtliche Kalman-Filter das Ergebnis der zeitlichen Kalman-Filterung verschlechtert, wenn er nach der zeitlichen Korrektur eine örtliche Filterung der Stützpunkte zueinander vornimmt. Der subjektive Test wird zeigen, dass die Begrädigung des gefilterten Streckenverlaufs zwar optisch ansprechender ist, weil ein gezackter Verlauf störend und unnatürlich wirkt, jedoch die mittleren Abstandsquadrate anhebt, da die Anpassung der Punkte zueinander in vielen Fällen auch eine Entfernung von der ursprünglichen Kurve bedeutet. Je geringer der Einfluss der örtlichen Filterung ist, desto geringere Abweichungen ergeben sich. Bild 4.16 fasst die Ergebnisse der verschiedenen Kalman-Filter zusammen.

Die Filterung mit dem Partikel-Filter ist bei dieser synthetisch erzeugten Kurve nicht aussagekräftig, da der Stützpunkt durch die Streuung ständig springt, die Messung jedoch immer eindeutig ist und die oben genannten Vorteile des Partikel-Filters nicht zur Geltung kommen. Für die objektive Bewertung des Partikel-Filters überlagerte der Test die synthetische Kurve mit einem zufälligen Kantenverlauf auf der entsprechenden Zeile. Auf diese Weise stehen dem Filter, wie in Bild 4.17 angedeutet, viele Messwerte zur Verfügung, wobei die Stützpunkte der synthetischen Kurve immer die größten Kantensprünge in der Suchzeile erzeugten. Bild 4.18 zeigt die mittleren Abstandsquadrate zur synthetischen Kurve bei unterschiedlicher Anzahl der verwendeten Partikel.



Bild 4.17 : Synthetische Stützpunkte mit zufälligen Suchzeilen

Die Darstellung zeigt, dass der Partikel-Filter selbst bei stark ausgeprägten Kanten im synthetischen Bild Ausreißerwerte verursacht und damit die Abweichung von der zu ermittelnden Kurve anhebt. Der Grund hierfür liegt in der Unterabtastung der Messwerte auf der Suchzeile: Bei einer geringen Anzahl an Partikeln kann sich die gesuchte Kante auf der Suchzeile an einer Stelle befinden, auf die kein Partikel fällt, so dass die Partikel an der nächstgrößten Kante kondensieren. Je größer die Anzahl der Partikel ist, umso seltener tritt dieser Fall auf, da die Wahrscheinlichkeit für die Unterabtastung sinkt. Bei großen Partikelanzahlen tritt derselbe Effekt auf, wenn der letzte Kondensationsschritt viele Partikel auf eine Position auf der Suchzeile zieht, der nächste Stützpunkt aber genau auf ein durch den vorherigen Kondensationsschritt erzeugtes Partikelloch fällt. Dieser

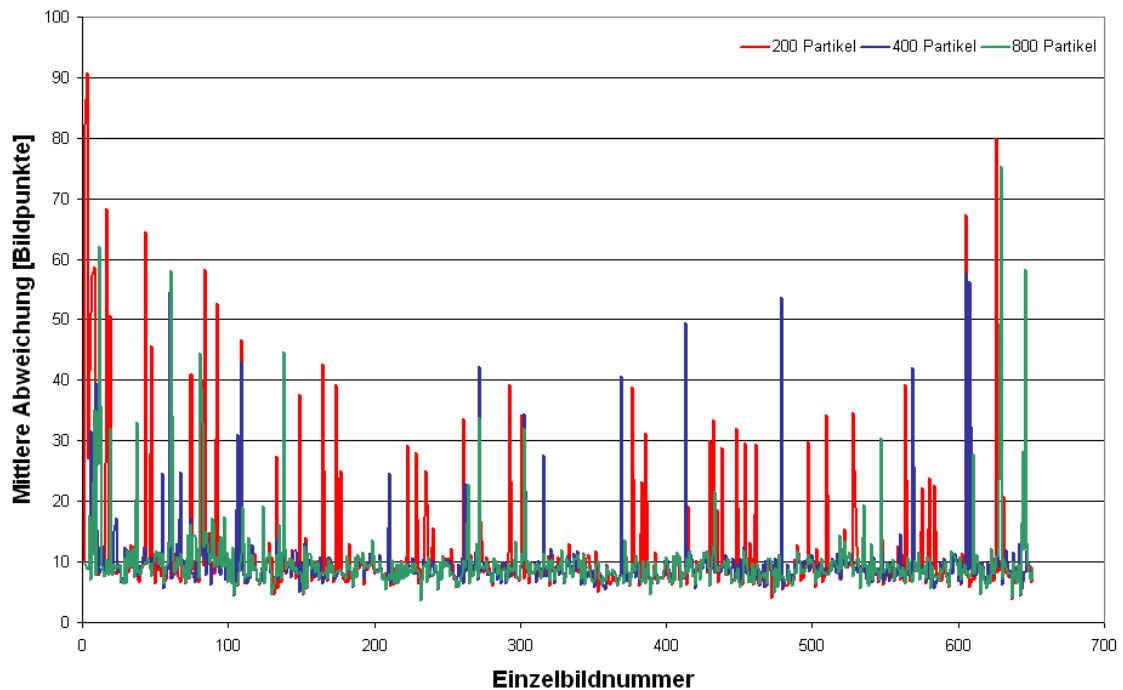


Bild 4.18 : Partikel-Condensation-Filter mit unterschiedlicher Anzahl an Partikeln

Effekt reduziert sich, wenn die Berechnung der Partikelwahrscheinlichkeiten neben dem Gradienten an der Position des Partikels auch den Abstand zur letzten ermittelten Kantenposition einbezieht. ISARD schlägt die Erweiterung des Condensation-Algorithmus um eine Korrekturfunktion vor, die Informationen darüber enthält, an welchen Stellen sich wichtige Zustände befinden, und eine Unterabtastung an diesen Stellen vermeidet [Isa98]. Die Informationen der Korrekturfunktion können beispielsweise aus einer anderen Messung der Kante stammen, die in dieser Arbeit jedoch nicht umgesetzt ist.

Selbst wenn die Bestimmung der mittleren Abstandsquadrate Ausreißer ignoriert, kann der in dieser Arbeit umgesetzte Partikel-Filter die Stützpunkte nur mit einer mittleren Abweichung von etwa acht Bildpunkten an die ursprüngliche Kurve anschmiegen, während der zeitliche Kalman-Filter eine mittlere Abweichung von etwa vier Bildpunkten erreicht. Ein weiterer Nachteil des Partikel-Filters ist der erhöhte Speicher- und Ressourcenbedarf im Vergleich zum Kalman-Filter, der zusätzlich zu den Koordinaten der Stützpunkte ihre Geschwindigkeiten und die vier Einträge der Kovarianzmatrizen speichern muss. Der Partikel-Filter hingegen muss für jeden Stützpunkt eine große Anzahl an Partikelpositionen speichern und das Gewicht der Partikel, die Wahrscheinlichkeitsverteilung, die Neuverteilung der Partikel und die neue Streuung der Partikel berechnen. Tabelle 4.1 vergleicht den Speicher- und Rechenaufwand zwischen dem Kalman-Filter und dem Partikel-Filter mit verschiedenen Partikelanzahlen.

	Kalman-Filter	Condensation	Condensation	Condensation
Anzahl Partikel pro Stützpunkt	-	200	400	800
Speicherbedarf pro Stützpunkt	Geschwindigkeit: 1x Integer Kovarianz: 4x Float	Partikel: 200 x Integer	Partikel: 400 x Integer	Partikel: 800 x Integer
Rechenzeit pro Stützpunkt	1 μ s	230 μ s	500 μ s	970 μ s

Tabelle 4.1: Speicher- und Ressourcenbedarf beim Kalman- und Partikel-Filter

Insgesamt kann der zeitliche Kalman-Filter bei synthetischen Kurven mit künstlich normalverteilten Stützpunkten den Verlauf der Kurve am besten rekonstruieren. Um aber auch eine Aussage für echte Kurven in einem Wärmebild zu erhalten, vergleicht ein subjektiver Test die optische Bewertung der Fahrbahnhervorhebung.

4.2.6 Subjektive Bewertung der ermittelten Stützpunkte

Für die subjektive Bewertung der Fahrbahnhervorhebung betrachteten verschiedene Probanden die Ergebnisse der unterschiedlichen Filter und bewerteten Bild für Bild, ob die Fahrbahnerkennung ihrer Meinung nach für das gerade aktuelle Bild erfolgreich war. Die Kriterien für eine erfolgreiche Erkennung der Fahrbahn waren, dass die künstlich eingezeichnete Linie deckungsgleich mit dem echten, im Bild vorhandenen Fahrbahnrand ist und dabei weder einzelne oder mehrere Punkte des künstlichen Fahrbahnrandes von dem echten abweichen, noch ein Versatz zwischen erkanntem und echtem Fahrbahnrand besteht. Sechs Probanden dokumentierten ihre Antwort, die nur aus "Fahrbahnrand erkannt" oder "Fahrbahnrand nicht erkannt" ohne weitere Abstufungen bestand, für jedes Bild per Tastendruck und gaben damit erst das nächste Bild frei. Auf diese Weise entstanden für eine Videosequenz verschiedene Bewertungen, die Aussagen über die subjektiv empfundene Erkennungsrate geben. Bild 4.19 zeigt beispielhaft die Bewertung eines Probanden.

Nach Bild 4.19 und Tabelle 4.2 ist die Erkennungsrate bei der Kombination aus zeitlichem und örtlichem Kalman-Filter am größten. Diese Tatsache spiegelt sich in der geringen Anzahl an notwendigen Neuinitialisierungen wider, was im Widerspruch zum Ergebnis aus den objektiven Tests steht. Der Grund liegt in der optischen Bewertung durch die Probanden: Während der objektive Test tatsächlich nur die mittleren Abweichungen nach der Filterung vergleicht, bewerten die Probanden den optischen Eindruck, den sie von der Erkennung der Fahrbahn haben. So reagieren die Probanden viel empfindlicher auf gezackte Kurvenverläufe, wie sie bei der Filterung mit dem zeitlichen Kalman-Filter alleine entstehen, obwohl diese rechnerisch genauer sind.

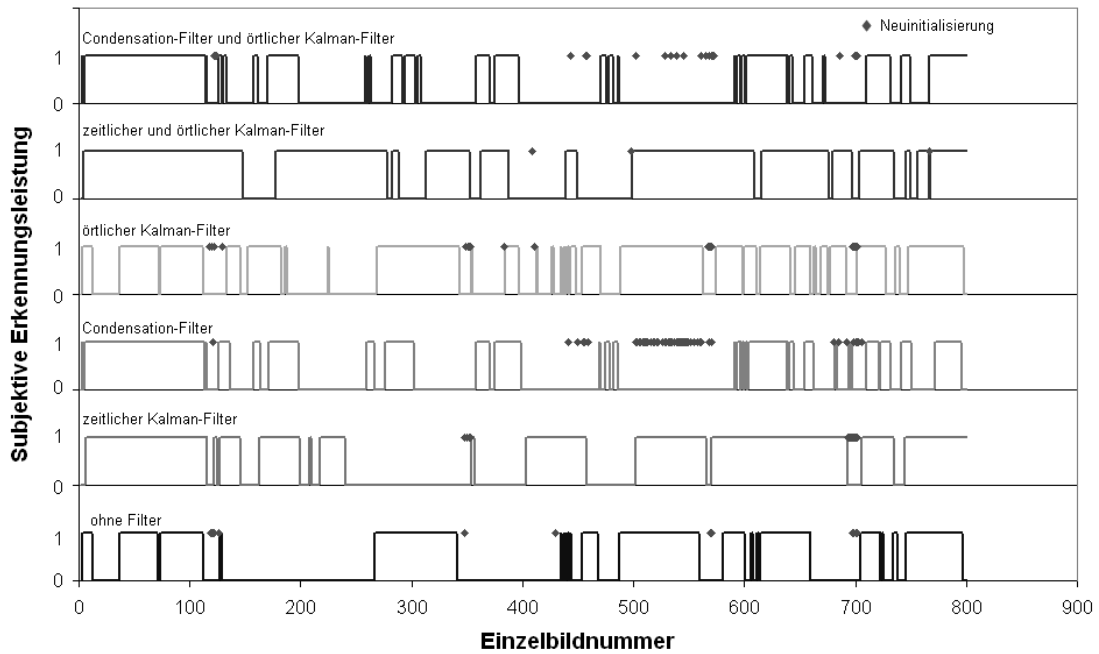


Bild 4.19 : Subjektiver Vergleich der unterschiedlichen Filter

	ohne Filter	zeitlicher Kalman-Filter	Particle-Condensation-Filter	örtlicher Kalman-Filter	zeitlicher und örtlicher Kalman-Filter	Condensation-Filter und örtlicher Kalman-Filter
Mittlere subjektive Erkennungsrate	49,5%	65,5%	43,6%	62,9%	74,4%	42,9%
Im Mittel notwendige Initialisierungen	13	13	56	19	3	21

Tabelle 4.2: Vergleich der subjektiv empfundenen Erkennungsraten und der notwendigen Initialisierungen bei verschiedenen Filterkombinationen

4.2.7 Ermittlung des Fahrbahnverlaufs

Direkte Verbindung der Stützpunkte

Da nun die genaueste Filterkombination zur Erfassung der Stützpunkte bekannt ist, kann die Fahrbahnerkennung verschiedene Ansätze anwenden, um aus den Stützpunkten den Fahrbahnverlauf zu ermitteln. Die einfachste Methode, einen Fahrbahnverlauf zu generieren, ist die direkte Verbindung der benachbarten Stützpunkte zu einem Polygonzug. Bei dieser Annäherung an die Fahrbahnränder reagiert das menschliche Auge empfindlich auf

sprunghafte Richtungsänderungen zwischen den Verbindungen der einzelnen Punkte, insbesondere wenn nur der zeitliche Kalman-Filter die Korrektur der Stützpunkte vornimmt. Obwohl der vorhergehende Abschnitt gezeigt hat, dass der zeitliche Kalman-Filter ohne den örtlichen Kalman-Filter die größte Genauigkeit aufweist, empfindet der menschliche Betrachter die Kombination aus beiden Filtern als genauer. Während der zeitliche Kalman-Filter zwar die Positionen der Stützpunkte optimiert, kann er auf Grund ihrer Unabhängigkeit voneinander den Versatz der einzelnen Stützpunkte zueinander nicht berücksichtigen. Ein gleichmäßiger Verlauf der Kurve scheint für den Betrachter jedoch wichtiger zu sein als die Nähe der hervorgehobenen Kante zur Kurve im Bild. So muss der Algorithmus bei der polygonalen Verbindung der Stützpunkte die objektiv schlechtere Methode anwenden, um ein für den Betrachter besseres Ergebnis zu liefern.

Annäherung des Straßenverlaufs durch Regressionskurven

Modellbasierte Ansätze gewichten die Position der einzelnen Stützpunkte zueinander stärker als es der örtliche Kalman-Filter kann. Der erste in dieser Arbeit verfolgte Ansatz ist die Berechnung einer Regressionskurve auf Basis der Stützpunkte.

Eine Regressionskurve versucht, sich optimal an die Wertepaare $P_i(x_i/y_i)$, $i = 1, \dots, m$ anzunähern. Die Lineare Regression setzt hierzu eine Funktion $G(x)$ an, die aus der Linearkombination von beliebigen Funktionen $g_j(x)$ besteht [BSMM97]:

$$G(x) = a_n \cdot g_n(x) + a_{n-1} \cdot g_{n-1}(x) + \dots + a_0 \cdot g_0(x) = \sum_{j=0}^n a_j \cdot g_j(x). \quad (4.31)$$

Nach der Gaußschen Methode der kleinsten Fehlerquadrate soll die Funktion $G(x)$ von allen Punkten P_i einen minimalen Abstand $G(x_i) - y_i$ haben. Die Summe der Fehlerquadrate ist abhängig von den Linearfaktoren a_j und berechnet sich aus

$$\sigma^2 = S(a_n, \dots, a_0) = \sum_{i=1}^m (G(x_i) - y_i)^2. \quad (4.32)$$

σ^2 ist an den Nullstellen der Ableitungen der Fehlersumme S nach a_j minimal, so dass

$$\frac{\partial S}{\partial a_n} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial a_{n-1}} = 0, \quad \dots \quad \frac{\partial S}{\partial a_0} = 0 \quad (4.33)$$

gefordert ist. Die Ableitung der Fehlersumme nach einem Linearfaktor

$$\frac{\partial S}{\partial a_j} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial ((G(x_i) - y_i)^2)}{\partial a_j} \quad (4.34)$$

$$= 2 \cdot \sum_{i=1}^m (G(x_i) - y_i) \cdot g_j(x_i) = 0 \quad (4.35)$$

und dessen Nullsetzung ergibt nach der Umformung

$$\sum_{i=1}^m G(x_i) \cdot g_j(x_i) = \sum_{i=1}^m y_i \cdot g_j(x_i). \quad (4.36)$$

$G(x_i)$ in letzte Gleichung eingesetzt ergibt

$$\sum_{i=1}^m (a_n \cdot g_n(x_i) + a_{n-1} \cdot g_{n-1}(x_i) + \dots + a_0 \cdot g_0(x_i)) \cdot g_j(x_i) = \sum_{i=1}^m y_i \cdot g_j(x_i) \quad (4.37)$$

beziehungsweise

$$\begin{aligned} a_n \cdot \sum_{i=1}^m g_n(x_i) \cdot g_j(x_i) + a_{n-1} \cdot \sum_{i=1}^m g_{n-1}(x_i) \cdot g_j(x_i) + \dots \\ \dots + a_0 \cdot \sum_{i=1}^m g_0(x_i) \cdot g_j(x_i) = \sum_{i=1}^m y_i \cdot g_j(x_i). \end{aligned} \quad (4.38)$$

Durch Einsetzen aller Wertepaare $P_i(x_i/y_i)$ entsteht das lineare Gleichungssystem

$$P \cdot \vec{a} = \vec{b}, \quad (4.39)$$

beziehungsweise mit

$$p_{k,l} = \sum_{i=1}^m g_k(x_i) \cdot g_l(x_i) \quad (4.40)$$

und

$$b_n = \sum_{i=1}^m y_i \cdot g_n(x_i) \quad (4.41)$$

in der Form

$$\begin{pmatrix} p_{n,n} & p_{n-1,n} & \dots & p_{0,n} \\ p_{n,n-1} & p_{n-1,n-1} & \dots & p_{0,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n,0} & p_{n-1,0} & \dots & p_{0,0} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_n \\ a_{n-1} \\ \vdots \\ a_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_n \\ b_{n-1} \\ \vdots \\ b_0 \end{pmatrix}. \quad (4.42)$$

Sofern P eine invertierbare Matrix ist, ist die Lösung des linearen Gleichungssystems

$$\vec{a} = P^{-1} \cdot \vec{b}. \quad (4.43)$$

Für die Annäherung an die Fahrbahnränder verwendet der Algorithmus dieser Arbeit Polynome dritter Ordnung, so dass $g_j(x) = x^j$ für $j = 0, \dots, 3$ und

$$G(x) = a_3 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a_0 \quad (4.44)$$

ist. JESSEN beschreibt, wie die Regressionsrechnung aus den Stützpunkten die Linearfaktoren a_n mit Hilfe des Gaußschen Eliminationsverfahrens ermittelt [Jes05].

Die Regressionsrechnung berücksichtigt bei der Ermittlung der Kurve die Lage aller Stützpunkte zueinander, während der örtliche Kalman-Filter hauptsächlich die Lage benachbarter Punkte einbezieht und die Lage der anderen Stützpunkte nur indirekt und mit wenig Gewicht berücksichtigen kann. Dadurch repräsentiert die Regressionskurve den Fahrbahnverlauf besser als die direkte Verbindung der Stützpunkte.

Beschreibung der Fahrbahn durch Klothoiden

Eine noch bessere Übereinstimmung zwischen vorhandenen und hervorgehobenen Fahrbahnrandern verspricht die Anwendung des Klothoidenmodells, das ebenfalls über eine Regressionsrechnung die Lage aller Stützpunkte berücksichtigt, aber zusätzlich den echten Verlauf der Straße besser wiedergibt. Ein Regressionspolynom kann aus den vorhandenen Stützpunkten alle erdenklichen Fahrbahnverläufe ermitteln, da sie als Parabel dritter Ordnung viele Freiheitsgrade hat. Nur die Stützpunkte zwingen die Regressionskurve in den richtigen Verlauf, so dass die Regressionsrechnung Kurven erzeugt, die den Fahrbahnverlauf nicht gut genug wiedergeben können, sobald die Qualität der Stützpunkte sinkt und sie sich im Bild nicht mehr dicht am Fahrbahnverlauf befinden.

Die Straßenbaurichtlinien schreiben für den Übergang zwischen zwei Kurven mit unterschiedlichen Radien eine konstante Krümmungsänderung vor, so dass Autofahrer bei der Einfahrt in eine Kurve dieser mit einer konstanten Lenkgeschwindigkeit folgen können und nicht ruckartig das Lenkrad auf die für den Kurvenradius notwendigen Winkel stellen müssen. Die Straße muss eine Anfangskrümmung c_0 und eine konstante Krümmungsänderung c_1 aufweisen und verhält sich aus diesem Grund immer wie eine Klothoide. Damit ist das mathematische Modell der Straße

$$c(l) = c_0 + c_1 \cdot l, \quad (4.45)$$

wobei c die Krümmung der Straße in einer Distanz l beschreibt. Nach obiger Definition ist ein gerader Streckenabschnitt durch eine Anfangskrümmung von $c_0 = 0$ und eine Krümmungsänderung $c_1 = 0$ abgedeckt. Bild 4.20 zeigt eine Klothoide in einem kartesischen Koordinatensystem [BSMM97].

Die Bewegung eines Fahrzeugs auf einer Klothoide der Länge L führt zu einer Änderung der Fahrtrichtung um den Winkel $\Delta\chi$ und eine laterale Abweichung von der ursprünglichen Position um ΔX in einer Entfernung ΔZ , so dass

$$\Delta\chi(L) = \int_0^L c(l) \cdot dl = c_0 \cdot L + c_1 \frac{L^2}{2} \quad (4.46)$$

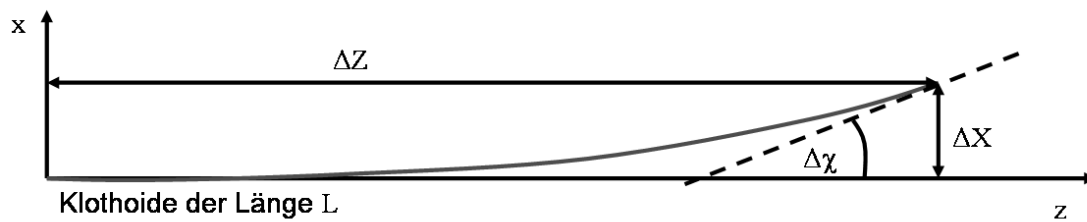


Bild 4.20 : Klothoide im kartesischen Koordinatensystem

gilt [Beh97]. Damit gilt für die Position des Fahrzeugs nach dem Kurvenbogen der Länge L für $\Delta\chi \ll 1$ im kartesischen Koordinatensystem annähernd

$$\Delta X(L) = \int_0^L \cos \Delta\chi(l) dl \approx L \quad (4.47)$$

und

$$\Delta Z(L) = \int_0^L \sin \Delta\chi(l) dl \approx \frac{c_0}{2} L^2 + \frac{c_1}{6} L^3. \quad (4.48)$$

Auf Grund der quadratischen Terme in den trigonometrischen Funktionen sind die Integrale nicht trivial und führen auf Fresnel-Integrale, Bessel-Funktionen und die Gamma-Funktion. Die Annäherung ist für die Berechnung des Fahrbahnverlaufs im kartesischen Koordinatensystem des Fahrzeugs ausreichend.

Zur Umrechnung der Klothoiden-Koordinaten aus dem dreidimensionalen in das zweidimensionale Kamera-Koordinatensystem kommt das Lochkameramodell für eine Kamera mit Brennweite f zum Einsatz [Beh97, Die06]. Nach Bild 4.21 und dem Strahlensatz gilt für die Transformation von fahrzeugfesten Welt- in Kamerakoordinaten unter der Annahme einer geraden Ebene vor einer Kamera, deren optische Achse parallel zur Ebene verläuft

$$\begin{pmatrix} x_{\text{Kamera}} - b_{\text{Sensor}}/2 \\ y_{\text{Kamera}} - h_{\text{Sensor}}/2 \end{pmatrix} = -\frac{f}{z_{\text{Welt}}} \begin{pmatrix} k_x \cdot x_{\text{Welt}} \\ k_y \cdot y_{\text{Welt}} \end{pmatrix}. \quad (4.49)$$

x_{Kamera} und y_{Kamera} stellen dabei die Koordinaten im Kamera-Koordinatensystem in Bildpunkten dar, wobei b_{Sensor} und h_{Sensor} die Breite und Höhe des Kamersensors in Bildpunkten bezeichnen. f ist die Brennweite der Kamera, während k_x und k_y die zugehörigen Kamerafaktoren zur Umrechnung der Weltkoordinaten in Kamerakoordinaten sind und durch Kalibrierung ermittelt werden [Die06]. Für die Weltkoordinaten

$$\begin{pmatrix} x_{\text{Obj,Welt}} \\ y_{\text{Obj,Welt}} \end{pmatrix} \quad (4.50)$$

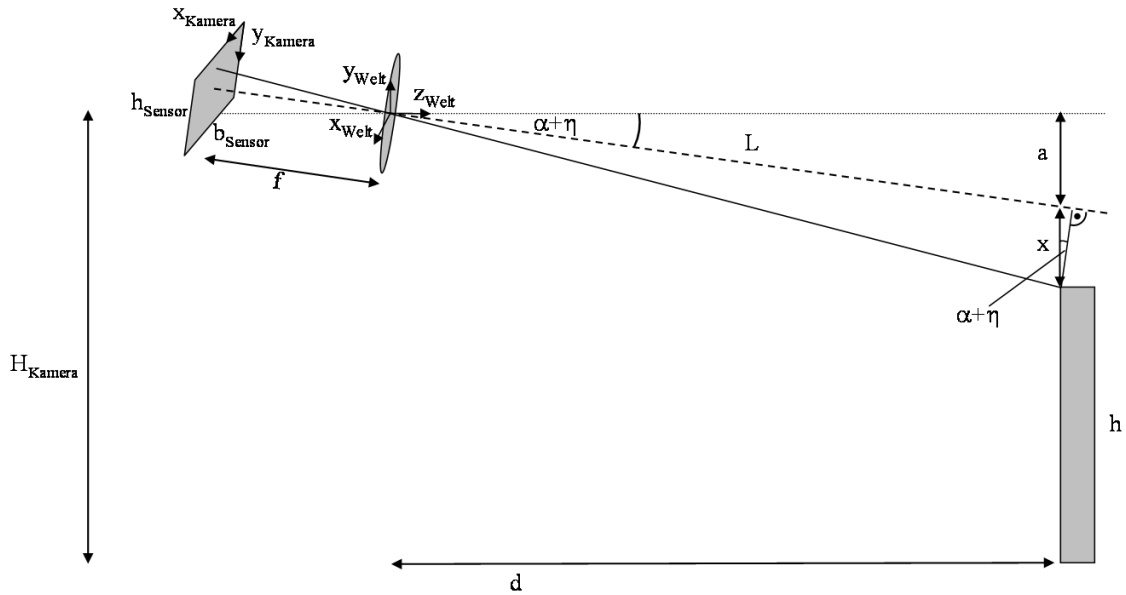


Bild 4.21 : Kameramodell und Koordinatentransformation

eines Objektes gilt unter Berücksichtigung der Neigung α und der Einbauhöhe H_{Kamera} der Kamera und dem Nickwinkel η des Fahrzeugs

$$x_{Obj,Welt} = -\frac{x_{Obj,Kamera} - b_{Sensor}/2}{k_x} \cdot \frac{z_{Obj,Welt}}{f} \quad (4.51)$$

$$y_{Obj,Welt} = -x - a = \frac{y_{Obj,Kamera} - h_{Sensor}/2}{k_y} \cdot \frac{z_{Obj,Welt}}{f} - \sin(\alpha + \eta) \cdot z_{Obj,Welt} \quad (4.52)$$

$$z_{Obj,Welt} = d = \cos(\alpha + \eta) \cdot L \approx L. \quad (4.53)$$

$z_{Obj,Welt}$ beziehungsweise L kann auf Grund der zweidimensionalen Abbildung der dreidimensionalen Welt nicht berechnet werden, solange die Höhe h des Objekts nicht bekannt ist. Bei der Berechnung der Entfernung auf Basis des Objektfußpunkts ist die Kenntnis der Objekthöhe nicht notwendig, da in einer Ebene für den Fußpunkt

$$y_{Obj,Welt} = -H_{Kamera} \quad (4.54)$$

und damit

$$z_{Obj,Welt} = \frac{k_y \cdot f \cdot y_{Obj,Welt}}{y_{Obj,Kamera} - k_y \cdot f \cdot \sin(\alpha + \eta)} \approx L \quad (4.55)$$

gilt. Die Bildzeile

$$y_{Obj,Kamera} = y_H = k_y \cdot f \cdot \sin(\alpha + \eta) \quad (4.56)$$

ist die Nullstelle des Nenners und gibt den Horizont im Bild an. Da $z_{Obj,Welt}$ hier gegen Unendlich strebt, sind Objekte auf dieser Zeile - wie vom Horizont zu erwarten - unendlich weit entfernt.

Die Koordinaten des rechten Fahrbahnrandes folgen unter Berücksichtigung des Fahrzeuggierwinkels der Gleichung (Bild 4.22)

$$x_{Welt} = a - \tan(\Psi) \cdot L + \frac{c_0}{2} \cdot L^2 + \frac{c_1}{3} \cdot L^3, \quad (4.57)$$

die des linken Fahrbahnrandes

$$x_{Welt} = a - b - \tan(\Psi) \cdot L + \frac{c_0}{2} \cdot L^2 + \frac{c_1}{3} \cdot L^3. \quad (4.58)$$

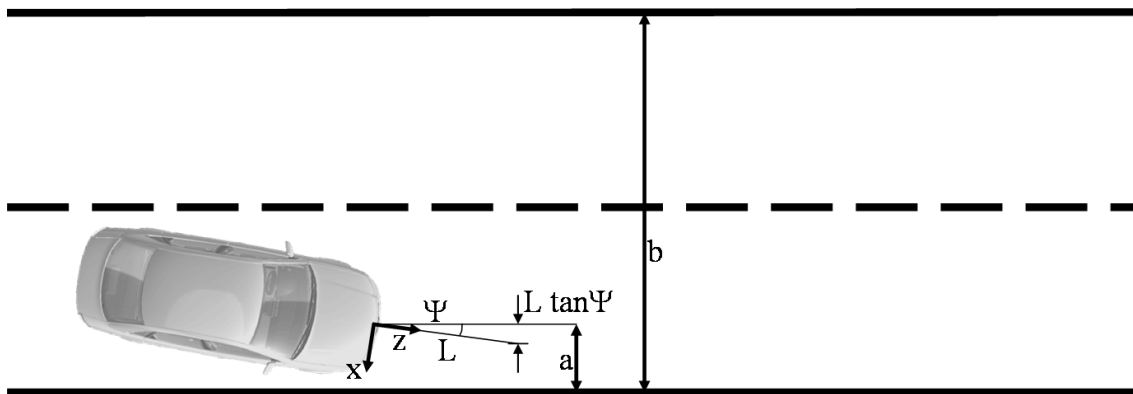


Bild 4.22 : Position eines Fahrzeugs in der Fahrbahn

Vergleich der Modelle

Bild 4.23 vergleicht die mittleren Abweichungen der Modelle nach Anwendung auf die synthetischen Kurven aus Abschnitt 4.2.5. Dabei bauen die Regressionskurve und die Klothoide nur auf den zeitlich gefilterten Stützpunkten und die direkte Verbindung auf den zeitlich und örtlich gefilterten Stützpunkten auf, da diese Filterkombination bei den subjektiven Vergleichen die besten Bewertungen erreichte.

Die Darstellung zeigt, dass das Klothoidenmodell mit einer mittleren Abweichung von etwa 2,5 Bildpunkten das beste Ergebnis erzielt, während die direkte Verbindung der Punkte entsprechend dem Ergebnis aus Abschnitt 4.2.5 eine Abweichung von 4 Bildpunkten und die Regressionsgerade von etwa 3,5 Bildpunkten erreicht. Um dieses Ergebnis zu

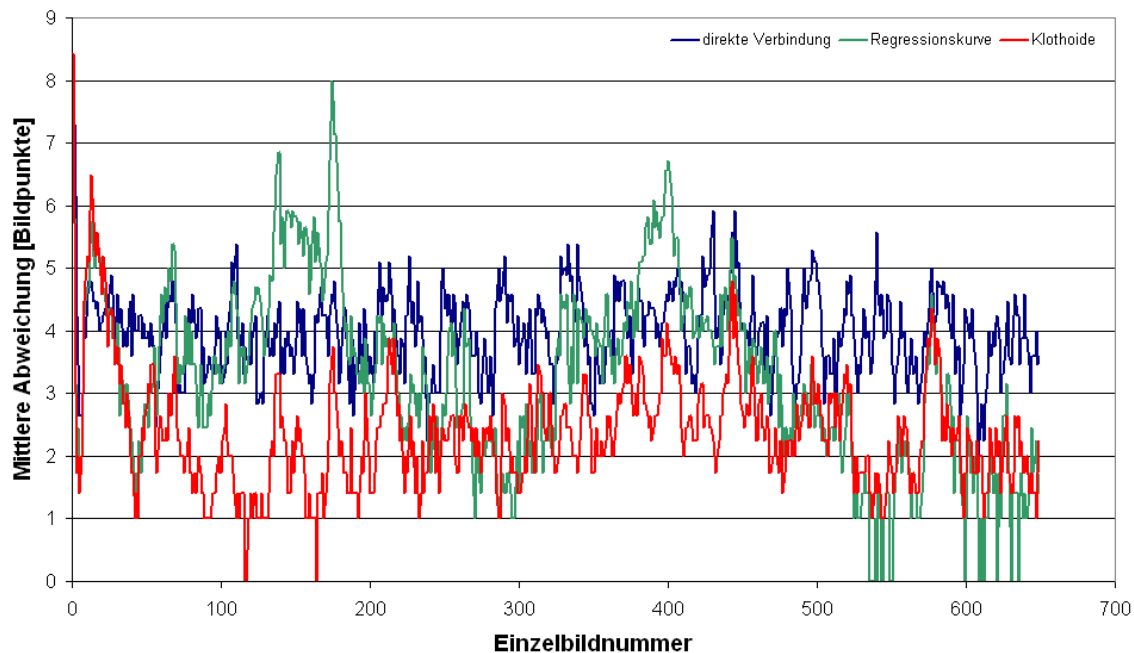


Bild 4.23 : Vergleich der mittleren Abweichungen der Fahrbahnmodelle

validieren, bewerteten sechs Versuchspersonen die unterschiedlichen Modelle bei der Anwendung auf derselben Videosequenz. Dabei bewerteten sie für alle Modelle sowohl jedes Einzelbild als auch die Gesamtsequenz, wobei die Bewertungskriterien den Anforderungen aus der subjektiven Bewertung der Stützpunkte entsprachen. Auf diese Weise entstanden für jede Testperson drei über die gesamte Laufzeit der Videosequenz reichende Bild-für-Bild-Bewertungen. Bild 4.24 zeigt beispielhaft die Bewertung einer Person.

Sowohl die Hervorhebung der Fahrbahnränder mit Hilfe von Regressionskurven als auch die Anzeige von Klothoiden konnte die subjektive Bewertung der Fahrbahnerkennung nochmals deutlich verbessern: Die Probanden gestanden der Modellierung der Fahrbahn-ränder durch die Regressionskurve eine Erkennungsrate von 82,4% und der Erkennung durch Klothoiden eine Rate von 91,4% zu, wobei beide Varianten auf eine Neuinitialisierung der Erkennung verzichten konnten.

Die Leistungsfähigkeit der Fahrbahnerkennung ist extrem wetterabhängig, da beispielsweise Regen und Schnee die Temperaturunterschiede zwischen Straße und Bebauung ausgleichen beziehungsweise als “Regenfilm” oder “Schneedecke” eine Oberfläche mit einheitlicher Temperatur erzeugen. Die Ermittlung der Stützpunkte ist jedoch auf den Kontrast zwischen Asphalt und Bebauung angewiesen, so dass Regen, Schnee und dichter Nebel zu weitaus geringeren Erkennungsraten führen.

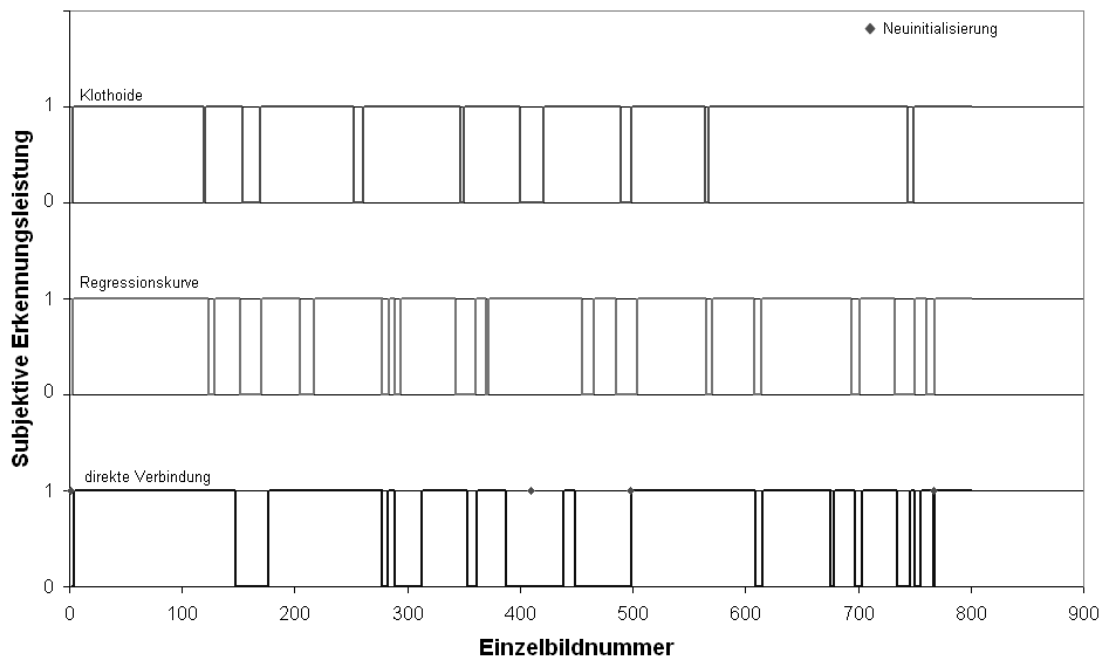


Bild 4.24 : Beispielhafte Bild-für-Bild-Bewertung der Fahrbahnmodelle einer Testperson

4.3 Objektextraktion

Abschnitt 4.2 hat einen Algorithmus zur Extraktion und Hervorhebung der Fahrbahn-ränder vorgestellt und brachte diese Arbeit der Darstellung des NightVision-Bildes nach Bild 4.2 ein Stück näher. Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Extraktion und Hervorhebung potenziell gefährlicher Objekte. Potenziell gefährlich sind alle Objekte, die mit dem Fahrzeug auf Kollisionskurs stehen und die der Fahrer im Abblendlicht nicht sehen kann. Hierbei kann es sich um Menschen, Tiere, andere Fahrzeuge sowie auf der Straße liegende Objekte aller Art handeln. Die Priorität bei der Auslegung der Objektextraktion liegt bei dieser Arbeit auf Menschen und Tieren, da Unfälle mit Lebewesen besonders schwer und tragisch sind und NightVision-Systeme gerade diese Art von Unfällen adressieren. Andere Fahrzeuge sind auf Grund ihrer Beleuchtung und ihrer Rückstrahler auch ohne NightVision-System sichtbar, sofern ihre Beleuchtung eingeschaltet ist.

Die aktuellen Entwicklungen zu NightVision-Systemen in der Zuliefererindustrie und bei Hochschulen konzentrieren sich auf die Erkennung von Personen. BERTOZZI et al. beispielsweise suchen im FIR-Bild nach warmen symmetrischen Objekten mit einem bestimmten Seitenverhältnis [BBG⁺03], während XU und FUJIMURA Kandidaten mit Hil-

fe einer Support Vector Machine detektieren [LF04] und MEIS et al. detektierte Objekte aufwändig segmentieren und mit polynomialen Klassifikatoren erkennen [MRN03].

Dieser Abschnitt beschreibt, wie das im Rahmen dieser Arbeit umgesetzte hervorhebende NightVision-System Menschen und Tiere markiert. Das Wärmebild stellt warme Objekte besonders hell dar und bietet dadurch die Möglichkeit, Lebewesen einfach zu detektieren. Die Klassifizierung der detektierten Objekte beschränkt sich in dieser Arbeit auf die Validierung des Aufenthaltsortes, der Größe und des Formats des Objektes. Andere Arbeiten haben sich intensiver mit der Klassifikation von Personen in NightVision-Bildern beschäftigt [MRN03, BBG⁺03, LF04, XLF05]. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Vorstellung des hervorhebenden NightVision-Systems in einem Fahrzeug zu geben, um das hervorhebende System mit einem rein anzeigenden vergleichen zu können.

4.3.1 Randbedingungen

Bild 4.25 zeigt ein typisches FIR-Bild bei Nacht und macht deutlich, dass neben Personen und Tieren auch andere Objekte wie Fahrzeugteile, Gebäude, Bordsteine und Baumkronen hell erscheinen können. Umgekehrt kann die Bekleidung Körperteile verdecken und Körperwärme isolieren.



Bild 4.25 : Typisches FIR-Bild bei Nacht

4.3.2 Hervorhebung relevanter Objekte im Bild

Der Algorithmus zur Extraktion potenziell gefährlicher Objekte teilt sich in aufeinander aufbauende Phasen auf: Der erste Schritt trennt helle Bildpunkte vom restlichen Bild und erfasst damit neben Menschen und Tieren auch andere warme Objekte. Der zweite Schritt sortiert alle Bildpunkteanhäufungen aus, die zu klein sind, um eine Gefahr darzustellen. Ein weiterer Schritt bewertet die Positionen der Objekte und verwirft dabei alle Kandidaten, die auf Grund ihrer Größe und ihres Aufenthaltsortes keine Gefahr darstellen. Der letzte Schritt berechnet für die verbleibenden Objekte das umgebende Rechteck und validiert diese mit Hilfe der Formatverhältnisse und der Füllfaktoren bezüglich des umgebenden Rechtecks.

Um im ersten Schritt helle Punkte vom restlichen Bild zu trennen, berechnet der Algorithmus für jedes Bild das Histogramm. Die linke Hälfte von Bild 4.26 zeigt die Verteilung der Bildwerte der Szene aus Bild 4.25. Die Anhäufung um das absolute Maximum enthält die Punkte des Bildes, die nicht hell genug sind, um relevante Objekte darzustellen. Diese Bildpunkte werden im Folgenden als "Hintergrund" bezeichnet.

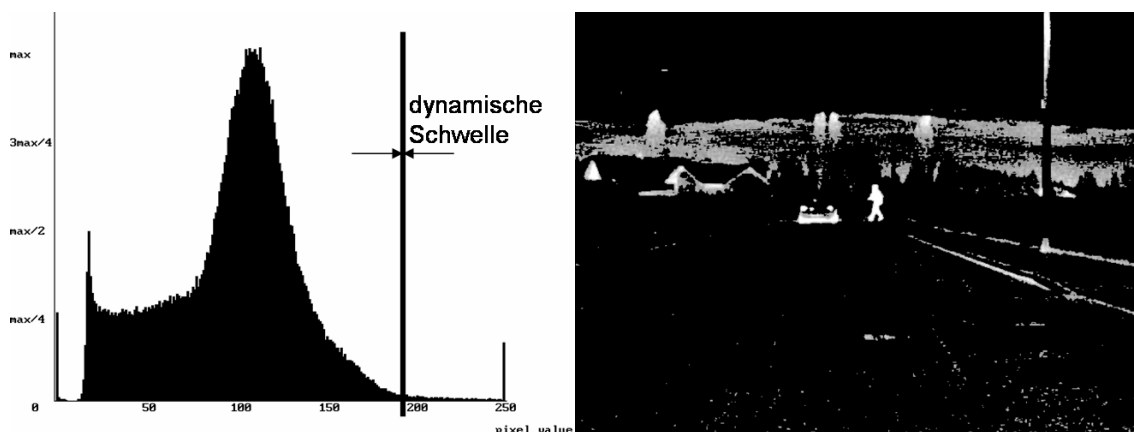


Bild 4.26 : Histogramm der Szene aus Bild 4.25 und Schwellenbild

Mit diesem Wissen legt der Algorithmus eine dynamische Schwelle hinter das absolute Maximum und trennt damit die Bildwerte der relevanten Objekte vom Hintergrund. Wenn diese Schwelle nun die zum Hintergrund gehörenden Punkte auf ihrer linken Seite herausfiltert, entsteht ein Bild, das hauptsächlich helle Objekte beinhaltet (Bild 4.26 rechts). Die Ermittlung des Schwellenwerts erfolgt durch die Berechnung der Steigung der Histogrammkurve nach dem absoluten Maximum: Unterschreitet die Steigung einen Grenzwert ϵ , ist das Ende der Bildpunkteanhäufung erreicht. Da die Histogrammkurve jedoch keine stetige Kurve ist, verlässt sich die Schwellenberechnung nicht nur auf die Differenz zweier benachbarter Histogrammwerte, sondern verlangt die Grenzwertbedingung

auch den beiden vorhergehenden und den beiden folgenden Histogrammwerten ab. Ist also $H(n)$ die Histogrammkurve und ε der zu unterschreitende Grenzwert, so muss

$$\begin{aligned}
 H(n-2) - H(n-1) < \varepsilon & \quad \text{und} \quad H(n-1) - H(n) < \varepsilon \\
 & \quad \text{beziehungsweise} \\
 H(n) - H(n+1) < \varepsilon & \quad \text{und} \quad H(n+1) - H(n+2) < \varepsilon
 \end{aligned}
 \tag{4.59}$$

erfüllt sein, damit der Bildwert n die Schwelle bildet. Die rechte Seite von Bild 4.26 zeigt das Ergebnis des Schwellenverfahrens. Der Schwellwert unterliegt weiterhin einer zeitlichen Tiefpassfilterung, damit das Verfahren keine Bildpunkte nahe der Schwelle auf Grund von Schwankungen des Schwellwerts kurzzeitig erfasst und wieder verliert.

