

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Ergonomie

Kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem
Entwicklung und experimentelle Absicherung

Ulrich Bergmeier

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb, i.R.
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Schiller
3. Univ.-Prof. Dr. phil. habil., Dr.-Ing. Birgit Spanner-Ulmer,
Technische Universität Chemnitz

Die Dissertation wurde am 26.05.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 26.10.2009 angenommen.

Danksagung

Mein Dank gilt all denen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. An erster Stelle ist Herr Professor H. Bubb zu nennen, der mir diese interessante Arbeit ermöglicht hat und bei auftretenden Schwierigkeiten stets hilfreich zur Seite stand. Besonders zu schätzen wusste ich die freundliche Arbeitsatmosphäre, sowie die von ihm gewährten Freiheiten, die entscheidend für ein motiviertes, eigenverantwortliches, sowie kreatives Arbeiten waren. Frau Professor B. Spanner-Ulmer und Herrn Professor F. Schiller danke ich, dass sie sich bereit erklärt haben, diese Arbeit zu beurteilen, sowie Herrn Professor G. Wachtmeister zur Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein besonderer Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Ergonomie an der Technischen Universität München. Hervorzuheben ist Herr M. Wohlfarter, der mir mit seiner uneigennütigen, hilfsbereiten Art in schwierigen Zeiten menschlich wie auch fachlich stets eine sehr große Hilfe war. Auch Herrn D. Damböck möchte ich für die tatkräftige Unterstützung bei der Vorlesung „Produktionsergonomie“ danken, sowie Herrn Professor H. Rühmann, Herrn Dr. C. Lange, Herrn R. Spies, Herrn Dr. C. Mergl, Herrn Dr. J. Hartung, Herrn Dr. R. Zöllner, Herrn N. Knoll, Herrn M. Arzberger, Herrn M. Kienle, Herrn Dr. H. Wolf, Herrn Dr. H. Rausch, Herrn Dr. M. Schneid, Frau Dr. I. Jastrzebska-Fraczek, Frau Dr. C. Hüther, Herrn F. Engstler, Herrn W. Remlinger, Herrn O. Sabbah, Herrn F. Friesdorf, Frau M. Plavsic und Frau D. Popiv für die hervorragende und symbiotische Zusammenarbeit. Vielen Dank auch Herrn H. Hart für die Umsetzung der Prototypen und Versuchsaufbauten, sowie das Korrekturlesen der Arbeit.

Zu vergessen sind natürlich auch nicht die zahlreichen Studenten, die mich im Rahmen dieser Arbeit, aber auch bei parallelbegleitenden Projekten, tatkräftig unterstützt und somit maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Besonders möchte ich mich diesbezüglich bei Frau A. Pfeiffer, Herrn S. Kirchner, Herrn T. Reindl, Herrn I. Stefanov, Herrn O. Hamm, Herrn A. Haslbeck, Herrn M. Neubauer, Herrn B. Israel, Herrn X. Fu, Herrn F. Hofbeck, Herrn T. Sampl, Herrn M. Rindle und Herrn B. Fendt bedanken.

Der größte Dank kommt meiner Familie zu, insbesondere meiner Frau Tina sowie meinen Eltern und Großeltern, die mir auch in stürmischen Zeiten stets den Rücken frei gehalten haben.

München, 24. Mai 2009

Abstract

Deutsch:

Bisherige Augmented-Reality-Systeme, die den räumlichen Eindruck primär über die Stereoskopie erzielen, können unter automotivtauglichen Gesichtspunkten nicht bestehen. Das Problem ist in erster Linie, dass bekannte technische Lösungen kopfbasiert sind, ein Head-Tracking-System verwenden und nicht zuletzt sehr hohe Kosten verursachen. Infolgedessen wird eine neue Visualisierungsmethode entwickelt, die diese Probleme kompensiert und dem Fahrer mit den gleichen technischen Komponenten eines konventionellen Head-Up-Displays, unter partieller Ausnutzung menschlicher Tiefenwahrnehmung, virtuelle Objekte in einem Entfernungsbereich von 10 m - 300 m vor dem Fahrzeug dreidimensional suggeriert. Die Methode wird im Rahmen von Probandenversuchen in einem statischen Versuchsaufbau verifiziert und in einem realen Versuchsträger als modulares kontaktanaloges Head-Up-Display für Nachtsichtsysteme mit automatisierter Passantenerkennung technisch umgesetzt. Hierbei wird ein noch nicht im Sichtbereich befindlicher Fußgänger mit einer virtuellen Warnsymbolik markiert, die vom Fahrer exakt an der Position wahrgenommen wird, an der sich auch das reale Objekt befindet. Als zweites sichtverbesserndes Assistenzsystem wird in einem konventionellen Head-Up-Display eine Bird-View-Anzeige realisiert, die dem Fahrer aus einer virtuellen exozentrischen Perspektive Informationen des vorausliegenden Straßenverlaufs liefert. Basierend auf den Erkenntnissen der beiden anschließenden Feldexperimente wird ein Subsumptionsassistenzkonzept abgeleitet. Dieses kombiniert in sinnvoller Art und Weise bewährte sichtverbessernde Fahrerassistenzsysteme des Stands der Technik mit zukunftsweisenden kontaktanalogen Nachtsichtsystemen, um die Verkehrssicherheit bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion zu verbessern.

English:

Previous Augmented-Reality-Systems which achieve spatial impressions primarily through stereoscopy cannot pass automotive criteria. The main problem is, that known technical solutions are head-based, applying a head-tracking-system which entails an enormous increase in costs. Consequently a method for visualisation has been developed that compensates these problems by providing the driver with a three-dimensional deep spatial impression of objects 10 m - 300 m in front of the car. This is achieved with the same components of a conventional head-up-display by partially utilising the human depth perception. The method is verified and tested by means of a static experiment and then put

into practice in an experimental vehicle using a modular contact analogue head-up-display for night vision application, including automated pedestrian detection. This allows a pedestrian outside the field of vision to be marked with a virtual warning symbol which is then perceived by the driver at the exact position of the real object. As a second view improving assistance system, a bird's-eye-view display is realized in a conventional head-up-display which supplies the driver with information of the road lying ahead from a virtual exocentric perspective. Based on the findings of the two field experiments a subsumption-assistance-concept is derived. This combines successful state of the art view improving driver assistance systems with forward looking contact analogue night vision systems in a meaningful way, to improve road safety due to night and weather related view reduction.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung und Methodik	6
3	Objektivierung des Assistenzbedarfs bei Sichtreduktion	8
3.1	Systemergonomische Analyse des Fahrer-Fahrzeug-Systems	8
3.1.1	Funktionsweise und Defizite des visuellen Sinneskanals	14
3.1.2	Funktionsweise und Defizite der multimodalen Informationsverarbeitung	26
3.2	Unfalldatenanalyse	39
3.3	Assistenzbedarf	47
4	Stand der Technik	52
4.1	Lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme	52
4.2	Nachtsichtsysteme	57
4.2.1	Variationsspektrum	58
4.2.2	Stand der Forschung	63
4.2.3	Methoden der kontaktanalogen Visualisierung	70
5	Abgeleitete HMI-Lösungskonzepte	73
5.1	Straßenverlauf	74
5.2	Sicherheitskritische Objekte	78
6	Versuchsreihen	85
6.1	Bird-View-Anzeige	86
6.1.1	Versuchsdesign	86
6.1.2	Hypothesen	92
6.1.3	Ergebnisse	93
6.1.4	Hypothesenüberprüfung	101
6.2	Das kontaktanalog markierende Head-Up-Display	103
6.2.1	Technische Realisierung	103
6.2.1.1	Visualisierungsmethode	104
6.2.1.2	Technischer Aufbau des Versuchsträgers	114
6.2.2	Feldversuch	119
6.2.2.1	HMI-Varianten	120
6.2.2.2	Versuchsdesign	123
6.2.2.2.1	Probandenkollektiv	123
6.2.2.2.2	Versuchsträger	124
6.2.2.2.3	Versuchsstrecke	126
6.2.2.2.4	Datenermittlung und Kennwerte	128
6.2.2.2.5	Versuchsablauf	133
6.2.2.3	Hypothesen	134
6.2.2.4	Ergebnisse	139

6.2.2.4.1	Effektivität.....	139
6.2.2.4.2	Effizienz.....	148
6.2.2.4.3	Ablenkung	155
6.2.2.4.4	Zufriedenheit	161
6.2.2.5	Hypothesenüberprüfung.....	163
7	Diskussion der Ergebnisse und Ableitung eines Assistenzkonzeptes	169
8	Zusammenfassung.....	177
	Literaturverzeichnis	180

1 Einleitung

„Bei einem Unfall auf der Landstraße 67 ist am gestrigen Montagabend ein 52-jähriger Mann getötet worden. Der dunkel gekleidete Fußgänger wollte die Landstraße gegen 22:45 Uhr an einer unbeleuchteten Stelle überqueren. Dabei wurde er kurz vor der Fahrbahnmitte von einem Pkw erfasst und erlitt tödliche Verletzungen. Zeugenaussagen zufolge war der 71-jährige Pkw-Fahrer mit vorgeschriebener Geschwindigkeit unterwegs“ (ka-news, 2007).