Die vorhergehende Darstellung zeigt, dass die Trennung der hellen Bildpunkte vom Hintergrund auch viele verrauschte Bildwerte erfasst. Um Rauschpunkte und sehr kleine Objekte aus dem Schwellenbild zu entfernen, filtern Erosionsmasken alle Bildpunkte heraus, die eine bestimmte Größe unterschreiten. Auf diese Weise bleiben nur noch Objekte erhalten, die mindestens so groß sind wie die verwendete Maske. Die Maskengröße hängt dabei von ihrer Position im Bild ab, da Objekte im unteren Bildbereich sich in der Nähe der Kamera befinden und entsprechend groß erscheinen. Je mehr sich die Masken dem Horizont nähern, umso feiner werden sie, um kleiner erscheinende Objekte in der Nähe des Horizonts zu erhalten. Oberhalb des Horizonts steigt die Maskengröße wieder an, da diese Objekte über dem Boden schweben und für die Hervorhebung im Bild nicht relevant sind oder, wenn sie nicht schweben, sich sehr nah an der Kamera befinden. Bild 4.27 zeigt die verschiedenen Bereiche mit den beschriebenen Maskengrößen. Der Algorithmus ignoriert die obersten und untersten Zeilen des Bildes, da der obere Bildbereich ohnehin nicht relevant ist und die Hervorhebung von Objekten im Nahfeld der Kamera keinen Nutzen bietet. Auf diese Weise spart das Verfahren Rechenzeit ein.

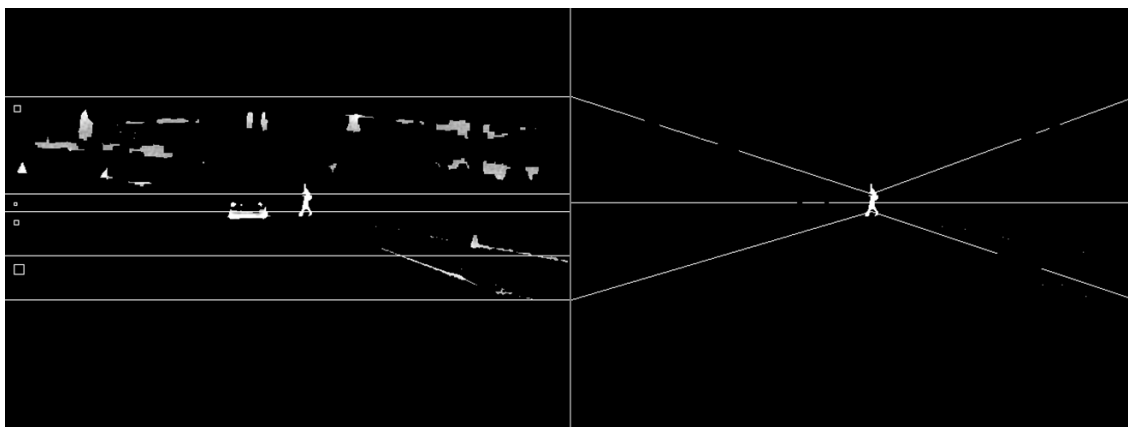


Bild 4.27 : Bildpunkte im Vordergrund

Die linke Seite von Bild 4.27 macht deutlich, dass sich immer noch viele Objekte im Bild befinden, die nicht potenziell gefährlich sind. In dem hier behandelten Beispiel-

bild handelt es sich um Baumkronen, Hausdächer und Wolken. Ein weiterer Algorithmus untersucht die noch vorhandenen Objekte auf ihren Aufenthaltsort, da für den Fahrer gefährliche Objekte nur bestimmte Positionen im Bild einnehmen können, und liefert als Ergebnis die rechte Seite von Bild 4.27. Bild 4.28 gibt einen Überblick über die möglichen Aufenthaltsorte von potenziell gefährlichen Objekten. Diese Aufenthaltsorte gelten natürlich wieder nur unter der Annahme einer ebenen Fläche vor dem Fahrzeug.



Bild 4.28 : Mögliche Aufenthaltsorte von potenziell gefährlichen Objekten

Die Untersuchung der Objektpositionen basiert auf der Horizontlinie und den Linien zum Fluchtpunkt der Kamera, die vereinfachend die Trajektorien des Fuß- und des Kopfpunkts eines Menschen darstellen, der neben dem Fahrzeug parallel zur Fahrzeuglängsachse geradeaus läuft. Das Verfahren entfernt alle Objekte, deren Fußpunkte sich oberhalb der Horizontlinie befinden (a, b, c), da diese entweder schweben oder sich sehr weit vor dem Fahrzeug befinden und aus diesem Grund nicht relevant sind. Weiterhin löscht der Algorithmus alle Objekte, deren Höhe innerhalb einer Toleranz nicht symmetrisch zur Horizontlinie ist (d). Objekte, die über die obere Trajektorie reichen und deren Fußpunkte über der unteren Trajektorie liegen (e), müssen sich wegen dem Fußpunkt weit entfernt von der Kamera befinden, erscheinen aber wegen der Ausdehnung in der Höhe zu groß,

um einen Menschen oder ein zu erwartendes Tier darzustellen und scheiden deshalb ebenfalls aus der Kandidatenliste aus. Alle Objekte, die sich vollständig unter dem Horizont, jedoch oberhalb des Nahbereichs befinden, bleiben erhalten.

In der vorletzten Stufe bestimmt das Verfahren Rechtecke, die jeweils ein extrahiertes Objekt umgeben, und berechnet den Füllfaktor der eingerahmten Bildpunkte. Ist nicht mindestens 25% der eingerahmten Fläche mit Bildpunkten des Objekts gefüllt, löscht der Algorithmus den Inhalt des Rahmens und befreit das Bild auf diese Weise von großen zusammenhängenden Rauschpunkten, die die Masken nicht erfassen konnten. Um die Anzahl der nicht relevanten Objekte zu reduzieren, kann eine Betrachtung des Objektformats alle Kandidaten aussortieren, die beispielsweise breiter als hoch sind. Letztendlich entsteht ein Bild nach Bild 4.29, in dem das einzig hervorgehobene Objekt der querende Fußgänger ist. Die Rahmen im Bild stellen die Objekte dar, die zwar vom Hintergrund getrennt, jedoch von den oben beschriebenen Filtermechanismen aussortiert wurden.



Bild 4.29 : Ergebnis der Objektextraktion

4.3.3 Bewertung der Objektextraktion

Der in Abschnitt 4.3.2 vorgestellte Algorithmus kommt ohne Tracking und ohne Formklassifikator aus und ist dennoch in der Lage, potenziell gefährliche Objekte hervorzuheben. Dadurch ist das Verfahren auch in der Lage, Tiere zu kennzeichnen. Doch ähnlich wie bei einem Formklassifikator können die beschriebenen Algorithmen zur Beseitigung von nicht relevanten Bildinhalten auch Menschen und Tiere aussortieren. Diese Gefahr besteht insbesondere dann, wenn Personen im Bild mit ungefähr gleich hellen Objekten verschmelzen und das Gesamtobjekt insgesamt zu hoch wird oder das Format des Gesamtobjekts breiter ist als die Höhe. Die Formatbetrachtung hat zudem den Nachteil, viele Tiere auszusortieren. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Objektextraktion erfolgte anhand aufgezeichneter Videodaten, die zwei verschiedene Fälle abdecken: Im ersten Fall stand das Fahrzeug etwa eine Stunde lang in einer Fußgängerzone, während die Kamera vorbeigehende Passanten aufzeichnete. Die Bildverarbeitung musste die aufgezeichneten Personen hervorheben und auf diese Weise Ihre Leistungsfähigkeit unter Beweis stellen. Die Erkennungsrate κ der Bildverarbeitung errechnete sich aus der Anzahl an Personen, die das System erkannt hat und der Anzahl an Personen, die tatsächlich im Video zu sehen waren:

$$\kappa = \frac{e}{m}, \quad (4.60)$$

wobei e die Anzahl der erkannten Personen und m die Anzahl der tatsächlich aufgezeichneten Personen darstellt. Dabei galt eine Person als erkannt, wenn das Verfahren sie zumindest einmal hervorgehoben hat, während sie sich im Bild der Kamera befand. Dabei reichte auch die Einfärbung einzelner Gliedmaßen aus. Der Fall, dass das System nur die Beine der Passanten hervorhebt, tritt relativ häufig auf, da Jacken, Pullover und Westen sich im Hüftbereich falten und dabei die Temperatur der Person nicht vollständig annehmen. Dadurch erscheint dort die Temperatur geringer als an den Beinen und am Oberkörper. Wenn diese Temperaturschwankung unter die dynamische Schwelle des Hervorhebungsalgorithmus fällt, erkennt das System die Beinregionen und die Oberkörperregionen als unabhängige Objekte. Da nun aber der Oberkörper zu schweben scheint und der Unterkörper sich innerhalb der erlaubten Bereiche aus Abschnitt 4.3.2 befindet, werden die Beine eingefärbt, der restliche Körper jedoch nicht.

Da der entwickelte Algorithmus kein Tracking-Verfahren anwendet, waren bereits erkannte Objekte nicht immer durchgängig hervorgehoben. Grundsätzlich müsste die Bestimmung der Erkennungswahrscheinlichkeit nach der Gleichung

$$\hat{\kappa} = \frac{e \cdot b}{m \cdot n} \quad (4.61)$$

erfolgen, wobei n die Anzahl der Bilder, in denen eine Person im Bild zu sehen war und b die Anzahl der Bilder, in der diese Person hervorgehoben war, darstellt. Die Ermittlung des Korrekturfaktors b/n ist relativ aufwändig, weshalb die Berechnung der Erkennungswahrscheinlichkeit darauf verzichtet. In dem beschriebenen Szenario in der Ingolstädter

Innenstadt hatte das System an einem kühlen Sommerabend ab 21 Uhr mit 17,5°C Außentemperatur eine Erkennungsrate von $\kappa = 83\%$, da das System in 63 Minuten 72 von 87 Passanten erkannt hat. Unter diesen 87 Passanten waren 14 Fahrradfahrer, jedoch keine Tiere. Während dieser Zeit färbte das System 16 Objekte ein, die weder Personen noch Tiere waren. Dabei handelte es sich hauptsächlich um Reifen vorbeifahrender Fahrzeuge. Diese Werte sind extrem temperaturabhängig, da Fußgänger bei geringen Temperaturen besser isolierende Kleidung tragen und an warmen Tagen die Temperaturdifferenzen zwischen Lebewesen und Gegenständen eng beieinander liegen und die dynamische Schwelle diese nicht mehr trennen kann.

In einem zweiten Test lief der Algorithmus während der Fahrt, wobei ein Video-Recorder das Endergebnis der Hervorhebung aufzeichnete. Die Strecke führte durch kleinere Ortschaften und erforderte eine Fahrtzeit von 45 Minuten. In dieser Zeit erkannte das System 48 von 55 Personen und erreichte auf diese Weise eine Erkennungsrate von knapp 87%. Es traten insgesamt 21 Fehlerkennungen an Fahrzeugreifen, Felsen am Straßenrand, Betonpfosten und Verkehrsinsel-Beleuchtungen sowie beleuchteten Vitrinen auf. Fehlerkennungen sind während der Fahrt jedoch kaum aufgefallen, da der Fahrer nur einen Bruchteil der Fahrtzeit auf die Anzeige sehen konnte.

Auch die Leistungsfähigkeit der Objekterkennung ist wetterabhängig und verschlechtert sich im Gegensatz zur Fahrbahnerkennung sowohl bei zu hohen als auch bei zu tiefen Temperaturen: Ist die Umgebung tagsüber sehr warm, heizen sich viele Gegenstände auf und geben die gespeicherte Wärme nachts wieder ab, so dass die Trennung der Objekte vom Hintergrund auch viele nicht relevante Objekte erfasst. Zwar validiert der Algorithmus auch deren Aufenthaltsorte, Größen und Formate, jedoch ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass auch unbelebte Objekte erhalten bleiben. Gleichzeitig können Lebewesen mit unbelebten, jedoch warmen Objekten verschmelzen und für den Algorithmus ein Objekt bilden, das nicht der relevanten Größe oder dem gesuchten Format entspricht. Dadurch steigt sowohl die Falscherkennungs- als auch die Nichterkennungsrate.

Bei tiefen Temperaturen steigt zwar der Unterschied zwischen der Körperwärme und der Umgebungstemperatur, jedoch führt gut isolierende Bekleidung dazu, dass dieser Temperaturunterschied im Bild nicht sichtbar ist. Die Oberfläche der Bekleidung bietet einen geringen Kontrast zur Umgebung, so dass im Winter zwar freiliegende und dünn bekleidete Körperteile wie Kopf und Beine von Personen sichtbar sind, ihr Oberkörper jedoch fast verschwindet. Der Erkennungsalgorithmus erkennt, wie oben beschrieben, nur die Beine als Objekt und markiert den Oberkörper der Personen nicht.



5 Alternatives Sichtverbesserungssystem

Ziel eines NightVision-Systems ist die Sichtverbesserung bei Nacht zur Vermeidung von Unfällen, insbesondere mit Fußgängern, Radfahrern und Wild. Die Entwicklung der NightVision-Systeme entstand aus dem Ansatz, Kameras in Fahrzeuge zu integrieren, die mehr und weiter sehen können als der Mensch bei der Ausleuchtung der Straße mit Abblendlicht. Die Darstellungen aus Kapitel 3 zeigen, dass die Kameras zwar weitere Bereiche erfassen können als das menschliche Auge, der Fahrer die gewonnene Information jedoch während der Fahrt nur schwer aufnehmen kann.

5.1 Motivation für eine alternative Lösung

Im ersten Teilversuch der in Kapitel 6 genauer beschriebenen Fahrversuche bewerteten Probanden verschiedene NightVision-Kameras. Dabei nutzten sie rein anzeigende Systeme, die das Bild der Kamera ohne Zusatzinformationen in einer Anzeige darstellten. Während des Versuchs konnte der Versuchsleiter feststellen, dass die Versuchsteilnehmer unabhängig von der Kamera und der Anzeige Gefahren nicht bemerkten. Die Probanden übersahen Rehe, die der Versuchsleiter vom Beifahrersitz aus in der NightVision-Darstellung erkennen konnte oder ganz ohne NightVision entdeckte. Diese Beobachtung stellt den Nutzen eines NightVision-Systems in Frage. Empirische Untersuchungen mit NightVision-Systemen bestätigen die beschriebenen Beobachtungen durch die Messung der Erkennungsrate mit Hilfe eines Blickerfassungssystems bei Fahrten mit und ohne NightVision-System [TKM⁺04]. Die intensive Nutzung des Fernlichts während der Testfahrten ist ein Hinweis darauf, dass NightVision das Fernlicht nicht ersetzen kann und die Nutzung des Fernlichts deutlich angenehmer ist. Die NightVision-Systeme vereinnahmten einige Probanden so sehr, dass sie sowohl bei Gegenverkehr als auch bei vorausfahrendem Verkehr sowie bei Fahrten durch Ortschaften vergaßen, abzublenden und mit Fernlicht weiterzufahren.

Die Nutzung eines NightVision-Systems ist hauptsächlich in Situationen vorgesehen, in denen die Nutzung des Fernlichts verboten ist, um andere Fahrer vor Blendung zu

schützen. Die Straßenverkehrsordnung beschreibt in § 17, wann der Fahrer das Fernlicht ausschalten muss: *“Auf Straßen mit durchgehender Beleuchtung darf auch nicht mit Fernlicht gefahren werden. Es ist rechtzeitig abzublenden, wenn ein Fahrzeug entgegenkommt oder mit geringem Abstand vorausfährt oder wenn es sonst die Sicherheit des Verkehrs auf oder neben der Straße gefährdet”* [Str06]. Sind keine anderen Verkehrsteilnehmer vorhanden, kann der Fahrer das Fernlicht nutzen und ist nicht unbedingt auf das NightVision-System angewiesen. In Anbetracht der Ausführungen aus Kapitel 3 und der beschriebenen Zusatzbelastung des Fahrers bei der Nutzung der Systeme ist es sehr wahrscheinlich, dass der Fahrer in Situationen ohne andere Verkehrsteilnehmer das Fernlicht bevorzugt. Damit schränkt sich der Nutzen von NightVision hauptsächlich auf Fälle mit Gegenverkehr ein. Gerade im Falle entgegenkommender Fahrzeuge verzichtet der Fahrer jedoch auf die Nutzung des NightVision-Systems, da sich seine Blickaktivität auf die anderen Verkehrsteilnehmer konzentriert: Der Fahrer muss die Differenzgeschwindigkeit und den Abstand zu den anderen Fahrzeugen abschätzen [Die04] und meidet deshalb den Blick auf die NightVision-Anzeige.

Spätestens an diesem Punkt stellt sich die Frage, ob NightVision die Anzahl nächtlicher Unfälle reduzieren kann, wenn der Fahrer das System bei Gegenverkehr nicht nutzt und in Situationen ohne andere Verkehrsteilnehmer das Fernlicht bevorzugt. Nach Untersuchungen nutzen Autofahrer das Fernlicht teilweise nur in 20% der Zeit, in der sie es nutzen könnten, weil sie nicht ständig auf- und abblenden wollen oder vergessen, das Fernlicht einzuschalten [SAMF03]. Lichtassistenzsysteme automatisieren das Fernlicht bei Nacht, indem sie das Vorfeld des Fahrzeugs mit einer Kamera beobachten, andere Verkehrsteilnehmer sowie Ortschaften erkennen und automatisch das Fernlicht ausschalten. Befinden sich keine Verkehrsteilnehmer vor dem eigenen Fahrzeug beziehungsweise verlässt das Fahrzeug die Ortschaft, schaltet sich das Fernlicht wieder automatisch ein [BZFS05].

Adaptive Lichtsysteme und aktive Scheinwerfer hingegen passen ihre Ausleuchtung der aktuellen Fahrsituation an [KWVE03]. Sie schalten zwischen vorgegebenen Ausleuchtungen, wie dem Abblendlicht, dem Autobahnlicht, dem Kreuzungslicht, dem Abbiegelicht und dem Kurvenlicht um und versuchen, die beste Ausleuchtung für die aktuelle Fahrsituation zu bieten. Die aktuelle Situation schätzen aktive Lichtsysteme mit Hilfe der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Positionsdaten aus dem Navigationssystem ab.

Diese Systeme optimieren zwar die Ausleuchtung der Fahrzeugposition und Geschwindigkeit entsprechend, bieten jedoch keine Verbesserung der Sicht für den Fall, dass andere Verkehrsteilnehmer vorhanden sind. Ein Fernlichtscheinwerfer, der einzelne Bereiche seiner Ausleuchtung abdunkeln kann, ist ein erster Ansatz für eine Alternative zu NightVision-Systemen, die auch im Falle von Gegenverkehr die Sicht im Vergleich zur Ausleuchtung mit Abblendlicht verbessern kann.

5.2 Adaptives Fernlicht

Bild 1.7 zeigt ein Fahrzeug mit dem Ausleuchtungsbereich seiner Fernlichtscheinwerfer. Ein Fernlichtscheinwerfer, der aus vielen kleineren Lichtquellen besteht, die - wie in Bild 5.1 angedeutet - einzelne Bereiche vor dem Fahrzeug beleuchten und gemeinsam die Abstrahlung eines Fernlichtscheinwerfers erzeugen, kann seine Ausleuchtung in verschiedene Bereiche unterteilen.

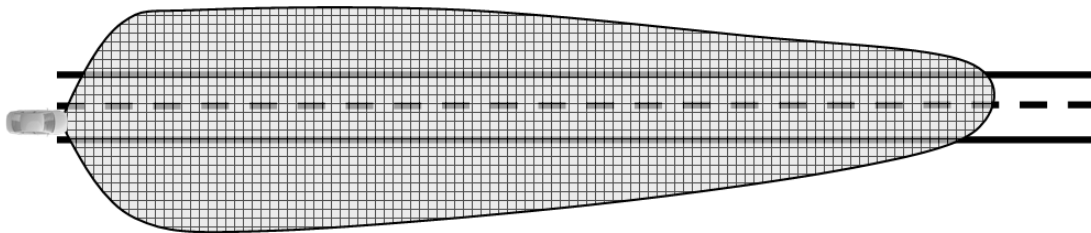


Bild 5.1 : Teilbereiche des Fernlichts

Die Umsetzung eines solchen Scheinwerfers ist grundsätzlich mit mehreren Light Emitting Diodes (LED) [Pau92, HBG01], mit Digital Mirror Devices (DMD) [Yod95] beziehungsweise Liquid Crystal Displays (LCD) [Pau92, HBG01] und mit einzelnen Blenden möglich. DMDs und LCDs sind aus der Projektortechnik bekannt und können durch Ansteuerung ihrer Bildelemente das Licht einer Beleuchtung bildgebend modulieren. Wenn sich andere Verkehrsteilnehmer im Fernlicht befinden und eine Blendungsgefahr besteht, kann der Scheinwerfer die Blendung verursachenden Bereiche ausschalten oder dimmen. Bild 5.2 stellt dies für den Fall des Gegenverkehrs dar.

Da die Anpassung der Ausleuchtung an die aktuelle Verkehrssituation komplexer ist als die Umschaltung zwischen Abblend- und Fernlicht und viele Anpassungsvarianten möglich sind, sollte die Steuerung der abzublendenden Bereiche automatisch erfolgen. Eine manuelle Steuerung der Ausleuchtungsbereiche durch den Fahrer könnte auf Grund von Fehleinschätzung der Positionen anderer Fahrzeuge sowie der Ausleuchtungsbereiche häufig zu Blendung anderer Verkehrsteilnehmer führen und würde die Belastung des Fahrers erhöhen. Aus diesem Grund ist eine Umfelderkennung notwendig, die andere Verkehrsteilnehmer erkennt und die entsprechenden Bereiche des Fernlichts ausblendet.

Zur Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer bieten sich verschiedene Sensoren an, die bereits im Fahrzeug verfügbar sind. Dazu zählt der Radarsensor des ACC, der vorausfahrende Fahrzeuge detektiert, um den vom Fahrer gewünschten Abstand einzuhalten, und der mit einem derzeitigen Erfassungsbereich von etwa 16° auch Fahrzeuge auf der Gegenseite

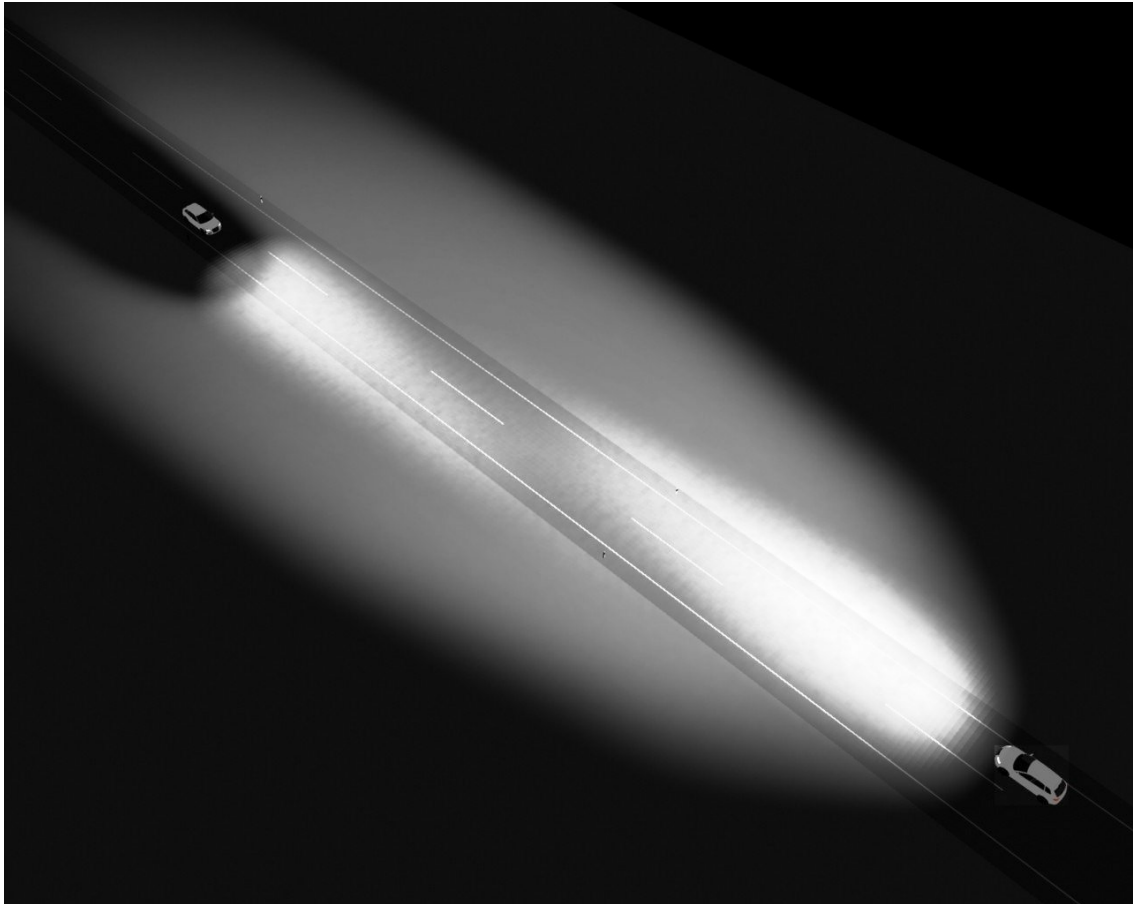


Bild 5.2 : Simulation einer Situation mit Gegenverkehr mit Adaptivem Fernlicht

und an Kreuzungen erfassen kann. Auch eine Kamera für den sichtbaren Spektralbereich, wie sie bereits Spurhaltesysteme nutzen, kann in Verbindung mit einer Bildverarbeitung andere Verkehrsteilnehmer erkennen. Da es sich um ein System handelt, dessen Nutzung nur bei Nacht sinnvoll ist, darf angenommen werden, dass die anderen Verkehrsteilnehmer ihre Fahrzeugbeleuchtung nutzen und nur diese im Bild erkannt werden muss. Die Erkennung von Scheinwerfern in der Dunkelheit ist verhältnismäßig einfach, während die Erkennung unbeleuchteter Verkehrsteilnehmer auf diese Weise nicht möglich ist. Da der Fahrer unbeleuchtete Personen und Radfahrer sehen soll und sie dazu anleuchten muss, stellt das Anleuchten unbeleuchteter Verkehrsteilnehmer keine Einschränkung des Systems dar. Um aber Verkehrsgefährdungen durch Blendung unbeleuchteter Verkehrsteilnehmer zu vermeiden, muss der Fahrer die Möglichkeit haben, das System zu überstimmen und auf das Abblendlicht zu schalten, nachdem er die anderen Verkehrsteilnehmer im Adaptiven Fernlicht entdeckt hat.

Das System besteht somit aus einer Sensorik, wobei eine Videokamera, ein Radarsensor oder aber auch die Kombination aus beiden Sensoren möglich ist, einer Videobild- oder Radarsignalverarbeitung, die andere Verkehrsteilnehmer im Fernlichtkegel erkennt, und einer Aktuatorik in Form eines Scheinwerfers mit flexibler Ausleuchtcharakteristik [Tan06b, Tan06a]. Dieses Sichtverbesserungssystem beinhaltet keinen Bildschirm, der dem Fahrer die gewonnene Information darstellen muss. Die Aufgabe, die Information über die vorliegende Szene von einem Bildschirm auf die Wirklichkeit zu übertragen, entfällt vollständig. So muss der Fahrer weder die Nutzung des Systems erlernen noch sich eine neue Blickstrategie angewöhnen. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle reduziert sich auf die Bedienung der Schalter zum Ein- und Ausschalten des Systems.

5.3 Umsetzung

Nachdem Radarsensoren und Videokameras als sinnvolle Sensoren zur Erfassung von Fahrzeugen bei Dunkelheit identifiziert sind und diese bereits andere Assistenzsysteme im Fahrzeug ermöglichen, liegt es nahe, diese Sensoren für die Erkennung von Fahrzeugen bei Dunkelheit zu verwenden.

Für die Umsetzung der Scheinwerfer ergeben sich, wie bereits angedeutet, mehrere Ansätze. DMDs und LCDs wirken wie viele matrixförmig angeordnete Blenden vor der Lichtquelle des Fernlichtscheinwerfers und können die einzelnen Elemente unabhängig voneinander ansteuern. Dadurch variieren sie mit Hilfe ihrer Blendenelemente die Ausleuchtcharakteristik des Scheinwerfers. Diese Anordnung ist unter dem Namen Pixellicht bekannt [End01]. DMDs und LCDs haben relativ geringe Wirkungsgrade bis $\eta = 60\%$, so dass maximal die Hälfte der Lichtleistung nach dem Durchgang durch das LCD oder der Reflexion am DMD verfügbar ist. Das Licht einer Halogen- oder Gasentladungslampe, das durch ein LCD strahlt oder am DMD reflektiert wird, reicht keinesfalls zur Ausleuchtung der Straße aus, insbesondere da zusätzliche Verluste durch die Optik entstehen. Aus diesem Grund bedienen sich die Pixellicht-Prototypen stärkerer Lichtquellen, wie beispielsweise Quecksilberdampflampen mit einer Leistung von $P = 400\text{ W}$. Diese Lichtquellen erfordern auf Grund ihrer hohen Licht- und Verlustleistung eine Wasserkühlung des gesamten Systems und sind weit von einer Umsetzung in einem Serienfahrzeug entfernt. Der für diese Scheinwerfer benötigte Bauraum lässt die Integration in einem Fahrzeugscheinwerfer nicht zu.

Die Fortschritte in der LED-Technik zur Umsetzung von LED-Scheinwerfern [BH03, Eic05] ermöglicht eine Lösungsalternative zu DMDs und LCDs. Die elektronische Ansteuerung von LEDs ersetzt mechanische Verstelleinrichtungen durch Modulation der LEDs. Sind die einzelnen LED-Arrays optisch so ausgelegt, dass sie abgegrenzte Bereiche der Straße beleuchten, kann der Scheinwerfer die in Abschnitt 5.1 beschriebene Ausleuchtung erreichen.

5.3.1 Videokamera und Radarsensor

Der Radarsensor ist bereits heute in vielen Oberklassefahrzeugen verbaut und dient dem ACC zur Erkennung anderer Fahrzeuge auf Entfernungen bis zu 200 m. Algorithmen zur Erkennung anderer Fahrzeuge auf Basis von Video-Bilddaten finden erst seit kurzer Zeit ihren Weg in die Fahrzeuge. Dabei besteht ihre Aufgabe in der Erkennung von Fahrzeugen im Nahbereich, da die Bildgröße von Fahrzeugen im Mittel- und Fernbereich schnell die Schwelle zur Erkennbarkeit unterschreitet. Bei dieser Anwendung besteht die Aufgabe der Kamera darin, weit entfernte Fahrzeuge bei Nacht aufzuzeichnen, so dass die Bildverarbeitung andere Verkehrsteilnehmer im Fahrzeugvorfeld erkennen kann.

Bild 5.3 zeigt den Ausleuchtbereich des Fernlichts und den Erfassungsbereich einer Videokamera für den Spurhalteassistenten mit 35° Öffnungswinkel und eines Radarsensors für ACC mit 16° Öffnungswinkel maßstabsgetreu.

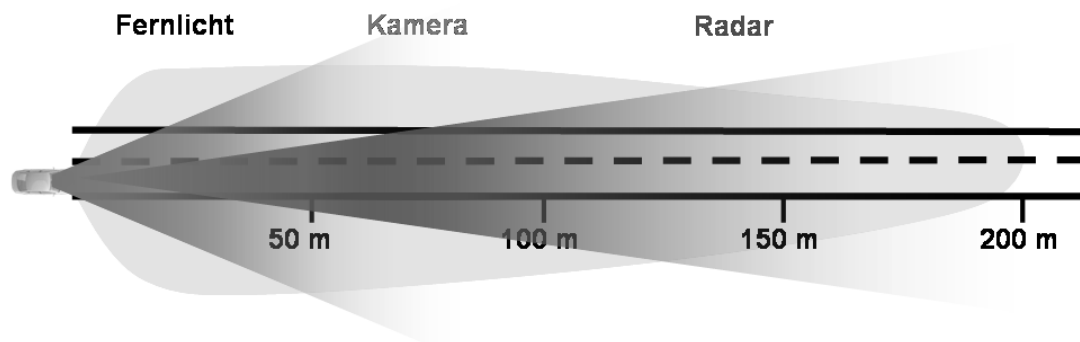


Bild 5.3 : Ausleuchtbereich des Fernlichts und Erfassungsbereiche der Kamera und des Radarsensors

Die Darstellung zeigt deutlich, dass der Erfassungsbereich der Videokamera den vom Fernlicht ausgeleuchteten Bereich vor allem zur Seite hin deutlich besser abdeckt. Insbesondere überholende Fahrzeuge kann die Kamera früher erfassen als der Radarsensor. Im Fernbereich, wo der Radarkegel die Breite des Fernlichts überschreitet und Fahrzeuge sich im Kamerabild klein abbilden, kann der Radarsensor die Fahrzeugerkennung unterstützen. Zwar sind auch Radarsensoren mit größeren Öffnungswinkeln verfügbar, diese weisen jedoch eine geringere Reichweite auf. Durch die Vergrößerung des Erfassungsbereichs verringert sich die Richtcharakteristik der Radarantenne, so dass sich die Strahlenergie breiter im Raum verteilt und die Reichweite sinkt.

Die in dieser Arbeit genutzte CMOS-Kamera hat eine Auflösung von 640 x 480 Bildpunkten (VGA) und liefert ein Schwarz-Weiß-Bild mit einer Bildtiefe von 12 Bit. Das verwendete Objektiv erzeugt einen horizontalen Öffnungswinkel von etwa 35°. Die Kamera ist ähnlich wie beim Spurhalteassistenten und beim NIR-NightVision hinter der Frontscheibe im Bereich des Innenspiegels verbaut. Bild 5.4 zeigt das von der Kamera aufgezeichnete Bild bei Tageslicht, während Bild 5.5 eine Szene mit vorausfahrendem und entgegenkommendem Verkehr bei Nacht darstellt.



Bild 5.4 : Kamerabild des Fahrzeugvorfelds bei Tageslicht

Grundsätzlich ist für die Erkennung von Fahrzeugen auch die Nutzung einer Farbkamera denkbar. Diese bietet auch die Möglichkeit, anhand der Farbe der Beleuchtung zwischen vorausfahrenden und entgegenkommenden Fahrzeugen zu unterscheiden. Auf Grund der zusätzlichen Farbinformation steigt der Rechenaufwand mindestens auf das doppelte an. Wie bereits erwähnt, haben Farbkameras auf Grund ihrer Farbfilter den Nachteil einer geringeren Lichtempfindlichkeit und einer geringeren Auflösung innerhalb eines Farb-bands [Die06]. Aus diesen Gründen verwendet diese Arbeit eine Schwarz-Weiß-Kamera zur Umsetzung des Adaptiven Fernlichts. Für eine prototypische Umsetzung verzichtet diese Arbeit auch auf die Verwendung des Radarsensors.

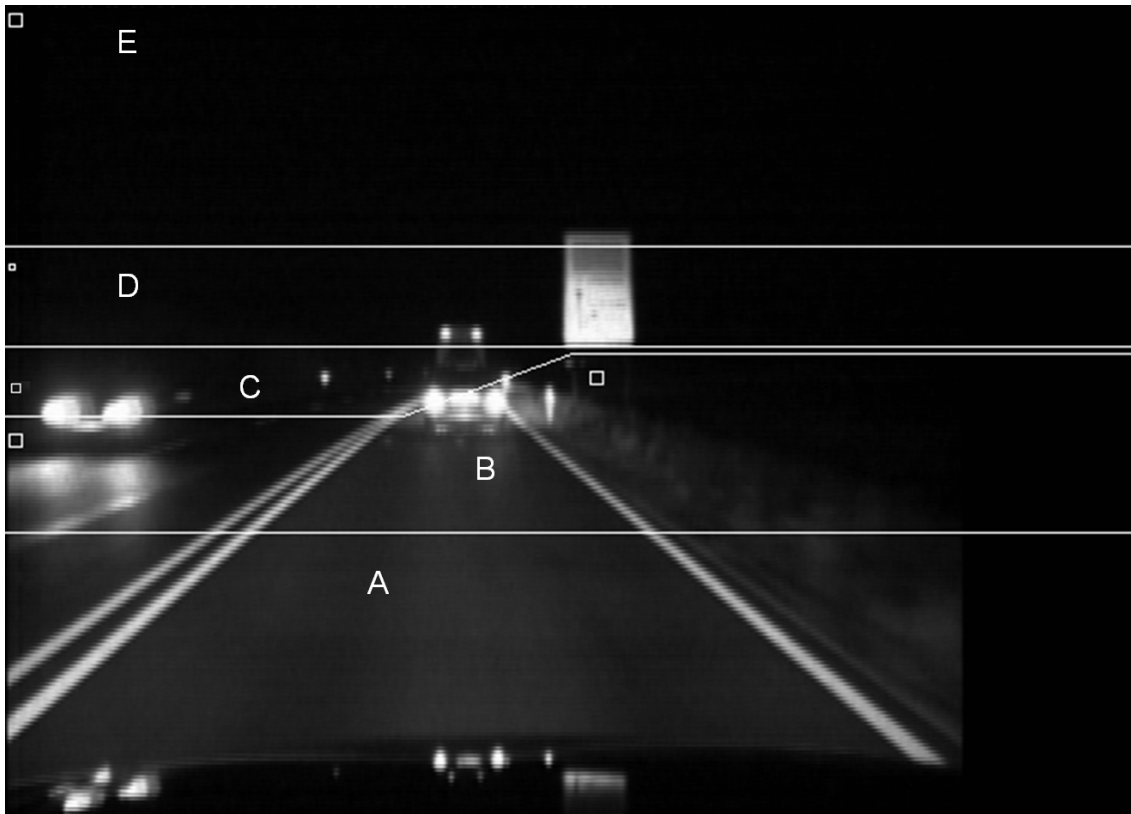


Bild 5.5 : Szene mit vorausfahrendem und entgegenkommenden Verkehr bei Nacht

5.3.2 Bildverarbeitung

Aufgabe der Bildverarbeitung ist es, die Scheinwerfer anderer Verkehrsteilnehmer zu erkennen. Dabei muss der Algorithmus sowohl den Gegenverkehr als auch den Verkehr in eigener Fahrtrichtung erfassen. Folglich muss das System in dem Graustufenbild sowohl Frontscheinwerfer als auch Rückleuchten detektieren. Die Erkennung von Fahrzeugen, die quer zur eigenen Fahrtrichtung stehen oder fahren, ist schwieriger. Dieser Fall tritt besonders häufig an Kreuzungen auf.

Die Erkennung der Beleuchtung anderer Verkehrsteilnehmer entspricht größtenteils der Extraktion relevanter Objekte aus Abschnitt 4.3. Der Algorithmus unterscheidet sich lediglich in wenigen Parametern und beginnt mit der Suche nach sehr hellen Objekten im Fernlichtbereich. Hierzu vergleicht die Bildverarbeitung die Helligkeitswerte aller Bildpunkte mit einem konstanten Schwellenwert. Dieser erfasst bei Nacht sowohl die Frontscheinwerfer und die Rückleuchten von Kraftfahrzeugen und Motorrädern als auch die viel schwächere Beleuchtung von Mopeds, Mofas und Fahrrädern. Um Straßenschilder und Begrenzungspfosten, die ebenfalls sehr hell im Bild erscheinen, aus der Detektion

herauszufiltern, teilt der Suchalgorithmus das Bild in verschiedene Bereiche ein. Diese sind ebenfalls in Bild 5.5 angedeutet.

In dem mit A bezeichneten Bereich direkt vor dem Fahrzeug findet keine Suche nach Fahrzeugbeleuchtungen statt, da sich in diesem Bereich die Motorhaube des eigenen Fahrzeugs abbildet beziehungsweise sich hier keine Fahrzeuge befinden können. Im Bereich B sucht die Bildverarbeitung nach großen Lichtquellen. Das Quadrat in Bereich B deutet die Mindestgröße der Lichtquellen an, die der Algorithmus gerade noch berücksichtigt. Diese geometrische Schwelle soll Reflexionen des eigenen Lichts an Begrenzungsprofilen herausfiltern und nur die Heckleuchten vorausfahrender Fahrzeuge berücksichtigen. Die Grenze zwischen den Bereichen B und C entspricht ungefähr der Projektion der Hell-Dunkel-Grenze der Fahrzeugbeleuchtung in die Bildebene. Im Bereich C hinterlässt der Algorithmus nur Lichtquellen, die im Bild der Größe des Quadrats in Bereich C entsprechen. Sie stellen in den meisten Fällen die Scheinwerfer entgegenkommender Fahrzeuge dar. Der Bereich D deckt mit sehr kleinen Quadraten die Erfassung von weit entfernten Fahrzeugen bis zum Horizont ab. In diesem Bereich können sich auch Straßenschilder befinden, die sich zwar näher am eigenen Fahrzeug befinden als weit entfernte entgegenkommende Fahrzeuge, jedoch in der Projektion in die Bildebene auf Grund ihrer erhöhten Lage weit entfernt erscheinen. Zudem entspricht das von den Schildern reflektierte Licht des eigenen Fahrzeugs der Helligkeit eines weiter entfernten entgegenkommenden Fahrzeugs, so dass die Unterscheidung zwischen Straßenschild und Gegenverkehr schwierig ist. Grundsätzlich wäre es möglich, den Bereich D nochmals in drei Teile zu unterteilen. Dabei könnten die Bereiche am rechten und am linken Bildrand die Aufenthaltsorte von Straßenschildern und der verbleibende mittlere Bereich den Aufenthaltsort von weit entfernten Fahrzeugen darstellen. In weiten Kurven kommt es dann jedoch zu Verwechslungen zwischen Straßenschildern und Verkehrsteilnehmern.

Der Bereich E erfasst Lichtquellen, die weit über der Straße positioniert sind. Auf diese Weise kann das System zwischen Stadtfahrten, wo das Fernlicht auf Grund der regelmäßigen Beleuchtung ausgeschaltet bleiben muss, und Überlandfahrten, wo das Fernlicht grundsätzlich genutzt werden darf, unterscheiden. Redundanzinformationen wie die Fahrzeugposition aus den Daten des Navigationssystems sowie die Fahrtgeschwindigkeit, die Hinweise darauf geben können, ob sich das Fahrzeug innerhalb oder außerhalb von Ortschaften bewegt, stabilisieren und verbessern die Erkennung von Ortschaften.

Die soeben erläuterten Bereiche sind rein virtuell und befinden sich in der Bildebene. Da die Kamera starr mit dem Fahrzeug verbunden ist und Nick-, Wank-, und Gierbewegungen des Fahrzeugs mitmacht, können die Bereiche in der Bildebene während der Fahrzeugbewegung andere Bereiche in der Realität abdecken. So kann sich bei einer Beschleunigung des Fahrzeugs der obere rechte Teil des Bereichs B bis zum Horizont der Szene anheben [Huh98]. Da der Bereich B aber relativ große Lichtquellen erwartet und Fahrzeuge nahe des Horizonts nur kleine Lichtquellen im Bild ergeben, kann es zur Blendung des weit entfernten Verkehrsteilnehmers kommen. Aus diesem Grund liest der

Algorithmus den Nickwinkel des Fahrzeugs über den CAN-Bus [ZS06] ein und passt die Position der Bereiche A bis D dem aktuellen Nickwinkel an. Der Gierwinkel und der Wankwinkel des Fahrzeugs wirken sich ebenfalls auf das Bild aus, sind jedoch für die Erkennung der Scheinwerfer anderer Fahrzeuge nicht berücksichtigt.

Sind die relevanten Lichtquellen detektiert, so muss das System die Koordinaten der Lichtquellen berechnen. Hierzu verwendet der Algorithmus das einfache Kameramodell aus Kapitel 4 und schätzt die Entfernung der Lichtquellen unter der Annahme einer ebenen Fläche über den Fußpunkt der detektierten Quellen im Bild ab. Diese Abschätzung ist gerade bei großen Entfernungen ungenau, da die Entfernungsbereiche, die einzelne Zeilen im Bild abdecken, immer größer werden, je näher sie sich am Horizont befinden. Bild 5.6 zeigt den Unterschied zwischen der auf Basis der Kameradaten berechneten und der mit einem Entfernungsmessgerät bestimmten Entfernungen eines entgegenkommenden Fahrzeugs. Dabei hat die Kamera wie bereits beschrieben einen Öffnungswinkel von $\alpha = 35^\circ$ und eine Neigung zur Straße von $\eta = 3^\circ$.