In Europa werden jährlich ca. 560000 Personen bei Dunkelheit verletzt und ca. 23000 getötet. Im Jahre 2004 sind allein auf deutschen Straßen 2431 Personen bei nächtlichen Verkehrsunfällen tödlich verunglückt. In Relation zur Gesamtanzahl der jährlich Verunglückten von 5842 Toten entspricht dies einem Anteil von 42 %. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass sich das durchschnittliche Verkehrsaufkommen in den Nachtstunden um rund 80 % verringert, resultiert nachts ein vielfach höheres Risiko tödlich zu verunglücken als tagsüber. Krüger et al. (1995) konnten bei Nacht ein 1,51faches Verursachungsrisiko für Verkehrsunfälle nachweisen. Experten gehen davon aus, dass bei jedem zweiten Nachtunfall optische Wahrnehmungsprobleme eine Rolle spielen (Pflug, 2005). Aufgrund dessen sehen Unfallforscher in der Verbesserung des Sehens und des Gesehenwerdens bei Nacht ein enormes Verbesserungspotenzial zur Steigerung der Verkehrssicherheit. Die Infrastruktur betreffenden Optimierungsstrategien, wie beispielsweise nächtliche Geschwindigkeitslimits, erweisen sich aus psychologischer Sicht als nicht zielführend, da sie von den Autofahrern mit hoher Wahrscheinlichkeit zu oft missachtet werden würden. Der Grund hierfür besteht darin, dass aus subjektiver Sicht der Autofahrer bei Nacht problemlos auch mit höheren Geschwindigkeiten gefahren werden kann. Ebenso stellt eine flächendeckende ortsfeste Straßenbeleuchtung, insbesondere aufgrund wirtschaftlicher Aspekte, keine in absehbarer Zeit realisierbare Lösung dar. Die Forschung fokussiert sich deshalb auf eine bessere Unterstützung des Fahrers bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion durch eine verbesserte lichttechnische Ausstattung des Fahrzeugs in Kombination mit aktiv unterstützenden Fahrerassistenzsystemen. Der durch diese Strategie erzielte Fortschritt im Bereich der automobilen Scheinwerfertechnologie ist rückblickend auf die vergangenen 120 Jahre deutlich zu erkennen.

Mit der Erfindung des Automobils Ende des 19. Jahrhunderts durch Gottlieb Daimler und Karl Benz beginnt zugleich die Geschichte der automobilen Lichttechnik. Dem Problem der Sichtreduktion bei Nacht wurde jedoch weder von Seiten der Behörde noch von Seiten der Entwickler anfangs größere Bedeutung zugeschrieben. Laut einer Polizeiverordnung im

königlichen Preußen vom 15.04.1901 (§ 31) bestand die einzige gesetzliche Auflage darin, dass während der Dunkelheit und bei starkem Nebel die Laternen brennen müssen. In den frühen Jahren des Automobils sorgten neben Kerzen auch Petroleumlampen und Acetylenbrenner für das vorgeschriebene Licht, das jedoch aufgrund seiner geringen Helligkeit lediglich ausreichte, um sich mit minimaler Geschwindigkeit durch die Nacht zu tasten. Ingenieure erkannten schon früh das Problem, so dass damals wie heute das Hauptziel der automobilen Lichttechnik darin besteht, den frontalen Verkehrsraum maximal auszuleuchten und dabei zugleich eine unfallträchtige Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden. Aufgrund dessen entwickelten die Konstrukteure der Acetylenscheinwerfer bereits im Jahre 1908 eine Abblendvorrichtung, die es ermöglichte, manuell mit einem Handhebel die Gasflamme über einen Bowdenzug aus dem Brennpunkt zu rücken. Dennoch hatte die erste Generation der automobilen Scheinwerfertechnik keine Zukunft, da die Autos immer schneller wurden und sich das Gaslicht als zu trüb erwies.

Abhilfe schaffte die Entwicklung eines elektrischen Scheinwerfers mit Batterie im Jahre 1908. Der endgültige Durchbruch erfolgte im Jahre 1913, als die Firma Bosch ein Komplettsystem, bestehend aus Scheinwerfer, Lichtmaschine und Lichtmaschinenregler, auf den Markt brachte. Hierbei wurden zur Kompensation der Blendungsproblematik entweder elektrische Widerstände vorgeschaltet oder aber die Scheinwerfer am Fahrzeug so angebracht, dass ihr Strahlenbündel zum Abblenden manuell nach unten geneigt werden konnte. Letzteres erwies sich bei nasser Fahrbahn aufgrund der starken Spiegelung als vollkommen untauglich. Am Besten bewährten sich separate Scheinwerferpaare für Abblend- und Fernlicht. Dennoch konnte das Problem der Blendung nicht völlig kompensiert werden, so dass 1921 das Reichsverkehrsministerium vorsah, eine gesetzliche Dauerabblendung für Fahrzeuge in Deutschland einzuführen, wie sie zur damaligen Zeit bereits in den USA vorgeschrieben war. Dies konnte jedoch im Jahre 1924 durch die von Osram entwickelte sogenannte Biluxlampe verhindert werden. Mit dieser Zweiphasenglühlampe war es möglich, Abblend- und Fernlicht aus einem einzigen Reflektor zu erzeugen und somit die Blendung drastisch zu reduzieren.

Nach diesem technischen Meilenstein benötigte es weitere 33 Jahre, bis 1957 erneut ein richtungweisender lichttechnischer Fortschritt zu verzeichnen war. Die Rede ist von der innovativen asymmetrischen Lichtverteilung mit nach rechts ansteigender Hell-Dunkel-Grenze. Zuvor war in Europa eine waagrechte Hell-Dunkel-Grenze für das Abblendlicht gesetzlich vorgeschrieben. Diese Gesetzgebung erwies sich jedoch als wenig praxistauglich, da schlecht beleuchtete bzw. gar nicht beleuchtete Verkehrsteilnehmer, wie beispielsweise Fußgänger oder Radfahrer, am rechten Fahrbahnrand oft unbemerkt blieben. Wenige Jahre nach dieser Innovation begann die Halogenlampe ihren Siegeszug, die im Vergleich zu konventionellen Glühlampen ihre hohe Strahlkraft während der gesamten Lebensdauer

behält und fast doppelt so viel Licht wie gewöhnliche Glühlampen liefert. Nichtsdestotrotz dauerte es fast 10 Jahre vom Debüt der H1-Halogenglühlampe im Jahre 1962 bis zum Durchbruch der Halogentechnik im Jahre 1971. Die sogenannte Zweifaden-Halogenglühlampe mit der Bezeichnung H4-Lampe besteht aus zwei Glühwendeln, von denen im Abblendlichtmodus die obere der beiden durch eine Kalotte abgeschirmt wird. Der Nachteil dieser Methode besteht darin, dass bei Abblendlicht lediglich die obere Hälfte des Paraboloidreflektors ausgenutzt werden kann, was eine geringere Reichweite des Abblendlichts zur Folge hat.

Die folgenden Jahre waren durch Innovationen im Bereich der Scheinwerfer- und Reflektorform bestimmt. Eine dieser technischen Neuerungen ist der 1983 entwickelte DE-Projektionsscheinwerfer. Hierbei dient nicht wie bisher ein Parabolspiegel als Reflektor sondern ein dreiachsiges Ellipsoid, das ein Lichtbündel mit einem exakten Brennpunkt kurz nach dem Reflektor erzeugt. Dort sitzt anstelle der üblichen Streuscheibe eine Sammellinse mit wenigen Quadratzentimetern Fläche, die das Lichtbündel konzentriert und auf diese Weise bei kleinerer Austrittsfläche eine wesentlich höhere Lichtausbeute erzielt. Mit dieser Technologie war es nun zur Freude der Automobildesigner möglich, kompakte, extrem flache Scheinwerfer mit starker Neigung der Streuscheibe zu entwickeln. Zugleich haben sie den Vorteil einer gleichmäßigen Lichtverteilung und einer verminderten Eigenblendung bei Nebel, Regen oder Schneetreiben. Durch immer leistungsstärkere Rechner war es 1988 möglich, computergestützt anhand eines iterativen Optimierungsverfahrens, ideale Reflektorfremflächen zu berechnen. Anhand dieser sogenannten FF-Reflektoren konnte ein Maximum an Lichtausbeute und ein Optimum an Lichtverteilung erzielt werden.

Konkurrenz bekamen die hochoptimierten FF-Reflektoren, kombiniert mit den neuesten H7-Glühlampen, durch die 1995 erstmalig in Serie gegangenen Xenonscheinwerfer. Diese wurden jedoch vorerst nur für die Abblendlichtfunktion verwendet, da die langen Ansprechzeiten der Gasentladungslampe den Anforderungen der Fernlichtfunktion nicht genügten. Dennoch hat die Xenonlampe den entscheidenden Vorteil, dass sie bei einem Stromverbrauch von lediglich 35 Watt doppelt so leuchtstark ist, wie eine herkömmliche Halogenlampe mit 55 Watt, was eine weitaus bessere und hellere Ausleuchtung der Fahrbahn mit ihren Seitenrändern zur Folge hat. Die hohe Lichtleistung der Xenonscheinwerfer fordert jedoch zugleich eine extreme Präzision der Lichteinstellung, um eine Blendung des Gegenverkehrs zu vermeiden. Deshalb wurde eine sensorgesteuerte Lichtweitenregulierung entwickelt, die in Echtzeit dynamische Karosseriebewegungen aufgrund von Brems- und Beschleunigungsvorgängen oder variierenden Beladungszuständen kompensiert.

Das verbleibende Problem der Fernlichtfunktion konnte 1999 mit den zukunftsweisenden Bi-Xenon-Scheinwerfern kompensiert werden. Diese neue Lösung verwendet für Abblend- und

Fernlicht eine gemeinsame Xenonlampe. Beim Umschalten auf das Abblendlicht schiebt sich eine Blende in das Lichtbündel des Fernlichts und deckt den fernlichtrelevanten Teil ab.

Es kann rückblickend auf die technische Entwicklung der automobilen Lichttechnik festgehalten werden, dass sich die Fahrbahnausleuchtung seit den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts bis heute um über 85 % verbessert hat. Moderne Bi-Xenon-Scheinwerfer haben mit über 180 m eine sechsmal größere Reichweite als damalige Bilux-Paraboloidscheinwerfer. Im Bereich der Breitenausleuchtung der Fahrbahn übertreffen Bi-Xenon-Scheinwerfer die Leistung der Biluxsysteme um das Dreifache. Die positiven Auswirkungen dieser modernen Scheinwerfertechnologie auf die Verkehrssicherheit bei Nacht wurden 2006 vom TÜV Rheinland anhand einer Unfalldatenanalyse bestätigt. Laut Schäbe et al. (2006) könnte bei einer 100%igen Ausstattungsrate mit Xenonlicht das Nacht/Tag-Unfallverhältnis von 0,5 auf 0,2 gesenkt werden. Das entspräche einem Rückgang der Nachtunfälle auf Landstraßen um ca. 60%. Diese Prognose ist sehr optimistisch. Dennoch ist es nicht von der Hand zu weisen, dass durch eine Verbesserung der visuellen Wahrnehmung bei Nacht oder witterungsbedingter Sichtreduktion eine merkliche Steigerung der Verkehrssicherheit und des Komforts zu erzielen ist.

Forscher und Entwickler suchen mit Nachdruck nach immer besseren Methoden und alternativen Technologien, um den Fahrer in solchen Situationen bestmöglich zu unterstützen. Sogenannte lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme stellen ein komplett neues Entwicklungsfeld dar und versprechen einen weiteren Meilenstein in der automobilen Lichttechnik. Hierbei werden Fahrzeugzustands- und Fahrzeugumfeldinformationen mit Sensoren erfasst und an ein Steuergerät übertragen. Dieses verarbeitet die gelieferten Informationen und bewirkt eine automatisierte situationsadäquate Adaption des frontal ausgeleuchteten Verkehrsbereichs. Auf diese Weise hoffen die Entwickler in naher Zukunft die bestehende Lücke zwischen Fern- und Abblendlicht schließen zu können.

Aber auch in alternativen Technologien sieht die Automobilindustrie ein enormes Optimierungspotenzial bezüglich der visuellen Wahrnehmung bei nacht- oder witterungsbedingter Sichtreduktion. Die Rede ist von sogenannten infrarotbasierten Nachtsichtsystemen, die dem Fahrer zusätzliche Informationen des frontalen Verkehrsraums anbieten, die visuell nicht wahrnehmbar sind, da sie sich jenseits der maximalen Abblendlichtreichweite befinden. Das Funktionsprinzip solcher Systeme beruht auf der Ausnutzung der vom menschlichen Auge nicht wahrnehmbaren infraroten elektromagnetischen Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 780 nm – 30000 nm. Innerhalb dieses Spektrums werden je nach Wellenlängenbereich die beiden konkurrierenden Technologien, Fern-Infrarot (FIR) und Nah-Infrarot (NIR), unterschieden, die

jeweils spezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Beide Technologien sind nicht neu, sondern finden ihren Ursprung in den 30er Jahren mit der Entwicklung der ersten Bildwandlerröhre. In der Folge haben NIR- und FIR-Systeme einen hohen technischen Entwicklungsstand erreicht. Sie fanden noch bis vor kurzem fast ausschließlich im militärischen Bereich Verwendung. Die wesentlichen Gründe hierfür sind zum einen der nicht auf Anhieb ersichtliche Vorteil in Punkto Sicherheit beim Führen eines Fahrzeugs und zum anderen die für einen Massenabsatz auf dem zivilen Markt zu hohen Produktions- und Instandhaltungskosten. Günstigere Produkte weisen merkbare Mängel hinsichtlich Darstellungsqualität und Bauvolumen auf. Zuletzt ist noch das für Original Equipment Manufacturers (OEM) unklare Risiko der Haftungspflicht im Falle eines aufgrund von negativen Effekten des Nachtsichtsystems verursachten Unfalls zu erwähnen.

All diese Gründe haben dazu beigetragen, dass seit der ersten Diskussion über den Nutzen von Nachtsichtsystemen im Automotivbereich 10 Jahre vergingen, ehe im Jahre 2000 Cadillac das erste Nachtsichtsystem auf Ferninfrarotbasis auf den Markt brachte. 2003 folgte Lexus (NIR), 2004 Honda (FIR) und 2005 Mercedes-Benz (NIR) zusammen mit BMW (FIR).

Aufgrund mangelnder Erfahrungen existieren für Nachtsichtsysteme bislang noch keine industriellen Standards, weshalb sich die auf dem zivilen Markt zu erwerbenden Systemvarianten sehr stark bezüglich Sensorik, Bildverarbeitung und Human Maschine Interface (HMI) unterscheiden. Ein wesentlicher Nachteil aller Systemvariationen besteht darin, dass lediglich ein hochinformatives Videobild der Nachtszenarie präsentiert wird, das der Kraftfahrer aktiv während der gesamten Fahrt kontinuierlich kontrollieren müsste, um eine Gefahrensituation frühzeitig erkennen zu können. In der Praxis ist dies nicht möglich, so dass der Autofahrer nur in den seltensten Fällen eine Gefahrensituation frühzeitig erkennt und zwar nur dann, wenn er gerade zufällig in dem Moment auf das Display schaut, in dem auch eine Gefährdung eintritt.

Im Weiteren liefern videobasierte Nachtsichtsysteme nur eine schlechte Informationsaufbereitung, so dass es dem Fahrer in der kurzen Zeit nicht möglich ist, objektspezifische Informationen aus dem Videobild herauszufiltern. Diese sind jedoch für eine adäquate Einschätzung der Gefahr unerlässlich. Laut Meier (2008) bieten aktuelle Nachtsichtgeräte mit den beschriebenen ergonomischen Defiziten eine trügerische Sicherheit, da sie nur wenige Unfälle vermeiden.

2 Zielsetzung und Methodik

Der Mehrwert aktueller Nachtsichtsysteme ist in ihrer jetzigen Ausprägung stark umstritten. Dies liegt in erster Linie an den massiven ergonomischen Defiziten der entsprechenden Human Machine Interface (HMI) Varianten. Aber auch die von Entwicklern praktizierte strikte Trennung von lichtbasierten Assistenzsystemen und Nachtsichtsystemen stellt ein wesentliches Problem dar. Aus dieser eingegengten Betrachtungsweise resultieren zwangsläufig technische Insellösungen, die das offensichtlich systemübergreifende Optimierungspotenzial bei Nacht oder schlechter Witterung, nur zu einem Bruchteil ausschöpfen.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht in der Entwicklung eines systemübergreifenden konsistenten Assistenzkonzeptes zur idealen Unterstützung der visuellen Wahrnehmung des Fahrers bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion. Eine wesentliche Notwendigkeit zur Lösung dieser Aufgabe stellt die Entwicklung einer automotivtauglichen Methode zur kontaktanalogen Visualisierung von Fahrerassistenzinformationen dar, die im Realfahrzeug in Form eines kontaktanalogen Head-Up-Displays (kHUD) zur passgenauen Markierung von sicherheitskritischen Objekten in der Umwelt technisch umgesetzt und evaluiert wird. Des Weiteren sollen mit der Bird-View-Anzeige (BVA), deren Einfluss auf die Fahrsicherheit bei Nacht im Rahmen von Realversuchen überprüft werden soll, weitere wertvolle Erkenntnisse im Hinblick auf ein einheitliches Assistenzkonzept gewonnen werden. Die methodische Vorgehensweise zur Erfüllung dieser Zielsetzung ist aus Abbildung 2–1 zu entnehmen.