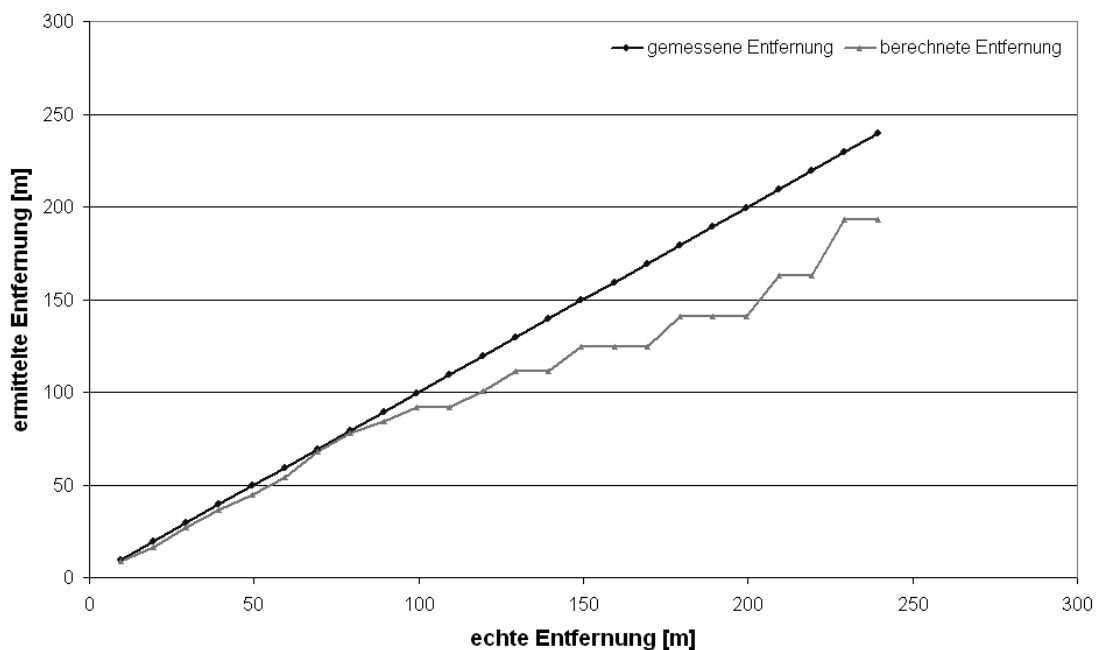


Bild 5.6 : Fehler der Entfernungsschätzung aus dem Kamerabild

Grundsätzlich müsste die Berechnung der Entfernung einen weiteren Fehler berücksichtigen, der durch die durchschnittliche Einbauhöhe der Fahrzeugscheinwerfer von etwa 65 cm [Huh98] über dem Boden entsteht. Diese Fehlerquelle ist bei entgegenkommenden Fahrzeugen nicht relevant, da im Kamerabild nicht der Scheinwerfer an sich, sondern

der Leuchtkegel der Scheinwerfer sichtbar ist. Der Ausleuchtbereich reicht bei weit entfernten Fahrzeugen bis auf die Fahrbahn direkt vor dem Fahrzeug, so dass eher ein Fehler durch diesen vorgelegten Fußpunkt vor dem Fahrzeug entsteht. Bei regennasser Fahrbahn verstärkt sich dieser Effekt durch die Reflexion des Scheinwerferlichts auf dem Asphalt. Da aber ein vorgelegter Fußpunkt zur Berechnung kleinerer Entfernungen führt und das System demnach das Licht weiter vom entgegenkommenden Verkehrsteilnehmer heranzieht, besteht keine Gefahr der direkten Blendung. Weiterhin leuchten entgegenkommende Fahrzeuge selbst die Fahrbahn bis zu einer Entfernung von 50 m aus, so dass sich die geringere Ausleuchtung des Fernlichts nicht negativ auswirkt. Bis sich das erkannte Fahrzeug so weit an das eigene Fahrzeug genähert hat, dass die Scheinwerfer tatsächlich sichtbar und erkennbar sind, befindet sich der besagte Teilnehmer im Abblendlicht des eigenen Fahrzeugs, so dass das Adaptive Fernlicht ohnehin nicht mehr in seine Richtung leuchtet und auch hier eine Blendung ausgeschlossen ist. Eine indirekte Blendung kann bei Regen jedoch durch Reflexion des Lichts an der nassen Straße auftreten.

Rückleuchten vorausfahrender Fahrzeuge haben einen kleineren Lichtkegel und eine geringe Intensität, wodurch oben genannte Effekte nur teilweise gültig sind: Bei Rückleuchten treten höchstens bei Nässe geringe Reflexionen an der Fahrbahn auf, so dass die berechnete Entfernung selten oder nur geringfügig durch einen vorgezogenen Fußpunkt reduziert wird. Stattdessen ergibt sich durch die Bauhöhe der Rückleuchten besonders im Nahbereich eine tendenziell zu große Entfernung, so dass der Scheinwerfer das vorausfahrende Fahrzeug bis zu dessen Rückleuchten ausleuchtet. Hierbei besteht die Gefahr, dass Streulicht oder selbst kleine Fehler in der Abstandsberechnung den vorausfahrenden Fahrer in den Seitenspiegeln blendet.

Anstatt den Abstand anderer Fahrzeuge in kartesischen Koordinaten unter der selten gegebenen Voraussetzung einer ebenen Fläche zu berechnen, können auch die Winkel angegeben werden, unter denen andere Verkehrsteilnehmer im Kugelkoordinatensystem auftauchen. Auf diese Weise meidet das System Entfernungsfehler, die durch unebene Flächen entstehen, und garantiert die Ausleuchtung bis zu den erkannten Lichtquellen anderer Verkehrsteilnehmer. Da auch hier jede Zeile einen Winkelbereich der Straße abdeckt, der mit der Entfernung des zu erkennenden Verkehrsteilnehmers ansteigt, entsteht genau derselbe Entfernungsfehler wie in Bild 5.6 bereits angedeutet.

Zusätzlich zur Bildverarbeitung ist die Analyse der Bewegungstrajektorie des erfassten Bereichs mit erhöhter Helligkeit möglich, um auch aktive Lichtquellen wie Verkehrsinsel-Beleuchtungen oder Ampeln von anderen Verkehrsteilnehmern zu unterscheiden. Dieses Verfahren erkennt jedoch stehende Fahrzeuge nicht mehr als Verkehrsteilnehmer. Testfahrten mit dem oben beschriebenen System haben gezeigt, dass eine Analyse der Trajektorie nicht notwendig ist, da sich die Trajektorien von Schildern und Scheinwerfern erst unterscheiden, wenn sich das Fahrzeug den Objekten so weit genähert hat, dass die bereits beschriebene Betrachtung des Aufenthaltsortes völlig ausreicht, um zwischen Schildern und Fahrzeugen unterscheiden zu können.

Mehr Bedarf besteht an einem Tracking-Verfahren, das in der Bildverarbeitung den kurzzeitigen Verlust eines Fahrzeugs und die daraus resultierende Blendung des anderen Verkehrsteilnehmers vermeidet. Dieser Fall ist auf zahlreichen Testfahrten nur selten eingetreten, weshalb diese Arbeit kein Tracking anwendet. Für den großflächigen Einsatz im Straßenverkehr scheint diese Erweiterung jedoch sinnvoll, da die Erkennungsgüte mit Tracking deutlich steigt. Das System hat Schwierigkeiten bei der Erkennung von seitlich stehenden Fahrzeugen, da deren Scheinwerfer im Bild erst sichtbar werden, wenn sich das Fahrzeug in Richtung der optischen Achse der Kamera bewegt.

Die größte Schwierigkeit bestand jedoch darin, einen Kompromiss in der Belichtungssteuerung der Schwarz-Weiß-Kamera zu finden: Während für die Erkennung entgegenkommender Fahrzeuge eine sehr kurze Belichtungszeit des Bildaufnehmers ausreicht, benötigt die Kamera größere Belichtungszeiten, um auch die Heckleuchten vorausfahrender Fahrzeuge abzubilden. Diese längere Belichtung führt aber dazu, dass die reflektierenden Anteile von Leitpfosten und insbesondere von Verkehrsschildern auf Fahrzeughöhe wie beispielsweise Parkwarntafeln, Richtungstafeln in Kurven, Absperrtafeln und -schranken, Leitbaken und Zeichen für die vorgeschriebene Vorbeifahrt [Str06] sehr hell im Bild erscheinen und näherungsweise dieselben Helligkeitswerte liefern wie die Heckleuchten der zu erkennenden Fahrzeuge und Zweiräder. Damit ist die Unterscheidung zwischen Rückleuchten und Reflektoren allein auf Basis der Helligkeitswerte im Bild kaum und mit der beschriebenen Betrachtung der Aufenthaltsorte der Lichtquellen nur begrenzt möglich, da sich diese Reflexionen auch örtlich nicht eindeutig von anderen Verkehrsteilnehmern unterscheiden.

Abhilfe können hier eine Farbkamera und unterschiedliche Schwellen für die Farbbänder des Bildes schaffen: So müssen weiße Objekte, also jene, die in allen Farbbändern vertreten sind, im Bild der Farbkamera sehr hell erscheinen. Objekte hingegen, die nur Anteile im roten Farbband haben, dürfen geringere Helligkeiten aufweisen, damit die Bildverarbeitung diese Lichtquellen als Verkehrsteilnehmer erkennt.

Die Verwendung einer Kamera, die zur Beleuchtung synchronisierbar ist, ermöglicht selbst mit einem Schwarz-Weiß-Bildaufnehmer einen Lösungsansatz: Nimmt die Kamera nur Bilddaten auf, wenn die LED-Beleuchtung gerade keinen Lichtpuls aussendet, empfängt die Kamera nur Fremdlicht und kann nur noch Reflexionen der Beleuchtung anderer Verkehrsteilnehmer an Schildern aufnehmen.

Die Bildverarbeitung zur Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer auf Basis einer Farbkamera ist zwar bereits in der Entwicklung, jedoch nicht mehr in diese Arbeit eingeflossen. Ein gepulstes LED-Fernlicht mit der Funktionalität des Adaptiven Fernlichts und einer dazu synchronisierten Kamera ist heute nicht verfügbar, so dass auch diese Lösungsmöglichkeit nicht mehr Bestandteil dieser Arbeit ist.

Die Bildverarbeitung übermittelt die berechneten Aufenthaltsorte der erkannten Verkehrsteilnehmer an die Steuerung der Beleuchtung, damit diese blendende Bereiche des Fern-

lichts abdunkelt. Die übermittelten Daten müssen sich auf dasselbe Koordinatensystem beziehen, so dass auch hier eine Koordinatentransformation analog zu Abschnitt 4.2.7 die Kamerakordinaten in Fahrzeugkoordinaten überführt.

5.3.3 Beleuchtung

Die Aufgabe der LED-Scheinwerfer ist die Ausleuchtung einzelner Bereiche auf der Straße. Die Ausleuchtungsbereiche aller einzelnen Lichtelemente sollen zusammen die Lichtverteilung eines gewöhnlichen Fernlichts ergeben.

Die Auflösung der Fernlichtunterteilung ist technischen Rahmenbedingungen unterworfen. Die feine Auflösung eines Pixellichts, das der Auflösung des verwendeten DMDs oder LCDs entspricht, ist mit LEDs heute nicht umsetzbar. Die Anzahl der verwendbaren LEDs ist durch den Bauraum im Scheinwerfer und den Temperaturhaushalt beschränkt. LEDs benötigen heute noch große Kühlflächen, da die kleinen Lichtquellen durch hohe Bestromung zwischen $I = 400 \text{ mA}$ bis $I = 1000 \text{ mA}$ Lichtleistungen von etwa $\Phi = 400 \text{ lm}$ bei einem Gesamtwirkungsgrad zwischen $\eta = 15\%$ und $\eta = 20\%$ liefern müssen [HA05, Luc05]. Im Scheinwerfer entstehen durch die Lichtquelle selbst, aber auch durch den Motor, der Wärme nach vorne zu den Scheinwerfern abstrahlt, hohe Temperaturen. Lüfter und Kühlkörper müssen die Lichtquellen vor Überhitzung bewahren und sie auf einer Temperatur von $T = 100^\circ\text{C}$ halten. Mit dem stetig wachsenden Wirkungsgrad der LEDs steigt ihre Lichtausbeute, während ihre Verlustleistung abnimmt. Damit werden die notwendigen Aufwendungen zur Kühlung der Lichtquellen immer geringer und diese damit kleiner und kostengünstiger. Abgesehen von der heutigen Baugröße lassen einzelne LEDs kaum eine derart schmale Bündelung zu, dass die Auflösung des LED-Scheinwerfers mit der eines Pixellichts vergleichbar wäre.

Das Konzept des matrixförmig ausleuchtenden Scheinwerfers muss entsprechend mit einer geringeren Anzahl an LEDs auskommen. Dabei muss die Beleuchtung den gesamten Bereich des Fernlichts erfassen und dennoch eine ausreichend feine Untergliederung des Ausleuchtungsbereichs ermöglichen.

Bild 5.7 zeigt eine sinnvolle Aufteilung der Teilbereiche des Matrix-Fernlichts. Der Bereich direkt vor dem Fahrzeug stellt die Ausleuchtung des Abblendlichts dar, das gesetzlich vorgeschrieben ist und unter keinen Umständen reduziert wird. Die acht Einzelsegmente des Fernlichts decken besondere Bereiche des Fahrzeugvorfelds ab. So ermöglicht der Bereich A bei entgegenkommendem Verkehr eine möglichst lange Beleuchtung des linken Straßenrands, bis der Gegenverkehr die Grenzen des Abblendlichts erreicht hat. Der Bereich B beleuchtet die linke Fahrspur in Entfernung der asymmetrischen Ausleuchtung des Abblendlichts und vervollständigt es im Bereich des Gegenverkehrs, während Bereich C den Hell-Dunkel-Verlauf auf der eigenen Fahrbahn begradigt. Die Segmente D und E beleuchten den Abschnitt des zukünftigen Autobahnlichts [KWVE03]

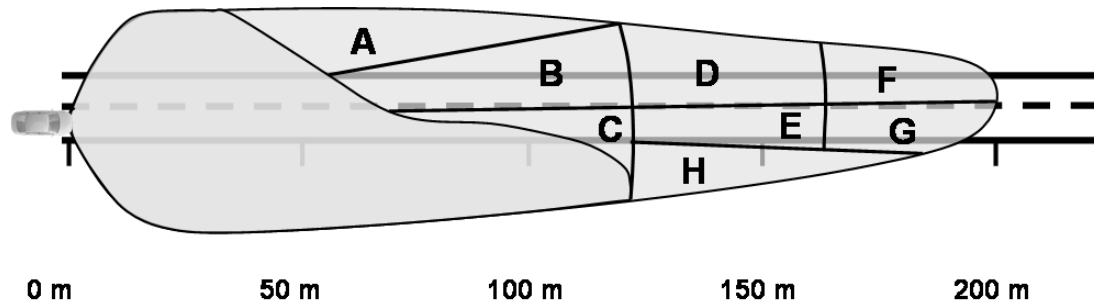


Bild 5.7 : Teilbereiche des Fernlichts

und wirken wie eine diskrete Leuchtweitenregelung des Fernlichts. Die Bereiche F und G vervollständigen das Fernlicht. Segment H beleuchtet den rechten Straßenrand, selbst wenn andere Verkehrsteilnehmer auf der eigenen Fahrbahn vorausfahren.

Tabelle 5.1 zeigt die notwendigen Neigungswinkel des Ausleuchtkegels zur Straße zur Umsetzung der in Bild 5.7 angedeuteten Ausleuchtung und verdeutlicht die feinmechanische Herausforderung zur Herstellung und Justierung eines solchen Scheinwerfers.

Ausleuchtweite des Adaptiven Fernlichts [m]	50	68	120	170	200	400
Neigung des Ausleuchtkegels [°]	0,8	0,57	0,32	0,23	0,19	0,1

Tabelle 5.1: Reichweite des Adaptiven Fernlichts und Neigung des Ausleuchtkegels

Da der Scheinwerfer sehr tief verbaut ist und flach ausstrahlt, bewirken bereits kleine Winkeländerungen des Ausleuchtkegels große Reichweitenunterschiede. Solange der Ausleuchtwinkel zur Straße geneigt ist und unter einem Neigungswinkel von 0° bleibt, sollte der Lichtkegel auf Grund der tieferen Baulage der Scheinwerfer weder die Augen entgegenkommender Fahrer noch die Rückspiegel vorausfahrender Fahrzeuge treffen. Durch Streulicht, Nickbewegungen des Fahrzeugs und falsch eingestellte Scheinwerfer kann es dennoch zur Blendung anderer Verkehrsteilnehmer kommen.

5.3.4 Kalibrierung des Systems

Bei der Entfernungsberechnung in kartesischen Koordinaten beinhaltet die Kalibrierung des Systems die Kalibrierung der Kamera durch Ermittlung der bereits in Abschnitt 4.2.7 erwähnten Kamerafaktoren k_x und k_y und die Kalibrierung der Scheinwerfer. Die Ermittlung der Kameraparameter erfolgt über die Messung der Weltkoordinaten eines Objektes

auf einer ebenen Fläche und die Ermittlung der Kamerakoordinaten dieses Objektes im Bild. Mit diesen Werten sind die Kamerafaktoren bestimmt.

Die Kalibrierung der Scheinwerfer könnte auf der ebenen Fläche durch Ermittlung der Ausleuchtbereiche der einzelnen Segmente des Adaptiven Fernlichts erfolgen. Dieses Vorgehen ist jedoch umständlich, da ein großer freier und ebener Bereich vor dem Fahrzeug notwendig ist. Einfacher ist die Bestimmung der Ausleuchtbereiche durch Anleuchten einer senkrechten Wand und die Projektion des Lichtbildes auf die Ebene, auf der das Fahrzeug steht.

Auf diese Weise stehen sowohl die Weltkoordinaten der Aufenthaltsorte anderer Verkehrsteilnehmer als auch der Ausleuchtbereiche der Segmente zur Verfügung, so dass der Scheinwerfer seine Ausleuchtung anpassen kann.

Bei der Angabe der Position erkannter Fahrzeuge im Kugelkoordinatensystem ist kameraseitig lediglich die Kenntnis der Bildzeile y_H , die den Horizont abbildet, und die vertikale und horizontale Winkelbreite $\Delta\Gamma_v$ und $\Delta\Gamma_h$, die jeder Bildpunkt erfasst, notwendig. Die Kugelkoordinaten γ_v und γ_h der anderen Verkehrsteilnehmer mit den Kamerakoordinaten x_{Kamera} und y_{Kamera} ergeben sich dann mit

$$x_M = b_{Sensor}/2 \text{ und } y_M = h_{Sensor}/2 \quad (5.1)$$

zu

$$\gamma_v = (x_{Kamera} - x_M) \cdot \Delta\Gamma_v \quad (5.2)$$

und

$$\gamma_h = (y_{Kamera} - y_H) \cdot \Delta\Gamma_h. \quad (5.3)$$

x_M und y_H bilden damit den Schnittpunkt des Horizonts mit der Ebene durch die Fahrzeuglängsachse. Scheinwerferseitig muss bekannt sein, welchen Raumwinkel jedes einzelne Segment des Adaptiven Fernlichts abdeckt.

5.4 Vergleich zwischen Adaptivem Fernlicht und NightVision

Das vorgestellte System bringt als Alternative zu NightVision-Systemen viele Vorteile mit sich. Der größte Vorteil ist die einfache Nutzung, die der Nutzung des Fernlichts entspricht. Der Fahrer muss weder seine Aufmerksamkeit auf eine weitere Anzeige richten noch irgendwelche Bildinhalte oder Warnungen interpretieren. Das System zeigt dem Fahrer genau das, was er bei eingeschaltetem Fernlicht auch sieht und nimmt ihm zusätzlich die Ablendaufgabe ab, wenn andere Verkehrsteilnehmer auftauchen.

Tabelle 5.2 vergleicht NightVision und das Adaptive Fernlicht.

	NightVision	Adaptives Fernlicht
Sensorik	- NIR-Kamera mit Beleuchtung oder FIR-Kamera	+ gewöhnliche CMOS-Kamera, keine IR-Empfindlichkeit notwendig
Bildverarbeitung	- Personenerkennung sehr aufwändig	+ einfache Fahrzeugerkennung bei Nacht
Mensch-Maschine-Schnittstelle	- Bildschirme nicht optimal, starke Belastung des Fahrers, abstrakte Anzeige nur mit sehr viel Aufwand umsetzbar	++ sehr einfache Nutzung, echte Entlastung des Fahrers, kein Bildschirm
Fehlfunktionen	-- Bei rein warnenden Systemen ohne Bild nicht nachvollziehbar	- Falscherkennungen sind nicht sicherheitskritisch, aber stören den Fahrer, Nichterkennungen verursachen Verkehrsgefährdung durch Blendung
Nutzen	+ Menschen und Tiere (hervorgehoben) sehen	+ maximale Beleuchtung ohne Blendung

Tabelle 5.2: Vergleich zwischen NightVision und Adaptivem Fernlicht

Für den Automobilhersteller bietet das Adaptive Fernlicht eine interessante Alternative zur Sichtverbesserung bei Nacht, da Schwarz-Weiß-Kameras für den sichtbaren Spektralbereich deutlich billiger sind als NIR-Kameras oder FIR-Kameras und Synergien zum Spurhalteassistenten und anderen Fahrerassistenzsystemen bieten. Ein großer Kostenfaktor ist aus heutiger Sicht der LED-Scheinwerfer. LED-Scheinwerfer werden jedoch bald Stand der Technik sein und auch diesen Kostenfaktor senken.

Die automatische Erkennung von Fahrzeugen bei Nacht ist im Gegensatz zur Erkennung von Lebewesen viel einfacher. Das Rechnersehen kann bereits heute die automatische Erkennung von Scheinwerfern in der Dunkelheit verlässlich leisten. Selbst ohne Unterstützung durch Radarsensoren ist die Erkennungssicherheit sehr hoch. Dennoch wird es vorkommen, dass das System andere Verkehrsteilnehmer nicht erkennt, weil deren Scheinwerfer beispielsweise in langen Kurven durch Leitplanken verdeckt sind oder an Kreuzungen kaum im Bild sichtbar sind. Die Blendung der Verkehrsteilnehmer stellt eine Verkehrsgefährdung dar. Die Erkennung von aktiven Lichtquellen, die nicht zu anderen Verkehrsteilnehmern gehören, wie beispielsweise Straßenbeleuchtungen oder Verkehrsinselbeleuchtungen, ist weniger kritisch, da ihre Umgebung ausgeleuchtet ist und das Ablenden des LED-Scheinwerfers sich in diesem Bereich nicht nachteilig auswirkt. Das System muss diese Fälle dennoch vermeiden, da unnötiges Auf- und Ablenden die Aufmerksamkeit des Fahrers auf das sich ändernde Lichtbild lenkt.

5.5 Der aktive Scheinwerfer

Etwa zeitgleich, jedoch völlig unabhängig von dieser Arbeit, entstand an der Universität Paderborn eine Dissertation mit dem Titel “Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums” [Ros05]. ROSLAK verwendet einen Scheinwerfer, der aus einer UHV-Lampe mit einer Leistung von $P = 200\text{ W}$ und einem DMD-Chip besteht. Der Aufbau ist auf einer zusätzlichen Halterung an der Fahrzeugfront angebracht und unterliegt in seinen lichttechnischen Eigenschaften dem heutigen Abblend- und Fernlicht. Um die Entfernung der anderen Verkehrsteilnehmer zu berechnen, verwendet er zusätzlich einen Radarsensor. Der Scheinwerfer fungiert in den Fahrversuchen zur Bewertung des Systems sowohl als aktives Fernlicht als auch als übliches Fernlicht, wenn der DMD-Chip nicht angesteuert ist.

Das Ergebnis vorliegender Arbeit ist ein Scheinwerfer, der die neue Funktionalität erfüllt und dabei ohne zusätzliche Anbauten im Bauraum eines Serienfahrzeugs Platz findet sowie in seiner Ausleuchtung dem Stand der Technik heutiger Scheinwerfer entspricht. Diese Eigenschaft ist auch notwendig, damit Testpersonen das Adaptive Fernlicht sowohl mit heutigen Scheinwerfern mit Gasentladungslampen als auch mit rein anzeigenden und hervorhebenden NightVision-Systemen realistisch vergleichen können.



6 Fahrversuche

Die vorangegangenen Kapitel haben eine Reihe unterschiedlicher Ansätze zur Sichtverbesserung bei Nacht vorgestellt, theoretisch bewertet und miteinander verglichen. Für eine abschließende Bewertung ist jedoch die subjektive Empfindung des Nutzers ausschlaggebend. Aus diesem Grund war auch die Durchführung von Fahrversuchen Inhalt dieser Arbeit, bei denen Probanden die unterschiedlichen Systemausprägungen und die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systeme subjektiv bewerteten.

Die folgenden Abschnitte beschreiben den Untersuchungsgegenstand der Fahrversuche und den zur Durchführung der Fahrversuche aufgebauten Versuchsträger.

6.1 Untersuchungsgegenstand der Fahrversuche und Unterschiedshypothesen

Ziel der Probandenuntersuchung ist die Bewertung der Systeme durch potenzielle Nutzer. Die Untersuchung soll grundlegende Fragen zu klassischen NightVision-Systemen und den im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigten Alternativen beantworten. Dazu gehört die Bewertung des Sensoransatzes und der Anzeige. Aus dieser Anforderung und den Ausführungen aus Kapitel 2 und 3 leiten sich folgende Unterschiedshypothesen ab, die es zu überprüfen gilt.

- Unterschiedshypothese 1: Probanden bevorzugen rein anzeigende FIR-Systeme gegenüber rein anzeigenden NIR-Systemen
- Unterschiedshypothese 2: Probanden weisen rein anzeigenden FIR-Systemen eine höhere Warnfähigkeit als rein anzeigenden NIR-Systemen zu
- Unterschiedshypothese 3: Probanden bevorzugen die Anzeige des Bildes im Display des Kombiinstrumentes
- Unterschiedshypothese 4: Probanden bevorzugen ein hervorhebendes FIR-System gegenüber einem rein bildgebenden FIR-System
- Unterschiedshypothese 5: Probanden bevorzugen das Adaptive Fernlicht gegenüber dem besten NightVision-System aus Hypothesen 1 bis 4

Die Fahrversuche überprüfen diese Hypothesen mit Hilfe subjektiver Bewertungen der Probanden. Auf Basis eines Fragenkatalogs, den die Probanden für jedes System beantworten, soll die Untersuchung eine Rangfolge der Kameras und der Anzeigen bei rein bildgebenden Systemen liefern. Abschnitt 6.3 beschreibt das Versuchsdesign und geht in Teilen auf den Fragebogen ein, der im Anhang vollständig zu finden ist.

6.2 Versuchsträger

Für die Durchführung der Probandenversuche war der Aufbau eines Versuchsträgers notwendig, der ebenfalls Teil der vorliegenden Arbeit war. Es handelt sich dabei um einen Audi A8 der dritten Generation, der zu einem NightVision-Versuchsträger umgerüstet wurde. Die Umrüstung beinhaltet die Planung der zu integrierenden Systeme, die Auslegung der Schnittstellen der Systeme, die Auslegung der Bedienung des Fahrzeugs sowie die Organisation und Koordination des Aufbaus. Der mechanische und elektrische Aufbau selbst erfolgte bei einem Dienstleistungsunternehmen für Fahrzeugumbauten.

Das Fahrzeug ist mit zwei FIR-Systemen und zwei NIR-Systemen ausgestattet. Die jeweils doppelte Ausführung der beiden NightVision-Systemansätze ermöglicht den Vergleich verschiedener Varianten. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der verbauten Kameras.

Die FIR-Kameras sind direkt hinter dem Kühlergrill vor dem Kühler verbaut. Sie erfassen das Vorfeld des Fahrzeugs, wie in Bild 6.1 gezeigt, durch die äußeren Audi-Ringe. Geschirmte Kabel leiten die analogen Bilddaten der Kameras durch den Motorraum zu einem Video-Umschalter im Handschuhfach.

Die NIR-Kameras sind unter dem Dachmodul des Fahrzeugs direkt hinter der Frontscheibe verbaut und haben Streulichtblenden, die sie vor Lichtreflexionen von der Motorhaube des Fahrzeugs und vom Armaturenbrett schützen.

	NIR1	NIR2	FIR1	FIR2
Art	CCD	CMOS	BST	VOx
Auflösung	640 x 480	640 x 480	320 x 240	320 x 240
Horizontaler Blickwinkel	17°	24°	36°	36°
Bildtiefe	8 Bit	12 Bit	14 Bit	14 Bit
Dynamik	60 dB	120 dB	-	-

Tabelle 6.1: Überblick über die im Fahrzeug verbauten Kameras

Die Kameras sind mit Schnappverschlüssen aus der professionellen Fotografie an einer Halterung am Dachmodul befestigt, die den Austausch der Kameras binnen Sekunden



Bild 6.1 : Einbauorte der Kameras

ermöglichen. Auch hier leiten geschirmte Kabel die Bilddaten der Kameras über die A-Säule des Fahrzeugs in den bereits angesprochenen Video-Umschalter. Der Umschalter lässt eine Kamera auswählen und verteilt das Bild dieser Kamera auf alle vorhandenen Bildschirme im Fahrzeug. Die Auswahl der Kamera erfolgt in einer Bedieneinheit in der Mittelkonsole des Fahrzeugs (Bild 6.2).

Die Anzahl der gleichzeitig aktiven Bildschirme ist frei wählbar. Die Auswahl der Kameras ist jedoch auf eine beschränkt, da die Anzeige von zwei verschiedenen Kamerabildern in zwei verschiedenen Anzeigen nicht aussagekräftig ist. Die Anzeige eines Kamerabildes in unterschiedlichen Displays ist bei der Bewertung der Anzeigen sinnvoll. Um dennoch eine Vergleichbarkeit der Kameras und ihrer Bilddaten zu ermöglichen, liefert der Video-Umschalter ein Vier-Quadranten-Bild nach Bild 6.3, das die simultane Anzeige beziehungsweise Aufnahme der vier Kamerabilder ermöglicht.

Im Handschuhfach befindet sich außerdem ein Bildverarbeitungsrechner mit Intel Pentium III Prozessor mit 1 Ghz Taktrate und 128 MB Arbeitsspeicher, auf dem die Implementierung der Fahrbahnerkennung, der Objektextraktion und der Fahrzeugerkennung erfolg-

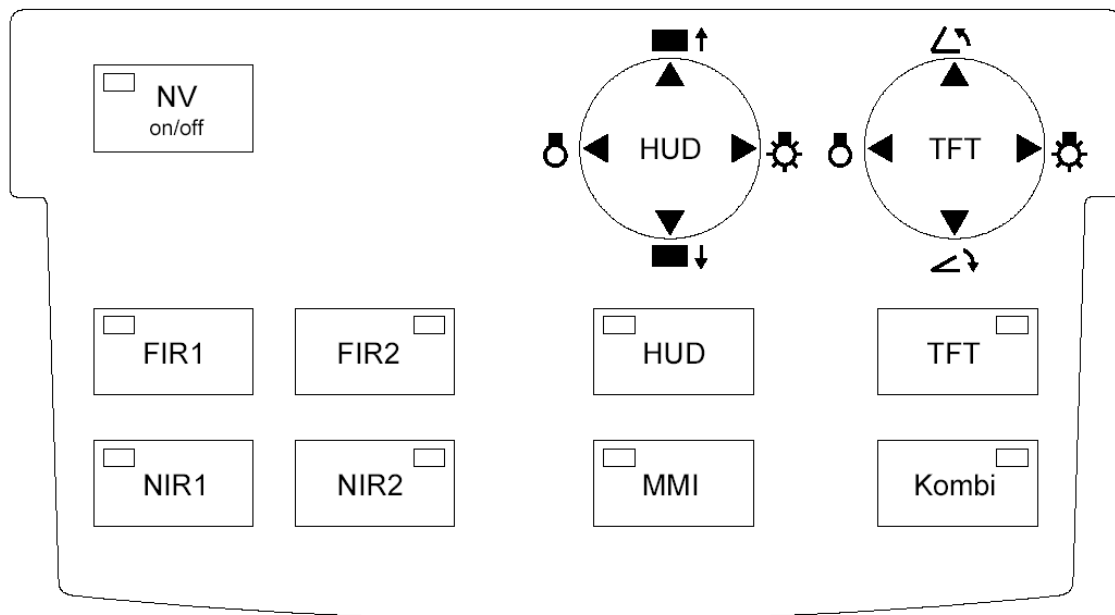


Bild 6.2 : Bedieneinheit

te. Dieser liest bei Bedarf die Daten der Wärmebildkamera beziehungsweise der CMOS-Kamera direkt in einen analogen beziehungsweise digitalen Framegrabber der Firma Matrox ein, verarbeitet die Daten und speist sie dann wieder in den Video-Umschalter zurück, der das Bild auf die Anzeigen verteilt.

Im Audi A8 sind serienmäßig ein Kombidisplay und ein Mitteldisplay verbaut. Die Abschnitte 2.2.2 und 2.2.3 haben diese bereits beschrieben. Das Mitteldisplay kann das Bild der Kameras mit geringem Aufwand darstellen, da es bereits serienmäßig Videobilder anzeigen kann. Das Kombidisplay ist in der Serienvariante nicht für die Anzeige eines Videobildes vorgesehen und erforderte daher zunächst elektronische Erweiterungen der Leiterplatten für die Ansteuerung. Weiterhin ist das Kombidisplay in der Serienausführung im Audi A8 teilweise durch die Rundinstrumente verdeckt und befindet sich tief im Kombiinstrument. Tuben um die Rundinstrumente verstärken diesen Tiefeneffekt. Aus diesem Grund sind im Versuchsträger die Rundinstrumente samt den Tuben nach außen verlagert, so dass sie den Blick auf die Bildschirmfläche ganz freigeben. Weiterhin schmiegt sich das Kombidisplay im Versuchsträger bündig auf der Höhe der Ziffernblätter an die Rundinstrumente an, so dass der Tiefeneffekt stark reduziert ist. Die serienmäßig vorhandenen Displays zeigen ihre gewöhnlichen Anzeigehalte an, wenn sie nicht für die Anzeige des NightVision-Bildes ausgewählt sind.

Der größte Aufwand bei der Umrüstung des Fahrzeugs entstand durch die Integration eines HUDs. Das HUD hat eine virtuelle Distanz von etwa 2,2 m vom Betrachter und eine Bildgröße von $2,5^\circ \times 5^\circ$, beziehungsweise 9 cm x 18 cm bei einer Auflösung von



Bild 6.3 : Vier-Quadranten-Bild

180 x 360 Bildpunkten. Es handelt sich um ein vollfarbenfähiges Display, dessen Weißpunkt auf das Farbempfinden bei Nacht abgeglichen ist. Helligkeit und Höhe des HUDs lassen sich an der Bedieneinheit verstellen. Die Beleuchtungsintensität des HUDs ist zwischen 3 und 4000 cd/m^2 regelbar und damit auch für Taganwendungen hell genug.

Für das HUD und die NIR-Kameras hinter der Frontscheibe war eine besondere Scheibe notwendig. Die umgerüstete Scheibe des Versuchsträgers besteht aus Klarglas, das die NIR-Strahlung weniger dämpft als das serienmäßig verbaute Grünglas. Der Siebdruck der Scheibe und der Graukeil, der vor Blendung bei tief stehender Sonne schützt, sind im Bereich der Kameras und des Regen-Licht-Sensors ausgespart. In die Scheibe ist zudem zur Vermeidung des Doppelbildes im HUD-Bild eine Keilfolie eingebettet.

Ein TFT-Klappdisplay sitzt in der Kombiutze und schwenkt bei Bedarf aus dieser heraus. Das TFT-Display ist ein Produkt eines Herstellers von Nachrüstlösungen aus dem Infotainment-Bereich. Die Klappmechanik ist aus einem Fahrzeugmodell eines anderen Automobilherstellers übernommen. Die Anpassung der vorhandenen Mechanik verringerte den Konstruktions- und Kostenaufwand. Die technischen Daten des Klappdisplays

sind im Vergleich zu den anderen Bildschirmen in Tabelle 6.2 angegeben. Die Bedieneinheit passt auch die Helligkeit und den Winkel des Klappdisplays an die Ansprüche des Fahrers an. Bild 6.4 zeigt das Klappdisplay im aufgeklappten Zustand: Es verdeckt bei der Sitzposition des 95%-Mannes weder die Sicht auf die Straße noch auf das HUD-Bild. Bei Nichtnutzung des Bildschirms verschwindet es in der Hutze.



Bild 6.4 : Kombidisplay und TFT-Klappdisplay

Das TFT-Display hat im Originalzustand einen großen Einblickwinkel. Die breite Abstrahlung der Displayinformation führte zur Spiegelung der Bildinhalte an der Frontscheibe. Bei Nacht stören diese Spiegelungen und müssen vermieden werden. Das Aufbringen einer Jalousiefolie auf die Oberfläche des Displays konnte den vertikalen Ausstrahlwinkel des Monitors reduzieren und die Spiegelungen an der Frontscheibe vermeiden.

Es sind keine wie in Abschnitt 2.2.7 angesprochenen selbst leuchtenden Stoffe in die Frontscheibe eingearbeitet. Diese Technik war zum Zeitpunkt des Fahrzeugaufbaus nicht verfügbar. Auch abstrakte Anzeigen nach Abschnitt 3.4.1 sind nicht im Fahrzeug vorhanden. Die Automobil- und Zuliefererindustrie bearbeitet diese Themen und entwickelt bereits die in Abschnitt 3.4.1 vorgestellten Anzeigen. Der Reifegrad der Anzeigen reicht

	Kombisdisplay	MMI-Display	Headup-Display	TFT-Klappdisplay
Art	TFT-LCD	TFT-LCD	hinterleuchtetes LCD	TFT-LCD
sichtbare Auflösung	320 x 240	480 x 240	360 x 180	400 x 133
sichtbares Format	4:3	16:9	2:1	3:1
sichtbare Größe	5 Zoll	7 Zoll	8 Zoll	5,2 Zoll
Abstand zum Fahrer	70 cm	75 cm	217 cm	73 cm
Blickrichtung (v/h)	ca. 18°/0°	ca. 20°/ca. 60°	ca. 5,2° - 7,3°/0°	ca. 12°/0°

Tabelle 6.2: Überblick über die Anzeigen im Versuchsträger

jedoch auf Grund ihrer prototypischen Umsetzung noch nicht für aussagekräftige Probandenuntersuchungen aus.

Die inneren Scheinwerfermodule des Versuchsträgers in Bild 6.1 sind NIR-Strahler. Es handelt sich dabei um Fernlichtmodule mit Interferenzfiltern. Der horizontale Ausstrahlungswinkel des NIR-Scheinwerfers beträgt etwa 24° und entspricht den Öffnungswinkeln der NIR-Kameras. Zur Wahrung der Augensicherheit schaltet ein Kontrollsystem die NIR-Scheinwerfer bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit unter 30 km/h ab. Die Abblend- und Fernlichtfunktion ist in den äußeren Modulen erhalten. Dadurch wurde die Integration des Adaptiven Scheinwerfers in den Versuchsträger besonders anspruchsvoll, da nun beide Module jedes Scheinwerfers bereits belegt sind und der Versuchsträger weder auf das Abblend- und das Fernlicht noch auf die NIR-Scheinwerfer verzichten kann, um für Nachtfahrten auf öffentlichen Straßen nutzbar zu bleiben beziehungsweise die NIR-NightVision-Funktionalität zu erhalten.

Die LED-Technik ist zum heutigen Zeitpunkt nicht ausgereift genug, um das äußere Modul durch einen Voll-LED-Scheinwerfer zu ersetzen, der sowohl das Abblendlicht als auch das Adaptive Fernlicht in LED-Technik darstellen kann. Zur Lösung dieses Bauraumproblems entstand im Rahmen dieser Arbeit ein neuer Scheinwerfer, der das Adaptive Fernlicht mit Hilfe eines so genannten Xenon-Scheinwerfers umsetzt.

Der Xenon-Scheinwerfer besteht aus einer Gasentladungslampe, die sich im ersten Brennpunkt eines rotations-elliptischen Reflektors befindet. Vor dem zweiten Brennpunkt des Reflektors befindet sich eine Metallblende, die sich wiederum im Brennpunkt einer Plan-Konvex-Linse befindet. Die Gasentladungslampe, der Reflektor und die Blende erzeugen auf diese Weise eine Lichtverteilung in der Ebene der Blende, die die Linse auf das Fahrzeugvorfeld abbildet. Die Blende formt die Ausleuchtungscharakteristik des Fernlichts. Durch Hinzu- oder Wegschwenken einer weiteren Blende, die die Ausleuchtcharakteristik des Abblendlichts mit dem Hell-Dunkel-Anstieg formt, kann der Xenon-Scheinwerfer mit nur einer Lichtquelle zwischen Abblendlicht und Fernlicht umschalten. Diese Eigenschaft gibt dem Bi-Xenon-Scheinwerfer seinen Namen.

Die Scheinwerfer des Versuchsträgers besitzen zusätzlich zu der Abblendlicht- und der Fernlichtblende jeweils vier weitere Blenden, die zusammen die Form der Abblendlichtblende ergeben. Vier Schrittmotoren können diese Blenden unabhängig voneinander in der Blendenebene senkrecht zur optischen Achse des Scheinwerfers aus dem Strahlengang heraus- und auch wieder hineinbewegen. Bild 6.5 stellt dies schematisch dar.

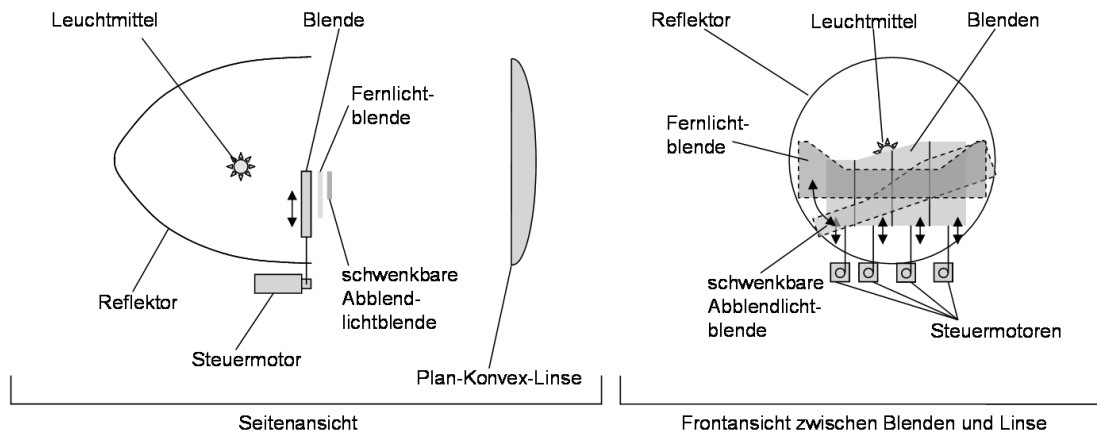


Bild 6.5 : Sicht auf einen Xenon-Scheinwerfer von der Seite und von vorne mit vier Blenden, vier Schrittmotoren und dem Verfahrensweg der Blenden

Während die Blende zur Umschaltung zwischen Abblend- und Fernlicht auf der linsenseitigen Position der Fernlichtblende sitzt, befinden sich die Einzelblenden auf der leuchtmittelseitigen Position der Fernlichtblende. Auf diese Weise bleibt die ursprüngliche Funktionalität des Scheinwerfers erhalten. Im Fernlichtmodus können die Einzelblenden die Ausleuchtcharakteristik des Fernlichts verändern, während sich im Abblendlichtmodus die Verschiebung der Einzelblenden nicht auswirkt, da sie hinter der Abblendlichtblende bleiben. Auf diese Weise entsteht eine Sicherheitsschaltung, die das Adaptive Fernlicht durch Abblenden am Lenkstockhebel ausschaltet, falls die Bildverarbeitung oder die Ansteuerung der Scheinwerfer ungünstige Ausleuchtungen erzeugt.

Bild 6.6 zeigt eine mögliche Auswirkung der Blendenanordnungen in der Draufsicht. Während ein LED-Scheinwerfer einzelne Bereiche vor dem Fahrzeug belichtet, stellt die Umsetzung mit dem Xenon-Scheinwerfer eine fahrbahnabhängige Leuchtweitensteuerung dar. Die Blenden sind genau so dimensioniert, dass eine Blende jeweils die eigene Fahrbahn, die Gegenfahrbahn und die Bereiche neben der Straße ausleuchtet. Dabei überlagern sich beide Scheinwerfer im Fernfeld und decken jeweils alle vier Bereiche auf der Straße ab. Da die Schrittmotoren bei der Verschiebung der einzelnen Blenden mit endlich kleinen Schrittweiten arbeiten und die Reichweitensteuerung sich hauptsächlich im Bereich einer Ausleuchtneigung von $\Delta = 0 \dots 1\% = 0^\circ \dots 0,57^\circ$ bewegt, ergibt sich keine kontinuierliche, sondern eine fünfstufige Steuerung des ausgeleuchteten Bereichs.

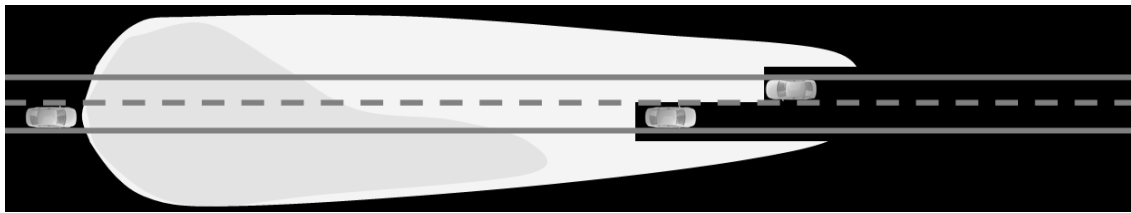


Bild 6.6 : Beispiel der Ausleuchtung mit dem Xenon-Scheinwerfer

Bild 6.7 zeigt den Zusammenhang zwischen dem berechneten Abstand eines Fahrzeugs und der Ausleuchtweite des Adaptiven Fernlichts auf Xenon-Basis auf einer ebenen Fläche. Diese Abweichungen gelten auch für die Angabe der Position anderer Verkehrsteilnehmer in Kugelkoordinaten mit den entsprechenden Winkeln. Das Bild verzichtet auf die Angabe der Winkel, da Entfernungen gängiger und einfacher einzuschätzen sind.

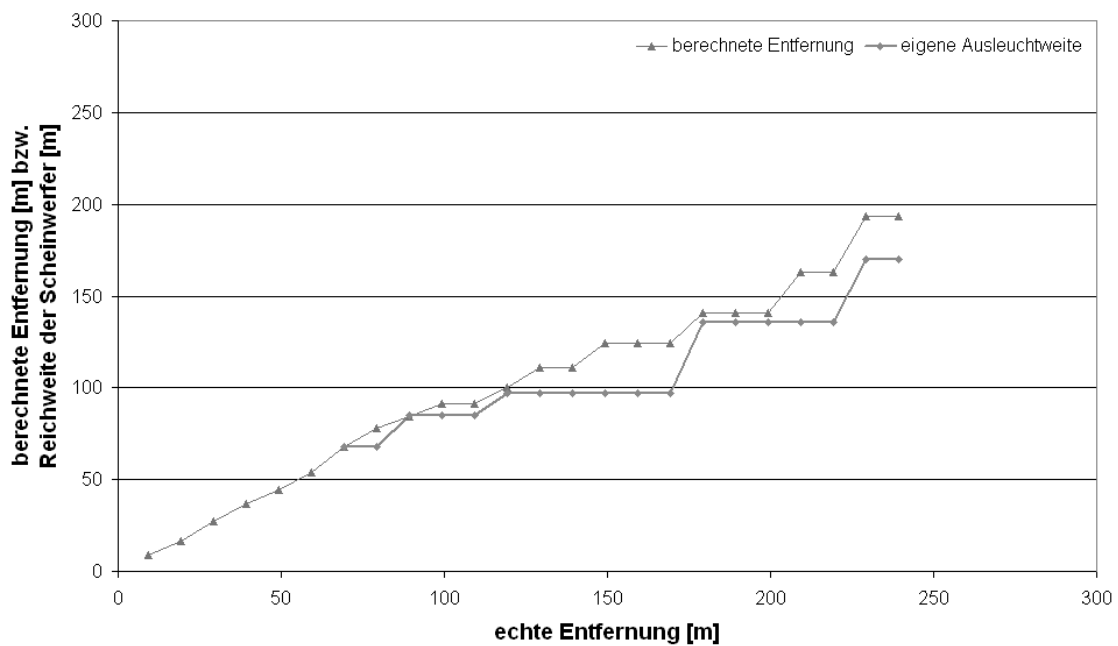
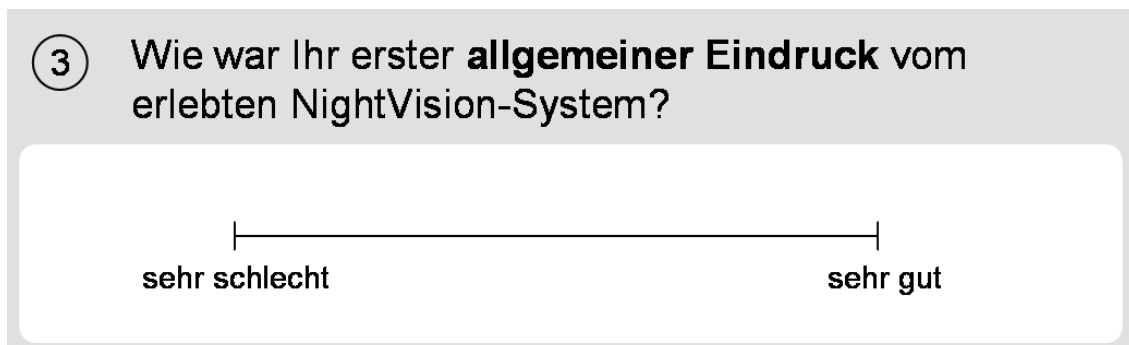


Bild 6.7 : Berechnete Entfernung eines Fahrzeugs und Ausleuchtweite des Adaptiven Xenon-Fernlichts

Schnittstellen zum CAN-Bus des Fahrzeugs erlauben den Zugriff auf die Botschaftsaktivitäten des Fahrzeugs. Der Bildverarbeitungsrechner steuert die Motoren der Blenden über einen privaten CAN-Bus zwischen Rechner und Scheinwerfer an.

6.3 Versuchsdesign

Ziel der Probandenuntersuchung ist die Bestimmung des besten Ansatzes für ein Sichtverbesserungssystem, wobei die Untersuchung natürlich nur die im Versuchsträger integrierten Systeme miteinander vergleichen und bewerten kann. Das Versuchsdesign sieht einen relativen Vergleich der Systeme untereinander vor. Der Versuchsträger bietet dabei den Vorteil, alle Systeme in einem einzigen Fahrzeug darzustellen, so dass sich der Einfluss des Fahrzeugs auf die Bewertung der Testpersonen bei allen Systemen gleichermaßen niederschlägt. Zur Bewertung der Systemeigenschaften erhalten die Probanden einen Fragebogen, in dem sie Fragen zu den Systemen beantworten. Die Probanden müssen die meisten Fragen auf einer Skala nach Bild 6.8 beantworten.



3 Wie war Ihr erster **allgemeiner Eindruck** vom erlebten NightVision-System?

sehr schlecht ————— sehr gut

Bild 6.8 : Beispiel einer Frage des Fragebogens mit Antwortskala

Die beiden Enden der Skala sind mit den extremen Antwortmöglichkeiten beschriftet, während zwischen den beiden Extremen weder Skalenstriche noch -beschriftungen vorhanden sind, um Anhäufungen an den Teilbeschriftungen zu verhindern.

Das Versuchsdesign muss neben dem Ziel der Überprüfung der Hypothesen auch den Möglichkeiten des Versuchsträgers und den Umweltbedingungen gerecht werden. Die Hypothesen und die erhoffte Rangfolge der Systeme erfordern den Vergleich aller Sensoren in allen Anzeigen. Allein bei den rein anzeigenden NightVision-Systemen bietet der Versuchsträger bei vier Kameras und vier Anzeigen bereits 16 Kombinationsmöglichkeiten. Hinzu kommen das hervorhebende System und das Adaptive Fernlicht. Dies ergibt 18 Versuchsfahrten pro Testperson und ist praktisch nicht durchführbar. Die Testfahrten können anwendungsbedingt nur bei Nacht stattfinden und würden sich deshalb über einen sehr langen Zeitraum erstrecken, bis alle Probanden mit allen Systemen gefahren sind. Zudem sind über einen langen Zeitraum keine konstanten Wetterbedingungen garantiert, so dass das Versuchsdesign den Vergleich in mehrere Teilversuche unterteilt.

Alle Versuche fanden im Sommer beziehungsweise Herbst statt, da die Wahrscheinlichkeit, Personen und Tiere anzutreffen, in warmen Monaten deutlich höher ist als in kalten.

Die Fahrbahnerkennung aus Kapitel 4 erfordert gute Kontraste zwischen Straße und Bebauung im Wärmebild, so dass im gewählten Zeitraum die Gefahr geringer war, an stark verregneten und kalten Abenden auf die Fahrbahnerkennung verzichten zu müssen.

6.3.1 Probandenuntersuchung zu NightVision-Kameras

Ziel des Versuches ist es, die beste aus den im Versuchsträger integrierten Kameras zu identifizieren, beziehungsweise die Unterschiedshypothesen 1 und 2 zu bestätigen.

Am Versuch nahmen 14 Mitarbeiter der Technischen Entwicklung der AUDI AG und zwei Mitarbeiter der Audi Electronics Venture GmbH teil. Die Probanden waren im Alter zwischen 24 und 54, hatten ein Durchschnittsalter von 38 Jahren und hatten eine jährliche Fahrleistung von mindestens 15000 km. Der Anteil an Männern und Frauen war gleich hoch. 75 % der Probanden hatten eine Sehhilfe und waren vorwiegend kurzsichtig. Keiner der Probanden hatte Vorerfahrungen mit den getesteten Systemen. Die Anzahl von 16 Probanden ist grundsätzlich zu gering, um unterschiedliche technische Auslegungsvarianten zu testen [Zöf01], jedoch hätte eine größere Anzahl an Probanden die Dauer der Untersuchung deutlich verlängert und zusätzlich erschwert, da die Testfahrten erst nach Einbruch der Dunkelheit stattfinden konnten. Die sich über einen längeren Zeitraum ändernden Wetterbedingungen hätten zudem die Vergleichbarkeit der einzelnen Testfahrten eingeschränkt. Die Ergebnisse der Untersuchungen können aus diesem Grund nur Tendenzen aufzeigen. Für repräsentative Aussagen müssen Untersuchungen mit deutlich mehr Teilnehmern und weniger Varianten stattfinden.

Die Versuche fanden von September bis November 2005 zwischen 20:30 und 23:00 Uhr, jedoch immer nach Einbruch der Dunkelheit statt. Die Probanden formulierten in einer Interview-Frage ihre Erwartungen an ein NightVision-System. Anschließend brachten sie die verschiedenen Vorteile des Systems (siehe Frage II des Fragebogens) in eine Rangfolge. Der Versuchsleiter erklärte dem Probanden vor jeder Fahrt das zu erprobende System. Die Fahrt führte über die in Bild 6.9 eingezeichnete Route, die eine Gesamtlänge von 23 km hat und sich durch viele Kurven, Feld- und Waldgebiete auszeichnet. 16% der Strecke führen durch Ortsteile und 84% über Landstraßen, wobei etwa die Hälfte dieser Streckenanteile gut, die andere Hälfte eher schlecht ausgebaut ist. Die einmalige Fahrt der Strecke dauert etwa 25 Minuten. Der Versuchsleiter navigierte den Probanden auf der Route, so dass er nicht auf die Streckenführung achten musste.

Jeder Proband fuhr die Strecke zweimal hin und zurück und nutzte je eine Kamera in einem Bildschirm, so dass sich zwischen den Fahrten die Kamera änderte, nicht jedoch die Anzeige. Die Fahrer testeten die Kameras jedoch in unterschiedlichen Bildschirmen, so dass der Bildschirm keinen Einfluss auf die Gesamtbewertung nehmen konnte. Um Reihenfolgen-, Gewöhnungs- und Erschöpfungseffekte der Fahrer auszugleichen, war die

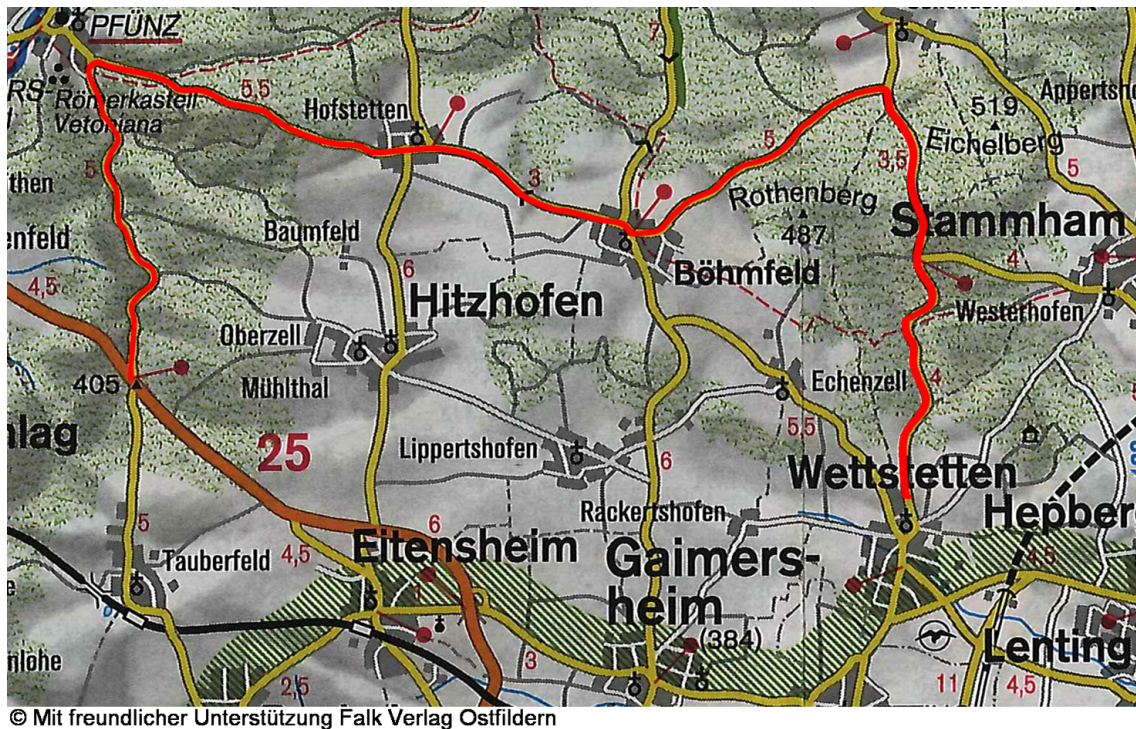


Bild 6.9 : Versuchsstrecke für Probandenuntersuchung

Reihenfolge der Kameras unter den Fahrern permutiert. Für eine vollständige Permutation bei vier Varianten sind pro Anzeige mindestens $4! = 24$ Probanden notwendig. Um dennoch eine vollständige Permutation zu erreichen, bildeten die beiden NIR-Systeme und die beiden FIR-Systeme jeweils eine Gruppe. Das Versuchsdesign permutierte dann zum einen die beiden Gruppen und zum anderen die beiden Varianten innerhalb der Gruppe. Auf diese Weise entstand die Permutationstabelle nach Tabelle 6.3.

Diese Aufteilung nach Gruppen hat den zusätzlichen Vorteil, dass mit der Permutation der Gruppen und der Systeme innerhalb der Gruppen für jede Anzeige eine Permutation stattfindet. Weiterhin hat diese Gruppenbildung den Vorteil, dass die Probanden immer die beiden verwandten Systeme direkt nacheinander testen und diese dann besser miteinander vergleichen können.

Der Fahrer musste nach jeder Teilstrecke den Fragebogen ausfüllen. Dabei nutzte der Proband immer denselben Bogen und konnte nach der ersten Fahrt die darauf folgenden Fahrten direkt im Vergleich zu den vorhergehenden bewerten. Der Versuchsleiter gab die nächste Fahrt erst nach der Beantwortung der Fragen frei. Am Ende aller Fahrten waren die Skalen aller Fragen mit vier Bewertungen beschriftet. Die Probanden durften sich während des gesamten Versuchs mit dem Versuchsleiter unterhalten sowie das Radio beziehungsweise den CD-Player nutzen. Fragen zu den Systemen beantwortete der

Versuchsperson Nr.	Kamera 1	Kamera 2	Kamera 3	Kamera 4	Anzeige
1	CCD	CMOS	VOx	BST	HUD
2	CMOS	CCD	BST	VOx	HUD
3	BST	VOx	CCD	CMOS	HUD
4	VOx	BST	CMOS	CCD	HUD
5	CCD	CMOS	BST	VOx	Kombidisplay
6	CMOS	CCD	VOx	BST	Kombidisplay
7	BST	VOx	CCD	CMOS	Kombidisplay
8	VOx	BST	CMOS	CCD	Kombidisplay
9	CCD	CMOS	BST	VOx	MMI-Display
10	CMOS	CCD	VOx	BST	MMI-Display
11	BST	VOx	CCD	CMOS	MMI-Display
12	VOx	BST	CMOS	CCD	MMI-Display
13	CCD	CMOS	BST	VOx	TFT-Display
14	CMOS	CCD	VOx	BST	TFT-Display
15	BST	VOx	CCD	CMOS	TFT-Display
16	VOx	BST	CMOS	CCD	TFT-Display

Tabelle 6.3: Permutationstabelle für Kameraversuch

Versuchsleiter nur dann, wenn keine Gefahr bestand, dass die Antworten einen Einfluss auf die Bewertung des Probanden haben. Am Ende der Testfahrten mit allen Systemen musste der Proband seinen Favoriten unter den beiden NIR-Systemen und den beiden FIR-Systemen angeben. Der Fragebogen endete mit der Festlegung auf NIR oder FIR als besseren Sensoransatz.

Die Beobachtungen des Versuchsleiters und auch die Auswertung der Fragebögen haben gezeigt, dass die Probanden die vorgegebene Skala nach Bild 6.8 unterschiedlich genutzt haben: Während einige die gesamte zur Verfügung stehende Breite der Skala verwendeten, beschränkten sich andere Probanden auf einen kleinen Teil der Skala, obwohl sie angaben, einen deutlichen Unterschied in den Systemen gesehen zu haben. Auch für die Absolutbewertung hatte jeder Proband eine eigene Verschiebung auf der Skala, so dass einige Probanden sagten, dass ihnen das erlebte System nicht gefallen habe, obwohl sich ihre Bewertung dennoch eher auf der rechten Hälfte der Skala befand. Auf Grund des unterschiedlichen Antwortverhaltens der Probanden ist eine absolute Auswertung der Angaben nicht sinnvoll: Die Absolutangaben unterliegen einer probandenabhängigen Basisverschiebung und die Abstände der Bewertungen basieren auf einem probandenabhängigen Faktor. Grundsätzlich wäre es möglich gewesen, die Antworten aller Teilnehmer auf Basis der schlechtesten und besten Bewertung einer Frage zu normieren, dabei würden aber die Antworten der Probanden verfälscht. Die Auswertung der Fragen beschränkte sich deshalb immer auf die Ermittlung einer Rangfolge der bewerteten Systeme, da nur die Rangfolge der Systeme ohne Verzerrungen und Verschiebungen der Antworten

eindeutig vorhanden war. Die Überprüfung der Signifikanzen erfolgte aus diesem Grund paarweise mit dem Wilcoxon-Test für abhängige Variablen [Zöf01]. Die Auswertung erfolgte mit dem Statistikprogramm SPSS.

Antworten der Probanden

Vor Beginn der Testfahrt mussten die Probanden eine Interviewfrage beantworten und verschiedene mögliche Eigenschaften von NightVision-Systemen in eine Rangfolge bringen. Im Folgenden geben Tripel in Klammern oder in Tabellen den Testwert, den Freiheitsgrad und das Signifikanzniveau des Testergebnisses an. Der Fragebogen zum Fahrversuch, die Altersverteilung der Probanden und die Antworten in Form von Diagrammen befinden sich im Anhang B.

Auf die Frage “Welche Erwartungen haben Sie allgemein an ein NightVision-System?” antworteten die Probanden, dass sie von dem System eine bessere Sicht (14 Nennungen) erwarten, hauptsächlich um Personen (5 Nennungen) und Tiere (5 Nennungen) besser erkennen und sicherer fahren zu können. Das System soll den Fahrer unterstützen (4 Nennungen), insbesondere auch bei schlechtem Wetter (4 Nennungen). Idealerweise soll das System nicht lebendige Objekte (3 Nennungen) anzeigen, Blendung vermeiden (3 Nennungen) und Gefahrensituationen früher erkennbar machen (3 Nennungen) oder sogar vor Gefahren warnen (3 Nennungen). Bei dieser Interviewfrage waren keine Antwortmöglichkeiten vorgegeben, so dass die befragten Personen tatsächlich Ihre eigenen Erwartungen formulierten.

Im zweiten Schritt mussten die Versuchspersonen die Eigenschaften “andere Fahrzeuge erkennen”, “Gegenstände auf der Fahrbahn erkennen”, “Wildwechsel erkennen”, “Personen erkennen”, “Fahrbahnverlauf erkennen”, “Blendeffekte durch Gegenverkehr vermeiden”, “Straßenschilder erkennen” und “Objekte neben der Fahrbahn erkennen” der Wichtigkeit nach sortieren. Die Sortierung der Probanden ergab, dass sie die Erkennung von Personen als signifikant wichtiger als die Erkennung von Gegenständen auf der Fahrbahn (4; 1; 0,046) und auch signifikant wichtiger als die Erkennung von Wildwechsel (6,25; 1; 0,012) erachteten. Die Erkennung von Gegenständen auf der Fahrbahn ist ihnen jedoch signifikant wichtiger (6,25; 1; 0,012) als die Vermeidung von Blendung durch Gegenverkehr. Weitere Signifikanzen zur Rangfolge der Eigenschaften waren nicht vorhanden.

Leider ergaben sich auch bei den anderen Fragen kaum signifikante Unterschiede. Die Fragen und die Testergebnisse sind in Tabelle 6.4 unter Angabe des Testwertes, des Freiheitsgrades und der Signifikanz zusammengefasst. Ergebnisse, die mindestens signifikant zu Gunsten einer Kamera ausfallen, sind der Legende entsprechend in der Farbe der Kamera hervorgehoben. Unterschiede, die nur knapp die Signifikanz verfehlen, sind in der Farbe der besseren Kamera umrahmt.

Das CMOS-System hinterlässt im Vergleich zu allen anderen Systemen einen signifikant besseren ersten Eindruck. Wie zu erwarten war, bewerteten die Probanden die Art der Darstellung des Fahrzeugvorfelds und die Bildqualität des CMOS-Systems hochsignifikant besser als die Darstellungsart der FIR-Systeme. Aus der Bildart, der Bildqualität und der gewohnten Darstellung der NIR-Systeme folgt dann auch die signifikant bessere Orientierbarkeit der Probanden im NIR-Bild.

Die Probanden hielten das pyroelektrische FIR-System im Vergleich zum bolometrischen System für signifikant serientauglicher, wobei die Frage nach dem favorisierten FIR-System keinen signifikanten Unterschied fand, da das Ergebnis 9:7 für das pyroelektrische System ausfiel. Einigen Probanden ist das stillstehende Bild der Mikrobolometer-Kamera während der Kalibrierung aufgefallen, was sie als Defekt der Kamera interpretierten und als störend empfanden.

Das CMOS-NIR-System ziehen die Testpersonen auf signifikante Weise dem CCD-NIR-System vor, was das Ergebnis von 12:4 für das CMOS-System verdeutlicht. Dies kann in der signifikant höheren Blendung im CCD-System begründet sein. Obwohl das CMOS-System signifikant bessere Noten erhält als die FIR-Systeme, war das Ergebnis des Paarvergleichs zwischen NIR und FIR mit 9:7 weit von einer Signifikanz entfernt.

Die Auswertung der Fragen auf Basis ordinaler Skalen mit dem T-Test nach Student [Zöf01] begünstigt die Ergebnisse geringfügig für das Nahinfrarot-System, wobei sie keine weiteren Signifikanzen für den NIR-Ansatz liefert.

Die Ergebnisse des Versuchs geben leider keine eindeutige Aussage über den besseren Sensoransatz. Bei NIR-Systemen ist zumindest erkennbar, dass der Einsatz einer CMOS-Kamera zu größerem Erfolg führen wird, da CMOS-NIR-Systeme bezüglich des ersten Eindrucks und der Blendung deutlich besser bewertet wurden als die CCD-Version. Der Vergleich zwischen der pyroelektrischen und der mikrobolometrischen Wärmebildkamera hingegen lässt keinen Favoriten ausfindig machen. Beim Vergleich zwischen Nah- und Ferninfrarotsystemen bestechen NIR-Systeme durch die bessere Bildqualität und die bessere Bilddarstellung sowie die damit verbundene bessere Orientierung im Bild, jedoch reicht dies bei der Festlegung auf einen Sensoransatz nicht für eine eindeutige Aussage gegen Ferninfrarot-Systeme und für Nahinfrarotsysteme aus. Auf Grund der Versuchsergebnisse muss damit sowohl die erste als auch die zweite Unterschiedshypothese verworfen werden, da die Probanden FIR-Systeme NIR-Systemen nicht vorziehen und ihnen auch keine größere Warnfähigkeit zugestehen.

Fragen	Kameras					
	CCD vs. CMOS	CCD vs. BST	CCD vs. VOx	CMOS vs. BST	CMOS vs. VOx	BST vs. VOx
Wie war Ihr erster allgemeiner Eindruck vom erlebten NightVision-System?	-2,207; 15; 0,027	-0,554; 15; 0,579	-0,630; 15; 0,529	-2,078; 15; 0,038	-2,151; 15; 0,031	-0,276; 15; 0,783
Wurden Ihre Erwartungen an Ihr Wunschsystem vom erlebten System erfüllt?	-0,471; 15; 0,637	-0,393; 15; 0,694	-0,787; 15; 0,431	-0,908; 15; 0,364	-1,186; 15; 0,236	-0,426; 15; 0,670
Hatten Sie das Gefühl, mit dem erlebten System mehr zu sehen als mit dem Abblendlicht allein?	-0,852; 15; 0,394	-0,026; 15; 0,979	-0,400; 15; 0,689	-0,850; 15; 0,396	-1,138; 15; 0,255	-0,691; 15; 0,490
War die Sichtweite des Systems ausreichend?	-1,000; 15; 0,317	0,000; 15; 1,000	-0,577; 15; 0,564	-0,577; 15; 0,564	-1,414; 15; 0,157	-0,577; 15; 0,564
Wie bewerten Sie den Nutzen des erlebten Systems auf der Landstraße?	-0,517; 15; 0,605	-0,708; 15; 0,479	-1,211; 15; 0,226	-1,071; 15; 0,284	-1,390; 15; 0,164	-0,655; 15; 0,512
Wie bewerten Sie den Nutzen des erlebten Systems in der Stadt/im Ort?	-1,252; 15; 0,210	-0,838; 15; 0,402	-0,663; 15; 0,507	-0,027; 15; 0,979	-0,264; 15; 0,792	-0,423; 15; 0,672
Wie bewerten Sie den Nutzen des erlebten Systems in Kurven?	-1,279; 15; 0,201	-0,177; 15; 0,860	-0,578; 15; 0,563	-0,701; 15; 0,483	-1,246; 15; 0,213	-0,546; 15; 0,585
Wie bewerten Sie den Nutzen des erlebten Systems auf geraden Strecken?	-0,632; 15; 0,527	-0,343; 15; 0,732	-0,761; 15; 0,447	-0,921; 15; 0,357	-1,293; 15; 0,196	-0,483; 15; 0,629
Trauen Sie dem erlebten System zu, dass es auf Gefahren auf/neben der Straße aufmerksam macht?	-1,877; 15; 0,060	-1,038; 15; 0,299	-1,101; 15; 0,271	-0,185; 15; 0,853	-0,577; 15; 0,564	-0,462; 15; 0,644
Wie beurteilen Sie die Bildqualität des Systems bezüglich der Art des Bildes?	-1,642; 15; 0,101	-1,127; 15; 0,260	-1,393; 15; 0,164	-2,899; 15; 0,004	-2,518; 15; 0,012	-0,058; 15; 0,954
Wie beurteilen Sie die Bildqualität des Systems bezüglich Rauschen und Verzerrungen?	-1,429; 15; 0,153	-1,468; 15; 0,142	-1,640; 15; 0,101	-2,125; 15; 0,034	-2,301; 15; 0,021	-0,511; 15; 0,609
Wurden Sie durch Bildinhalte geblendet?	-2,646; 15; 0,008	-2,828; 15; 0,005	-2,309; 15; 0,021	-0,577; 15; 0,564	-0,447; 15; 0,655	0,000; 15; 1,000
Wie beurteilen Sie den von der Kamera erfassten Bildausschnitt bei kleiner Geschwindigkeit (<60km/h)?	-1,144; 15; 0,253	-0,353; 15; 0,724	-1,386; 15; 0,166	-0,744; 15; 0,457	-0,037; 15; 0,971	-0,546; 15; 0,585
Wie beurteilen Sie den von der Kamera erfassten Bildausschnitt bei großer Geschwindigkeit (>60km/h)?	-0,213; 15; 0,831	-0,096; 15; 0,923	-1,143; 15; 0,253	-0,143; 15; 0,887	-0,771; 15; 0,441	-1,428; 15; 0,153
Wie gelang Ihnen die Zordnung des Infrarotbilds zur direkt wahrgenommenen Umgebung?	-0,535; 15; 0,593	-2,538; 15; 0,011	-2,407; 15; 0,016	-2,598; 15; 0,009	-2,496; 15; 0,013	0,000; 15; 1,000
Konnten Sie für Sie relevante Informationen im Bild erkennen?	-0,471; 15; 0,637	-0,029; 15; 0,977	-0,819; 15; 0,413	-0,412; 15; 0,680	-1,219; 15; 0,223	-0,914; 15; 0,361
Empfanden Sie die Testfahrt ermüdender als eine entsprechende Nachtfahrt ohne NightVision-System?	0,000; 15; 1,000	-0,086; 15; 0,931	-0,404; 15; 0,686	-0,096; 15; 0,923	-0,223; 15; 0,824	-0,406; 15; 0,684
Empfanden Sie die Testfahrt anstrengender als eine entsprechende Nachtfahrt ohne NightVision-System?	-0,166; 15; 0,868	-1,004; 15; 0,315	-1,496; 15; 0,135	-0,799; 15; 0,425	-1,390; 15; 0,164	-1,328; 15; 0,184
Welche Schulnote würden Sie dem System geben? (T-Test nach Student)	2,117; 15; 0,051	-0,959; 15; 0,353	-0,849; 15; 0,409	-3,846; 15; 0,002	-2,839; 15; 0,012	0,000; 15; 1,000
Könnte das System in dieser Form Ihrer Meinung nach in Serie gehen?	-1,732; 15; 0,083	-0,816; 15; 0,414	-1,414; 15; 0,157	-0,577; 15; 0,564	-2,333; 15; 0,020	-2,121; 15; 0,034
Welches NIR-System hat Ihnen subjektiv besser gefallen?	-2,000; 15; 0,046	-	-	-	-	-
Welches FIR-System hat Ihnen subjektiv besser gefallen?	-	-	-	-	-	-0,500; 15; 0,617
Welche Sensorprinzip hat Ihnen subjektiv besser gefallen?	-	-0,500; 15; 0,617				-

CCD

CMOS

BST

VOx

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Kamerastudie

Die Ergebnisse der Studie decken sich größtenteils mit Untersuchungen aus der Industrie und von Instituten, die bei Fahrstudien ebenfalls keine signifikante Bevorzugung eines bestehenden Ansatzes finden konnten [AALS05]. Gründe hierfür können die eingeschränkten Möglichkeiten einer solchen Studie sein: Die Testfahrten können erst nach Einbruch der Dunkelheit stattfinden, so dass der Zeitrahmen für die Fahrt begrenzt ist. NightVision ist ein neues und komplexes Assistenzsystem, an das sich die Probanden erst gewöhnen und dessen Nutzung sie auf Grund der unausgereiften Mensch-Maschine-Schnittstelle erst erlernen müssen. Vermutlich können sie die Systeme nach so kurzen Fahrten nicht umfassend bewerten und die Vor- und Nachteile der verschiedenen Sensoransätze ausfindig machen. Dabei haben NIR-Systeme bei kurzen Studien den Vorteil, dass die Eingewöhnungszeit auf Grund der Ähnlichkeit des Bildes mit der menschlichen visuellen Wahrnehmung kürzer ausfällt und NIR-Systeme eher der allgemeinen Vorstellung eines Nachtsichtsystems entsprechen. Längere Fahrten mit jedem einzelnen System würden den Probanden jedoch überfordern, wenn alle Fahrten an einem einzigen Abend stattfinden. Wenn die Fahrten hingegen an verschiedenen Abenden stattfinden, ist die Vergleichbarkeit der Fahrten nicht unbedingt gegeben. Im zweiten Fall steigt zudem der Aufwand der Studie überproportional an.

Der Versuchsleiter konnte bei den Testfahrten beobachten, dass das System bei einigen Probanden sein Ziel verfehlte, da diese ständig mit Fernlicht fuhren und selbst Objekte, die eindeutig im NightVision-Bildschirm erschienen, unabhängig vom Sensoransatz und vom Anzeigeort übersahen. Diese Beobachtung war besonders beim HeadUp-Display und beim Klappdisplay auf der Hutze sowie bei den FIR-Systemen verwunderlich, da die Objekte im direkten Sichtfeld des Fahrers waren. Diese Beobachtung verstärkt die These von GRÜNDL [Grü05], der NightVision nur ein Unfallvermeidungspotenzial von lediglich 1,6% bezogen auf alle Unfälle und 7,1% bezogen auf Nachtunfälle gibt. GRÜNDL weist NightVision hierbei in allen Unfallsituationen ein Unfallvermeidungspotenzial zu, in denen der Unfall allein auf die Dunkelheit, nicht aber auf Alkoholeinfluss, Müdigkeit des Fahrers oder zu hohe Geschwindigkeit zurückzuführen ist. Dieses Potenzial reduziert sich in der Praxis weiter, da in der Studie vollständig fahrtüchtige Probanden Gefahren im NightVision-Bild übersahen. Das System vereinnahmte einige Probanden offenbar so stark, dass sie sowohl bei entgegenkommendem als auch bei vorausfahrendem Verkehr vergaßen, das Fernlicht auszuschalten. Diese Beobachtungen und die Suche nach Verbesserungsmöglichkeiten führten zur Idee des Adaptiven Fernlichts.

6.3.2 Probandenuntersuchung zu Anzeigen

Der Probandenversuch zu den Anzeigen entspricht dem Versuch zu den Kameras, wobei anstelle der Kameras die Anzeigen variierten. Die Fahrer mussten hier nur mit dem pyroelektrischen FIR-System fahren, wobei jeder Fahrer die Bilder der Kamera während vier verschiedener Fahrten in je einer der vier Anzeigen des Versuchsträgers sah. Ziel der

ersten Untersuchung zu den Kameras war es, den besten Sensoransatz beziehungsweise die beste Kamera zu ermitteln, um das beste rein anzeigende System mit dem hervorhebenden System mit den Erweiterungen der Bilddarstellung aus Kapitel 4 zu vergleichen. Da die Ergebnisse des ersten Versuchs keine eindeutigen Aussagen zur Präferenz der Versuchspersonen erlauben, fiel die Wahl auf Basis anderer Kriterien auf die pyroelektrische Wärmebildkamera: Die Bildverarbeitungsalgorithmen aus Kapitel 4 bauen auf den Rohdaten der pyroelektrischen Kamera auf, so dass der Vergleich zwischen dem rein anzeigenden System und dem hervorhebenden System mit derselben Kamera stattfinden sollte. So können sich die Probanden auf die Unterschiede durch die Bildverarbeitung konzentrieren, während der Vergleich zwischen einem Ferninfrarotsystem mit Hervorhebung und einem Nahinfrarotsystem ohne Zusatzinformation gerade nach dem Ergebnis des vorhergehenden Versuchs zu unscharfen Aussagen führen würde. So könnten sich Probanden beispielsweise auf Grund ihrer Präferenz für den Sensoransatz für das Nahinfrarotsystem entscheiden, obwohl sie die Zusatzinformationen aus der Bildverarbeitung für sinnvoll erachten. Um zu erfahren, ob Probanden, die grundsätzlich ein rein anzeigendes Nahinfrarotsystem bevorzugen, auf Grund der Bildverarbeitung ihre Meinung zugunsten des Ferninfrarotsystems ändern, müsste der Versuch Probanden vorselektieren, die NIR-Systeme den FIR-Systemen vorziehen und die Studie mit ihnen durchführen.

Der Versuch zu den Anzeigen fand mit 21 Mitarbeitern der AUDI AG und 3 Mitarbeitern der Audi Electronics Venture GmbH statt. Die 13 Männer und 11 Frauen hatten ein Durchschnittsalter von 41 Jahren, waren zwischen 35 und 50 Jahre alt und hatten alle eine jährliche Fahrleistung von mindestens 10000 km. Die Probanden arbeiten in Unternehmensbereichen, in denen sie keine Berührungspunkte mit den getesteten Systemen haben. Die Studie fand zwischen Juni und August 2006 zwischen 21:00 Uhr und Mitternacht, jedoch immer nach Einbruch der Dunkelheit statt. Auch die Teststrecke und die Fahrtzeiten waren mit denen der ersten Studie identisch. Da die Bewertungen der Kamerastudie gezeigt haben, dass die Skala des verwendeten Fragebogens ungeeignet ist und personenspezifische Offsets und Skalierungsfaktoren einbringt, sind die Skalen der Bildschirmstudie zwar beschriftet, jedoch nicht mit Skalenstrichen versehen, um dennoch einer Häufung um Skalenstriche entgegenzuwirken (Bild 6.10).

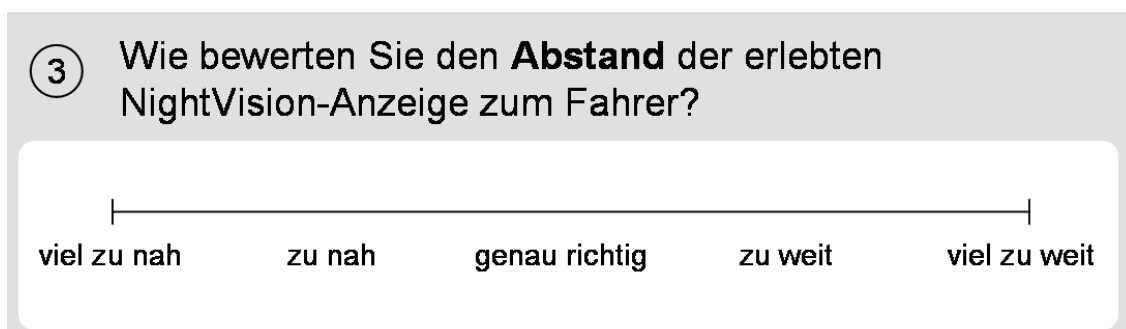


Bild 6.10 : Neue Skala für den Versuch zu den Anzeigevarianten

Weiterhin mussten die Probanden für jedes System einen neuen Fragebogen ausfüllen und hatten im Fragebogen keinen direkten Vergleich zu den vorher bewerteten Systemen. Der Fragebogen, die Altersverteilung der Probanden und die Antworten in Form von Diagrammen mit Minimal- und Maximalwerten sowie der 95%-Konfidenzintervalle finden sich im Anhang C. Die Anzahl von 24 Personen ermöglichte bei diesem Versuch die vollständige Permutation der Reihenfolge der Testvarianten.

Antworten der Probanden

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Tabelle 6.5 unter Angabe des Testwertes, des Freiheitsgrades und der Signifikanz angegeben. Signifikante Unterschiede sind in der Farbe der bezüglich der Frage besseren Anzeige hervorgehoben. Die Testwerte der Fragen 1 bis 13 lieferte der T-Test nach Student für verbundene Variablen, die Ergebnisse der Frage 14 stammen vom Wilcoxon-Test, da die Frage 14 die Rangfolge der Anzeigen wiedergibt und deshalb keine Analyse mit einem Test für ordinale Skalen erlaubt.

Das Ergebnis dieses Versuchs zeigt eine deutliche Bevorzugung des Kombidisplays und des TFT-Klappdisplays auf der Hutze. Sowohl bei der Frage nach der Rangfolge als auch bei der Bewertung nach Schulnoten erhalten diese beiden Bildschirme teilweise sogar höchstsignifikant bessere Beurteilungen als das HUD und das MMI-Display. Dabei fällt der Unterschied des Kombidisplays zum HUD und zum MMI-Display größer aus als der Unterschied des TFT-Klappdisplays. Die Unterschiede zwischen dem HUD und dem MMI-Display sowie dem Kombi und dem TFT-Klappdisplay sind nicht signifikant.

Den Vorteil der geringeren Akkommodation beim HUD konnten die Probanden bei sich nicht feststellen. Vielmehr gaben Sie an, beim HUD eher eine Beanspruchung der Augen zu spüren, so dass sie diese Beanspruchung signifikant höher als bei allen anderen Anzeigen bewerteten. Vermutlich steht hier der Einfluss der Bildqualität und damit der Erkennbarkeit der Bildinhalte im Vordergrund, da das HUD gegen alle anderen Bildschirme höchstsignifikant schlechtere Bewertungen erhält.

Interessant ist die Bewertung der Position der Anzeigen, da nur die Position des MMI-Displays teilweise höchstsignifikant schlechter ausfällt. Die Angabe, dass interessante Bildinhalte im MMI hochsignifikant seltener den Blick auf die Anzeige lenken konnten, bestätigt die schlechte Position dieser Anzeige. Zwischen HUD und MMI-Display scheint kein signifikanter Unterschied bei der Warnwirkung des Bildschirms bei auftretenden Objekten zu sein. Dies kann aber auch darin begründet liegen, dass die Probanden im kontrastarmen Bild des HUDs die Inhalte ohnehin nicht gut erkennen konnten. Gleichzeitig bewerteten die Probanden das HUD-Bild als mindestens hochsignifikant störender als die anderen Bildschirme. Auch das TFT-Klappdisplay, das sonst sehr gute Bewertungen erhielt, insbesondere auch zur Bildqualität und Erkennbarkeit, schneidet hochsignifikant schlechter als das Kombi-Display ab. Hier zeichnet sich ein Dilemma ab:

Fragen	Anzeigen				Kombi vs. MMI	Kombi vs. TFT	Kombi vs. HUD	MMI vs. TFT	MMI vs. HUD	TFT vs. HUD
Wie bewerten Sie die Größe der erlebten NightVision-Anzeige?	-0,181; 23; 0,858	-2,046; 23; 0,052	-1,896; 23; 0,074	-1,999; 23; 0,058	-1,655; 23; 0,112	0,210; 23; 0,835				
Wie bewerten Sie das Seitenverhältnis der erlebten NightVision-Anzeige?	-0,600; 23; 0,554	-3,169; 23; 0,004	-1,007; 23; 0,324	-2,812; 23; 0,010	-0,441; 23; 0,663	2,131; 23; 0,044				
Wie bewerten Sie den Abstand der erlebten NightVision-Anzeige zum Fahrer?	-3,060; 23; 0,006	0,334; 23; 0,741	-3,722; 23; 0,001	3,453; 23; 0,002	-0,500; 23; 0,622	-4,411; 23; 0,000				
Wie bewerten Sie die Einbauhöhe der erlebten NightVision-Anzeige?	-1,136; 23; 0,268	0,690; 23; 0,497	1,223; 23; 0,234	1,332; 23; 0,196	2,174; 23; 0,040	0,903; 23; 0,376				
Wie bewerten Sie die Position allgemein der erlebten NightVision-Anzeige?	5,302; 23; 0,000	0,502; 23; 0,620	0,753; 23; 0,459	-3,783; 23; 0,001	-3,146; 23; 0,005	0,439; 23; 0,665				
Wie bewerten Sie die Bildqualität der erlebten NightVision-Anzeige?	0,746; 23; 0,463	1,508; 23; 0,145	6,082; 23; 0,000	0,686; 23; 0,499	4,246; 23; 0,000	4,002; 23; 0,001				
Wie bewerten Sie die Erkennbarkeit der Anzeigehalte in der erlebten NightVision-Anzeige?	0,390; 23; 0,700	0,352; 23; 0,728	5,007; 23; 0,000	-0,056; 23; 0,956	3,893; 23; 0,001	4,683; 23; 0,000				
Haben relevante Bildinhalte Ihren Blick auf die NightVision-Anzeige gelenkt?	3,089; 22; 0,005	-0,672; 22; 0,509	1,437; 22; 0,165	-3,430; 22; 0,002	-1,130; 22; 0,270	2,211; 22; 0,038				
Wie bewerten Sie die Belastung während der Fahrt im Vergleich zur Fahrt ohne NightVision-System?	1,509; 23; 0,145	-0,737; 23; 0,469	2,865; 23; 0,009	-1,824; 23; 0,081	0,972; 23; 0,341	3,297; 23; 0,003				
Hat Sie die Anzeige des NightVision-Bildes gestört?	1,438; 19; 0,167	3,599; 19; 0,002	6,706; 19; 0,000	1,317; 19; 0,204	4,061; 19; 0,001	3,268; 19; 0,004				
Fühlten Sie bei der Nutzung eine besondere Anstrengung Ihrer Augen?	-0,581; 23; 0,567	0,358; 23; 0,724	3,890; 23; 0,001	0,716; 23; 0,481	3,843; 23; 0,001	3,620; 23; 0,001				
Wie hat Ihnen die Anzeige des NightVision-Bildes im erlebten Monitor im allgemeinen gefallen?	2,983; 23; 0,007	1,200; 23; 0,242	2,904; 23; 0,008	-1,507; 23; 0,145	0,331; 23; 0,744	2,647; 23; 0,014				
Welche Schulnote geben Sie der Anzeige?	-3,183; 23; 0,004	-1,330; 23; 0,197	-3,513; 23; 0,002	1,173; 23; 0,253	-0,712; 23; 0,483	-2,663; 23; 0,014				
Bringen Sie die Systeme in eine Rangfolge und beginnen Sie mit dem besten System (Wilcoxon-Test).	-3,527; 23; 0,000	-1,112; 23; 0,266	-2,610; 23; 0,009	-1,961; 23; 0,050	-0,101; 23; 0,919	-1,896; 23; 0,058				
	Kombi	MMI	TFT	HUD						

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Displaystudie

Zwar wünschen sich die Probanden das Bild im direkten oder zumindest im peripheren Blickfeld, gleichzeitig fühlen sie sich von der Anzeige gestört. Dies schlägt sich auch in der Belastung nieder, da die angegebene Belastung durch die Anzeigen mit steigender Entfernung vom direkten Blickfeld sinkt.

Bei den geometrischen Eigenschaften der Anzeigen ist interessant, dass das HUD zu weit entfernt scheint (höchstsignifikant gegenüber Kombidisplay und TFT-Klappdisplay). Das HUD zeigt kleine Bildinhalte und Details des NightVision-Bildes an, die in einer Entfernung von mehr als 2 m schwierig zu erkennen sind. Ein größeres HUD-Bild kann dem zwar entgegenwirken, würde aber dazu führen, dass die Position, die Belastung und der Störfaktor des HUD-Bildes schlechter bewertet werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, das virtuelle Bild näher an den Fahrer zu rücken. Mit der geringeren

Entfernung reduziert sich aber auch der Vorteil der geringeren Akkommodation, ohne dass sich die Bildqualität bemerkenswert verbessert, so dass dann die Anzeige in einem TFT-Klappdisplay vermutlich vorzuziehen ist.

Der MMI-Bildschirm erhält erwartungsgemäß schlechte Bewertungen bezüglich des Abstands zum Fahrer und der Einbauhöhe. Insgesamt sind die Bewertungen dieses Bildschirms jedoch so schlecht, dass er nicht für die Anzeige von NightVision in Frage kommen sollte. Der TFT-Bildschirm hingegen leidet stark an den gesetzlichen Vorschriften und der damit verbundenen Größe beziehungsweise dem breiten Format. Eine Erweiterung der Höhe würde dem Bildschirm jedoch mehr schaden, da er die Sicht durch die Frontscheibe stark beschränken würde und insbesondere kleinere Probanden diese Anzeige als störend bewerten würden.

Das Kombidisplay erhält insgesamt unerwartet gute Bewertungen und scheint einen guten Kompromiss darzustellen. Nicht einmal die Größe des Bildschirms ist ein Kritikpunkt: Diese ist an keine gesetzlichen Vorschriften gekoppelt und würde vermutlich den Störfaktor bei Vergrößerung der Anzeige nicht steigern. Die Bildschirmgröße beeinflusst das Design und die Ergonomie der Rundinstrumente: Ein größerer Bildschirm zwischen den Rundinstrumenten verschlechtert die Ablesbarkeit der analogen Anzeigen, da diese dazu kleiner oder ihre Abstände zueinander größer sein müssen. Alternativ ist die simulierte Anzeige der Rundinstrumente im Bildschirm möglich, wie sie Mercedes in Fahrzeugen mit NightVision zeigt: Ist NightVision nicht aktiv, erscheint im Bildschirm eine Simulation der analogen Geschwindigkeitsanzeige. Sobald der Fahrer NightVision aktiviert, zeigt das Display das Bild der NightVision-Kamera an, während sich die Anzeige der Geschwindigkeitsinformation auf einen Balken unter dem NightVision-Bild reduziert, der sich der Geschwindigkeit entsprechend horizontal ausdehnt.

Als Ergebnis des Versuchs ist festzuhalten, dass sich das Kombidisplay in dem genutzten Versuchsträger als beste Anzeige für NightVision-Systeme erwiesen hat und die Unterschiedshypothese 3 bestätigt werden kann. Die NightVision-Ausprägungen für den Hauptversuch sollten aus diesem Grund das Kombidisplay zur Anzeige nutzen.