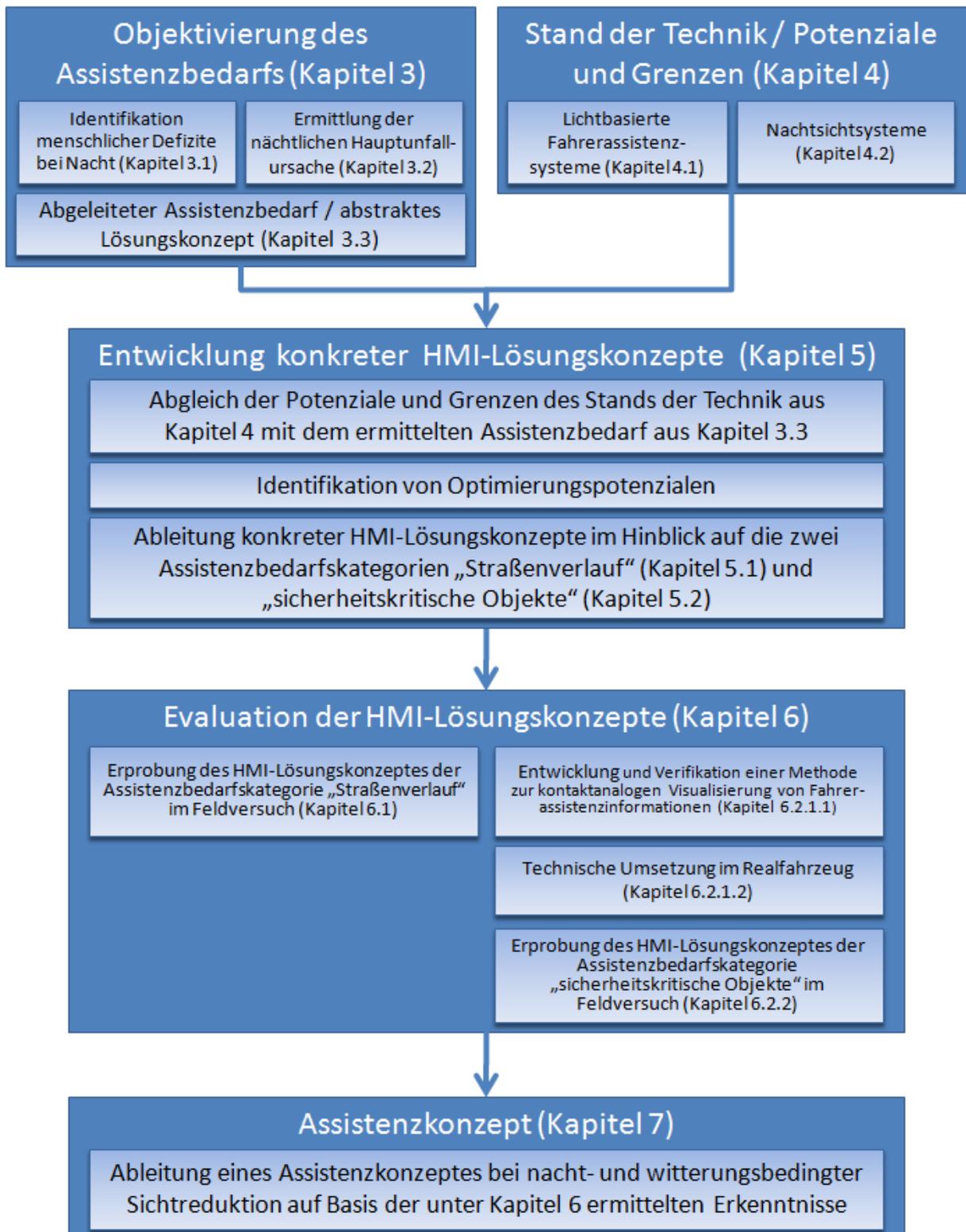


Abbildung 2–1: Methodische Vorgehensweise

3 Objektivierung des Assistenzbedarfs bei Sichtreduktion

Ausgangspunkt eines ergonomischen Entwicklungsprozesses ist in jedem Fall das Strukturschema des Arbeitsprozesses nach Schmidtke (1993), das nach dem Paradigma des Regelkreises die Interaktion von Mensch und Maschine in technischer Terminologie beschreibt (siehe auch Helander, (1988); Bubb, 1993). Dieser Regelkreis ist dadurch charakterisiert, dass der Mensch (Regler) im Zusammenspiel mit seinem Arbeitsmittel (Regelstrecke) unter dem Einfluss der Arbeitsumwelt (Störgröße) eine selbst- oder fremddefinierte Aufgabenstellung (Führungsgröße) durch iterative Rückmeldung (Rückkopplung) des Arbeitsergebnisses (Nachführgröße) solange ausführt, bis eine ausreichend gute Qualität, definiert durch den Quotienten zwischen Ergebnis und Aufgabe, vorliegt. Je kürzer dieser Prozess dauert, umso besser ist die Leistung des Systems. Ziel der Ergonomie ist es, im Hinblick auf eine Qualitäts- und Leistungssteigerung, die Belastung durch die Arbeitsaufgabe, Arbeitsumwelt und Mensch-Maschine-Interaktion soweit zu reduzieren, dass die in Abhängigkeit der individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen resultierende Beanspruchung ein Minimum annimmt (Schmidtke, et al., 1993).

In den nachstehenden Kapiteln erfolgt eine systemergonomische Analyse des Fahrer-Fahrzeug-Systems mit dem Fokus auf die erhöhte Umweltbelastung des Fahrers bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion. Basierend auf theoretischen Annahmen und Erkenntnissen werden Defizite der visuellen Informationsaufnahme und der multimodalen Informationsverarbeitung herausgearbeitet, die als Ursache für ein erhöhtes Unfallrisiko bei Nacht in Frage kommen. Ein weiterer Schritt besteht in der umfangreichen statistischen Analyse des nächtlichen Unfallgeschehens zur Identifikation der objektiven Hauptunfallursache bei Nacht. Durch einen Abgleich mit den zuvor erläuterten menschlichen Defiziten kann im Weiteren eine Objektivierung des Assistenzbedarfs stattfinden und somit das durch Assistenzsysteme abzudeckende Optimierungspotenzial definiert werden.

3.1 Systemergonomische Analyse des Fahrer-Fahrzeug-Systems

In modernen Automobilen ist der Fahrer mit einer Vielzahl von Aufgaben konfrontiert, die nach Bubb (2002) hinsichtlich ihrer Priorität in die drei hierarchischen Metaebenen, primäre, sekundäre und tertiäre Fahraufgaben, unterteilt werden können (siehe auch Geiser, 1985). Die Wichtigste dieser Tätigkeiten stellt die primäre Fahraufgabe, bestehend aus dem eigentlichen Fahrprozess, dar. Laut Bubb (2002) ist sie definiert als das Bewegen eines Fahrzeuges von Punkt A nach Punkt B, ohne von der Fahrspur abzukommen und jegliche

Berührung mit stehenden oder sich bewegenden Objekten im Verkehrsraum zu vermeiden. Additiv kommen noch in direkter und indirekter Abhängigkeit von der primären Fahraufgabe sekundäre Aufgaben auf den Fahrer zu, die ihrerseits wiederum in aktive und reaktive Tätigkeiten unterteilt werden können. Beispiele für solche, die primäre Fahraufgabe unterstützenden, sekundären Aufgaben sind das aktive Hupen und Blinken, aber auch Maßnahmen zur Sichtverbreiterung, wie das Einschalten des Lichts oder Scheibenwischers, die reaktiv auf veränderte Umweltbedingungen, wie in diesem Fall bei Dunkelheit oder witterungsbedingter Sichtreduktion, durchgeführt werden. Die letzte Ebene bilden die tertiären Aufgaben, die dadurch charakterisiert sind, dass sie in keiner Weise mit der Fahraufgabe in Verbindung stehen. Sie dienen einzig und allein dem Zufriedenstellen von Komfort-, Unterhaltungs- oder Informationsbedürfnissen. Dennoch ist einigen Zusatzgeräten im Sinne eines positiv einwirkenden Performance Shaping Factors (PSF) eine indirekte Unterstützung der primären Fahraufgabe dahingehend zu unterstellen, dass sie, wie beispielsweise eine Klimaanlage, die Umweltbedingungen für den Fahrer optimieren und somit ein entspanntes und zugleich sichereres Fahren begünstigen (Behr, 2005).

In Anbetracht der Aufgabenstellung, die darin besteht den Fahrer bei einer erhöhten Fahrzeugumweltbelastung aufgrund reduzierter Sicht zu unterstützen, wird im Folgenden lediglich die hierfür relevante primäre Fahraufgabe detaillierter betrachtet (siehe Abbildung 3–1). Laut Bernotat (1970) kann diese ihrerseits in die drei weiteren Subaufgaben der Navigation, Führung und Stabilisierung gegliedert werden (siehe auch Donges, 1978; Michon, 1985).