6.3.3 Probandenuntersuchung zu den Gesamtsystemen

Der Hauptversuch soll schließlich die Ergebnisse der Arbeit mit heutigen Fahrzeugen vergleichen, die keine weitere Sichtverbesserung außer den Scheinwerfern besitzen. Die getesteten Systeme sind ein rein anzeigendes FIR-System mit der Anzeige im Kombidisplay, ein FIR-System mit Hervorhebung der Fahrbahnrande und der Einfärbung potenziell gefährlicher Objekte im Kombidisplay sowie das Adaptive Fernlicht. Alle Systeme sind im selben Versuchsträger eingebaut, so dass das Fahrzeug den gleichen Einfluss auf die Bewertung der Probanden hat. Die Systeme sind in Kapitel 4 und 5 beziehungsweise

Abschnitt 6.2 umfassend beschrieben, wobei das hervorhebende System die Fahrbahn­ränder dauerhaft anzeigt und alle Objekte einfärbt, die es erkannt hat. Die dauerhafte Anzeige der Fahrbahn­ränder ermöglicht das System dadurch, dass es während der Initialisierungsphasen eine Standard-Fahrbahn einzeichnet, deren Ränder einen vordefinierten Abstand zum Fahrzeugmittelpunkt haben. Die Krümmung der Fahrbahn berechnet das System mit Hilfe des Lenkradwinkels, der ebenfalls über den CAN-Bus zur Verfügung steht. Auf diese Weise hat der Fahrer den Eindruck, dass das System die Fahrbahn­ränder immer erkennt. Der Sprung der nachgezeichneten Fahrbahn­ränder auf die Standard-Fahrbahn ist vor und nach der Initialisierungsphase sichtbar, sofern sich der Fahrer auf die Fahrbahnmarkierung konzentriert.

Auf Grund eingeschränkter Verfügbarkeit des Versuchsträgers fand dieser Versuch nur mit zwölf Probanden statt, die alle Mitarbeiter der AUDI AG sind und keine Berührungspunkte mit den getesteten Systemen haben. Das Durchschnittsalter lag bei 41 Jahren, wobei die Probanden zwischen 27 und 49 Jahre alt waren und alle eine jährliche Fahrleistung von mindestens 15000 km aufweisen konnten. Die Fahrten fanden im September 2006 zwischen 20:00 und 22:30 Uhr und erst nach Einbruch der Dunkelheit statt. Bei drei Systemen ist auch hier die vollständige Permutation der Reihenfolge der Systeme gegeben. Die Teststrecke beinhaltet für nächtliche Verhältnisse stark befahrene Streckenabschnitte und weicht von der Teststrecke der beiden vorhergehenden Versuche ab.

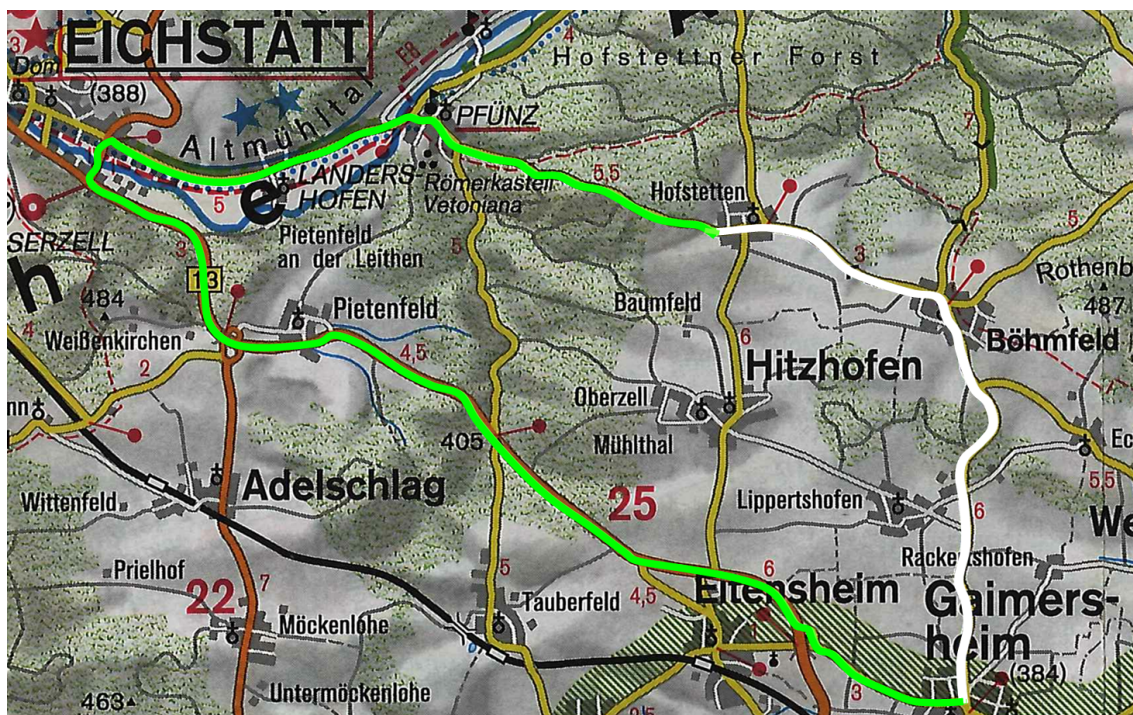


Bild 6.11 : Teststrecke des Hauptversuchs

Der weiß markierte Anteil der in Bild 6.11 gezeigten Strecke stellt die Eingewöhnungsphase dar: Auf diesem etwa 9 km langen Abschnitt, der eine Fahrtzeit von 10 Minuten beansprucht, fuhren die Probanden nur mit dem serienmäßigen Abblend- und Fernlicht des Fahrzeugs. Der Bi-Xenon-Scheinwerfer zeigte während der Eingewöhnungsfahrt eine sehr gute und hochwertige Ausleuchtung nach dem aktuellsten Stand der Technik. Am Ende der Eingewöhnungsfahrt hielten die Probanden kurz an und ließen sich vom Versuchsleiter das auf der restlichen Strecke zu testende System erläutern. Die Probanden nutzten auf der restlichen, in Bild 6.11 grün markierten Strecke mit einer Länge von 26 km und einer Fahrtzeit von etwa 20 Minuten jeweils eines der Systeme. Am Ende jedes Rundkurses mussten die Fahrer das getestete System anhand des Fragebogens im Anhang D bewerten, bevor die nächste Fahrt starten konnte. Die dreimalige Umrundung der Strecke dauerte etwa 90 Minuten, während das Ausfüllen der Fragebögen etwa 5 bis 10 Minuten in Anspruch nahm. Die Dauer des gesamten Fahrversuchs hielt sich so unter 2 Stunden. Im Anhang D finden sich neben dem Fragebogen auch die Altersverteilung der Probanden und die Auswertungen der Antworten in Form von Diagrammen unter Angabe der minimalen und maximalen Werte sowie den 95%-Konfidenzintervallen.

Antworten der Probanden

Tabelle 6.6 fasst die Antworten der Probanden zusammen und zeigt, dass sie das Adaptive Fernlicht im Vergleich zum anzeigenden und hervorhebenden NightVision-System sehr gut bewerten.

Den Probanden gefiel das Adaptive Fernlicht gut bis sehr gut und damit mindestens signifikant besser als die beiden NightVision-Varianten, die sie mit befriedigend bis gut bewerteten. Während die Fahrer die Sicht mit NightVision verglichen mit dem Abblendlicht etwa gleich gut und verglichen mit dem Fernlicht ein bisschen schlechter empfanden, bewerteten sie die Sicht mit dem Adaptiven Fernlicht viel besser als mit Abblendlicht und etwas besser als mit Fernlicht. Der Vergleich mit dem Fernlicht gibt die Situation mit anderen Verkehrsteilnehmern wieder, da das Adaptive Fernlicht genau dem Fernlicht entspricht, wenn keine weiteren Verkehrsteilnehmer in der Szene vorhanden sind.

Der Unterschied beim vermittelten Sicherheitsgefühl zwischen Adaptivem Fernlicht und NightVision verpasst knapp die Signifikanz, was nach Aussagen der Probanden darin begründet liegt, dass sich der Sicherheitsgewinn durch NightVision auf Grund des notwendigen Blicks in den Bildschirm reduziert, weil in dieser Zeit die Aufmerksamkeit nicht auf der Straße ist. Weiterhin haben die Probanden schnell bemerkt, dass es dem Zufall überlassen ist, ob sie im richtigen Moment das NightVision-Bild betrachten. Dennoch vermitteln beide Systeme eher ein besseres Sicherheitsgefühl als ohne Sichtverbesserungssystem. Dies zeigt sich insbesondere daran, dass die Probanden in allen Systemen ein hohes Potenzial zur früheren Erkennung von Gefahren sehen.

Fragen \ Systeme	anzeigendes NV vs. hervorh. NV	anzeigendes NV vs. Adaptives FL	hervorheb. NV vs. Adaptives FL
Wie hat Ihnen das Sichtverbesserungssystem im allgemeinen gefallen?	0,486; 11; 0,649	-2,942; 11; 0,013	-3,583; 11; 0,004
Wie empfanden Sie die Sicht mit dem System im Vergleich zur Sicht mit Abblendlicht?	-0,028; 11; 0,978	-4,316; 11; 0,001	-6,038; 11; 0,000
Wie empfanden Sie die Sicht mit dem System im Vergleich zur Sicht mit Fernlicht?	-0,192; 11; 0,851	-2,541; 11; 0,027	-4,714; 11; 0,001
Fühlten Sie sich mit dem System sicherer als ohne?	-0,050; 11; 0,961	-2,029; 11; 0,067	-2,062; 11; 0,064
Meinen Sie, mit dem System Gefahren früher entdecken zu können?	-0,504; 11; 0,624	-0,411; 11; 0,689	-0,614; 11; 0,551
Wie bewerten Sie die Belastung während der Fahrt im Vergleich zu einer Fahrt ohne das System?	1,109; 11; 0,291	-5,229; 11; 0,000	-5,424; 11; 0,000
Welche Schulnote (1- 6) würden Sie dem System geben?	0,109; 11; 0,915	2,175; 11; 0,052	2,089; 11; 0,061
Bringen Sie die Systeme in eine Rangfolge und beginnen Sie mit dem besten System (Wilcoxon-Test).	-0,775; 11; 0,439	-2,425; 11; 0,015	-2,443; 11; 0,015
Welches System würden Sie in Ihrem eigenen Fahrzeug nutzen? (Wilcoxon-Test)	0,000; 11; 1,000	-2,121; 11; 0,034	-2,449; 11; 0,014
Haben relevante Bildinhalte Ihren Blick auf die Anzeige gelenkt?	0,343; 11; 0,738	-	-
Wie bewerten Sie die Zuordenbarkeit des Bildes zur direkt wahrgenommenen Umgebung?	-0,092; 11; 0,928	-	-
Hat Sie die Anzeige des Bildes gestört?	2,237; 11; 0,047	-	-
Fragen zum hervorhebenden NightVision-System	erlebtes hervorhebende System vs. ideales hervorhebende System		
Wie hat Ihnen die Hervorhebung der Fahrbahnbegrenzungen im erlebten System und wie würde Ihnen die Hervorhebung der Fahrbahnbegrenzungen eines idealen Systems gefallen?	-3,021; 11; 0,012		
Wie hat Ihnen die Hervorhebung potenziell gefährlicher Objekte im erlebten System und wie würde Ihnen die Hervorhebung potenziell gefährlicher Objekte eines idealen Systems gefallen?	-2,349; 11; 0,039		
anzeigendes NightVision	hervorhebendes NightVision	Adaptives Fernlicht	ideales hervorh. NightVision

Tabelle 6.6: Ergebnisse der Gesamtsystemstudie

Die Ergebnisse des Versuches bestätigen, dass das Adaptive Fernlicht deutlich dazu beiträgt, die Belastung während der Fahrt zu reduzieren, da der Fahrer nicht nur eine optimale Ausleuchtung erhält, sondern sich zusätzlich nicht mehr um das Fernlicht und das Abblenden bei Gegenverkehr und in beleuchteten Ortschaften kümmern muss. Die Belastung bei NightVision hingegen bleibt neutral, da sich die Vor- und Nachteile des

Systems ausgleichen. Dies bestätigt Studien, die NightVision kein Gefährdungs- oder Ablenkungspotenzial zuweisen [TKM⁺04].

Die Bewertung der Systeme nach Schulnoten zeigt keinen signifikanten Unterschied zwischen NightVision und dem Adaptiven Fernlicht, was aber vermutlich in der Umsetzung des Adaptiven Fernlichts und den gelegentlich auftretenden Fehlerkennungen von Straßenschildern begründet liegt, da die Probanden nur die Beseitigung der Fehlerkennungen als Verbesserungsvorschlag für das System nannten. Die Bewertung nach Schulnoten korreliert erwartungsgemäß zu der Frage, wie den Probanden die Systeme im Allgemeinen gefallen haben. In der Rangfolge der Systeme findet sich das Adaptive Fernlicht mit großem Abstand an erster Stelle, während sich beide NightVision-Systeme den zweiten Rang teilen. Interessant ist aber, dass fast alle Probanden das Adaptive Fernlicht und zumindest ein Großteil der befragten Personen eines der beiden NightVision-Systeme nutzen würden. Dies bedeutet, dass die Priorität der Fahrer auf dem Adaptiven Fernlicht liegt, sie es aber durch NightVision ergänzen würden.

Die Unterschiede zwischen dem rein anzeigenden und dem hervorhebenden System fallen geringer aus: Den Probanden gefielen beide NightVision-Systeme etwa gleich gut, was sich auch in ähnlichen Schulnoten von durchschnittlich 2-3 für beide Systeme zeigt. Die beiden Systeme vermittelten keinen Unterschied in der Verbesserung der Sicht, so dass auch beim Sicherheitsgefühl, beim Potenzial, mit den Systemen Gefahren früher erkennen zu können, sowie bei der Belastung keine Signifikanzen vorhanden sind. Dieses Ergebnis bestätigt die Untersuchung von TSIMHONI, FLANNAGAN und MINODA im Fahrsimulator [TFM04]. Der Grund für dieses Ergebnis ist vermutlich die Hervorhebung der Fahrbahnrande, die in der umgesetzten Form schlechte bis befriedigende Bewertungen erhielt. Die Probanden empfanden die dauerhafte Hervorhebung der Fahrbahn als störend und ablenkend und nannten als Verbesserungsvorschlag für die Fahrbahn hervorhebung eine dezenterer Farbe wie "sehr helles Gelb" oder Weiß, die den Blick nicht sofort auf die Fahrbahnrande lenkt. Auch wenn die Hervorhebung dezenter wäre und keine Sprünge während der Initialisierungsphasen aufweisen würde, erhielte die Hervorhebung der Fahrbahn nur eine befriedigende Bewertung, was die Probanden damit begründeten, dass die Fahrbahn hervorhebung zwar grundsätzlich eine Hilfe sei, aber vom restlichen Bild ablenkt und die Orientierung im Bild auch ohne diese Kennzeichnung leicht fällt. Auf Grund der Fahrbahn hervorhebung bewerten die Probanden die Anzeige des Bildes im hervorhebenden System als signifikant störender als beim rein anzeigenden. Dieser Unterschied liegt nicht in der Einfärbung potenziell gefährlicher Objekte begründet, da die Antwort auf die Frage, ob relevante Objekte den Blick auf die Anzeige gelenkt haben und ob Gefahren mit dem System früher entdeckt werden können nur einen geringen Unterschied zeigen. Viele Probanden konnten die Frage, wie ihnen die Einfärbung der Objekte gefallen hat, zuerst nicht beantworten. Sie gaben an, keine Hervorhebungen gesehen zu haben, obwohl das System bei allen Fahrern Personen hervorgehoben hatte. Die Markierung war demnach nicht auffällig genug. Der Versuchsleiter stellte sich vor das Fahrzeug, um den Probanden einen Eindruck der Markierung relevanter Objekte zu

geben, damit diese mit ihrer Bewertung fortfahren konnten. Da einige Probanden die Hervorhebung nicht sehen konnten, bewerteten sie die implementierte Objekterkennung nur als befriedigend bis gut, wobei sie sich einig waren, dass diese grundsätzlich eine gute bis sehr gute Funktionalität des hervorhebenden NightVision-Systems ist. Die dargestellte rote Einfärbung der Objekte fand bei den Probanden bezüglich der Farbe große Zustimmung, wobei die Art der Markierung auffällig genug sein muss.

Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass das hervorhebende NightVision-System weder die Orientierung im Bild verbessert noch die frühere Erkennung von Gefahren ermöglicht und die ähnliche Bewertung des rein anzeigenden und hervorhebenden Systems die Unterschiedshypothese 4 nicht bestätigt. Die Bewertung des Adaptiven Fernlichts bestätigt jedoch die Unterschiedshypothese 5, nach der die Probanden dieses System den NightVision-Systemen vorziehen.

7 Zusammenfassung und Gesamtbewertung

Kapitel 2 hat beschrieben, dass NightVision-Systeme die Sicht bei Nacht verbessern und helfen können, Gefahren früher zu erkennen. Die Ergebnisse der Versuche aus Kapitel 6 zeigen jedoch, dass der Fahrer den Vorteil der erweiterten Sicht auf Grund der Mensch-Maschine-Schnittstelle nicht in vollem Umfang nutzen kann. Ziel der Arbeit war es, das System durch die Hervorhebung besonderer Bildinhalte und die damit verbundene Vereinfachung der Bildinterpretation zu verbessern. Der Fahrversuch zu den Gesamtsystemen zeigt allerdings, dass dieser Ansatz nur bedingt zum Erfolg führt: Zwar schätzen die Fahrer die Hervorhebung von Personen und Tieren als wichtig und notwendig ein, jedoch hilft sie nicht, den Nutzer auf eventuell vorhandene Gefahren aufmerksam zu machen, wenn die Hervorhebung nicht auffällig genug ist. Die Warnung vor erkannten Objekten wäre in einem peripher einsehbaren Bildschirm wie dem HUD oder dem TFT-Klappdisplay zwar auffälliger, jedoch nach den Ergebnissen der Displaystudie auch störender, da das bewegte Bild immer wahrnehmbar bleibt. Eine zusätzliche akustische, haptische oder optische Warnung außerhalb des NightVision-Bildes kann zu dem ungewollten Fall führen, dass der Fahrer das Bild ignoriert, bis er die Zusatzwarnung erhält. Aus den kurz zusammengefassten Ergebnissen dieser Studien scheint die beste Empfehlung die Anzeige eines hervorhebenden NightVision-Bildes ohne zusätzliche Hervorhebung der Fahrbahn im Kombidisplay zu sein. Ob das Bild aus einem Nahinfrarot- oder aus einem Ferninfrarotsensor stammen sollte, konnten die Untersuchungen nicht abschließend beantworten. Unter der Voraussetzung, dass mit beiden Sensoransätzen eine Personenerkennung möglich ist, haben beide Ausprägungen ihre Berechtigung und ihre Vor- und Nachteile. Ob die einfache Orientierung im Bild auf Kosten längerer Blickzeiten oder die Erweiterung der Sinne auf Kosten der Erlernbarkeit und der intuitiven Nutzung des Systems gerechtfertigt ist, bleibt Auslegungssache und eine Frage der Philosophie.

Das Adaptive Fernlicht hingegen findet in der Praxis sehr viel Zustimmung und bietet einen klaren Nutzen: Es nimmt dem Fahrer nicht nur das Umschalten zwischen Abblend- und Fernlicht ab, sondern bietet die bestmögliche Ausleuchtung ohne Blendung anderer Verkehrsteilnehmer. Die Ergebnisse der Studie sind diesbezüglich eindeutig. Viel interessanter ist die gleichzeitige Verwendung von NightVision und Adaptivem Fernlicht: Während das Adaptive Fernlicht jederzeit die bestmögliche Ausleuchtung gewährleistet, jedoch Objekte nicht hervorheben kann und damit auf den Kontrast der Gefahren im

sichtbaren Spektrum angewiesen ist, kann NightVision genau diese Personen erkennen und hervorheben. Damit bietet NightVision immer noch einen Mehrwert und ergänzt das Adaptive Fernlicht sinnvoll. Hier stellt sich aber nochmals die Frage nach dem geeigneten Sensoransatz für NightVision: Das Adaptive Fernlicht stellt ein blendfreies Fernlicht in der Realität dar; ein Nahinfrarotsystem hingegen die Darstellung eines blendfreien Fernlichts in einem Bildschirm, während ein Ferninfrarotsystem die Wärmeverteilung vor dem Fahrzeug in einem Bildschirm anzeigt. Der Unterschied zwischen dem Adaptiven Fernlicht und dem Nahinfrarotsystem ist relativ gering. Der Unterschied liegt, abgesehen von der in Zukunft möglichen Erkennung und Hervorhebung von Personen, in der schlechteren und schwereren Nutzbarkeit des NIR-Systems. Ein Fahrer, der sowohl das Adaptive Fernlicht als auch ein NIR-NightVision im Fahrzeug hat, wird vermutlich nur das Adaptive Fernlicht nutzen und nicht auf den NightVision-Bildschirm sehen, sofern das NIR-NightVision keine Warnungen ausgibt. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Fahrer ein Ferninfrarot-System nutzt, ist größer, da der Unterschied zwischen den Systemen größer ist und der Bildschirm nicht genau das anzeigt, was das Adaptive Fernlicht bereits vor dem Fahrzeug in der realen Szene sichtbar macht.

Die Strategie für die Sichtverbesserung bei Nacht sollte die Priorität auf das Adaptive Fernlicht legen und dieses als Basissystem anbieten. Als optionale Ergänzung ist ein Ferninfrarot-System mit Erkennung und Hervorhebung von Gefahren sinnvoll, da es dem Fahrer neben dem zwar zusätzlichen, aber doch nur zufälligen Sicherheitsgewinn ein interessantes Bild der Umwelt und ein oft erlebbares Assistenzsystem bietet.



8 Ausblick

Diese Arbeit hat verschiedene Ansätze für NightVision-Systeme erläutert und verglichen. Dabei hat sich gezeigt, dass Systeme, die Bildinformationen optisch hervorheben, den Nutzen des Systems nicht erkennbar vergrößern. Die Hervorhebung der Fahrbahn­ränder verbesserte die Orientierung im Bild nicht und lenkte den Blick unnötig auf die Anzeige und den hervorgehobenen Fahrbahnrand, so dass dieser Ansatz nicht weiterverfolgt werden sollte. Die Fahrversuche zeigen jedoch, dass die Einfärbung relevanter Objekte wie Menschen und Tiere sinnvoll ist und diese Warnung auffällig sein sollte.

Weiterführende Arbeiten können die Algorithmen zur Erkennung anderer Verkehrsteilnehmer für das Adaptive Fernlicht optimieren, beispielsweise durch Verwendung von Tracking-Verfahren, die Fahrzeuge schnell und sicher erkennen. Auch der Einsatz von Farbkameras wird die Anpassung und Erweiterung dieser Algorithmen erfordern, um durch die Unterscheidung zwischen Scheinwerfern, Rückleuchten sowie retroreflektierenden Objekten eine größere Erkennungsreichweite zu erzielen.

Das Adaptive Fernlicht ist direkt von der Entwicklung von Scheinwerfern abhängig, die variable Ausleuchtungen erzeugen können. Dabei bieten Scheinwerfer auf LED-Basis die Möglichkeit, die gepulste Beleuchtung antizyklisch zur Bildaufnahme der Kamera zu synchronisieren. Dieses Verfahren hat viel Potenzial zur Vermeidung von Eigenlichteinwirkung und könnte Fehlerkennungen deutlich reduzieren.

Die Ausleuchtbereiche des in dieser Arbeit konzipierten Scheinwerfers richteten sich nach pragmatischen Kriterien wie der Abdeckung der verschiedenen Fahrspuren durch die einzelnen Blenden. Die Aufteilung der Ausleuchtbereiche sollte jedoch auch aus wahrnehmungspsychologischer und lichttechnischer Sicht untersucht werden. Auch die Wirkung des Adaptiven Fernlichts auf vorausfahrende oder entgegenkommende Verkehrsteilnehmer sowie die Wirkung verschiedener Ausleuchtbereiche sowohl auf den Fahrer als auch auf andere Verkehrsteilnehmer ist noch weitgehend unbekannt.



Anhang A

Messung der Reflexionsgrade einiger Objekte

Die Messung der Infrarotreflektivität der Objekte aus Bild 2.8 erfolgte unter anwendungsnahen Bedingungen. Dazu stand das in Abschnitt 6.2 beschriebene Versuchsfahrzeug in einem abgedunkelten Lichtlabor. Vor dem Fahrzeug befand sich in 4 m Entfernung eine Stellwand mit diffus streuender und senkrecht zur Fahrzeuglängsachse stehender Oberfläche. Zur Messung der Infrarotreflektivität strahlten ausschließlich die Infrarotscheinwerfer des Versuchsträgers die zu messenden und an der Stellwand befestigten Objekte an. Dabei war der Raum vollständig abgedunkelt (Beleuchtungsstärke $< 0,1 \text{ lx}$), so dass nur die Infrarotstrahlung auf die Messproben treffen konnte. Eine CCD-Kamera mit linearer Kennlinie zeichnete das Infrarotbild der Objekte auf. Die Objekte befanden sich während der Aufnahme der Bilder immer an derselben Stelle auf der Stellwand, so dass die Ausleuchtungsverhältnisse konstant blieben. Durch die CCD-Kamera und die lineare Kennlinie war auch eine konstante Bestrahlung der Kamera gewährleistet. Der Mittelwert der Helligkeitswerte der Objekte in einem bestimmten Teilbereich des Bildes diente als Maß für die Infrarotreflektivität des Objektes. Den Referenzwert lieferte ein weißes Blatt gebleichtes Papier der Größe DIN A4. Bild A.1 zeigt den Messaufbau, während Bild A.2 exemplarisch das Bild der Messung eines Kleidungsstückes und der Bereich der Mittelwertbildung für die Reflektivitätsmessung verdeutlicht. Tabelle A.1 zeigt die zur Messung verwendeten Objekte und die Ergebnisse der Messungen.

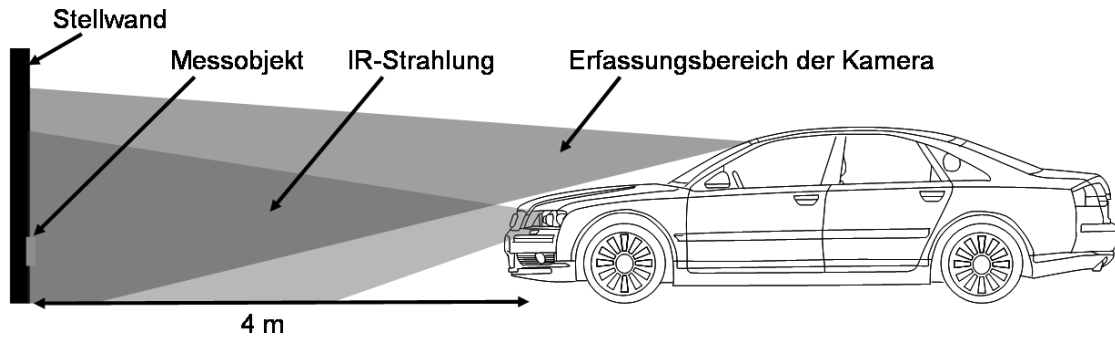


Bild A.1 : Messaufbau zur Bestimmung der IR-Reflektivität bei Bestrahlung mit einem NightVision-Infrarot-Scheinwerfer

Matrial	trocken	nass
Fahrzeuglack: Schwarz Uni	6%	5%
Tannenzweige	63%	64%
Fahrzeuglack: Rasantblau	77%	78%
Beton	78%	61%
Buchenrinde	81%	78%
Alu	81%	85%
grüne Ahornblätter	90%	90%
gelbes Buchenlaub	90%	89%
Fahrzeuglack: Polarweiss	92%	91%
Leitpfosten	92%	119%
Reflektorfolie	94%	-
grün-gelbe Haselnuss-Blätter	94%	93%
weißes chlorfreies Blatt Papier	100%	-
blau-weißes Straßenschild	107%	131%
blau-weißes Straßenschild	115%	146%

Material	trocken	nass
Leder schwarz	14%	10%
Jeans schwarz	28%	11%
Schurwolle dunkel	52%	54%
Haut	72%	-
Nylon beschichtet außen	76%	71%
Polyester schwarz	85%	80%
Baumwolle dunkel	89%	89%
Jeans blau	90%	81%
Polyester rot	90%	85%
Fleece schwarz	95%	90%
Baumwolle hell	97%	92%
Cord dunkel	97%	91%
Polyamid grün	98%	94%
Polyamid PU beschichtet gelb	99%	99%
Fleece hell	101%	97%

Tabelle A.1 : Reflexionsgrade der gemessenen Objekte im nahen Infrarot

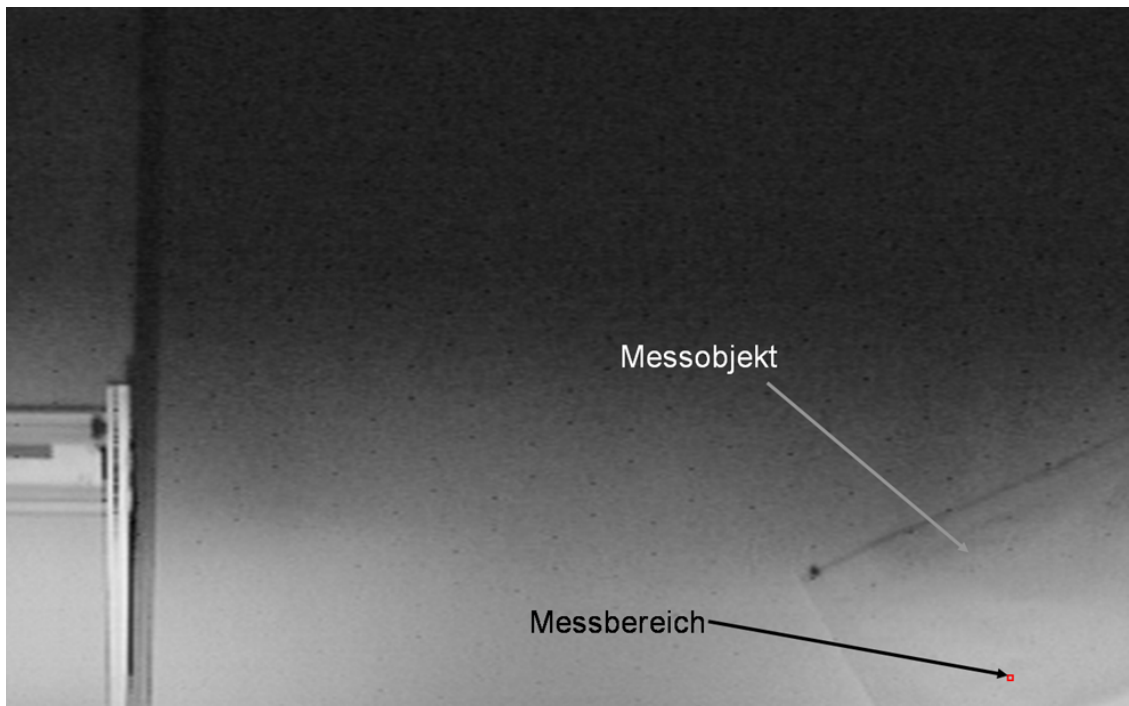
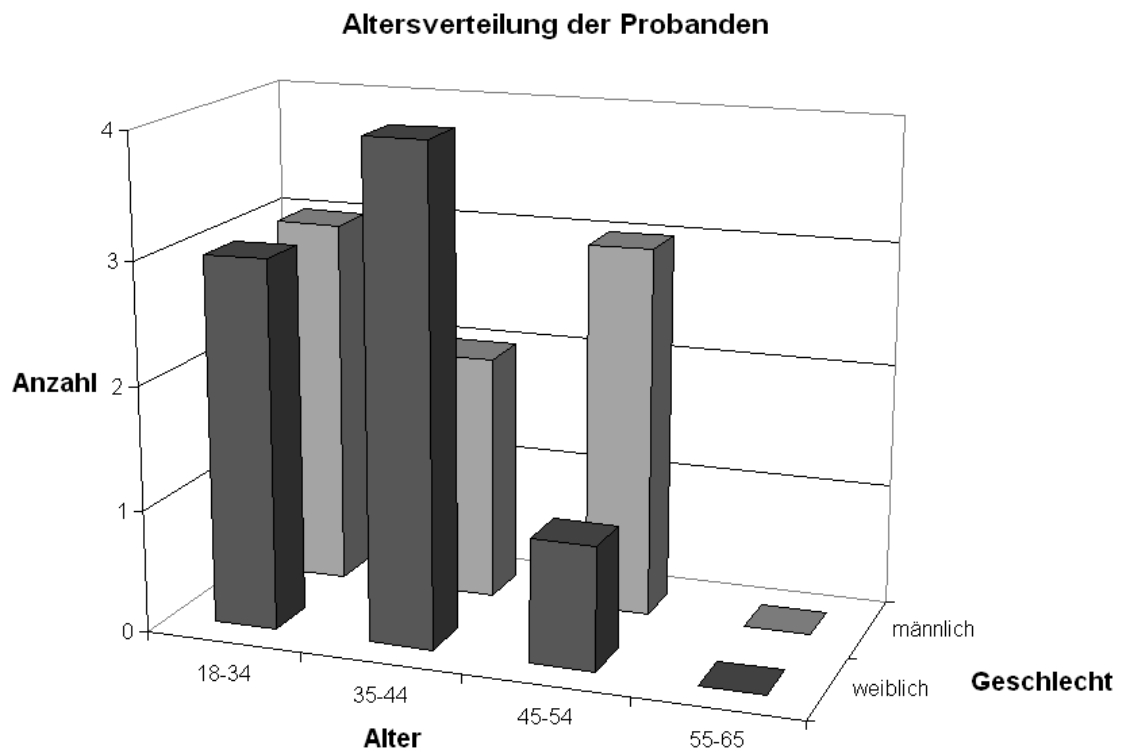


Bild A.2 : Messung der Infrarotempfindlichkeit eines Kleidungsstückes bei Bestrahlung mit einem NightVision-Infrarot-Scheinwerfer



Anhang B

Altersverteilung, Fragebogen und Antworten des Kameraversuchs





Fragebogen NightVision



Daten der Testperson

VP Nr: Gruppe.: Geschlecht.:

Alter.: jährliche Fahrleistung.:

Sehhilfe/Art.: Datum der Testfahrt:



Interviewfrage mit Proband durch Versuchsleiter

I Welche **Erwartungen** haben Sie ganz allgemein an ein NightVision-System?

.....

.....

.....

.....

.....

Durch Probanden selbst auszufüllen

II Bringen Sie folgende **Systemnutzen** Ihres **Wunschsystems** in eine Rangfolge von 1 bis 8

Andere Fahrzeuge erkennen
Gegenstände auf der Fahrbahn erkennen
Wildwechsel erkennen
Personen erkennen
Fahrbahnverlauf erkennen
Blendeffekte durch Gegenverkehr umgehen
Straßenschilder erkennen
Objekte neben der Fahrbahn erkennen



Fragebogen NightVision



Umfeldbedingungen

Wetter: Trocken Regen Schnee Nebel

Straßenzustand: trocken nass vereist

System 1: Temperatur:°C Abfahrt: Ankunft:

System 2: Temperatur:°C Abfahrt: Ankunft:

System 3: Temperatur:°C Abfahrt: Ankunft:

System 4: Temperatur:°C Abfahrt: Ankunft:

Sonstiges:

Fragebogen NightVision



Hinweise zum Fragebogen:

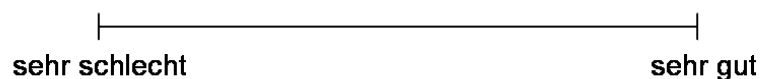
Bei einigen Fragen werden Sie gebeten, Teilaspekte des Systems auf einer Skala zu bewerten. Bitte lesen Sie die Skalenbeschriftung sorgfältig durch und kreuzen Sie dann die Stelle auf der Skala an, die Ihrer Bewertung entspricht.

Beispiel:



Beantworten Sie die folgenden Fragen bitte nach jeder Night Vision Testfahrt!

③ Wie war Ihr erster **allgemeiner Eindruck** vom erlebten NightVision-System?



④ Wurden Ihre **Erwartungen** an Ihr Wunschsystem vom erlebten System erfüllt?

nein, überhaupt nicht

ja, voll und ganz

Warum?

S1

S2

S3

S4

⑤ Hatten Sie das Gefühl, mit dem erlebten System **mehr zu sehen** als mit dem Abblendlicht allein?

nein, überhaupt nicht

ja, auf jeden Fall

⑥ War die **Sichtweite** des Systems ausreichend?

S1: ja

S2: ja

S3: ja

S4: ja

nein

nein

nein

nein

⑦ Wo sehen Sie den **Hauptnutzen** des erlebten Systems?

S1

S2

S3

S4

- ⑧ Wie bewerten Sie den **Nutzen** des erlebten Systems in folgenden **Einsatzgebieten**?

Landstraße

überhaupt nicht geeignet sehr gut geeignet

Warum?

S1 S2

S3 S4

Stadt/Ort

überhaupt nicht geeignet sehr gut geeignet

Warum?

S1 S2

S3 S4

Kurven

überhaupt nicht geeignet sehr gut geeignet

Warum?

S1 S2

S3 S4

Gerade Strecken

überhaupt nicht geeignet sehr gut geeignet

Warum?

S1 S2

S3 S4

- 9 Trauen Sie dem erlebten System zu, dass es auf **Gefahren** auf oder neben der Straße **aufmerksam macht**?

nein, gar nicht |-----| ja, auf jeden Fall

- 10 Wie beurteilen Sie die **Bildqualität** des Systems?

Art des Bildes (Erscheinungsbild)

sehr schlecht |-----| sehr gut

Warum?

S1

S2

S3

S4

Qualität des Bildes (Rauschen, Verzerrungen, etc.)

sehr schlecht |-----| sehr gut

Warum?

S1

S2

S3

S4

- 11 Wurden Sie durch **Bildinhalte** im Display **geblendet**?

S1: ja, durch nein
S2: ja, durch nein
S3: ja, durch nein
S4: ja, durch nein

- 15) Beschreiben Sie, wie Sie das NightVision-System auf der Testfahrt genutzt haben (z.B. Häufigkeit der Blickzuwendungen, Ableседauer usw.)

S1

S2

S3

S4

- 16) Konnten Sie für Sie **relevante Informationen** im Bild **erkennen**?

nie |-----| immer

- 17) Empfanden Sie die Testfahrt **ermüdender** als eine entsprechende Nachtfahrt ohne NightVision-System?

nein, überhaupt nicht |-----| ja, auf jeden Fall

18) Empfinden Sie die Testfahrt **anstrengender** als eine entsprechende Nachtfahrt ohne NightVision-System?

nein, überhaupt nicht ja, auf jeden Fall

19) Welche **Schulnote** würden Sie dem System geben?

Schulnote S1:

Schulnote S2:

Schulnote S3:

Schulnote S4:

20) Zu welchem **Preis** könnte das erlebte System Ihrer Meinung nach angeboten werden?

Preis in € S1:

Preis in € S2:

Preis in € S3:

Preis in € S4:

21 Könnte das System Ihrer Meinung nach in dieser Form in **Serie** gehen?

S1: ja Änderungsvorschläge:
 nein

Preis in € mit umgesetzten Änderungsvorschlägen:

S2: ja Änderungsvorschläge:
 nein

Preis in € mit umgesetzten Änderungsvorschlägen:

S3: ja Änderungsvorschläge:
 nein

Preis in € mit umgesetzten Änderungsvorschlägen:

S4: ja Änderungsvorschläge:
 nein

Preis in € mit umgesetzten Änderungsvorschlägen:

Beantworten Sie die Fragen zum Display bitte nachdem Sie alle NightVision-Systeme getestet haben!

A Wie beurteilen Sie die **Displaymaße**?

Größe

viel zu klein | viel zu groß

Seitenverhältnis

viel zu breit | viel zu hoch

Abstand zum Fahrer

viel zu nah | viel zu weit

Position (Höhe)

viel zu hoch | viel zu niedrig

Position (Allgemein)

sehr schlecht | sehr gut

B Welches **NIR-System** hat Ihnen subjektiv besser gefallen?

NIR1 NIR2

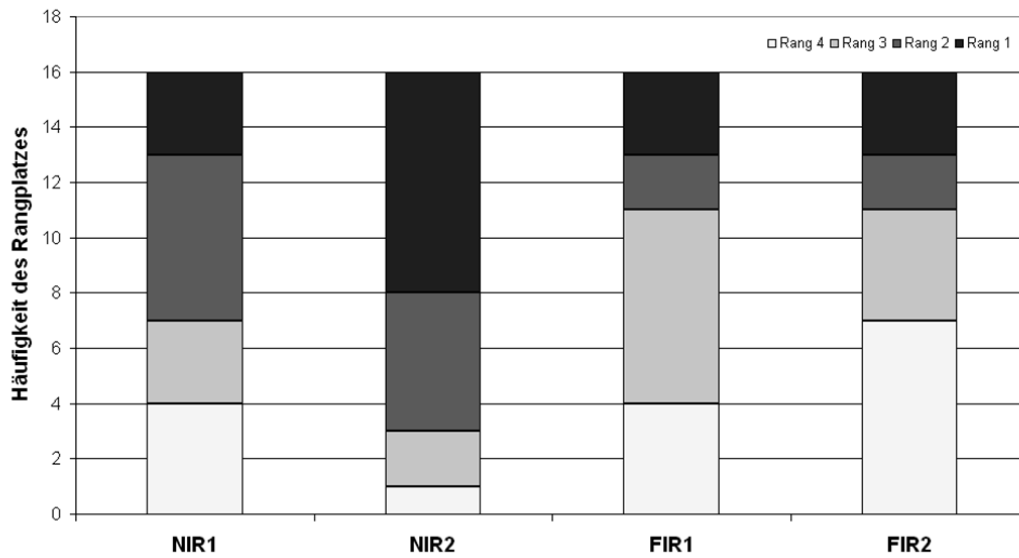
C Welches **FIR-System** hat Ihnen subjektiv besser gefallen?

FIR1 FIR2

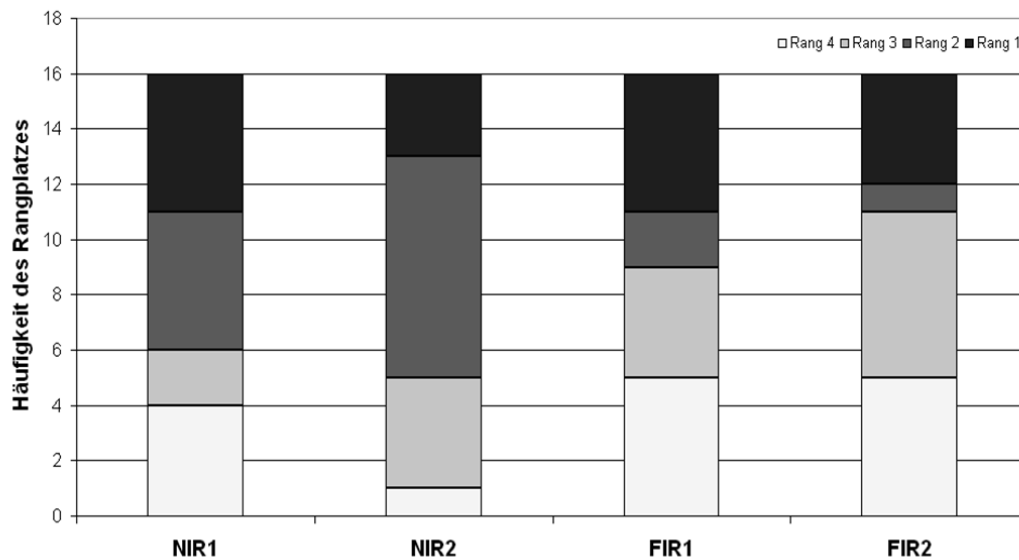
D Welches **Sensorprinzip** hat Ihnen subjektiv besser gefallen?

NIR FIR

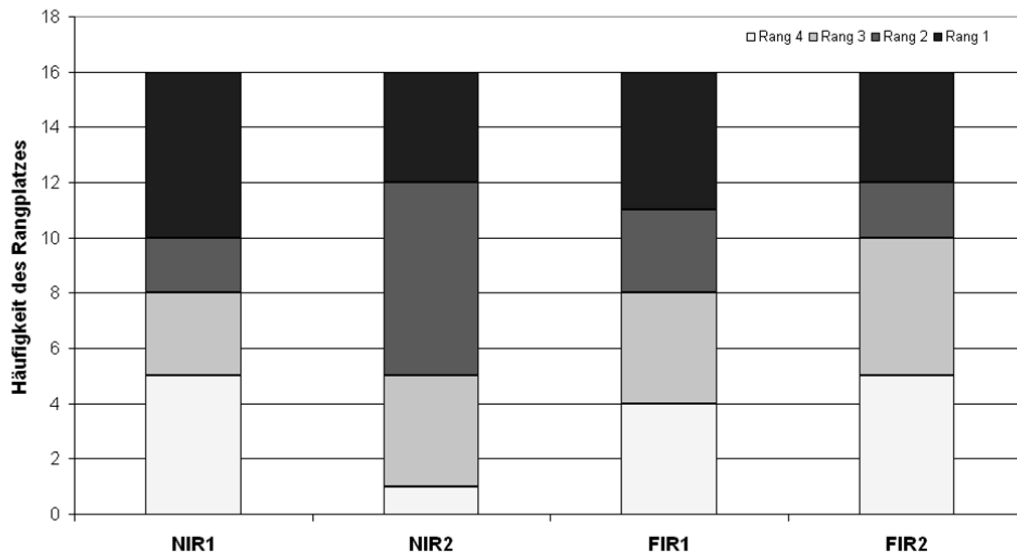
Wie war Ihr erster allgemeiner Eindruck vom erlebten NightVision-System?



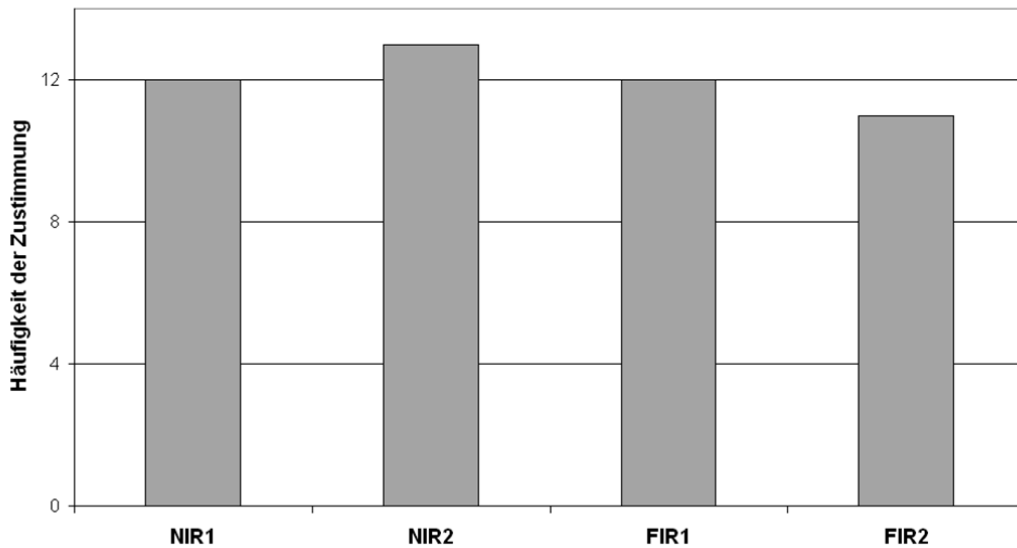
Wurden Ihre Erwartungen an Ihr Wunschsystem vom erlebten System erfüllt?