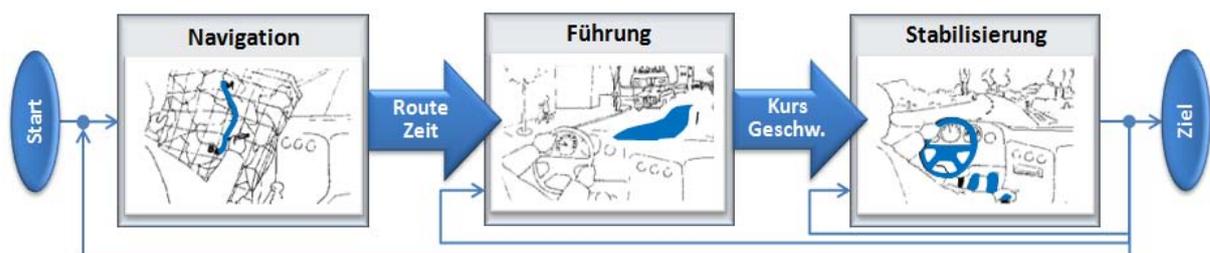


Abbildung 3–1: Die drei Subaufgaben der primären Fahraufgabe

Hierbei handelt es sich um drei hierarchisch ineinander verschachtelte Regelkreise, wobei die Navigationsaufgabe die höchste Ebene bildet (Kelley, 1968; Johannsen, 1976; Sachsse, 1971). Ihr Gegenstand ist die eigentliche Transportaufgabe, worunter diejenigen Aufgaben zu subsumieren sind, die zur Routenplanung notwendig sind, um in einer bestimmten Zeit von Punkt A zu Punkt B zu gelangen. Hierunter fallen Tätigkeiten wie die Benutzung von Landkarten oder ortsfesten Wegweisern. Das Ergebnis der Navigationsaufgabe ist die Route und die notwendige Zeit, um das Ziel zu erreichen.

Diese beiden Werte bilden zugleich die Aufgabenstellung des nächst niedrigeren Aufgabenniveaus, der Führung. Hierbei muss der Fahrer in Abhängigkeit von den Witterungsbedingungen, des unmittelbar vorausliegenden Straßenverlaufs und der statischen oder dynamischen Objekte auf der Fahrbahn den exakten Kurs und die exakte Geschwindigkeit festlegen. Eine weite Vorausschau und gute antizipatorische Fähigkeiten des Fahrers, die zum Abschätzen des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer und des zum Teil nicht einsehbaren Streckenverlaufs dienen, spielen zur Lösung dieser Aufgabe eine wesentliche Rolle.

Die dritte und letzte Ebene bildet die Stabilisierungsaufgabe, im Rahmen derer die von der Führungsebene übertragenden Größen des exakten Kurses und der exakten Geschwindigkeit durch Interaktion mit dem Fahrzeug über das Lenkrad und die Pedalerie in die Realität umgesetzt werden. Wie zu Beginn erwähnt, handelt es sich bei diesem Drei-Ebenen-Modell von Bernotat (1970) um einen hierarchisch verschachtelten Regelkreis, bei dem die entstandene Aufgabenerfüllung, in Form der augenblicklichen Position des Fahrzeugs auf der Straße, kontinuierlich in allen drei Ebenen mit der jeweiligen Aufgabenstellung übereinstimmen muss. Andernfalls kann dies zu einer Neudefinition der vorgegebenen Größen auf dem nächst höheren Niveau führen (Bubb, 1993).

Für eine detaillierte Betrachtung der auftretenden Wechselwirkungen zwischen Fahrer und Fahrzeug wird im Weiteren das Paradigma des Regelkreises zur technischen Beschreibung eines Mensch-Maschine-Systems auf die Problemstellung der primären Fahraufgabe übertragen (Schmidtke, 1993). Es werden von verschiedenen Autoren Vorschläge gemacht (Weir, et al., 1973; Burkhardt, 1965; Briggs, 1968; Fiala, 1966; Crossman, et al., 1969), wohingegen Bubb (1975) ein allen Betrachtungsweisen gerecht werdendes Modell herausgearbeitet hat.

Abbildung 3–2 zeigt eine vereinfachte Darstellung dieses Fahrer-Fahrzeug-Modells, bei dem die zweidimensionale Fahraufgabe in Form des Soll-Kurses und der Soll-Geschwindigkeit die Führungsgröße darstellt. Die Nachführgröße wird aus dem aktuellen Ist-Kurs und der aktuellen Ist-Geschwindigkeit gebildet. Der Fahrer als Regler registriert Abweichungen zwischen dem Soll und dem Ist der Regelstrecke. Er versucht die entstandene Differenz durch gezieltes Einwirken auf die Bedienelemente des Fahrzeugs zu minimieren. Diese Rückmeldung der Nachführgröße und deren Abgleich mit der Führungsgröße ist charakteristisch für einen Regelkreis und wird dementsprechend auch als Regelung bezeichnet. Nach dem Modell von Bubb (1975) wird die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs in zwei getrennten Regelkreisen, die über die Eigenschaften des Fahrzeugs miteinander verknüpft sind, geregelt.

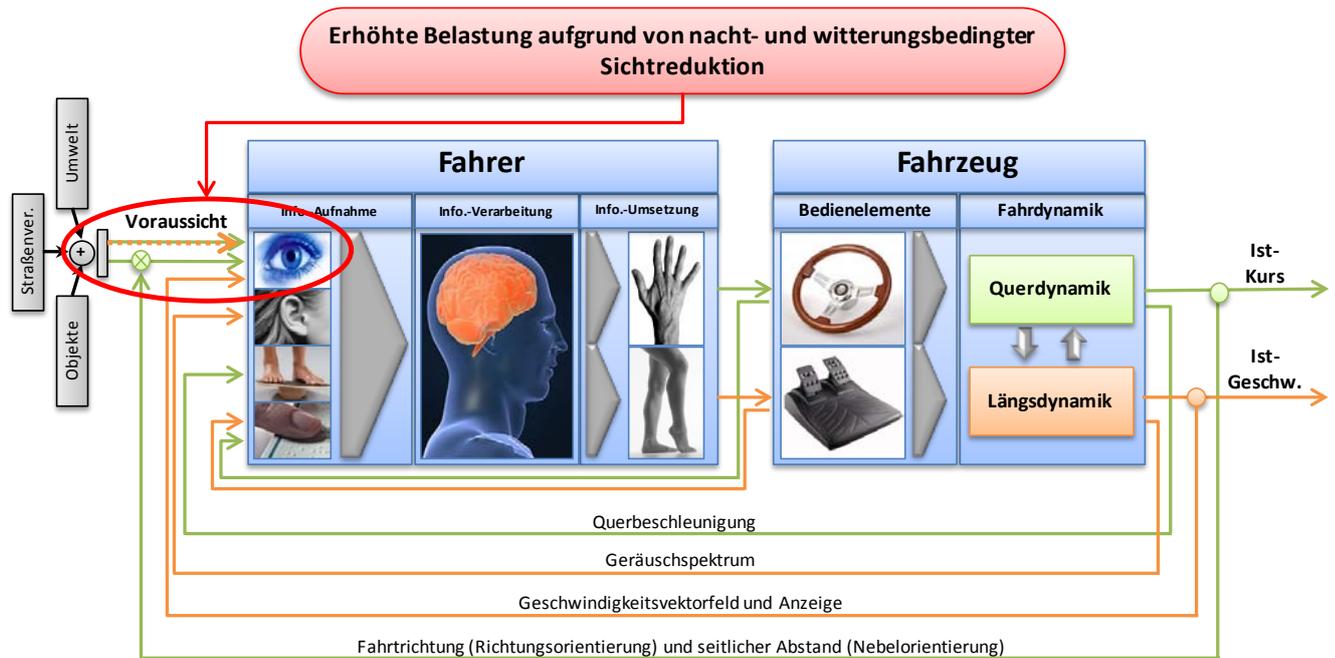


Abbildung 3-2: Fahrer-Fahrzeug-Modell

Zunächst sei die Regelung der Querdynamik am Beispiel einer Kurvenfahrt beschrieben, bei der die visuelle Wahrnehmung eine tragende Rolle spielt. Laut Fiala (1966) erhält der Fahrer über drei optische Rückmeldeniveaus Informationen aus der Umgebung und der eigenen Fahrzeugbewegung (siehe auch Crossman, et al., 1969). Diese sind die Vorinformation durch

- die Straßenvoraussicht (Scheinwerferorientierung),
- die Fahrzeughaltung (Richtungsorientierung) und
- den seitlichen Abstand (Nebelorientierung).