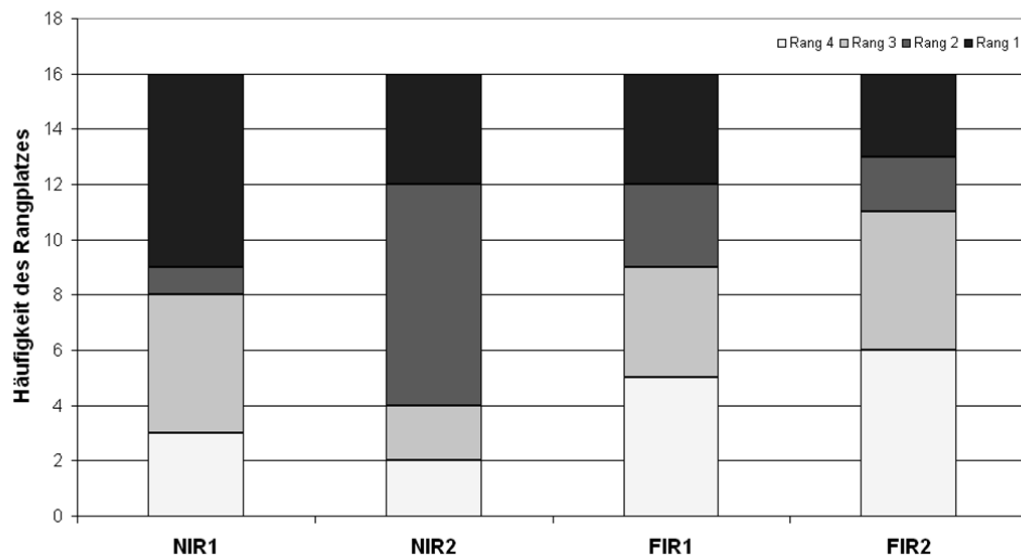
Hatten Sie das Gefühl, mit dem erlebten System mehr zu sehen als mit dem Abblendlicht allein?



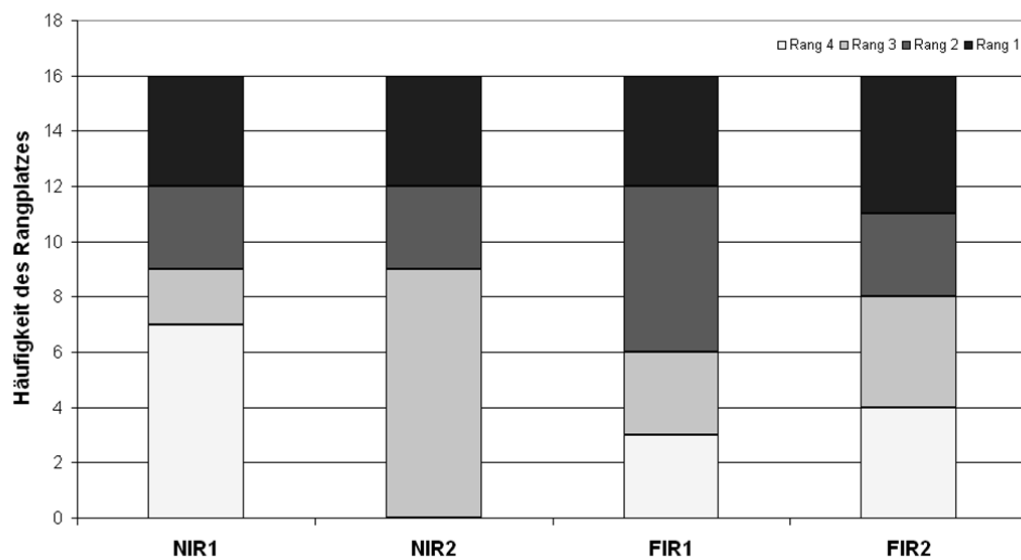
War die Sichtweite des Systems ausreichend?



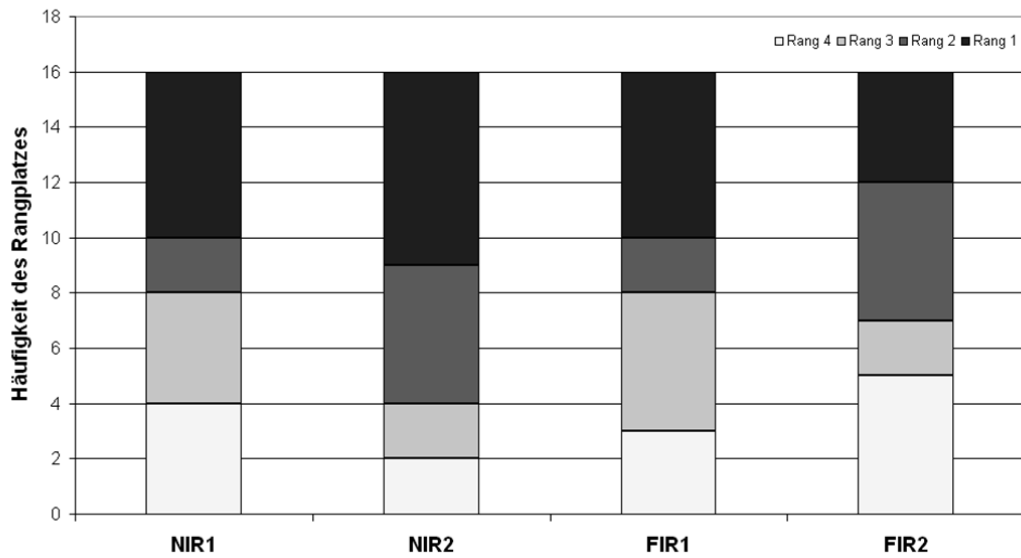
Wie bewerten Sie den Nutzen des Systems auf der Landstraße?



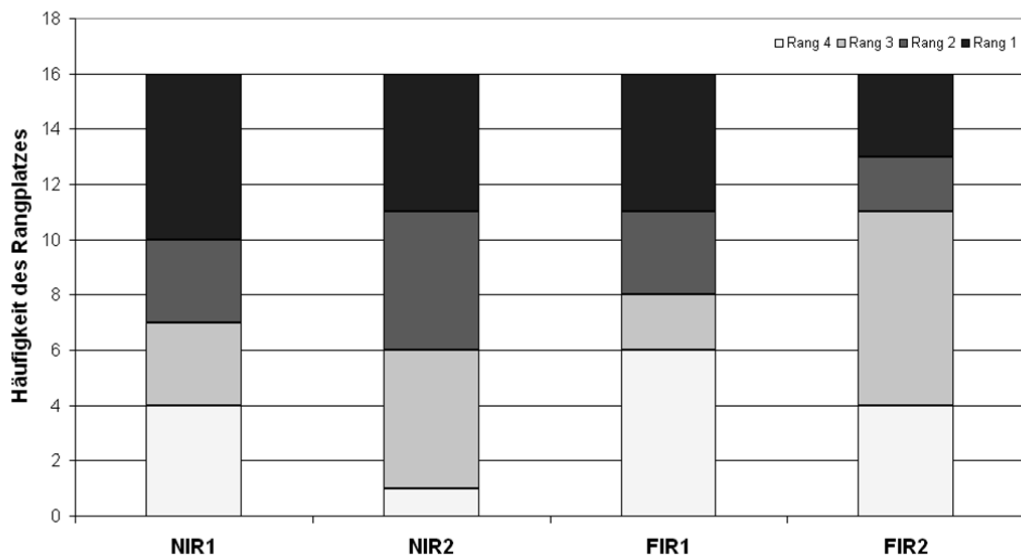
Wie bewerten Sie den Nutzen des Systems in der Stadt/im Ort?



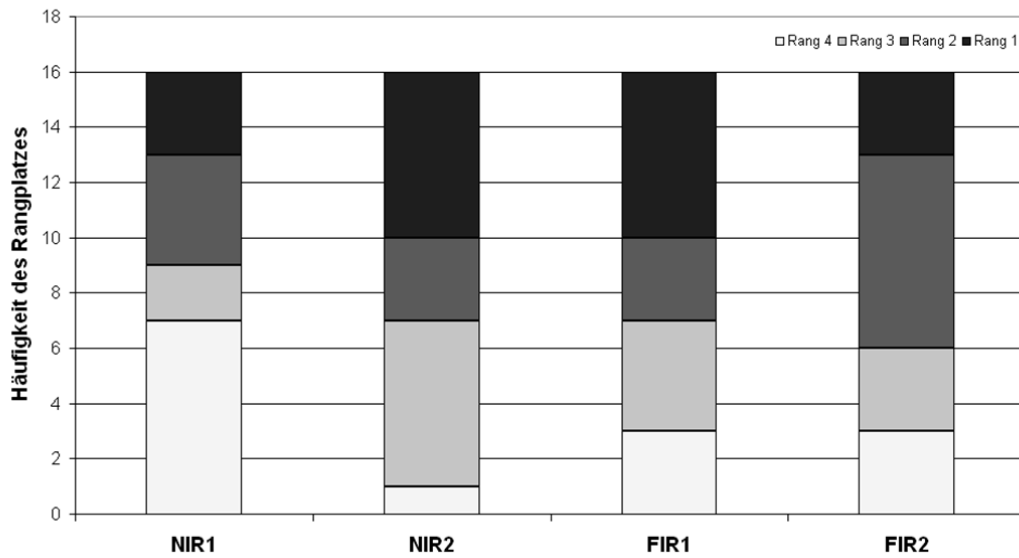
Wie bewerten Sie den Nutzen des Systems in Kurven?



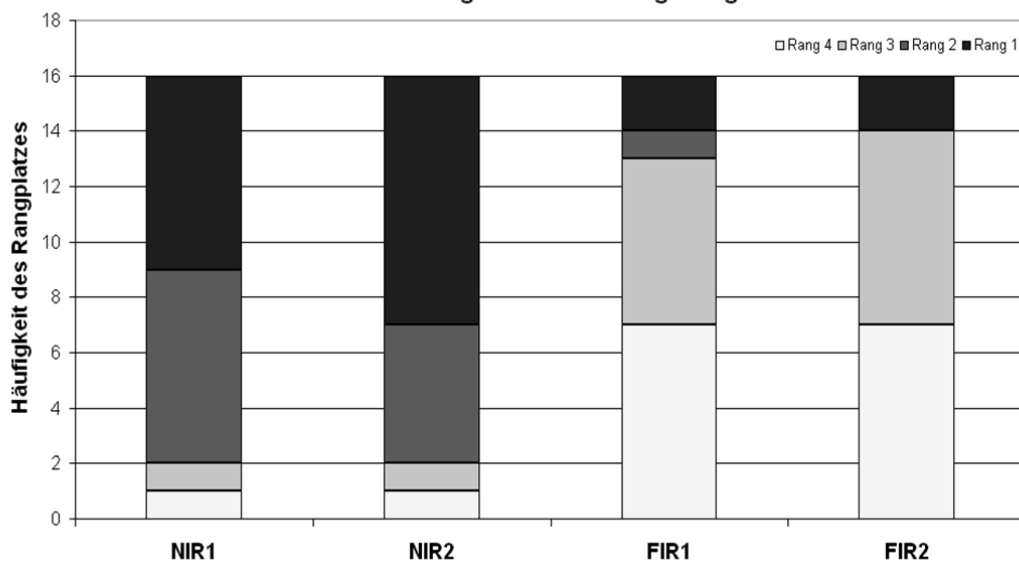
Wie bewerten Sie den Nutzen des Systems auf geraden Strecken?



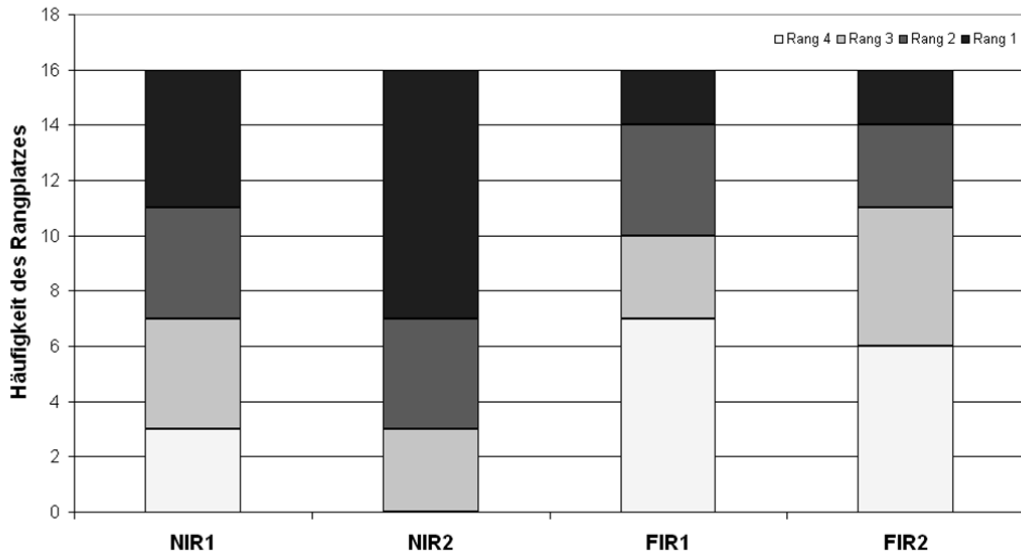
Trauen Sie dem erlebten System zu, dass es auf Gefahren auf oder neben der Straße aufmerksam macht?



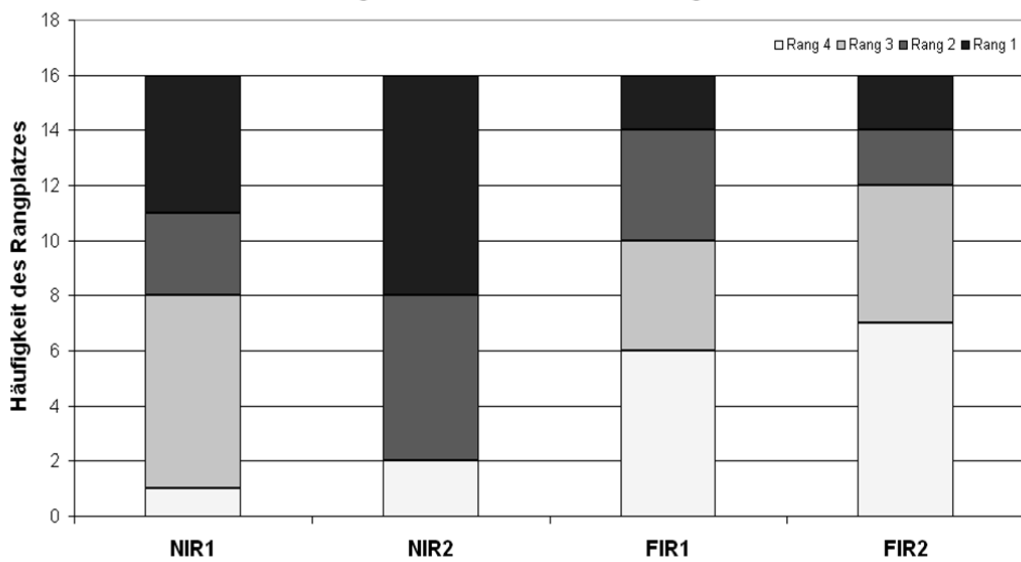
Wie gelang Ihnen die Zuordnung des Infrarotbildes zur direkt wahrgenommenen Umgebung?



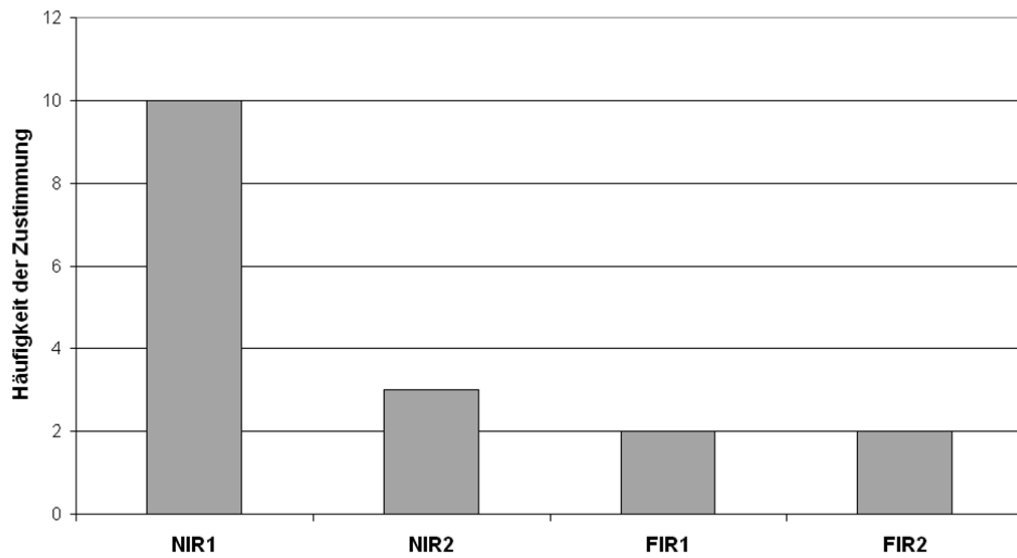
Wie beurteilen Sie die Bildqualität des Systems bezüglich der Art des Bildes?



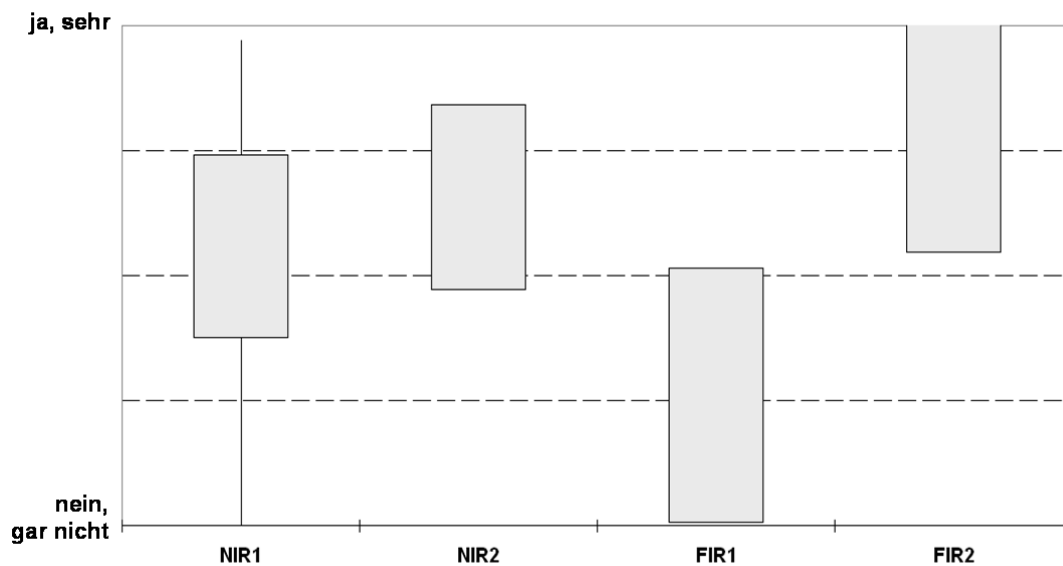
Wie beurteilen Sie die Bildqualität des Systems bezüglich Rauschen und Verzerrungen?



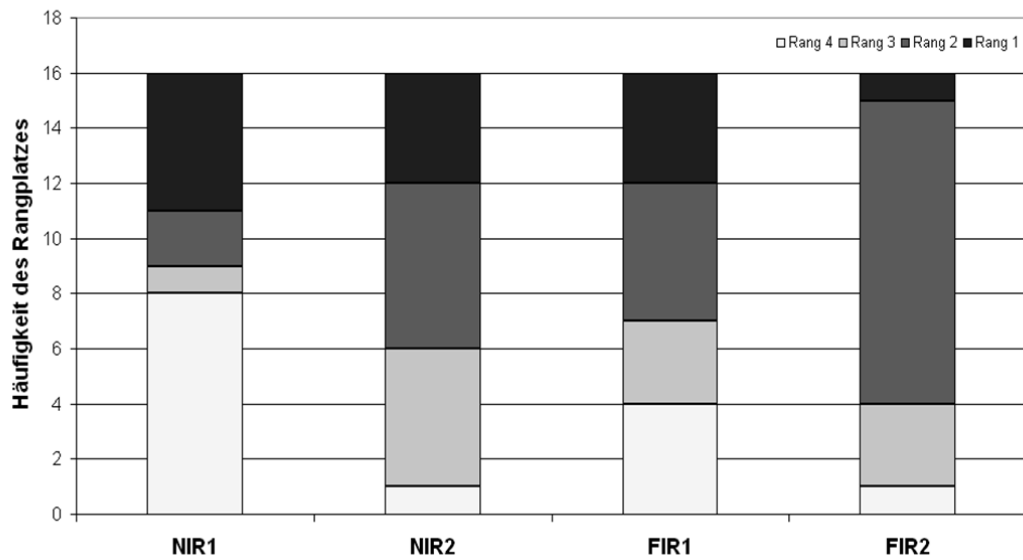
Wurden Sie durch Bildinhalte geblendet?



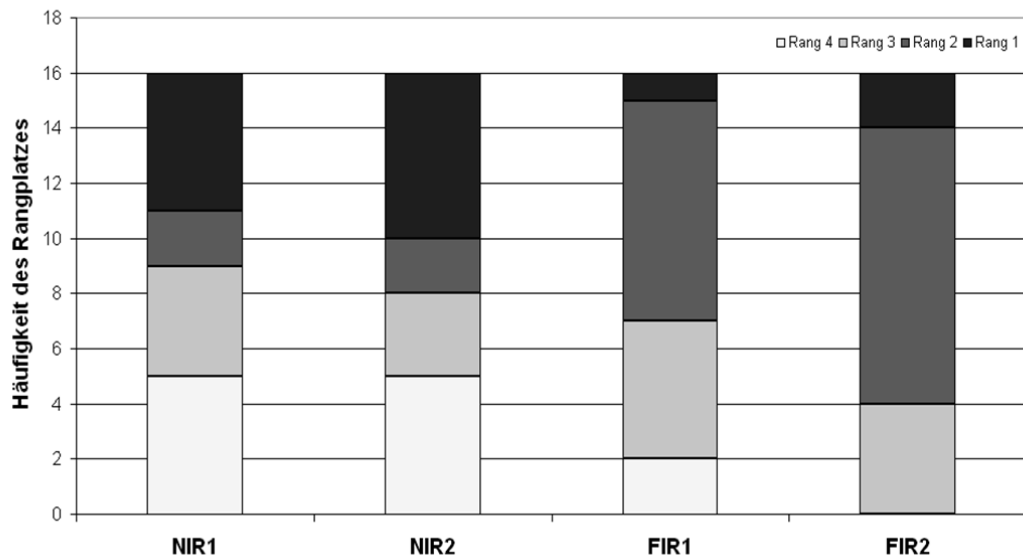
Falls ja, empfanden Sie die Blendungen als störend?

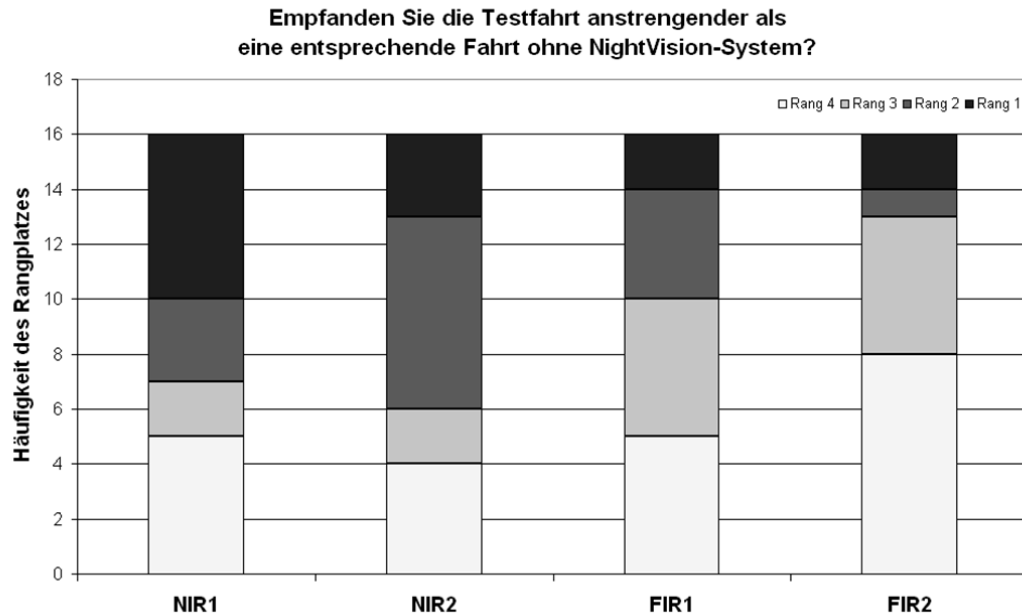
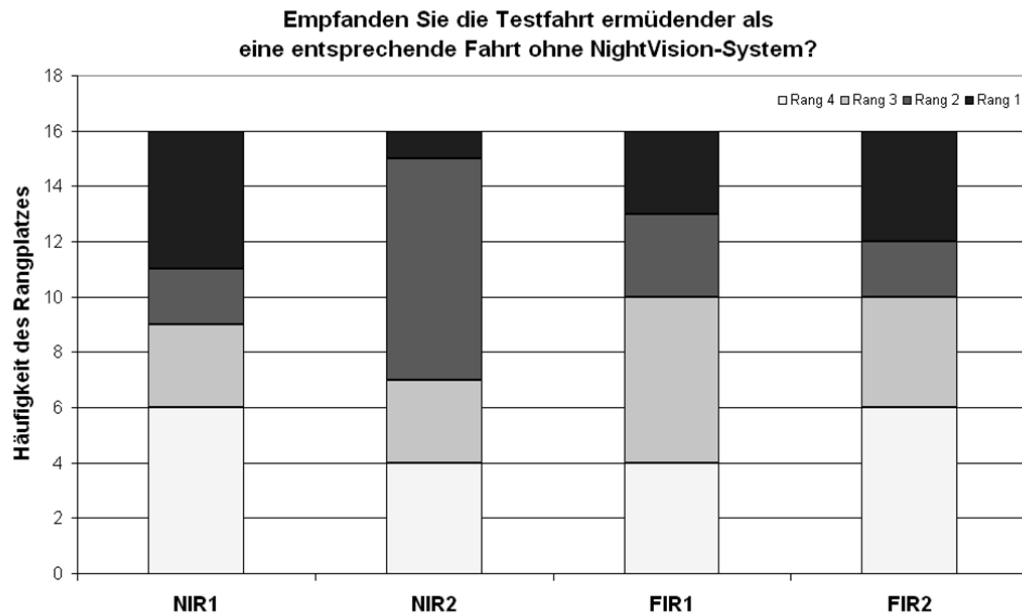


Wie beurteilen Sie den von der Kamera erfassten Bildausschnitt bei kleiner Geschwindigkeit ($v < 60\text{km/h}$)?



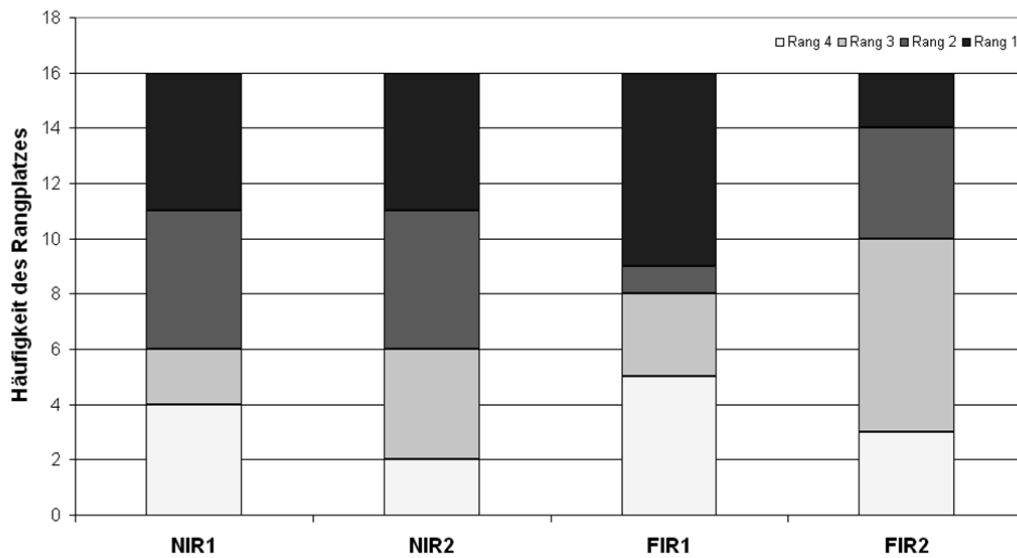
Wie beurteilen Sie den von der Kamera erfassten Bildausschnitt bei großer Geschwindigkeit ($v > 60\text{km/h}$)?



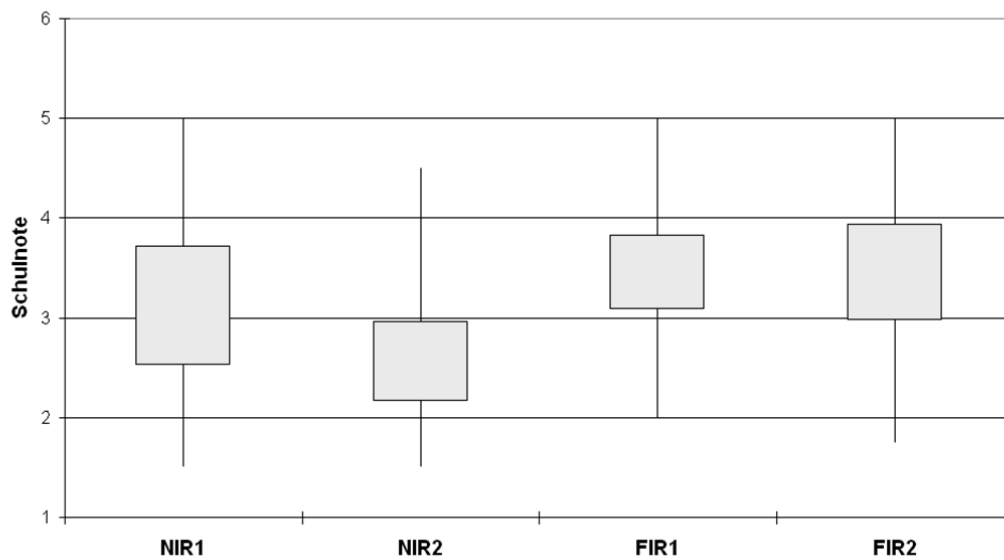


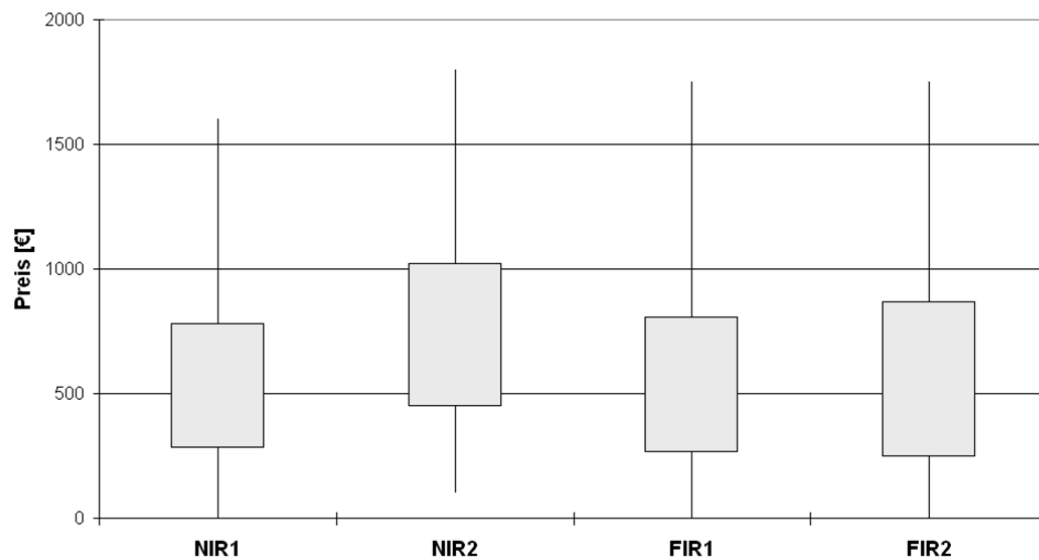
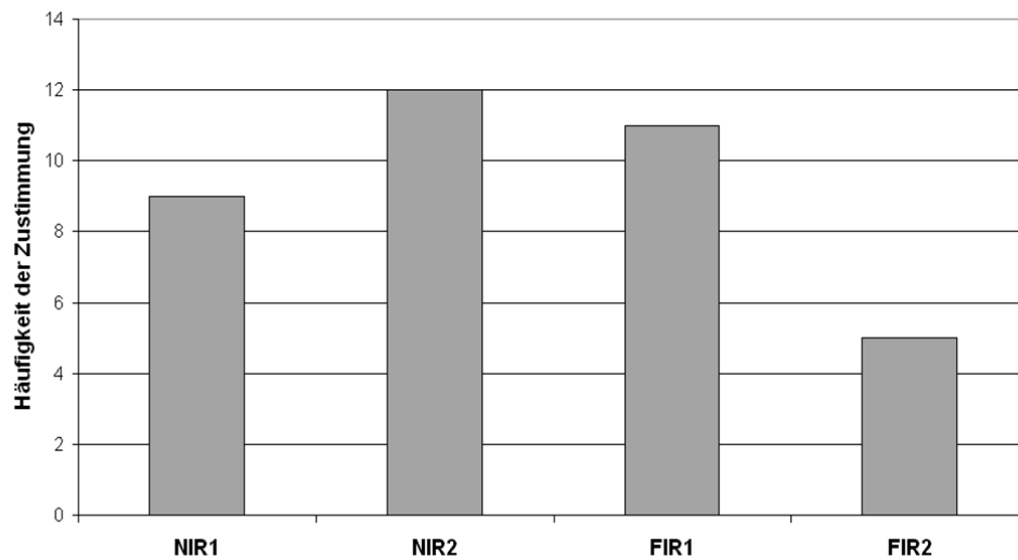


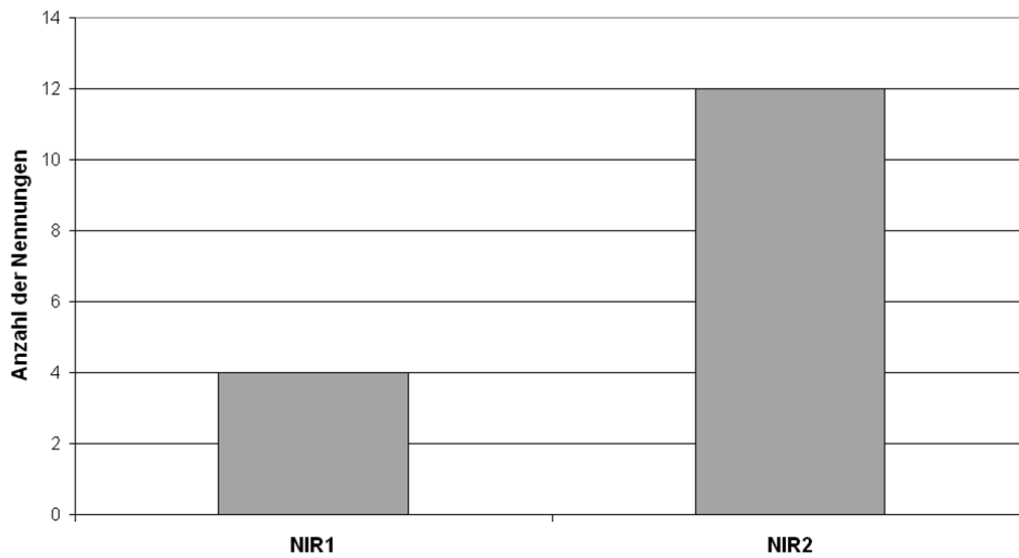
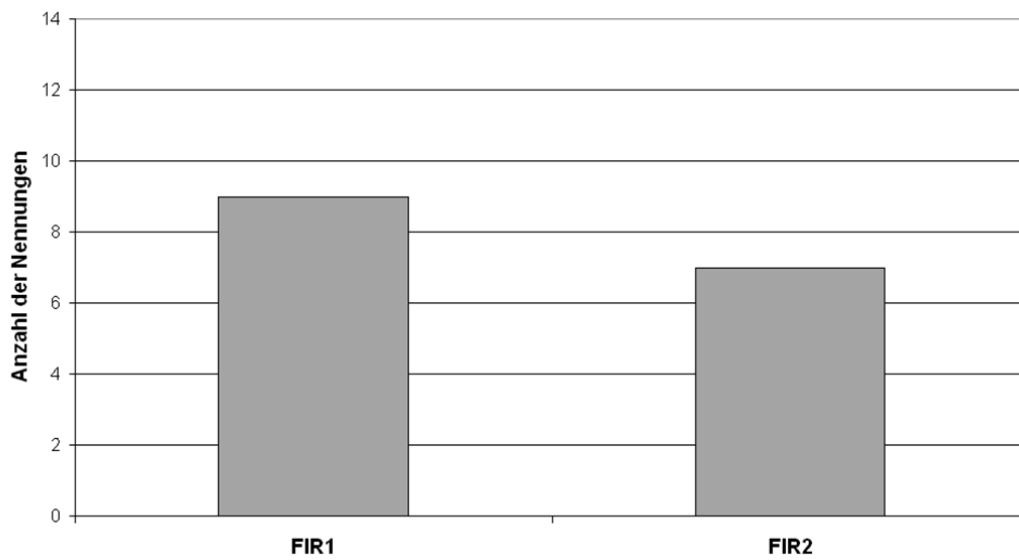
Konnten Sie für Sie relevante Objekte im Bild erkennen?

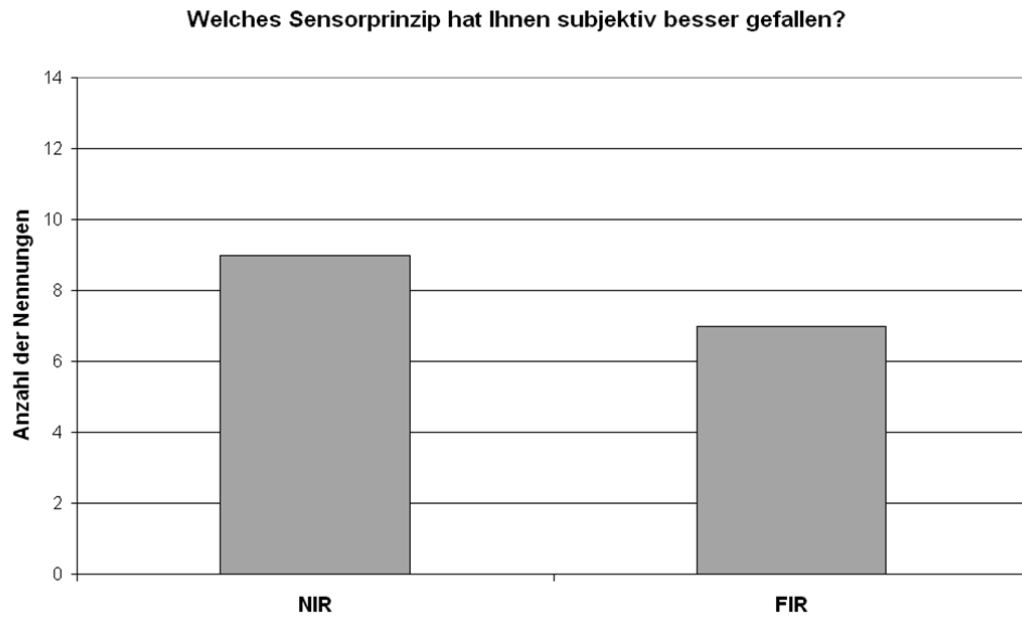


Welche Schulnote würden Sie dem System geben?

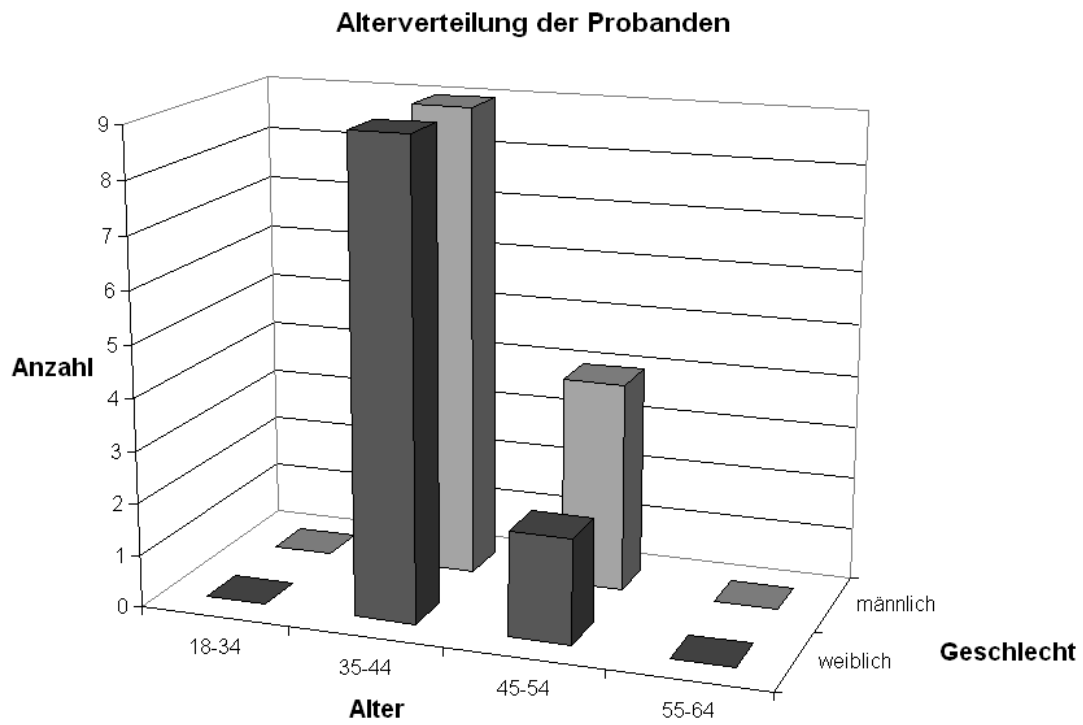


Zu welchem Preis könnte das System angeboten werden?**Könnte das System Ihrer Meinung nach in dieser Form in Serie gehen?**

Welches NIR-System hat Ihnen subjektiv besser gefallen?**Welches FIR-System hat Ihnen subjektiv besser gefallen?**



Altersverteilung, Fragebogen und Antworten des Displayversuchs



Fragebogen NightVision



Daten der Testperson

VP Nr.: Gruppe.: Geschlecht.:

Alter.: jährliche Fahrleistung.:

Sehhilfe/Art.: Datum der Testfahrt:

Körpergröße:

Wetter: Trocken Regen Schnee Nebel
Straßenzustand: trocken nass vereist
Anzeige: Temperatur:°C Abfahrt: Ankunft:

① Wie bewerten Sie die **Größe** der erlebten NightVision-Anzeige?

viel zu klein zu klein genau richtig zu groß viel zu groß

② Wie bewerten Sie das **Seitenverhältnis** der erlebten NightVision-Anzeige?

viel zu breit zu breit genau richtig zu hoch viel zu hoch

③ Wie bewerten Sie den **Abstand** der erlebten NightVision-Anzeige zum Fahrer?

viel zu nah zu nah genau richtig zu weit viel zu weit

④ Wie bewerten Sie die **Einbauhöhe** der erlebten NightVision-Anzeige?

viel zu niedrig zu niedrig genau richtig zu hoch viel zu hoch

⑤ Wie bewerten Sie die **Position allgemein** der erlebten NightVision-Anzeige?

sehr schlecht schlecht befriedigend gut sehr gut

⑥ Wie bewerten Sie die **Bildqualität** der erlebten NightVision-Anzeige?

sehr schlecht schlecht befriedigend gut sehr gut

⑦ Wie bewerten Sie die **Erkennbarkeit** der Anzeigehalte in der erlebten NightVision-Anzeige?

sehr schlecht schlecht befriedigend gut sehr gut

⑧ Haben relevante Bildinhalte Ihren **Blick auf die Anzeige** gelenkt?

nein, nie selten manchmal häufig ja, immer

9 Wie bewerten Sie die **Belastung** während der Fahrt im Vergleich zu einer Fahrt ohne NightVision-System?

sehr anstrengend anstrengend gleichermaßen anstrengend/entlastend entlastend sehr entlastend

10 Hat Sie die Anzeige des NightVision-Bildes gestört?

ja, sehr sogar nein, gar nicht

11 Fühlten Sie bei der Nutzung eine **besondere Anstrengung** Ihrer Augen?

ja, sehr stark stark bemerkbar kaum nein, gar nicht

12 Wie hat Ihnen die Anzeige des NightVision-Bildes im erlebten Monitor im **allgemeinen** gefallen?

sehr schlecht schlecht befriedigend gut sehr gut

13 Welche **Schulnote** würden Sie der Anzeige geben?

Schulnote:

(A) Bringen Sie die erlebten Anzeigen bitte in eine **Rangfolge** und beginnen Sie mit der besten Anzeige

Rang 1:

Rang 2:

Rang 3:

Rang 4:

(B) Wo würden Sie die **Aktivierung/Deaktivierung des System** erwarten?