Die Restriktionen, im Rahmen derer der Soll-Kurs (Führungsgröße 1) verlaufen muss, werden aus der visuellen Voraussicht (Scheinwerferorientierung) gewonnen. Diese sind Informationen des vorausliegenden Straßenverlaufs, von Fahrzeugen, Fußgängern oder Gegenständen auf der Fahrbahn und Einflüsse aus der Umwelt. Ausgehend von diesen durch das erste visuelle Rückmeldeniveau wahrgenommenen Grenzen legt der Fahrer seinen Soll-Kurs fest, den er einzuhalten versucht. Zur Bewältigung dieser Aufgabe benötigt er die iterative Rückmeldung des Ist-Zustandes der Querdynamik des Fahrzeugs (Nachführgröße 1). Dies erfolgt über eine multimodale Informationsaufnahme. Zunächst erhält er visuell über die Richtungsorientierung die Information der Ist-Richtung des Fahrzeugs und über die Nebelorientierung die Information der Ist-Lage des Fahrzeugs relativ zur Straße. Als weitere Information nimmt der Fahrer über den kinästhetischen Sinneskanal die momentane Querbeschleunigung wahr. Der Fahrer hat aufgrund seiner Erfahrung eine gewisse Annahme über die zu erwartende Querbeschleunigung in Abhängigkeit von der

Fahrzeuggeschwindigkeit und dem über den optischen Kanal wahrgenommenen Kurvenradius.

Aus dieser Informationsaufnahme leitet er eine bestimmte Handlungssequenz ab (Informationsverarbeitung), um die Abweichung des Ist-Kurses vom Soll-Kurs über den gewünschten Steuerwinkel (Soll-Steuerwinkel), der vom Hand-Arm-System (Informationsumsetzung) an das Lenkrad übermittelt wird, kompensatorisch auf Null zu reduzieren. Die bei der Informationsverarbeitung stattfindende Festlegung des Soll-Steuerwinkels wird noch zusätzlich durch diverse Entscheidungsmechanismen beeinflusst, die multimodal gewonnene Informationen von optischen, akustischen, kinästhetischen und haptischen Reizen zur Verarbeitung heranziehen (siehe Kapitel 3.1.2). Die tatsächliche Lenkradstellung (Ist-Steuerwinkel) wird dem Fahrer sowohl durch Stellungsrezeptoren der Armmuskulatur, als auch über die wahrgenommene Rückstellkraft des Lenkrades, haptisch zurückgemeldet und die auftretende Differenz zum Soll-Steuerwinkel in einem inneren Regelkreis ebenfalls zu Null ausgeregelt. Der auf diese Art und Weise gebildete Lenkwinkel bewirkt nicht nur eine neue Längsausrichtung des Fahrzeugs sondern auch einen neuen Kurvenradius. Diesen veränderten Fahrzeug-Ist-Kurs nimmt der Fahrer erneut sowohl visuell über die Richtungs- und Nebelorientierung, als auch kinästhetisch über die veränderte Querbeschleunigung, wahr, so dass der Regelkreis der Querdynamik hiermit geschlossen ist.

Charakteristisch für die beschriebene Querdynamikregelung bei einer Kurvenfahrt ist das Regeln nach einer zu erwartenden Querbeschleunigung. Im Vergleich dazu unterscheidet sich das Regelsystem bei Geradeausfahrt dadurch, dass der Fahrer auf die Querbeschleunigung Null regelt. Hierbei wird erst nach einer gewissen Zeit anhand der Richtungs- und Nebelorientierung optisch eine Abweichung vom Soll-Kurs festgestellt. Diese wird durch einen Lenkradeingriff korrigiert und umgehend wieder auf Querbeschleunigung Null geregelt. Dieses Handlungsmuster wiederholt sich bei einer längeren Geradeausfahrt mehrere Male.

Der zweite Regelkreis, der die zweidimensionale Fahraufgabe beschreibt, hat als Inhalt die Längsdynamik mit dem Ziel der Festlegung und Einhaltung einer bestimmten Geschwindigkeit. Auch hier spielt der visuelle Sinneskanal eine wichtige Rolle. Die einerseits über die visuelle Scheinwerferorientierung wahrgenommenen Vorinformationen über den Straßenverlauf, sicherheitskritische Objekte, wie beispielsweise am Straßenrand spielende Kinder, und die Straßenverhältnisse in Abhängigkeit aktueller Witterungsbedingungen, aber auch andererseits über die kinästhetische Wahrnehmung rückgemeldete Informationen über die auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte der Längsdynamik, verarbeitet der Fahrer mit Hilfe

seiner komplexen Informationsverarbeitungsmechanismen, so dass er subjektiv die Gefährlichkeit der gegenwärtigen Situation einschätzen kann.

In einem weiteren Schritt erfolgt ein Abgleich des wahrgenommenen Risikos mit seiner individuellen auf Erfahrungen basierenden Risikobereitschaft. Daraus resultiert eine Soll-Geschwindigkeit (Führungsgröße 2) mit einer implizierten Gefährlichkeit, die unterhalb seiner persönlichen Risikogrenze liegt. Diese Soll-Geschwindigkeit gilt es im Weiteren analog zum Soll-Kurs nun so zu regeln, dass die Differenz zwischen subjektiver Soll-Geschwindigkeit und wahrgenommener Ist-Geschwindigkeit (Nachführgröße 2) im Idealfall Null beträgt. Die zur Bewältigung dieser Aufgabe benötigte aktuelle Ist-Geschwindigkeit wird dem Fahrer zum einen visuell über das Geschwindigkeitsvektorfeld auf der Retina der Augen (Gordon, 1966; Wolf, 2008) und zum anderen akustisch über den geschwindigkeitsabhängigen Geräuschpegel zurückgemeldet. Auf Basis dieser Informationen erfolgt eine Schätzung der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit, die jedoch relativ schwierig und meist fehlerbehaftet ist (siehe Bubb, 1977; Gibson, 1979; Rockwell, et al., 1965; Steward, 1971). Das Geschwindigkeitsniveau (niedrige Geschwindigkeiten werden geringer, hohe Geschwindigkeiten relativ genau eingeschätzt) und die Zeitintervalllänge (Autobahneffekt; nach einer längeren Fahrt mit hoher Geschwindigkeit wird bei einer anschließenden langsameren Fahrt die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit für niedriger gehalten, als sie tatsächlich ist) spielen hierbei eine wichtige Rolle. In modernen Fahrzeugen wird der Fahrer deshalb durch eine analoge oder digitale Anzeige der aktuellen Geschwindigkeit im Kombiinstrument (Kombi) oder Head-Up-Display (HUD) unterstützt, um eine sehr zuverlässige und exakte Wahrnehmung der gefahrenen Geschwindigkeit gewährleisten zu können. Aus dem Abgleich der Soll-Geschwindigkeit mit der Ist-Geschwindigkeit resultiert eine vom Fahrer gewünschte Gas- und Bremspedalstellung, die wiederum mit der tatsächlichen Ist-Pedalstellung, die durch die proprioceptive Rückmeldung wahrgenommen wird, kompensatorisch auf „Null“ zu regeln ist. Durch diesen Eingriff in die Längsdynamik des Fahrzeugs stellt sich eine neue Ist-Geschwindigkeit ein, die wiederum dem Fahrer multimodal rückgemeldet wird, so dass auch dieser Regelkreis geschlossen ist.

Aus dieser theoretischen Betrachtung des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises ist nach Bubb (1975) eine Dominanz des visuellen Sinneskanals abzuleiten, da sowohl zur Regelung der Querdynamik die Voraussicht, Richtungsorientierung und Nebelorientierung, als auch zur Regelung der Längsdynamik die Voraussicht und das Geschwindigkeitsvektorfeld eine tragende Rolle spielen. Dieses Übergewicht der visuellen Informationen beim Führen eines Fahrzeugs geht auch aus der Tabelle 3-1 nach Tomaske, et al. (2001) hervor, die eine Zuordnung der Sinneskanäle zu den benötigten Fahrerinformationen darstellt.

Tabelle 3-1: Sinneskanalzuordnung der Fahrerinformationen (Tomaske, et al., 2001)

Information	visuell	vestibulär	haptisch	akustisch
Spurabweichung	x			
Quergeschwindigkeit	x			
Fahrgeschwindigkeit	x			x
Längs- und Querbeschleunigung		x	x	
Winkel Fahrzeug-längsachse-Sollkurs	x			
Giergeschwindigkeit	x			
Gierbeschleunigung		x		
Neigungswinkel	x	x		
Lenkwinkel	x		x	
Kräfte in Stellgliedern			x	
Fahrgeräusch				x

In Übereinstimmung damit bezieht ein Fahrer laut Rockwell (1971) und Lachenmayer et al. (1996) mehr als 90% der für den Verkehrsablauf relevanten Informationen über das visuelle System. Nach Cohen (1993) ist eine hohe Handlungszuverlässigkeit um so wahrscheinlicher, je vollständiger und gezielter der Fahrer die Verkehrskonstellation wahrnimmt, da er dadurch auf eine bessere Entscheidungsgrundlage zurückgreifen kann. Dies ist bei Nacht, Nebel, Regen oder heftigem Schneetreiben nicht gewährleistet, da in solchen Situationen das Sinnesorgan Auge den Engpass der Informationsaufnahme bildet. Cohen (1993) spricht in diesem Fall von einer „lückenhaften internen Repräsentation der Umwelt“.