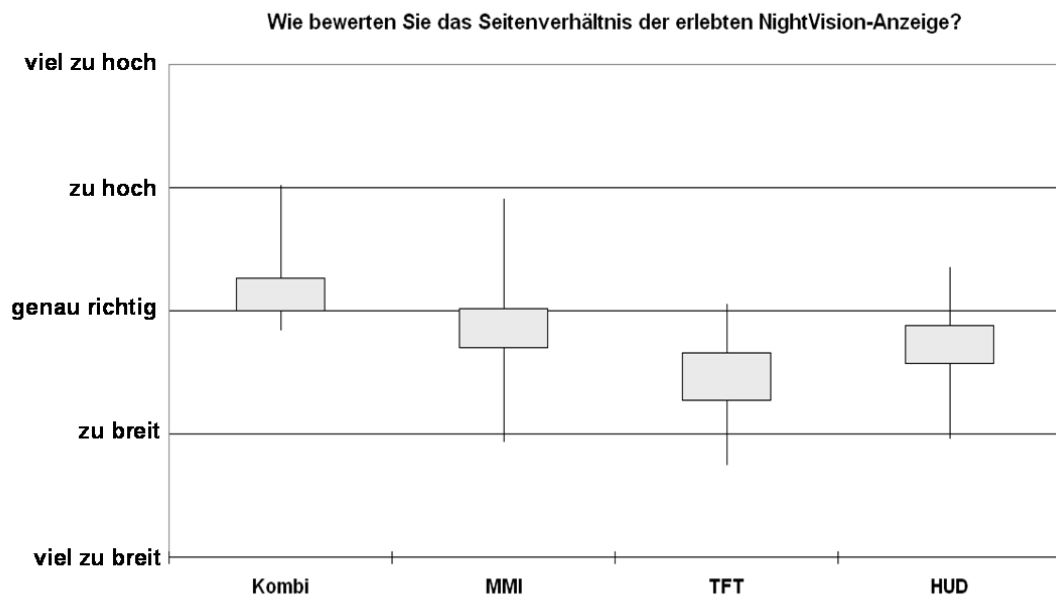
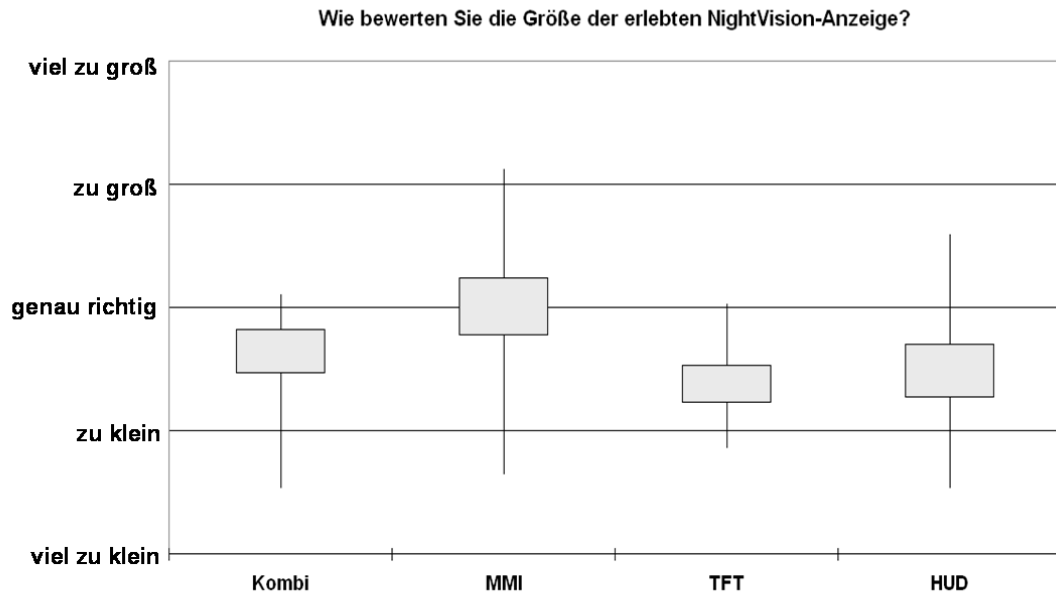
als Untermenü im MMI

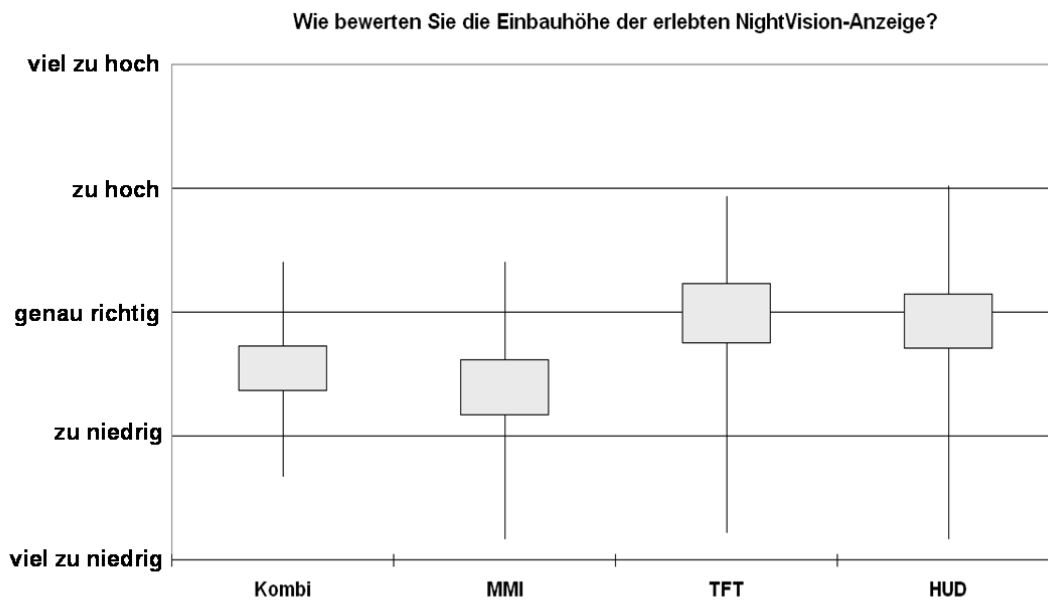
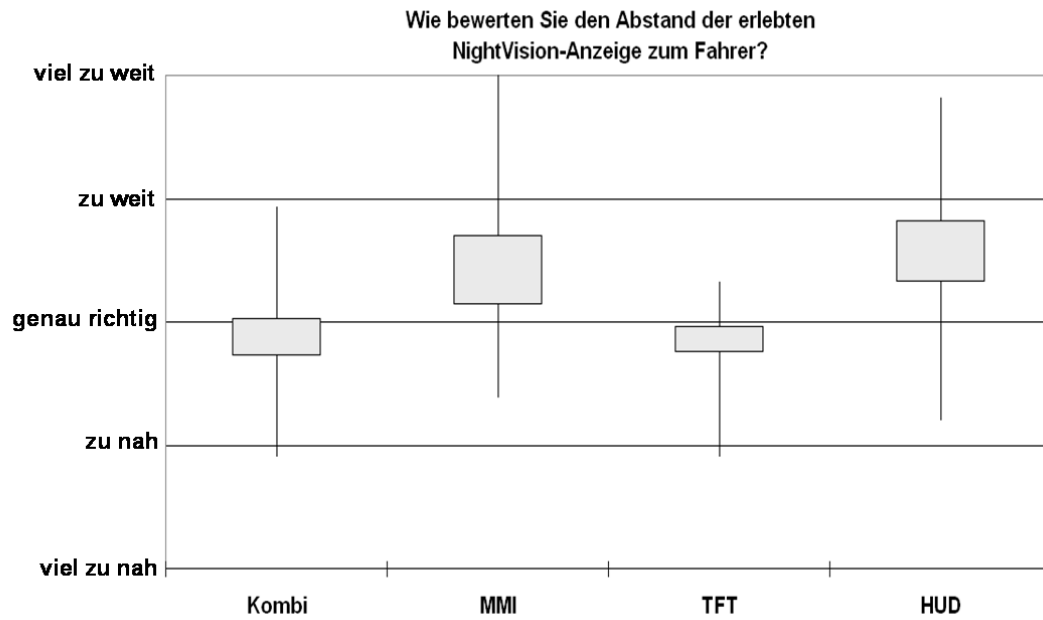
am Multifunktionslenkrad

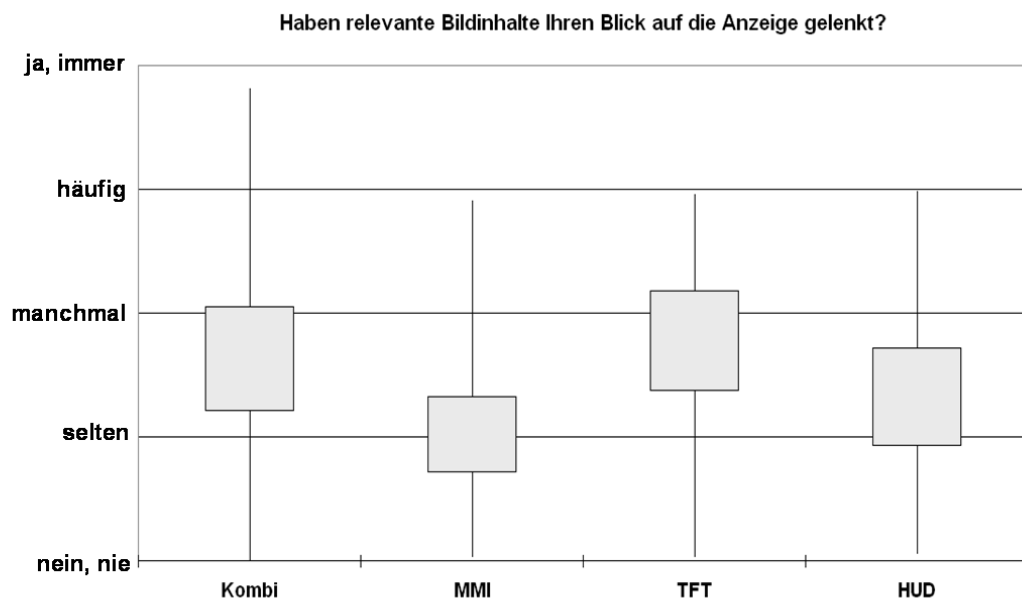
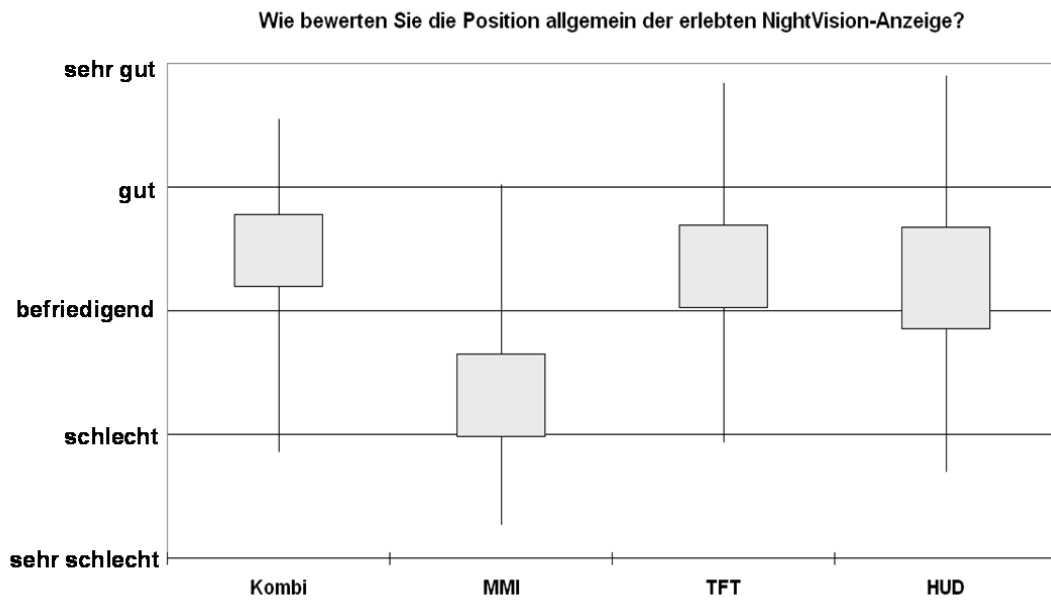
separater Taster

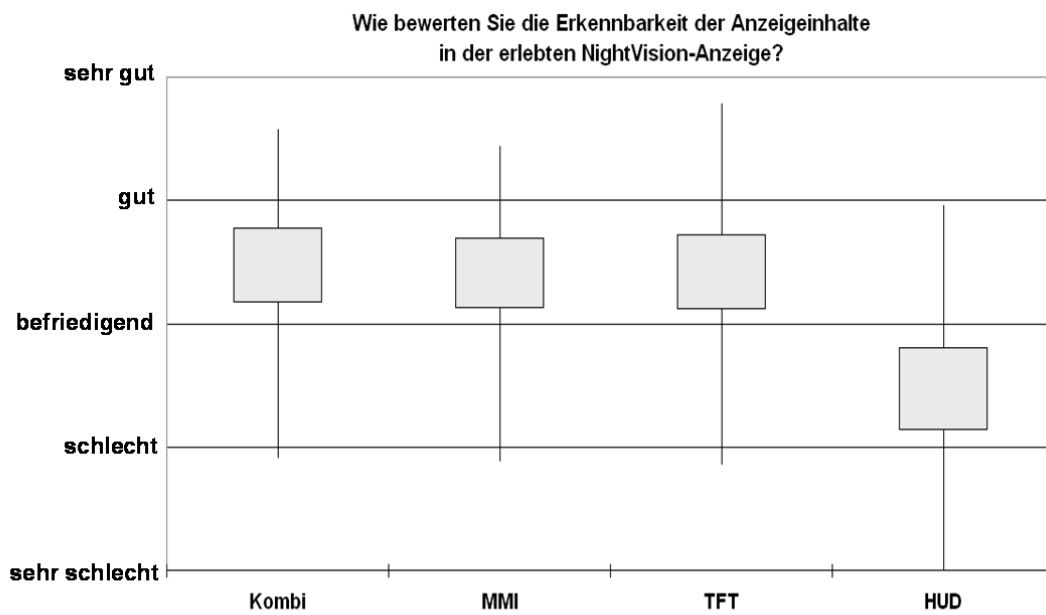
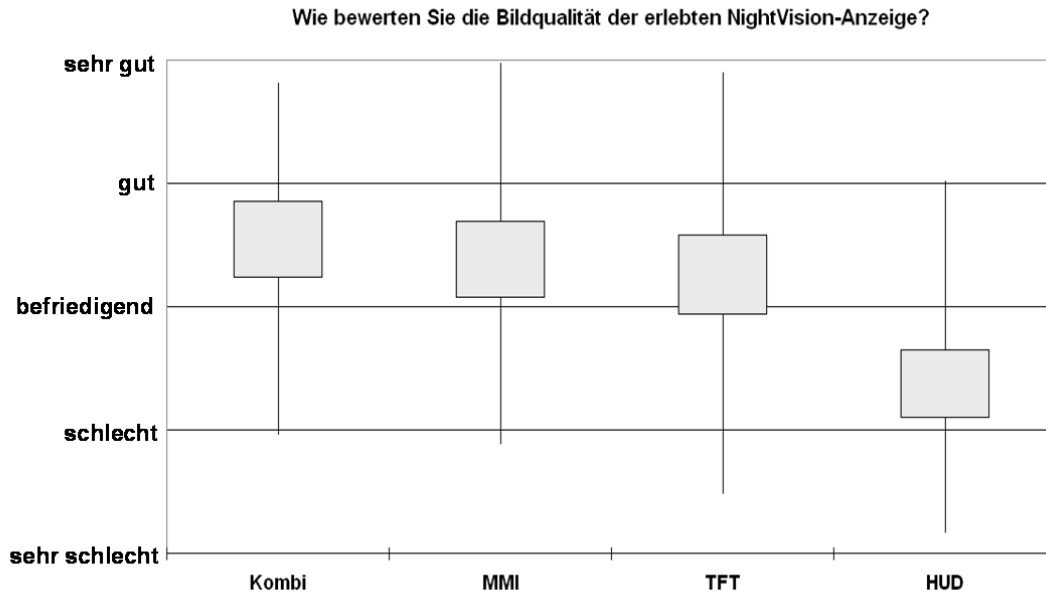
am Lenkstockhebel

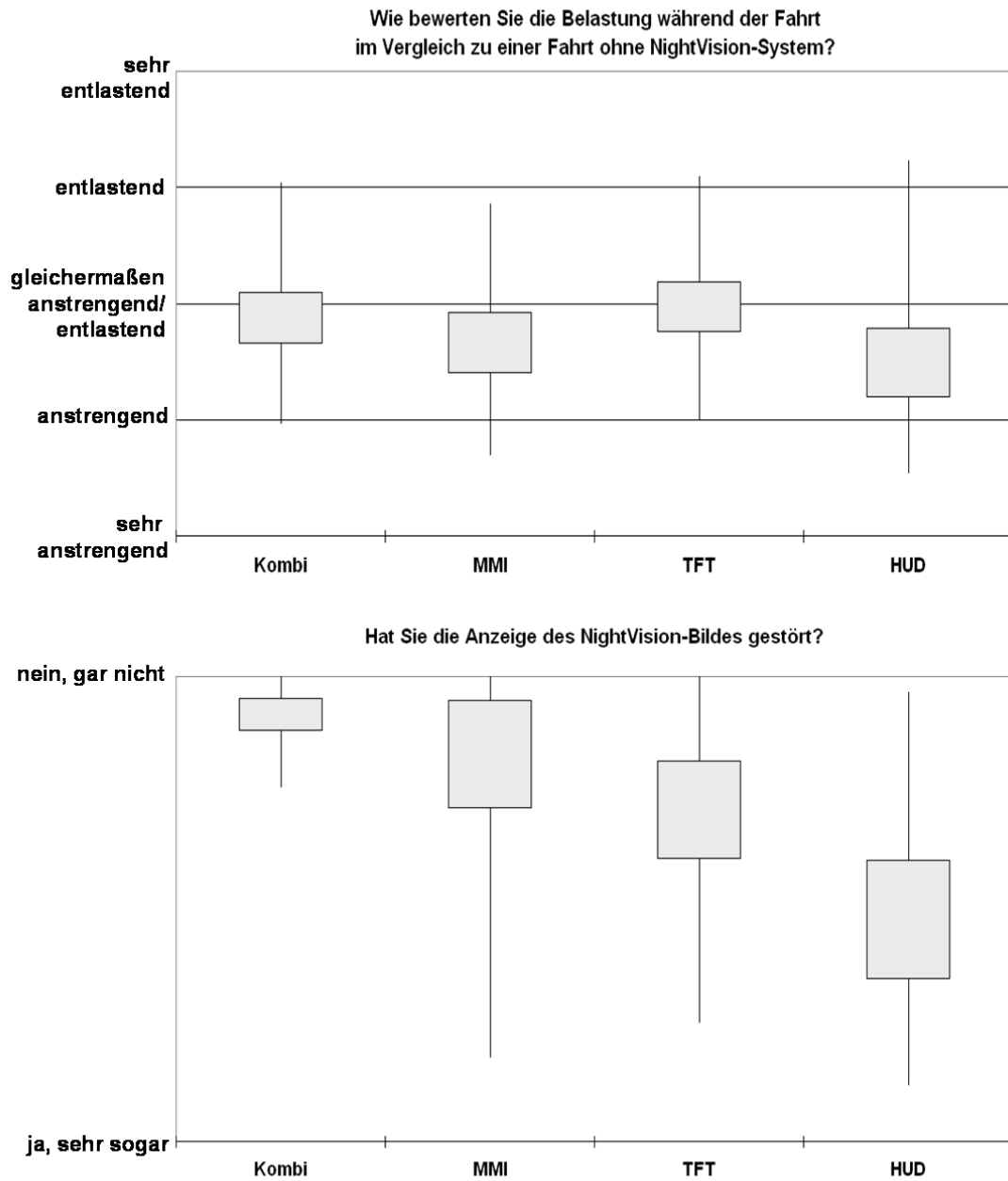
im Lichtdrehschalter

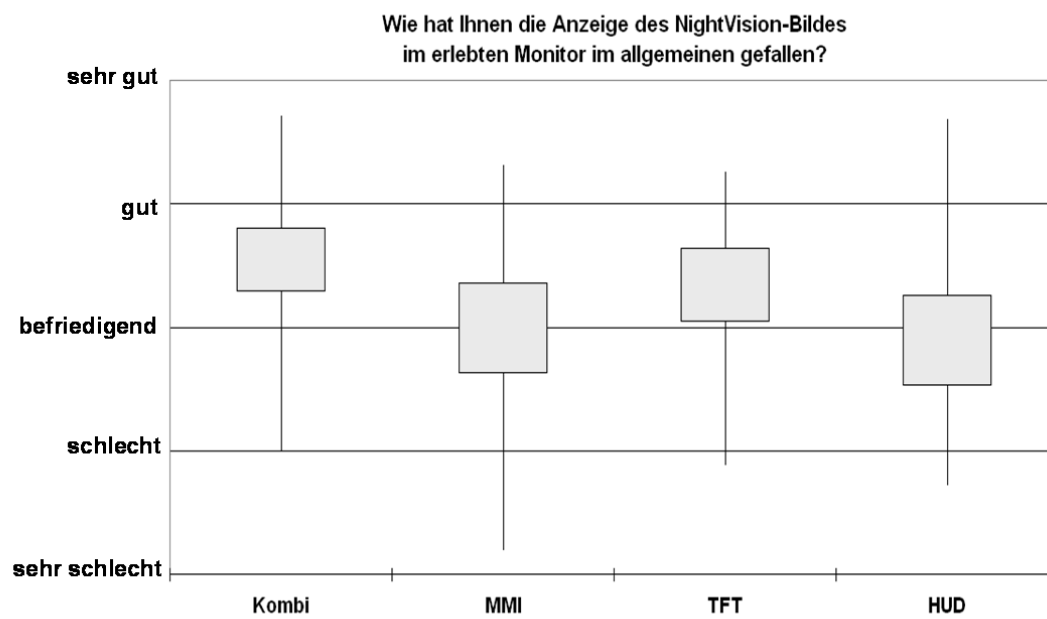
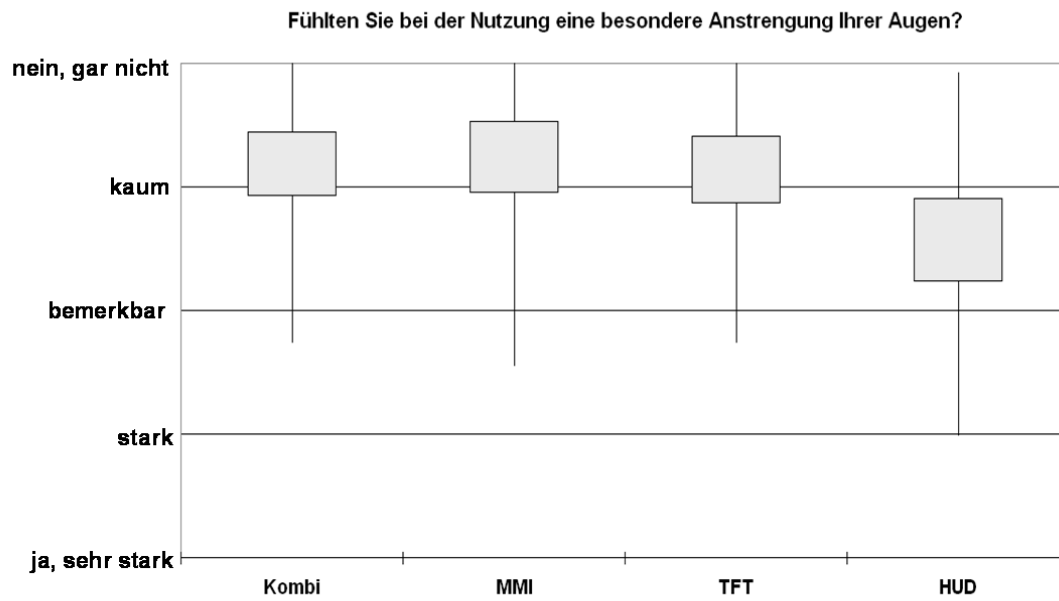




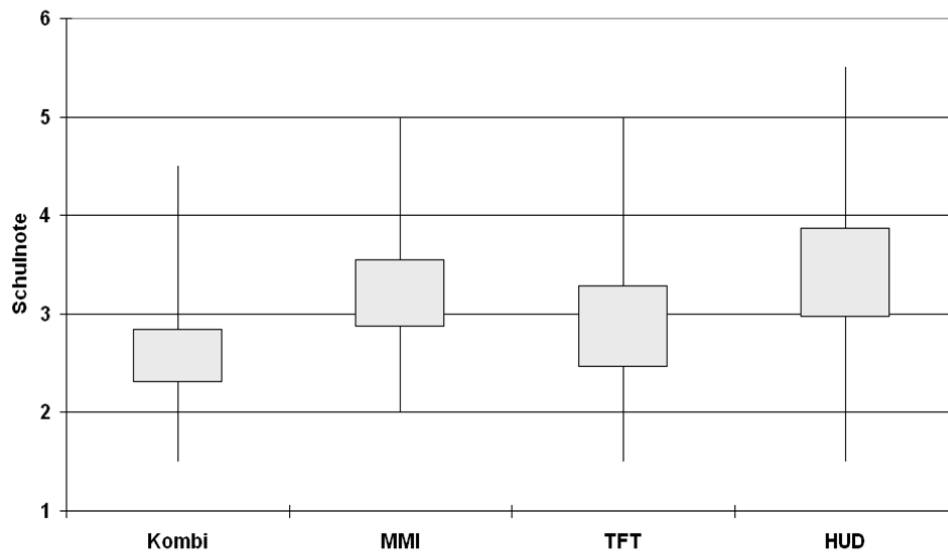




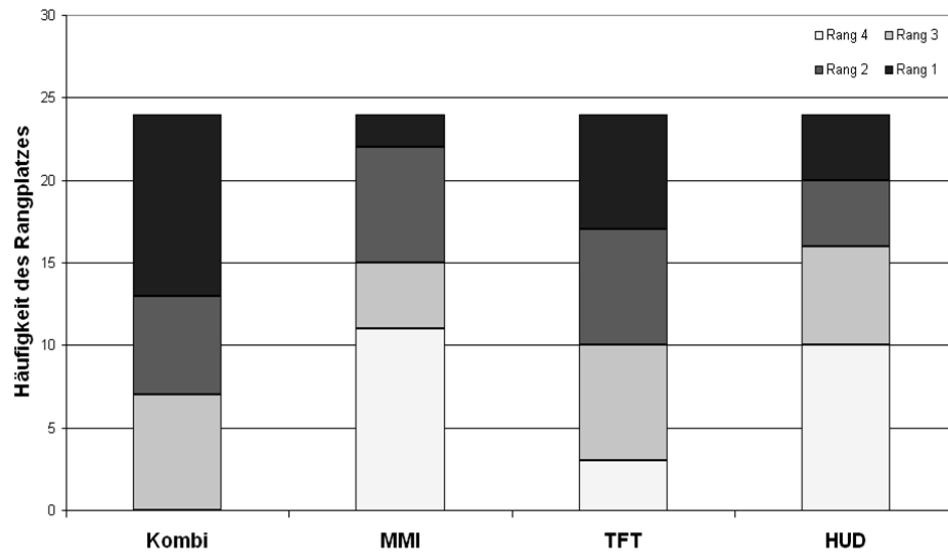




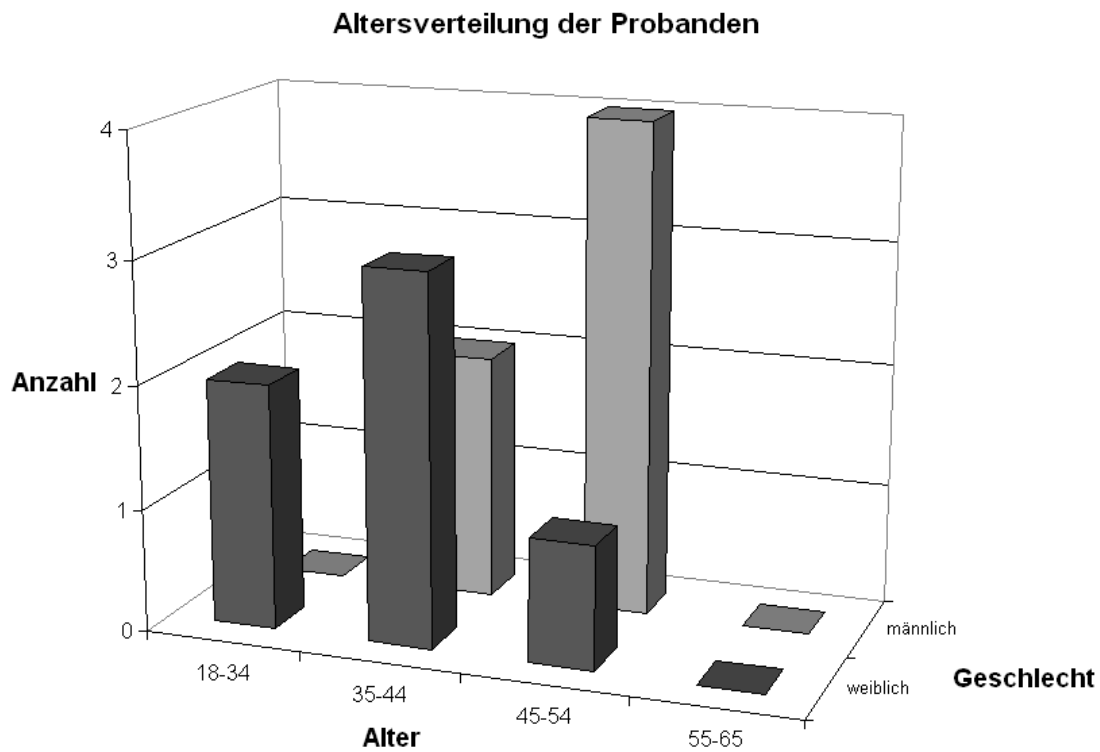
Welche Schulnote geben Sie der Anzeige?



Bringen Sie die erlebten Anzeigen bitte in eine Rangfolge und beginnen Sie mit der besten Anzeige



Altersverteilung, Fragebogen und Antworten des Hauptversuchs





Fragebogen zu Sichtverbesserungssystemen



Daten der Testperson

VP Nr: Gruppe.: Geschlecht.:

Alter.: jährliche Fahrleistung.:

Sehhilfe/Art.: Datum der Testfahrt:

Körpergröße:

rein anzeigendes NightVision

Wetter: Trocken Regen Schnee NebelStraßenzustand: trocken nass vereist

Anzeige: Temperatur:°C Abfahrt: Ankunft:

① Wie hat Ihnen das Sichtverbesserungssystem im allgemeinen **gefallen**?

sehr schlecht schlecht befriedigend gut sehr gut

② Wie **empfanden** Sie die **Sicht** mit dem System im Vergleich zur **Sicht** mit **Abblendlicht**?

viel schlechter schlechter gleich besser viel besser

③ Wie **empfanden** Sie die **Sicht** mit dem System im Vergleich zur **Sicht** mit **Fernlicht**?

viel schlechter schlechter gleich besser viel besser

④ **Fühlten Sie sich mit dem System **sicherer** als ohne?**

nein, gar nicht | ja, auf jeden Fall

⑤ **Meinen Sie, mit dem System **Gefahren früher entdecken** zu können?**

nein, gar nicht | ja, auf jeden Fall

⑥ **Haben relevante Bildinhalte Ihren **Blick auf die Anzeige gelenkt**?**

nein, nie | selten | manchmal | häufig | ja, immer

⑦ **Wie bewerten Sie die **Belastung** während der Fahrt im Vergleich zu einer Fahrt ohne das System?**

viel anstrengender | anstrengender | anstrengungs-neutral | weniger anstrengend | viel weniger anstrengend

hervorhebendes NightVision

Wetter: Trocken Regen Schnee Nebel

Straßenzustand: trocken nass vereist

Anzeige:Temperatur:°C Abfahrt:Ankunft:

① Wie hat Ihnen das Sichtverbesserungssystem im allgemeinen **gefallen**?

sehr schlecht schlecht befriedigend gut sehr gut

② Wie **empfanden** Sie die **Sicht** mit dem System im Vergleich zur **Sicht** mit **Abblendlicht**?

viel schlechter schlechter gleich besser viel besser

③ Wie **empfanden** Sie die **Sicht** mit dem System im Vergleich zur **Sicht** mit **Fernlicht**?

viel schlechter schlechter gleich besser viel besser

④ **Fühlten** Sie sich mit dem System **sicherer** als ohne?

nein, gar nicht ja, auf jeden Fall

⑤ Meinen Sie, mit dem System **Gefahren früher entdecken** zu können?

nein, gar nicht ja, auf jeden Fall

⑥ Haben relevante Bildinhalte Ihren **Blick auf die Anzeige gelenkt**?

nein, nie selten manchmal häufig ja, immer

⑦ Wie bewerten Sie die **Belastung** während der Fahrt im Vergleich zu einer Fahrt ohne das System?

viel anstrengender anstrengender anstrengungsneutral weniger anstrengend viel weniger anstrengend

⑧ Wie hat Ihnen die **Hervorhebung** der **Fahrbahnbegrenzungen** im **erlebten System** gefallen?

sehr schlecht schlecht befriedigend gut sehr gut

⑨ Wie würde Ihnen die **Hervorhebung** der **Fahrbahnbegrenzungen** eines **idealen Systems** gefallen?

sehr schlecht schlecht befriedigend gut sehr gut

⑩ Warum?

.....

.....

.....

⑪ Was würden Sie an der Hervorhebung der **Fahrbahnbegrenzungen verbessern** wollen?

.....

.....

.....

.....

⑫ Wie hat Ihnen die **Hervorhebung potenziell gefährlicher Objekte** im **erlebten System** gefallen?

sehr schlecht schlecht befriedigend gut sehr gut

⑬ Wie würde Ihnen die **Hervorhebung potenziell gefährlicher Objekte** eines **idealen Systems** gefallen?

sehr schlecht schlecht befriedigend gut sehr gut

⑭ Warum?

.....

.....

.....

⑮ Was würden Sie an der Hervorhebung der Objekte **verbessern** wollen?

.....

.....

.....

.....

16) Welche Hervorhebung gefällt Ihnen am besten?



①7 Welche **Hervorhebung im Bild** wünschen Sie sich - und in welcher Farbe?

keine

Fahrbahnbegrenzungen

Objekte

Farbe:

Farbe:

①8 Wie bewerten sie die **Zuordenbarkeit** des Bildes zur direkt wahrgenommenen Umgebung?

sehr schwierig schwierig leicht sehr leicht

①9 Hat Sie die **Anzeige** des Bildes **gestört**?

ja, sehr

nein,
gar nicht

②0 Welche **Schulnote (1-6)** würden Sie dem System geben?

Schulnote:

Adaptives Fernlicht

Wetter: Trocken Regen Schnee Nebel

Straßenzustand: trocken nass vereist

Anzeige: Temperatur:°C Abfahrt: Ankunft:

① Wie hat Ihnen das Sichtverbesserungssystem im allgemeinen **gefallen**?

sehr schlecht schlecht befriedigend gut sehr gut

② Wie **empfanden** Sie die **Sicht** mit dem System im Vergleich zur **Sicht** mit **Abblendlicht**?

viel schlechter schlechter gleich besser viel besser

③ Wie **empfanden** Sie die **Sicht** mit dem System im Vergleich zur **Sicht** mit **Fernlicht**?

viel schlechter schlechter gleich besser viel besser

④ **Fühlten** Sie sich mit dem System **sicherer** als ohne?

nein, gar nicht ja, auf jeden Fall

⑤ Glauben Sie, mit dem System **Gefahren früher entdecken** zu können?

nein, gar nicht ja, auf jeden Fall

⑥ Wie bewerten Sie die **Belastung** während der Fahrt im Vergleich zu einer Fahrt ohne das System?

viel anstrengender anstrengender anstrengungsneutral weniger anstrengend viel weniger anstrengend

⑦ Welche **Schulnote (1-6)** würden Sie dem System geben?

Schulnote:

⑧ Was würden Sie an dem System **verbessern** wollen?

.....
.....
.....

Ⓐ Bringen Sie die erlebten Systeme bitte in eine **Rangfolge** und beginnen Sie mit dem besten System

Rang 1:

Rang 2:

Rang 3:

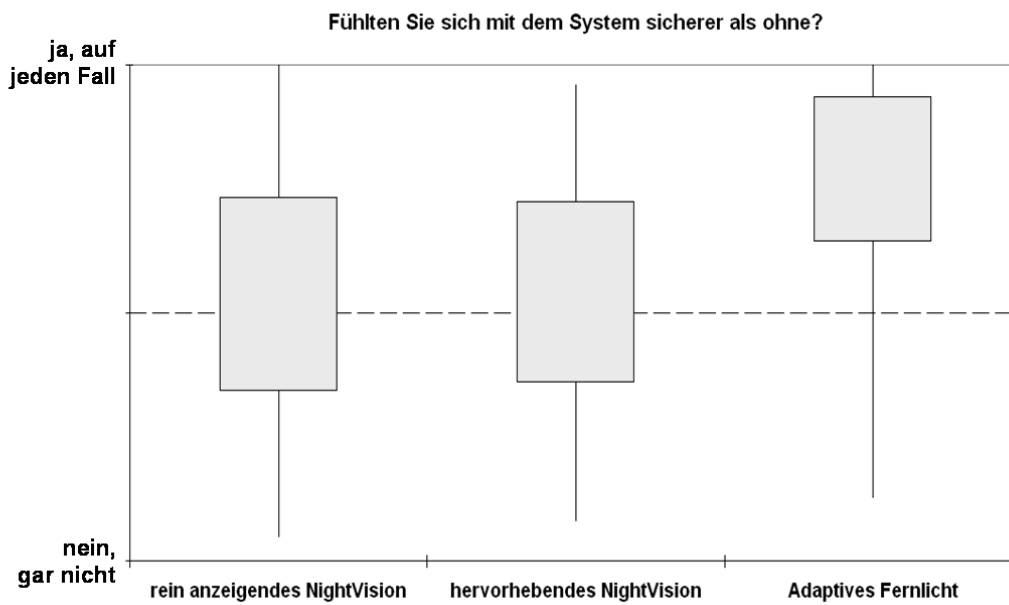
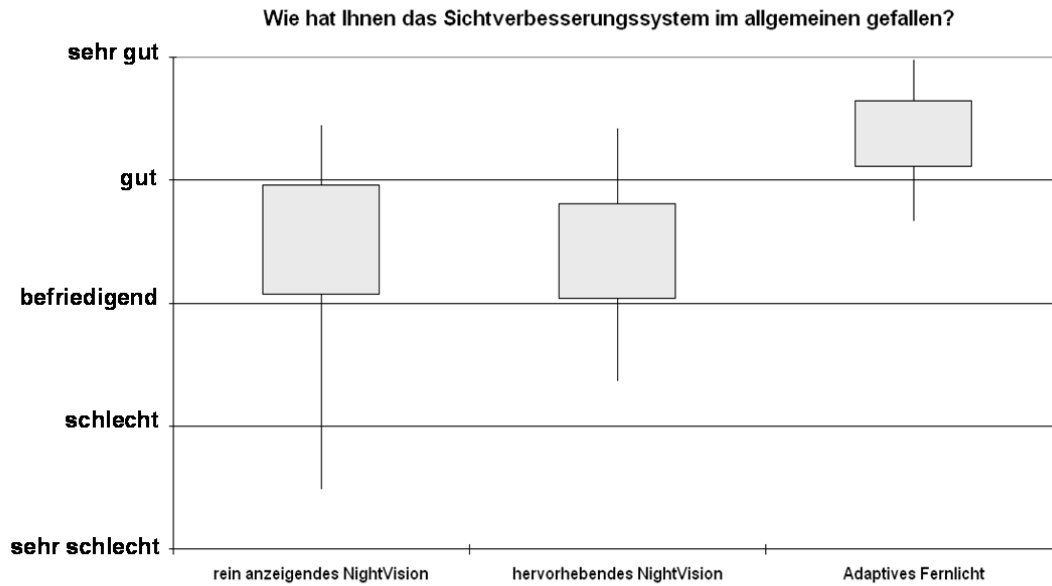
Ⓑ Welches System würden Sie **in Ihrem eigenen Fahrzeug nutzen?**

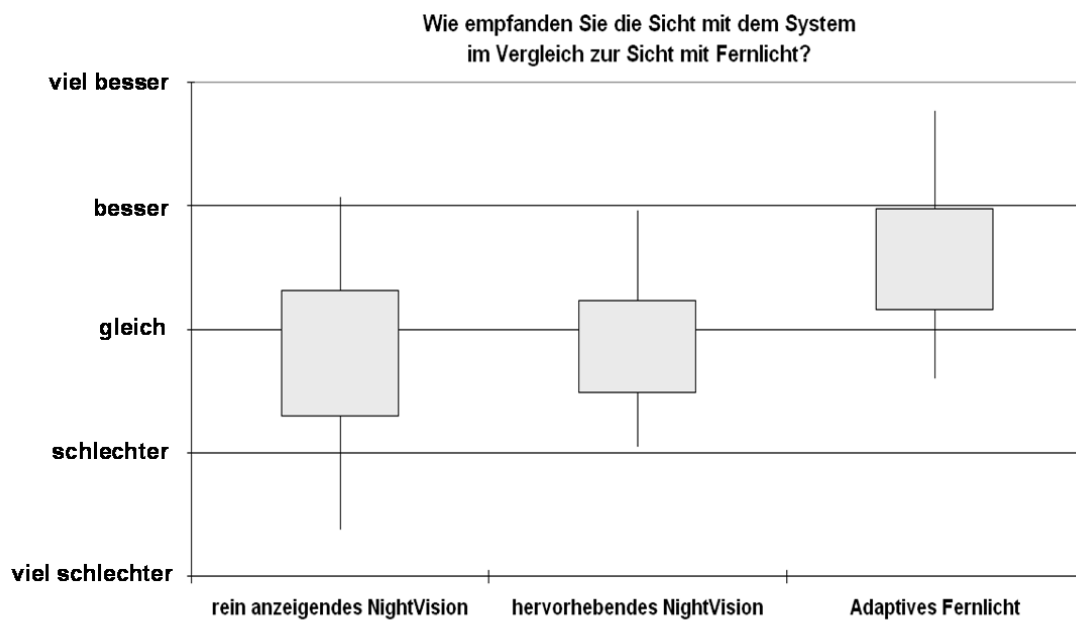
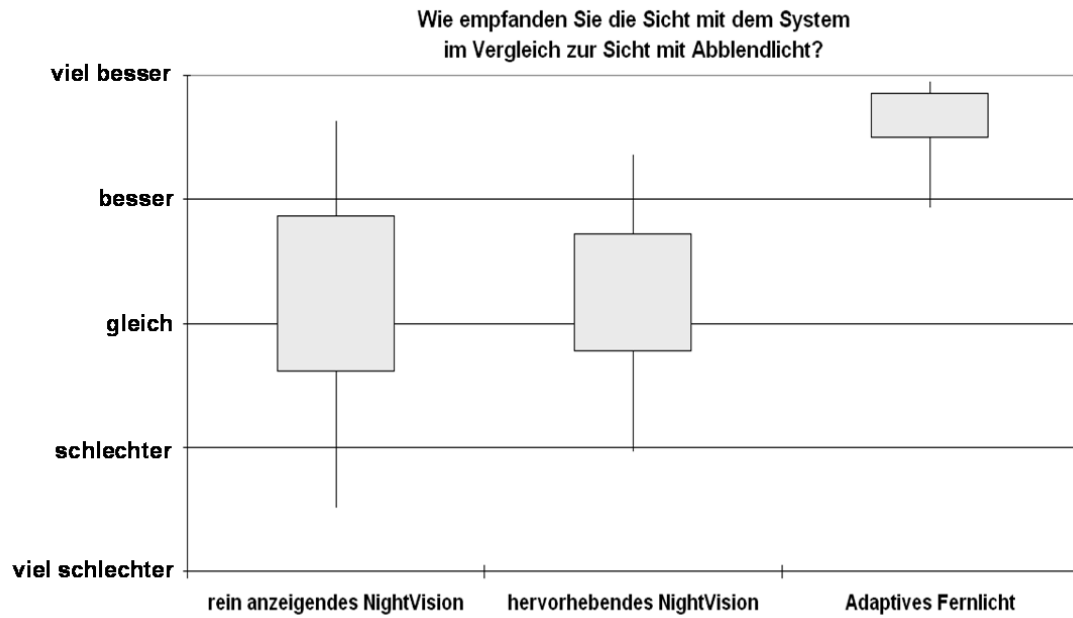
keines

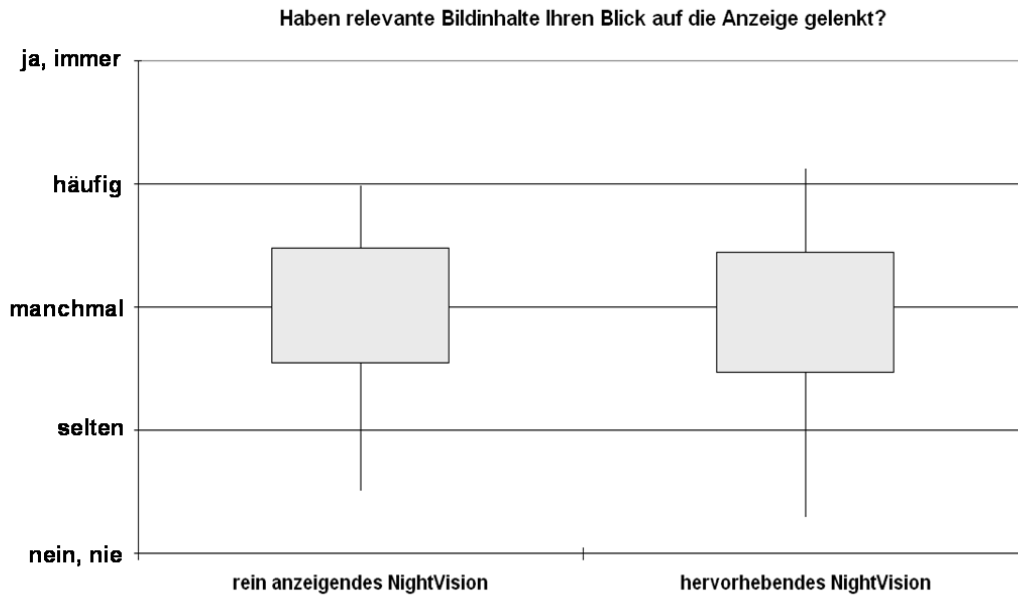
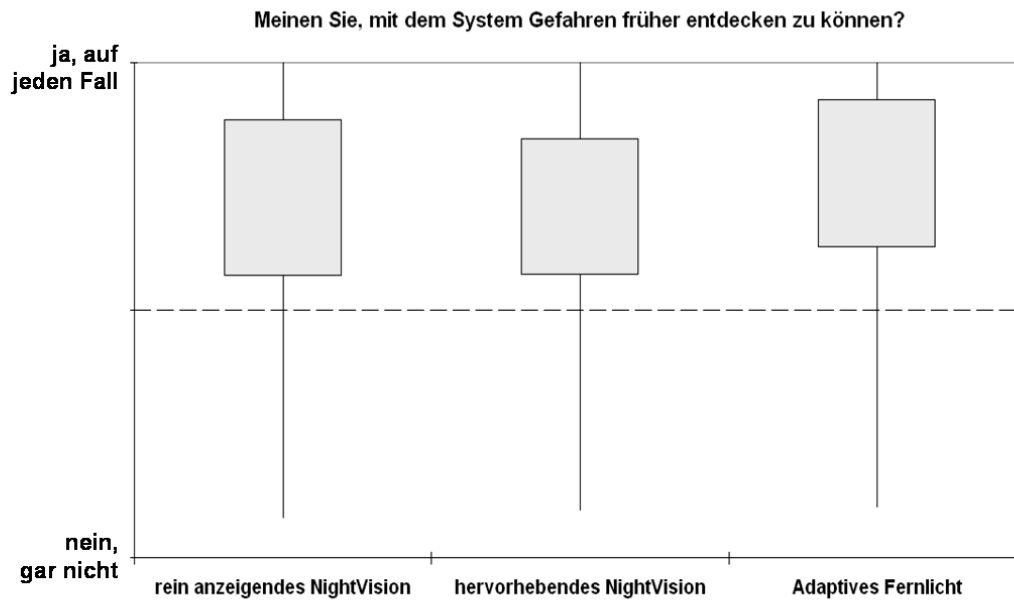
NightVision