Im Folgenden wird untersucht, welche negativen Auswirkungen eine erhöhte Umweltbelastung in Form von Dunkelheit und schlechter Witterung auf den Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis hat. Dies stellt eine nicht selten vorkommende Störgröße dar. In diesem Zusammenhang ist zunächst eine detaillierte Analyse der Funktionsweise und Defizite der visuellen Informationsaufnahme sowie der multimodalen Informationsverarbeitung des Menschen nötig.

3.1.1 Funktionsweise und Defizite des visuellen Sinneskanals

Die menschlichen Sinnesorgane sind in der Lage äußere physikalische Reize in physiologische Reize umzuwandeln (Bubb, 1993). Im Falle des Auges stellt die elektromagnetische Strahlung im sichtbaren Wellenlängenspektrum von 400 nm bis 750 nm den entsprechenden physikalischen Reiz dar (siehe Abbildung 3–3).

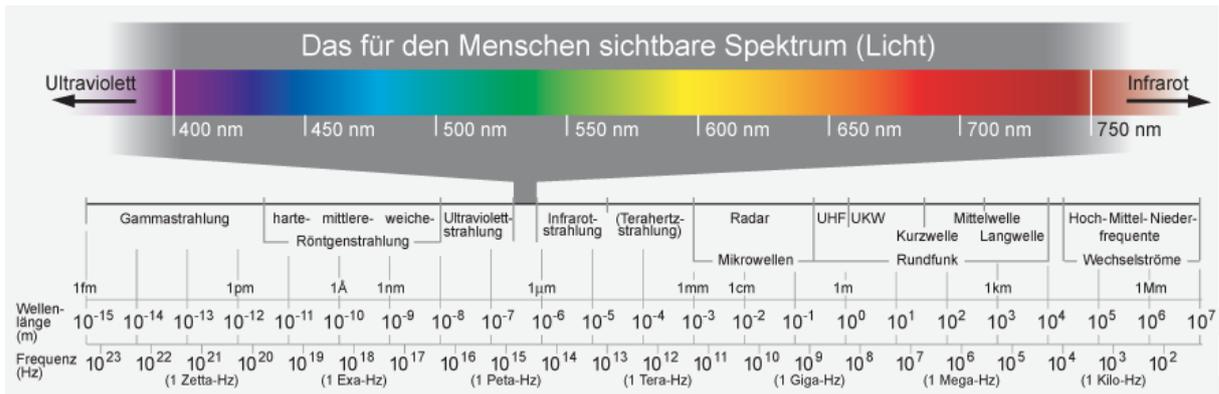


Abbildung 3–3: Spektrum der elektromagnetischen Strahlung (Frank, 2008)

Die von der Umgebung reflektierten Lichtwellen treten durch die ca. 1 mm dicke Hornhaut, die wie ein Fenster in der ansonsten mit Blutgefäßen durchzogenen Lederhaut agiert, in das Auge ein (siehe Abbildung 3–4). Unmittelbar vor der Linse befindet sich ein ringförmiger Muskel, die Iris, dessen Größe adaptiert werden kann. Die daraus resultierende freie Öffnung wird als Pupille bezeichnet. Ihre Aufgabe besteht, vergleichbar mit einer Blende, in der Dosierung des einfallenden Lichtes. Nach der Iris passieren die Lichtwellen die Linse, die das einfallende Licht bündelt und ein nach den Gesetzen der geometrischen Optik auf dem Kopf stehendes verkleinertes reelles Bild des Gesehenen auf die Netzhaut (Retina) projiziert. Bei in der Nähe betrachteten Objekten (< 5 m) muss das Auge akkomodieren, um ein scharfes Bild zu erhalten (Goldstein, 1997). Hierfür kann über den Ciliarmuskel, der durch die Zonulafasern mit der Linse verbunden ist, die Linsenkrümmung und somit die Brechkraft der Linse adaptiert werden.

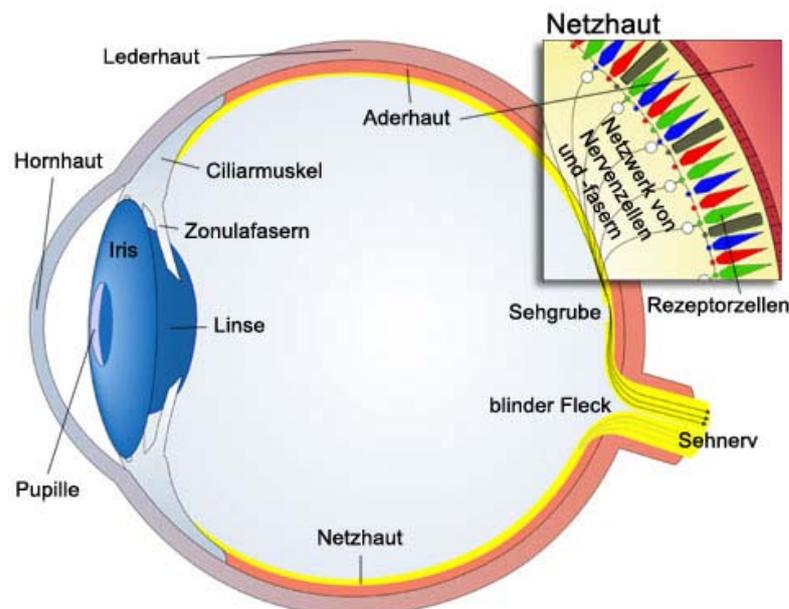


Abbildung 3–4: Aufbau des menschlichen Auges (Funk, 2008)

Die Aufgabe der Retina besteht darin, das aus den umgelenkten Photonen erzeugte Bild in einen physiologischen Reiz umzuwandeln. Die Oberfläche der Retina besteht zu diesem Zweck aus zweierlei Rezeptor-Typen, die sich vor allem in Bezug auf die absolute Lichtempfindlichkeit, periphere Ortsempfindlichkeit, Farbempfindlichkeit und das örtliche Auflösungsvermögen im Bereich der Sehgrube (Fovea Centralis) unterscheiden.

Diese Rezeptor-Zellen werden laut Schultze (1866) als Zapfen und Stäbchen bezeichnet und überziehen mit Ausnahme des blinden Flecks die gesamte Netzhaut. Die Zapfen sind primär für das Farben- und Tagessehen zuständig, reagieren erst ab einer bestimmten Helligkeit und befinden sich vorwiegend in der Fovea Centralis, dem Bereich des schärfsten Sehens. Dieses Gebiet liegt im Schnittpunkt der Retina mit der Verlängerung der zentralen Sehachse und besitzt eine kegelförmige Ausdehnung von ca. 2°. Im parafovealen Bereich, mit einer Ausdehnung von 2° bis ca. 10°, und im Bereich des peripheren Sehens, außerhalb eines Kegelöffnungswinkels von ca. 10°, verändert sich die Rezeptor-Charakteristik (siehe Abbildung 3–5). Die Dichteverteilung der Zapfen nimmt mit zunehmender Winkeldifferenz zur Fovea rapide ab, jedoch zu Gunsten einer erhöhten Stäbchendichte (Birbaumer, et al., 2002).

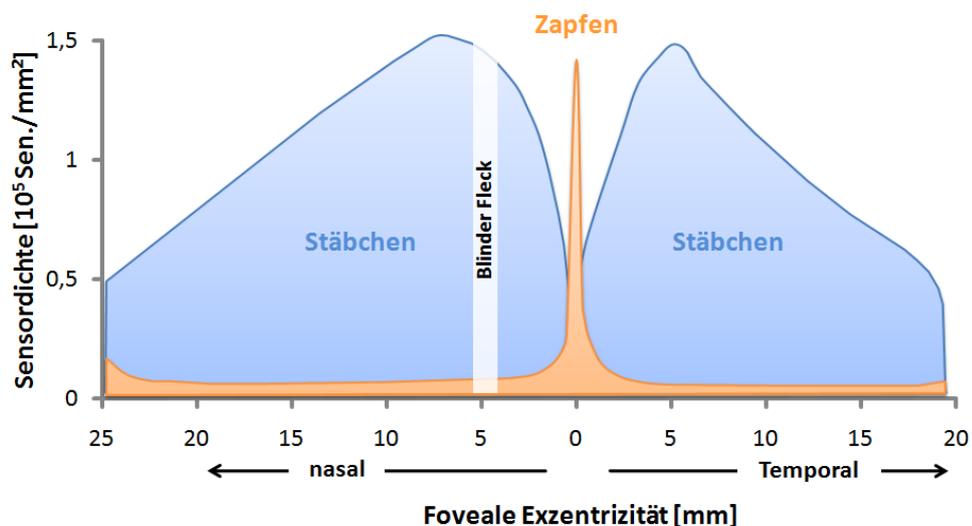


Abbildung 3–5: Verteilung der Sensordichte über die foveale Exzentrizität

Die mehr in der Peripherie angeordneten Stäbchenzellen weisen eine im Gegensatz zu den Zapfen hohe Lichtempfindlichkeit auf und sind somit primär für das Kontrastsehen bei Nacht verantwortlich. Dies ist auch der Grund, weshalb sehr leuchtschwache Objekte, wie beispielsweise ein Satellit am dunklen Sternenhimmel, nur peripher wahrnehmbar sind und bei Fixation verschwinden. Die Nervenfasern aller Rezeptor-Zellen (Zapfen und Stäbchen) laufen im Bereich des blinden Flecks zusammen und bilden den Sehnerv, der das in Nervenimpulse umgewandelte zweidimensionale Netzhautbild an das Gehirn weiterleitet.