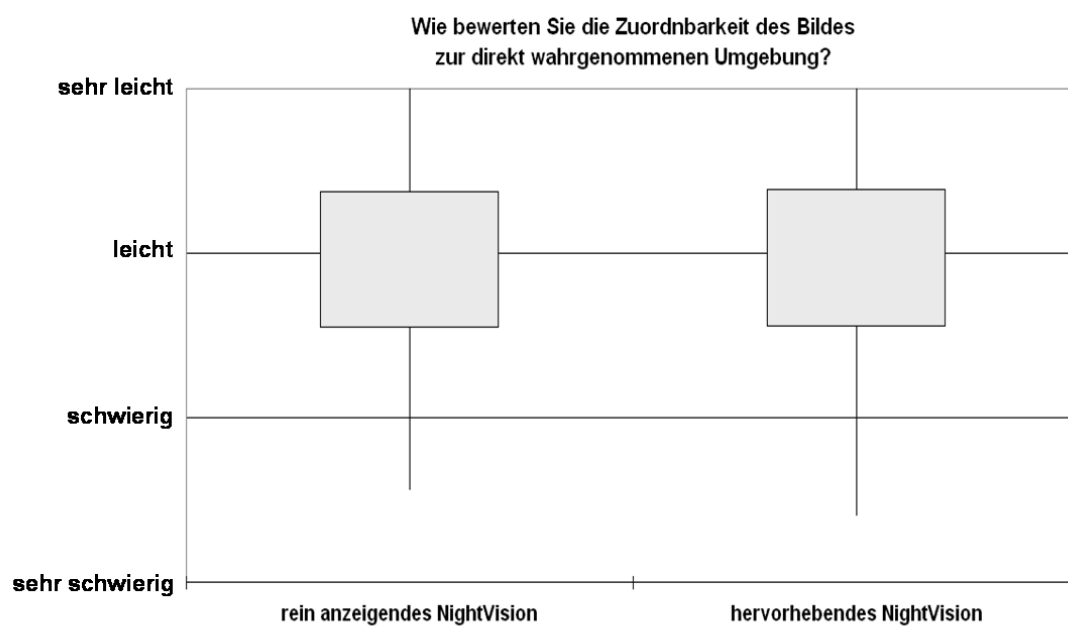
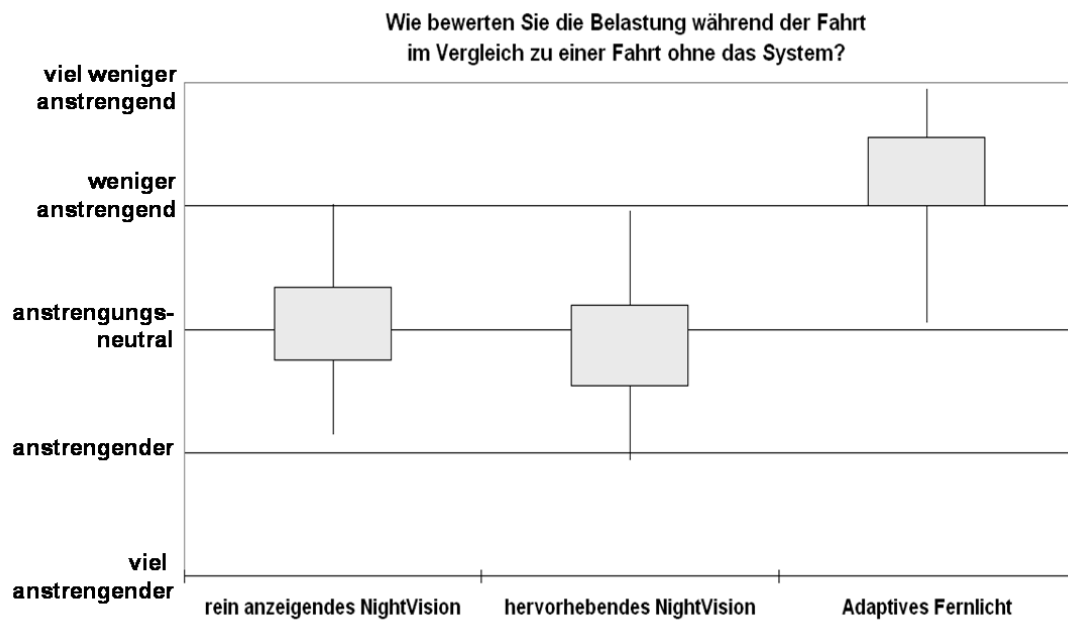
Adaptives Fernlicht

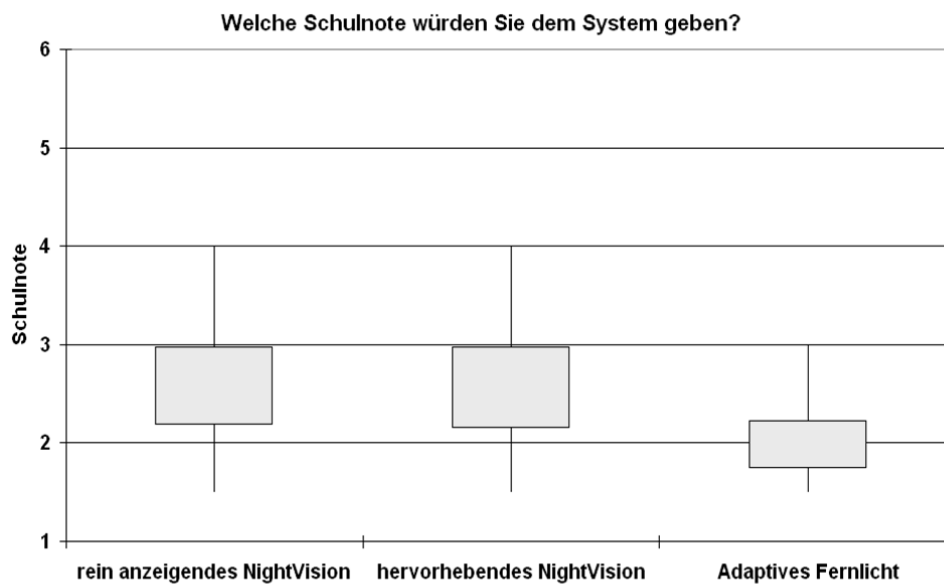
NightVision mit Zusatzinhalten

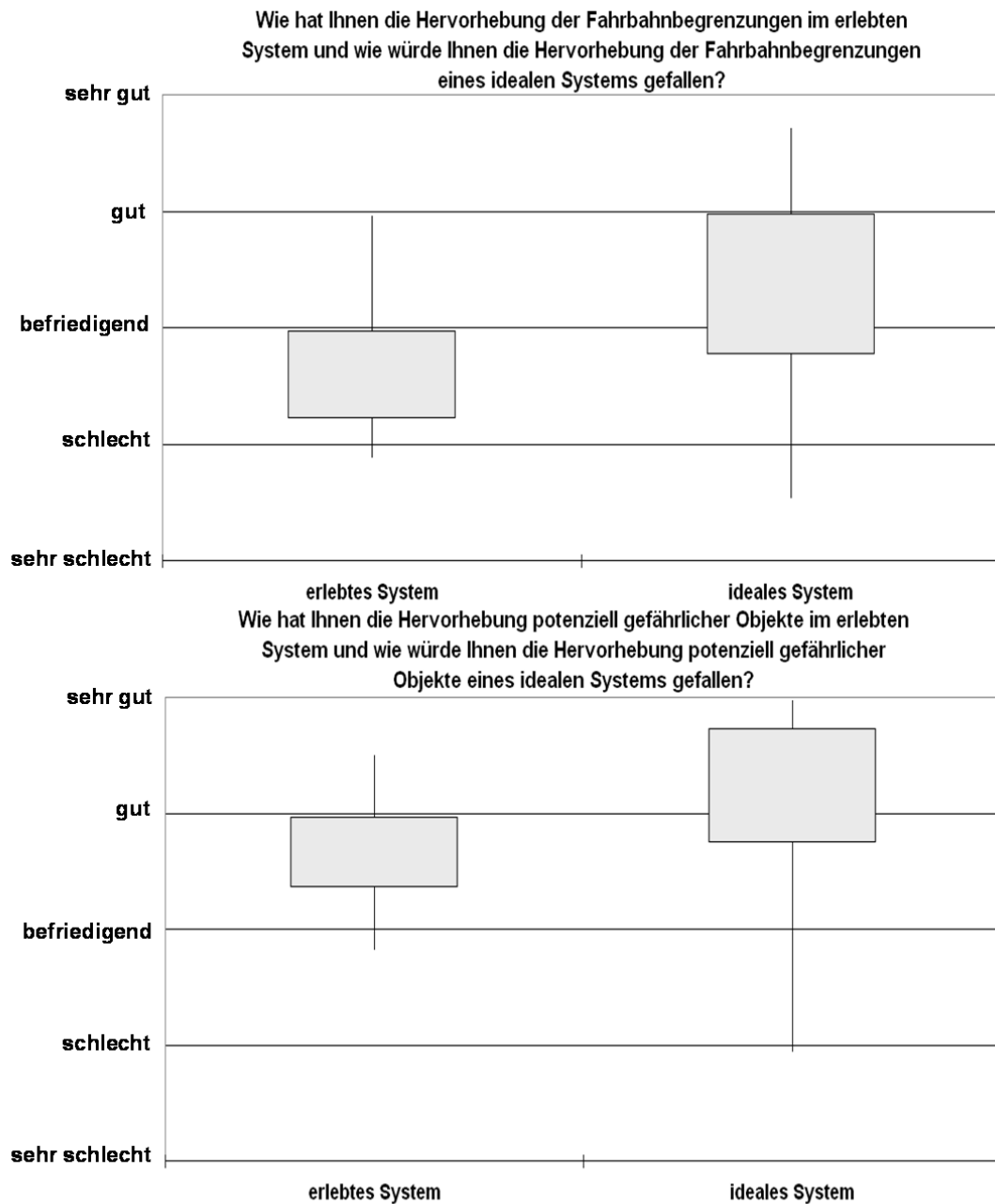




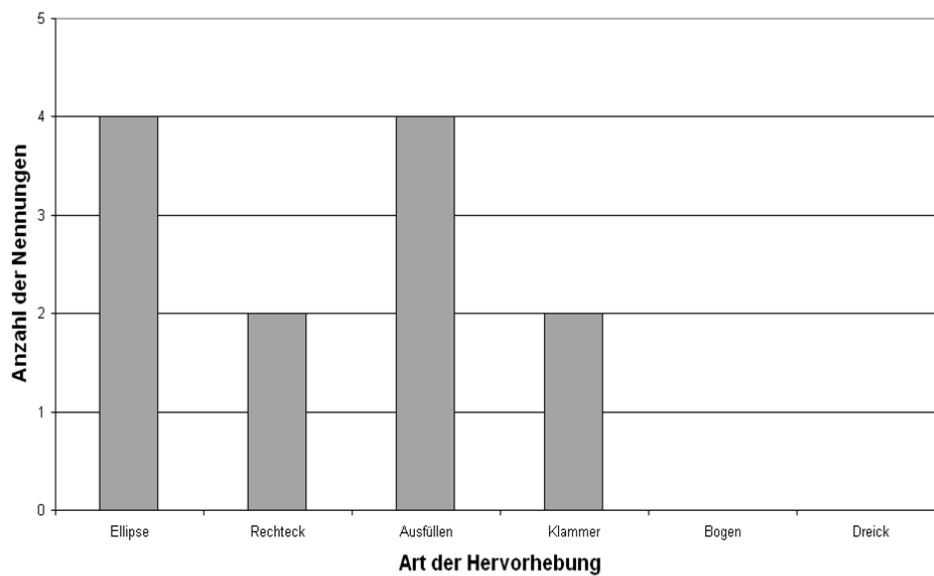




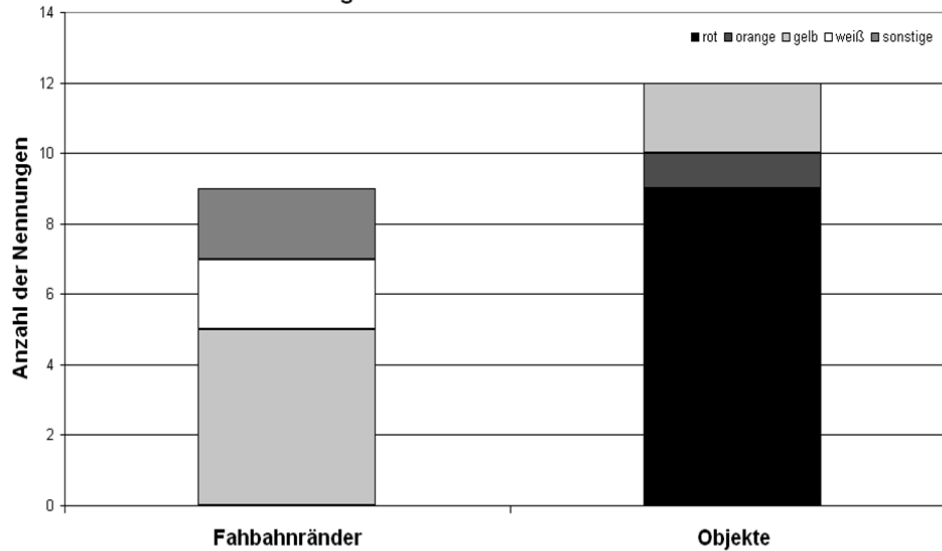




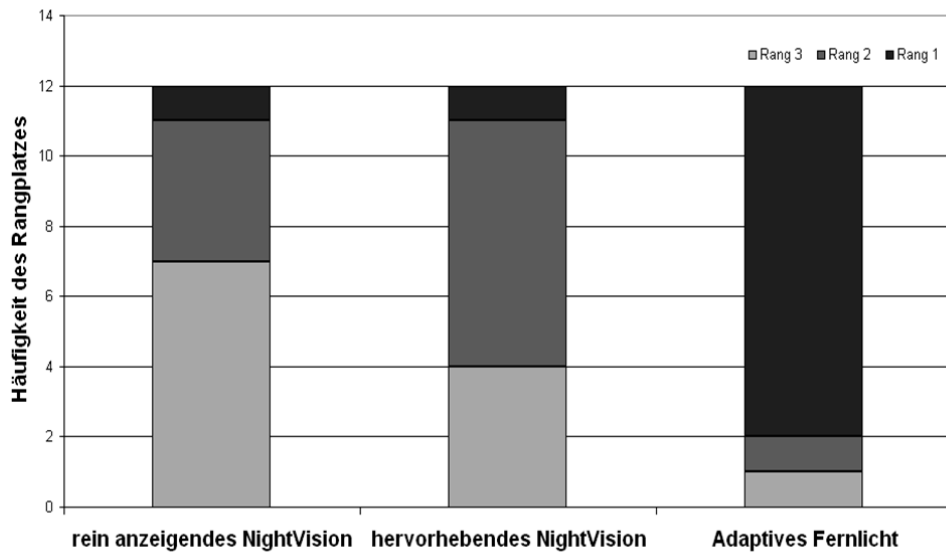
Welche Hervorhebung gefällt Ihnen am besten?



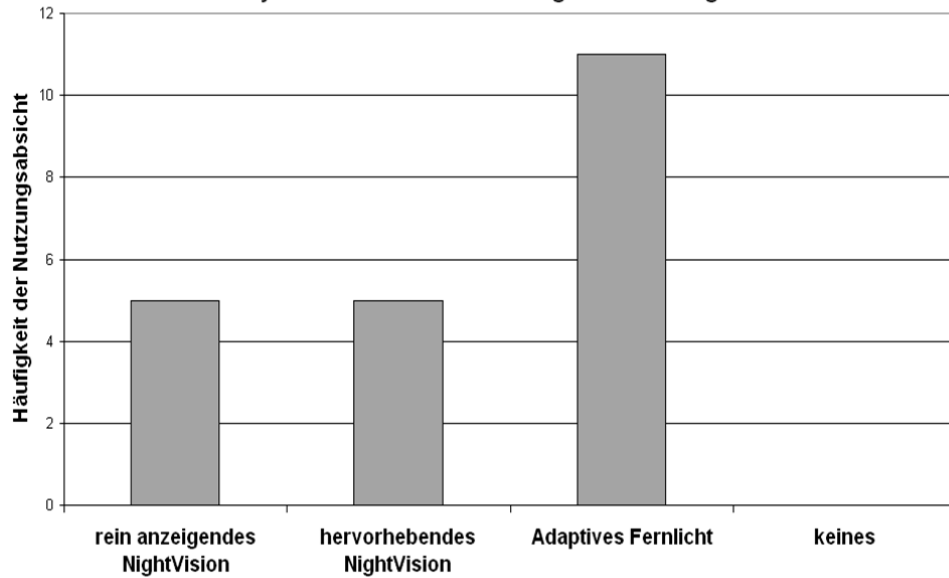
Welche Hervorhebung im Bild wünschen Sie sich und in welcher Farbe?



Bringen Sie die erlebten Systeme in eine Rangfolge und beginnen Sie mit dem besten System



Welches System würden Sie in Ihrem eigenen Fahrzeug nutzen?





Literaturverzeichnis

- [AALS05] ABEL, H.-B., H. ADAMIETZ, B. LEUCHTENBERG und N. SCHMIDT: *Integration von Night-Vision und Head-Up-Display im Kraftfahrzeug*. ATZ, Heft 11/2005. Vieweg Verlag, Wiesbaden, November 2005.
- [All06] ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBILCLUB: *Nachtsichtsysteme*. http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Technik_Zubehoer/fahrerassistenzsysteme/Nachtsichtsysteme/, Link vom 25.01.2007, 2006.
- [Ass85] ASSMANN, E.: *Untersuchung über den Einfluß einer Bremsweganzeige auf das Fahrverhalten*. Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 1985.
- [BAE01] BURG, M., B. ABEL und K. EICHHORN: *Infrared Headlamps for Active NightVision Systems*. Progress in Automobile Lighting 2001 Symposium, Darmstadt University of Technology. Seiten 90-98, 2001.
- [BB88] BURKHARDT, M. und H. BURG: *Berechnung und Rekonstruktion des Bremsverhaltens von PKW*. INFORMATION Ambs GmbH, Kippenheim, 1988.
- [BBG⁺03] BERTOZZI, M., A. BROGGI, P. GRISLERI, T. GRAF und M. MEINCKE: *Pedestrian Detection in Infrared Images*. IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2003. Seiten 662–667, Columbus, Ohio, USA, 2003.
- [BBR⁺05] BROSE, M., H. BRÜGGEMNEYER, H.-D. REIDENBACH, F. SERICK, H. SIEKMANN und E. SUTTER: *Sichtbare und infrarote Strahlung*. Fachverband für Strahlenschutz e.V., Leitfaden “Nichtionisierende Strahlung”, Februar 2005.
- [Bea03] BECKER, H. und E. DONNER ET AL.: *Großzahlenmaterial, “In-Depth”-Erhebungen und Einzelfallanalyse, Werkzeuge zur Verbesserung der Fahrzeugsicherheit im Volkswagen-Konzern*. 1. Dresdner Tagung. Verkehrssicherheit interdisziplinär. Seiten 89–103, Dresden, 27.-28. Juni 2003.

- [Beh97] BEHRINGER, R.: *Visuelle Erkennung und Interpretation des Fahrspurverlaufes durch Rechnersehen für ein autonomes Straßenfahrzeug*. Dissertation am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik der Universität der Bundeswehr München. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1997.
- [Ber70] BERNOTAT, R.: *Anthropotechnik in der Fahrzeugführung*. Ergonomics, 13. Seiten 353–377, 1970.
- [Ber04] BERUFGENOSSENSCHAFT DER FEINMECHANIK UND ELEKTROTECHNIK: *Expositionsgrenzwerte für künstliche optische Strahlung*. Berufsgenossenschaftliche Informationen für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit, Oktober 2004.
- [BH03] BERLITZ, S. und W. HUHN: *Lighting Innovations in Concept Cars*. Progress in Automobile Lighting 2003 Symposium, Darmstadt University of Technology. Seiten 114–123, 2003.
- [Blo06] BLOCH, A.: *Rotlicht-Viertel*. Auto Motor und Sport, Heft 2/2006, Februar 2006.
- [Bra06] BRAUNECK, U.: *Interferenzfilter für innovative Nachtsichtsysteme*. ATZ Heft 02/2006. Seiten 108–111. Vieweg Verlag, Wiesbaden, Februar 2006.
- [Bro83] BROWN, R.G.: *Introduction to Random Signal Analysis and Kalman Filtering*. John Wiley & Sons, New York Chichester Brisbane Toronto Singapore, 1983.
- [Bro98] BROOKNER, E.: *Tracking and Kalman Filtering Made Easy*. John Wiley & Sons, New York Chichester Brisbane Toronto Singapore, 1998.
- [BSMM97] BRONSTEIN, I.N., K.A. SEMENDJAJEW, G. MUSIOL und H. MÜHLIG: *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main Thun, 1997.
- [Bun73] BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN (BAST) AND FORSCHUNGSVEREINIGUNG AUTOMOBILTECHNIK (FAT): *GIDAS German in Depth Accident Study*. Datenbank zur vertieften Untersuchung von Unfällen, 1973.
- [Bus03] BUSCHARDT, B.: *Synthetische Lenkmomente*. Dissertation am Zentrum Mensch-Maschine-Systeme der Technischen Universität Berlin. Seiten 48–72. VDI-Fortschrittsberichte Reihe 22, Nr. 12, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003.
- [BZFS05] BROD, R., A. ZELLER, D. FALB und C. SCHAUDEL: *Fernlichtassistent*. Elektronik im Kraftfahrzeug, 6. - 7. Oktober 2005, Baden-Baden. Seiten 21–33. VDI-Berichte 1907, Düsseldorf, 2005.

- [CEK⁺00] CURIO, C., J. EDELBRUNNER, T. KALINKE, C. TZOMAKAS und W. v. SEELEN: *Walking Pedestrian Detection*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. Seiten 155–163, September 2000.
- [Coh86] COHEN, A.S.: *Möglichkeiten und Grenzen visueller Wahrnehmung im Straßenverkehr*. Bundesanstalt für Straßenwesen., Bergisch Gladbach. Seite 29, 1986.
- [Coh87] COHEN, A.S.: *Blickverhalten und Informationsaufnahme von Kraftfahrern*. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach. Seiten 33–38, 1987.
- [Die04] DIEM, C.: *Blickverhalten von Kraftfahrern im dynamischen Straßenverkehr*. Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt, 2004.
- [Die06] DIEPOLD, K.: *Manuskript 1 zur Vorlesung Digitales Video*. Lehrstuhl für Datenverarbeitung, Technische Universität München, 2006.
- [DIN97] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. UND VDE VERBAND DEUTSCHER ELEKTROTECHNIKER E.V.: *Sicherheit von Laser-Einrichtungen*. EN 60825-1, 1997.
- [Duc03] DUCHOWSKI, A. T.: *Eye Tracking Methodology: Theory and Practice*. Springer Verlag, London, Berlin, Heidelberg, 2003.
- [EGK⁺94] ENKELMANN, W., V. GENGENBACH, W. KRÜGER, S. RÖSSLE und W. TÖLLE: *Obstacle Detection by Real-Time Optical Flow Evaluation*. International Symposium on Intelligent Vehicles. Seiten 7–12, Paris, Frankreich, 1994.
- [Eic05] EICHHORN, K.: *LED Frontlighting*. Photonics in the Automobile. Proceedings of The International Society for Optical Engineering. Seiten 7–14, Bellingham WA, 2005.
- [Ekb70] EKBERG, J.: *Transmission Calculations for Infrared-Optical Links*. The State Institute for Technical Research Finland, 1970.
- [End01] ENDERS, M.: *Pixel Light*. Progress in Automobile Lighting 2001 Symposium, Darmstadt University of Technology. Seiten 234–239, 2001.
- [ESS⁺94] ESTABLE, S., J. SCHICK, F. STEIN, R. JANSSEN, R. OTT, W. RITTER und Y.J. ZHENG: *A Real-Time Traffic Sign Recognition System*. International Symposium on Intelligent Vehicles. Seiten 231–236, Paris, Frankreich, 1994.

- [Eur77] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie des Rates vom 27. September 1977 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über das Sichtfeld der Fahrer von Kraftfahrzeugen*. ECE 77/649/EWG, 1977.
- [Eur01] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Weissbuch - Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft*. Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften. Seite 76., Luxemburg, 2001.
- [Fac03] FACHHOCHSCHULE AALEN: *Bewertung eines IR-Scheinwerfers bezüglich Augenschutz*. Nicht veröffentlichte Messung der Fachhochschule Aalen, 2003.
- [Fle01] FLEURY, B.: *A High Performance Night Vision System*. Progress in Automobile Lighting 2001 Symposium, Darmstadt University of Technology, 2001.
- [Fle02] FLEURY, B.: *Active Infrared Night Vision System*. 1st Vision Congress, Rouen, Frankreich, 24.-25. September 2002.
- [For84] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESSEN, ARBEITSGRUPPE STRASSENENTWURF: *Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS-L-1)*. Teil Linienführung, 1984.
- [FW04] FARDI, B. und G. WANIELIK: *Hough Transformation Based Approach for Road Border Detection in Infrared Images*. 2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Seiten 549-554, Parma, Italien, 2004.
- [FYN⁺03] FANG, Y., K. YAMADA, Y. NINOMIYA, B. HORN und I. MASAKI: *Comparison between Infrared-image-based and Visible-image-based Approaches for Pedestrian Detection*. IEEE, 2003.
- [Gen97] GENGENBACH, R.: *Fahrerverhalten im PKW mit Head-Up-Display*. Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München. VDI-Fortschrittberichte Reihe 12, Nummer 330. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [GG02] GAVRILLA, D.M. und J. GEIBEL: *Shape-based Pedestrian Detection and Tracking*. Proceedings of IEEE Intelligent Vehicle Symposium, 2002.
- [Göh02] GÖHRING, D.: *Digitalkamertechnologien. Eine vergleichende Betrachtung CCD kontra CMOS, Link vom 25.01.2007*. Humboldt Universität zu Berlin. <http://www2.informatik.hu-berlin.de/~goehring/papers/ccd-vs-cmos.pdf>, 2002.

- [Grü05] GRÜNDL, M.: *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*. Dissertation an der Universität Regensburg, 2005.
- [GSMS05] GRAF, T., K. SEIFERT, M.M. MEINECKE und R. SCHMIDT: *Human Factors in Designing Advanced Night Vision Systems*. Intelligent Transportation Systems and Services 2005, Hannover, Germany, 2005.
- [GT92] GRÄFE, V. und L. TSINAS: *Automatic Recognition of Lanes for Highway Driving*. Motion control for Intelligent Automation. Seiten 295–300, Perugia, Italy, 27.-29. Oktober 1992.
- [HA05] HAMM, M. und R. ACKERMANN: *LED im Scheinwerfer - Revolution in Design und Technik*. ATZ, Heft 11/2005. Seiten 970-977. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2005.
- [Hal01] HALLER, R.: *Fahrer-assistenz versus Fahrer-Bevormundung: Wie erreicht man, dass der Fahrer Herr der Situation bleibt?* Kraftfahrzeugführung. Seiten 31-38. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2001.
- [HBG01] HERING, E., K. BRESSLER und J. GUTEKUNST: *Elektronik für Ingenieure*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 4. Auflage, 2001.
- [Hol96] HOLST, G.: *CCD Arrays, cameras and Displays*. JCD Publishing, Cove Trail, 1996.
- [Hon04] HONDA MOTOR CO., LTD.: *Intelligent Night Vision System*. <http://world.honda.com/HDTV/IntelligentNightVision/200408/>, Link vom 25.01.2007, 2004.
- [Hou62] HOUGH, P.: *Method and Means for Recognizing Complex Patterns*. U.S. Patent 3069654, U.S.A, 18. Dezember 1962.
- [Huh98] HUHN, W.: *Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelungen*. Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Darmstadt, 1998.
- [IB98] ISARD, M. und A. BLAKE: *Condensation - Conditional Density Propagation for Visual Tracking*. International Journal of Computer Vision. Seiten 5-28, August 1998.
- [Ill91] ILLIG, H.-J.: *ABC Glas*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 2. Auflage, 1991.

- [Int97] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION: *Guidelines on Limits of Exposure to Broad-Band Incoherent Optical Radiation (0.38 to 3 mM)*. Health Physics, September 1997.
- [Int07] INTERNETRATGEBER RECHT: *Berechnung des Bremswegs*. <http://www.internetratgeber-recht.de/Verkehrsrecht/Rechner/rechner-bremsweg.htm>, Link vom 25.01.2007.
- [Isa98] ISARD, M. A.: *Visual Motion Analysis by Probabilistic Propagation of Conditional Density*. Dissertation am Departement of Engineering Science an der University of Oxford, 1998.
- [IY03] INOUE, T. und S. YAGI: *The Development of an Infrared Projector*. Progress in Automobile Lighting 2003 Symposium. Darmstadt University of Technology. Seiten 440-450, 2003.
- [Jes05] JESSEN, M.: *Modellbasierte Fahrbahnerkennung in einem Ferninfrarot-Bild*. Diplomarbeit in der Sperrfrist bei der AUDI AG, Ingolstadt, 2005.
- [JFRT97] JAHARD, F., D.A. FISH, A.A. RIO und C.P. THOMPSON: *Far/Near Infrared Adapted Pyramid-Based Fusion for Automotive Night Vision*. Image Processing and its Applications (IPA97). Dublin, Irland. Seiten 886-890, July 1997.
- [Jäh05] JÄHNE, B.: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2005.
- [JKR03] JÜRGENSOHN, T. und H. KOLREP-ROMETSCH: *Untersuchung zur Nutzung von Night-Vision Systemen bei Müdigkeit*. Unveröffentlichter Abschlussbericht für die AUDI AG, Berlin, 2003.
- [Kal60] KALMAN, R.E.: *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. Trans. ASME, Series D. Seiten 34–45, 1960.
- [KB03] KLAPPER, S. und C. BÜTTNER: *Einsatz von Nachtsichtsystemen auf Basis Infrarottechnologie in der Fahrzeuganwendung*. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik. Baden-Baden, 17.-18.06.2003, VDI-Bericht 1731. Seiten 315–322, 2003.
- [KFD04] KOPF, M., M.N. FARID und C. DOISL: *Methoden zur Erhöhung der Akzeptanz und Effizienz eines Systems der aktiven Sicherheit*. Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. VDI-Berichte 1864. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004.

- [Kin93] KINZEL, W.: *Präattentive und attentive Bildverarbeitungsschritte zur visuellen Erkennung von Fußgängern*. Dissertation an der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München, 1993.
- [KKBK03] KESSELER, W., M. KLEINKES, G. BIERLEUTGEB und T. KÖNNING: *Verbesserte Sicht durch aktive Nachtsichtunterstützung - Aspekte des Gesamtsystems*. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik. Baden-Baden, 17.-18.06.2003, VDI-Bericht 1731. Seiten 277–284, 2003.
- [KKLB03] KESSELER, W., M. KLEINKES, J. LOCHER und G. BIERLEUTGEB: *Infrared Based Driver Assistance for Enhanced Perception at Night*. Progress in Automobile Lighting 2003 Symposium. Seiten 496-506, 2003.
- [Kno86] KNOLL, P.M.: *Displays: Einführung in die Technik aktiver und passiver Anzeigen*. Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH, Heideberg, 1986.
- [Kod07a] KODAK UNITED STATES: *Datenblatt der CMOS-Kamera KAC-9618*. <http://www.kodak.com/US/en/dpq/site/SENSORS/name/ISS-CMOSProductFamily>, Link vom 25.01.2007.
- [Kod07b] KODAK UNITED STATES: *Datenblatt der CMOS-Kamera KAC-9628*. <http://www.kodak.com/US/en/dpq/site/SENSORS/name/ISS-CMOSProductFamily>, Link vom 25.01.2007.
- [Köp97] KÖPENIK, J.: *Systemkomponenten von Infrarot-Wärmebildgeräten*. Dresden University Press GmbH, Dresden, 1997.
- [Kra98] KRAMER, F.: *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, Wiesbaden, 1998.
- [KWVE03] KAUSCHKE, R., J. WALLASCHEK, S. VÖLKER und K. EICHHORN: *Konstruktionssystematische Analyse und lichttechnische Bewertung von Konzepten für aktive Scheinwerfer*. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik. Baden-Baden, 17.-18.06.2003, VDI-Bericht 1731. Seiten 63–72, 2003.
- [Lan95] LANGWIEDER, K.: *Auftretensformen und Risiken bei Nachtunfällen*. Progress in Automobile Lighting Symposium, Darmstadt University of Technology, 1995.
- [Lan02] LANG, M.: *Kurzmanuskript zur Vorlesung Mensch-Maschine-Kommunikation 1*. Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München, 2002.

- [Lan04] LANG, M.: *Kurzmanuskript zur Vorlesung Mensch-Maschine-Kommunikation 2*. Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München, 2004.
- [LB97] LANGWIEDER, K. und H. BÄUMLER: *Charakteristik von Nachtunfällen*. Progress in Automobile Lighting Symposium, Darmstadt University of Technology, 1997.
- [LF04] LIU, X. und K. FUJIMURA: *Pedestrian Detection Using Stereo Night Vision*. IEEE Transactions on Vehicular Technology 06.11.2004. Seiten 1657-1665, 2004.
- [LO97] LEIBOWITZ, H.W. und D.A. OWENS: *Nighttime driving accidents and selective visual degradation*. Science. Seiten 422-423, 1997.
- [Lüt02] LÜTZELER, M.: *Fahrbahnerkennung zum Manövrieren auf Wegenetzen mit aktivem Sehen*. Dissertation am Institut für Systemdynamik und Flugmechanik der Bundeswehruniversität München. VDI-Fortschrittberichte Reihe 12, Nummer 493, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2002.
- [Luc05] LUCE, T.: *LED Headlamps - The Spiny Path to a legal headlamp*. Photonics in the Automobile, Proceedings of The International Society for Optical Engineering. Seiten 112-121, Bellingham WA, 2005.
- [LVBK03] LOCHER, J., S. VÖLKER, G. BIERLEUTGEB und M. KLEINKES: *NightVision: Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Infrarot-Nachtsichtsysteme*. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik. Baden-Baden, 17.-18.06.2003, VDI-Bericht 1731. Seiten 173-183, 2003.
- [MB00] MARTINELLI, N. und S. BOULANGER: *Cadillac DeVille thermal imaging night vision system*. Human Factors in 2000: Driving, Lighting, Seating Comfort, and Harmony in Vehicle Systems, Warrendale, PA, 2000.
- [MB03] MAYER, R. und J. BLUME: *Optik Design von Head-Up-Displays für Kraftfahrzeuge*. VDI-Tagung Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik. Baden-Baden, 17.-18.06.2003, VDI-Bericht 1731. Seiten 199-211, 2003.
- [Mei04] MEINERS, J.: *Cadillac Drops Night Vision on DeVille*. Automotive News. http://findarticles.com/p/articles/mi_go1459/is_200411/ai_n9436820, Link vom 25.01.2007, 2004.
- [MFJ93] MCCANN, R.S., D.C. FOYLE und J.C. JOHNSTON: *Attentional Limitations with Head-Up Displays*. Proceedings of the Seventh International Symposium on Aviation Psychology. Seiten 70-75, Columbia, Ohio State University, 1993.

- [Moi05] MOISEL, J.: *Solid State Night Vision Systems*. Photonics in the Automobile, Proceedings of The International Society for Optical Engineering. Seiten 47-54, 2005.
- [MRN03] MEIS, U., W. RITTER und H. NEUMANN: *Detection and Classification of Obstacles in Night Vision Traffic Scenes based on Infrared Imagery*. Proceedings of the Intelligent Transportation Systems, 2003. Seiten 1140-1144, 2003.
- [Ols87] OLSON, P.L.: *Visibility Problems in Nighttime Driving*. Society of Automotive Engineers Transactions. Band 96, Nr. 2. Seiten 797-812, 1987.
- [Pau92] PAUL, R.: *Optoelektronische Halbleiterbauelemente*. B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1992.
- [Pau95] PAUL, H.: *Physik in Experimenten und Beispielen*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1995.
- [Pet04] PETERSON, T.: *A Dark Start for Night Vision in Autos*. BusinessWeek Online. http://www.businessweek.com/technology/content/sep2004/tc20040914_2165_tc178.htm, Link vom 25.01.2007, 14.09.2004.
- [Pop06] POPKEN, M.: *Audi Side Assist*. Hanser Automotive, Heft Juli/August 2006. 5. Jahrgang. Seiten 54-56, 2006.
- [Pra91] PRATT, W.K.: *Digital Image Processing*. John Wiley & Sons, New York Chichester Brisbane Toronto Singapore, 1991.
- [RBR04] RIGOLL, G., H. BREIT und S. REITER: *Ergänzungen und Übungen zur Vorlesung Mensch-Maschine-Kommunikation 2*. Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München, 2004.
- [RBW04] RIGOLL, G., H. BREIT und F. WALLHOFF: *Robust Tracking of Persons in Real-World Scenarios Using a Statistical Computer Video Approach*. Image and Vision Computing Journal (IVCJ) 22. Seiten 571–582, 2004.
- [Reg93] REGENSBURGER, U.: *Zur Erkennung von Hindernissen in der Bahn eines Straßenfahrzeuges durch maschinelles Echtzeitsehen*. Dissertation an der Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München, 1993.
- [Rig94] RIGOLL, G.: *Neuronale Netze - eine Einführung für Ingenieure, Mathematiker und Naturwissenschaftler*. Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1994.
- [Rob04] ROBERT BOSCH GMBH: *Sicherheits- und Komfortsysteme: Funktion, Regelung und Komponenten*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 3. Auflage, 2004.

- [Roc72] ROCKWELL, T.: *Skills, judgement and information acquisition in driving*. T.W. Forbes (Hrsg.), Human factors in highway traffic safety research. Wiley, New York, 1972.
- [Rom02] ROMANS, B.: *Follow-Up Test: 2003 Lexus LX 470*. Inside In-line. <http://www.edmunds.com/insideline/do/Drives/Followup/articleId=77844>, 2002.
- [Ros05] ROSLAK, J.: *Entwicklung eines aktiven Scheinwerfersystems zur blendungsfreien Ausleuchtung des Verkehrsraums*. Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn, 2005.
- [Rum02] RUMAR, K.: *NightVision Enhancement Systems*. University of Michigan - Transport Research Institute, Michigan, 2002.
- [Rum03] RUMAR, K.: *NightVision Enhancement Systems (NVES) - Research and Requirements*. Progress in Automobile Lighting 2003 Symposium. Seiten 895–908, Darmstadt University of Technology, 2003.
- [SAMF03] SULLIVAN, J. M., G. ADACHI, M. L. MEFFORD und M. J. FLANNAGAN: *High-Beam headlamp usage on unlighted rural roadways*. University of Michigan, 2003.
- [Sch93] SCHMIDTKE, H.: *Ergonomie*. Carl Hauser Verlag, München, Wien, 3. Auflage, 1993.
- [Sch04a] SCHÄFER, B.-J.: *Prädiktive Fahrerassistenzsysteme - vom Komfortsystem zur aktiven Unfallvermeidung*. Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. VDI-Berichte 1864. VDI-Verlag. Seiten 37-46, Düsseldorf, 2004.
- [Sch04b] SCHMIDT, G.: *The Contribution of Future Vehicle Design to Improve Road Safety*. Tagungsband des Technischen Kongress 2004 in Rüsselsheim, 23. März 2004. Seiten 76–86, 2004.
- [Sei92] SEIFFERT, U.: *Fahrzeugsicherheit: Personenwagen*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [SM79] STAHL, K. und G. MIGOSA: *Infrarottechnik: Grundlagen, Strahlungsender und Detektoren, Infrarotbildaufnahmen und -wiedergabe, Fernmessverfahren*. Seiten 179–189. Dr. A. Hüthig Verlag, Heidelberg, 2. Auflage, 1979.
- [Spi05] SPIEGEL ONLINE: *Audi Allroad Concept - Helferlein halten Kurs*. <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,337155,00.html>, Link vom 25.01.2007, 2005.

- [Sta03] STATISTISCHES BUNDESAMT WIESBADEN: *Statistische Jahrbücher 1994 - 2003*. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden, 1994–2003.
- [Sta06] STATISTISCHES BUNDESAMT WIESBADEN: *Verkehrsunfälle - Fachserie 8 Reihe 7*. <http://www.destatis.de/>, Wiesbaden, 2006.
- [Str06] STRASSENVERKEHRS-ORDNUNG UND STRASSENVERKEHRS- ZULASSUNGSORDNUNG: *Straßenverkehrsrecht*. Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 45. Auflage, 2006.
- [Tan88] TANK, V.: *Infrarottemperaturmessung mit selbständiger Berücksichtigung des Emmisionsgrades*. Forschungsbericht des DFVLR, 1988.
- [Tan05] TANER, A.: *Ansätze zur Fahrbahnerkennung in Wärmebildern zur Unterstützung des Fahrers bei der Orientierung in einem passiven NightVision-Bild*. Elektronik im Kraftfahrzeug am 6.-7. Oktober 2005 in Baden-Baden. VDI-Berichte 1907. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2005.
- [Tan06a] TANER, A.: *Beleuchtungsvorrichtung für ein Fahrzeug*. Patentschrift beim Deutschen Patent- und Markenamt, Patentnummer DE 10 2006 008 188, eingereicht am 22.02.2006.
- [Tan06b] TANER, A.: *Kraftfahrzeug mit einer Beleuchtungseinrichtung mit veränderbarem Ausleuchtvolumen*. Offenlegungsschrift beim Deutschen Patent- und Markenamt, Offenlegungsnummer DE 10 2005 014 953 A1, Offenlegungstag am 05.10.2006.
- [TBMF04] TSIMHONI, O., J. BÄRGMAN, T. MINODA und M.J. FLANNAGAN: *Pedestrian Detection with Near and Far Infrared Night Vision Enhancement*. The University of Michigan Transportation Research Institute, Michigan, 2004. UMTRI-2004-38.
- [TFM04] TSIMHONI, O., M. FLANNAGAN und T. MINODA: *Pedestrian Detection with Night Vision Systems Enhanced by Automatic Warnings*. The University of Michigan Transportation Research Institute, Michigan, 2004. UMTRI-2005-23.
- [TGR06] TANER, A., H. GRÜNLEITNER und H. RIEDEL: *Nachtsichtsystem für ein Kraftfahrzeug*. Patentschrift beim Europäischen Patentamt, Patentnummer EP 1 632 791 A2, veröffentlicht am 08.03.2006.
- [TKM⁺04] THÜRING, M., J.F. KREMS, S. MAHLKE, K. PATAKI, D. SCHULZE-KISSING, D. RÖSLER, A. KEINATH und S. DITTRICH: *Empirische Bewertung von NightVision-Systemen*. Unveröffentlichter Abschlussbericht für den Volkswagen-Konzern, Berlin, Chemnitz, 2004.

- [TR06] TANER, A. und H. RIEDEL: *Verfahren zur Kennzeichnung von Bildinformationen in der Darstellung eines mit einer fahrzeugseitigen Bildaufnahmeeinrichtung aufgenommenen Nachtsichtbildes und zugehöriges Nachtsichtsystem*. Patentschrift beim Europäischen Patentamt, Patentnummer EP 1 617 371 A2, veröffentlicht am 18.01.2006.
- [vJKSH05] JAN, T. V., T. KARNAHL, K. SEIFERT und J. HILGENSTOCK: *Don't sleep and drive - VW's Müdigkeits- & Aufmerksamkeitserkennung für Fahrer*. Fahrer im 21. Jahrhundert - Der Mensch als Fahrer und seine Interaktion mit dem Fahrzeug, VDI-Berichte 1919, VDI Verlag, Düsseldorf, 2005.
- [Wal97] WALLRABE, A.: *Nachtsichttechnik*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, Wiesbaden, 1997.
- [WHW04] WEIDNER, T., W. HAHN und H. WINNER: *Architektur eines Nachtsichtsystems mit Bildfusion*. Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme. Seiten 187-207. VDI-Berichte 1864. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004.
- [XJ03] X. RONG LI und V.P. JILKOV: *Survey of Maneuvring Target Tracking*. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. Seiten 1333-1364, April 2003.
- [XLF05] XU, F., X. LIU und K. FUJIMURA: *Pedestrian Detection and Tracking With Night Vision*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 2005. Seiten 63-71, 2005.
- [Yod95] YODER, L.A.: *The Fundamentals of Using Digital Micromirror Device for Projection Displays*. International Conference on Integrated Micro/Nanotechnology for Space Application, Houston Texas, 1995.
- [YTC92] YOUNG, E., R. TRIBE und R. CONLONG: *Obstacle Detection for Collision Avoidance*. Proceedings of the 3rd Prometheus Collision Avoidance Workshop. Seiten 190-195, Nürtingen, 1992.
- [Zöf01] ZÖFEL, P.: *Statistik verstehen*. Addison-Wesley Verlag, München, 2001.
- [ZS06] ZIMMERMANN, W. und R. SCHMIDGALL: *Bussysteme in der Fahrzeugtechnik: Protokolle und Standards*. Vieweg Kraftfahrzeugtechnik ATZ/MTZ-Fachbuch, Wiesbaden, 2006.