Aufgrund des Abstandes zwischen linkem und rechtem Auge (\varnothing ca. 6 cm), erhält das Gehirn aus zwei unterschiedlichen Perspektiven ein Abbild der betrachteten Umwelt. Sowohl aus diesen stereoskopischen Informationen der beiden zweidimensionalen Netzhautbilder, als auch aus der okulomotorischen Muskelaktivitätsrückmeldung der Ciliarmuskeln und Augenbewegungsmuskeln generiert das Gehirn die dreidimensionale Konstellation der Umwelt.

Für die menschliche Fähigkeit des dreidimensionalen Sehens existieren unterschiedliche Erklärungsansätze, wobei die „Theorie der mehrfachen Tiefenkriterien“ nach Goldstein (1997) den Zusammenhang zwischen spezifischen Reizinformationen und der Wahrnehmung räumlicher Tiefe besonders gut herausstellt. Goldstein (1997) geht von den beiden Hauptgruppen der monokularen und der binokularen Tiefenkriterien aus (siehe Abbildung 3–6).

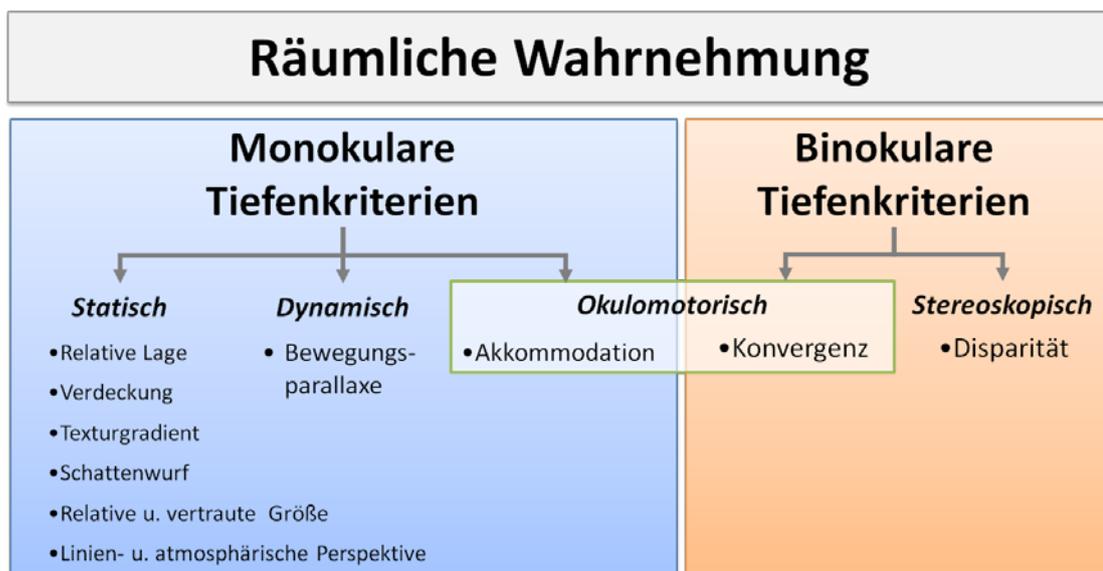


Abbildung 3–6: Räumliche Wahrnehmung durch monokulare und binokulare Tiefenkriterien

Unter der Gruppe der monokularen Tiefenkriterien sind alle Verarbeitungsmechanismen des Gehirns subsumiert, die auf die rückgemeldeten Informationen eines einzelnen Auges basieren. Diese gliedern sich in statische, dynamische und okulomotorische Tiefenkriterien. Hierbei umfassen die statischen monokularen Tiefenkriterien alle Mechanismen räumlicher Wahrnehmung, die sich auch ein Künstler zu Nutze macht, um eine zweidimensionale Leinwand dreidimensional wirken zu lassen. Diese sind die relative Lage zum Horizont, Verdeckung, Texturgradient, Schattenwurf, relative Größe, vertraute Größe, Linienperspektive und atmosphärische Perspektive (Biedermann, et al., 1982; Goldstein, 1997; Rock, 1998).

Die zweite Untergruppe bilden die dynamischen monokularen Tiefenkriterien mit der sogenannten Bewegungsparallaxe, die dem Gehirn eine Entfernungsrückmeldung aufgrund von Relativbewegungen des Beobachters zur Umwelt, oder der Umwelt zum Beobachter liefert. Sie ist definiert als die Winkeländerung infolge einer parallel zu einem Objekt vollzogenen Translation (Goldstein, 1997). Von zwei beobachteten Objekten mit gleicher Absolutgeschwindigkeit bewegt sich das zum Betrachter Nähere schneller über die Netzhaut als das weiter Entfernte.

Die letzte Kategorie der monokularen Tiefenkriterien stellen die okulomotorischen Tiefenkriterien dar, die zugleich eine Untergruppe der binokularen Tiefenkriterien bilden. Die Okulomotorik ist in diesem Zusammenhang verantwortlich für die Rückmeldung der Entfernung des fokussierten Objektes aufgrund von Muskelaktivitäten des visuellen Apparates. Auf der Seite der monokularen Tiefenkriterien erfolgt diese Art der Entfernungsrückmeldung über die Akkommodation und auf Seiten der binokularen Tiefenkriterien über die Konvergenz. Bei der bislang noch nicht erklärten Konvergenz, ist das Gehirn in der Lage über den beim Fixieren naher Objekte entstehenden Konvergenzwinkel zwischen den beiden Sehachsen des linken und rechten Auges auf die Objektentfernung rückzuschließen. Dies ist bei etwas weiter entfernten Gegenständen nicht mehr möglich, da die Sehachsen der beiden Augen annähernd parallel gestellt sind (siehe Abbildung 3–7).

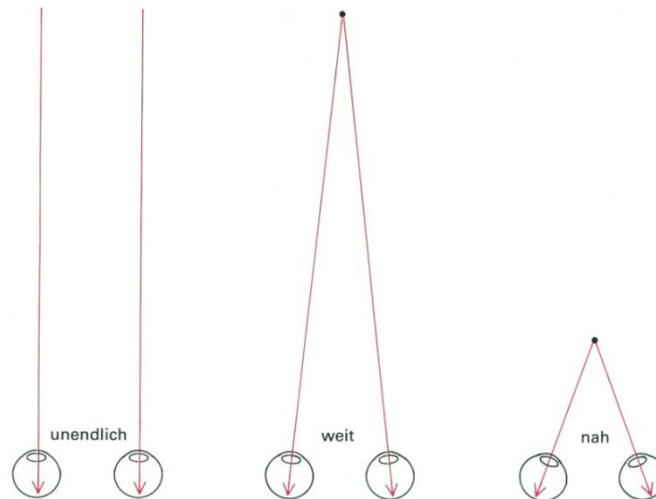


Abbildung 3–7: Konvergenzwinkel (Rock, 1998)

Das zweite, die binokulare Hauptgruppe beschreibende Tiefenkriterium, basiert ebenfalls auf dem Abstand der beiden Augen zueinander. Das Gehirn erhält aufgrund der unterschiedlichen Perspektiven zwei leicht differente Bilder der Umwelt, aus denen eine Entfernungsinformation generiert wird. Dieser Effekt wird als Disparität bezeichnet.

Bei der binokularen Fixierung naher Gegenstände akkommodieren und konvergieren die Augen im Bereich der optischen Achsen, wobei beim stereoskopischen Sehen zusätzlich das

auf die Retina projizierte Bild auf sogenannte korrespondierende Netzhautpunkte im Bereich der Fovea abgebildet wird (Abbildung 3–8). Diese Punkte sind dadurch charakterisiert, dass sie vom gleichen Objekt stammen und sich bei einer fiktiven Überlagerung der beiden Retinabilder exakt überlappen würden. Nichtfixierte Objekte mit demselben Abstand vom Betrachter werden ebenfalls auf korrespondierenden Netzhautpunkten abgebildet ($R = L$). Da sie vom Menschen peripher wahrgenommen werden, befinden sie sich außerhalb des fovealen Bereichs. Alle diese Punkte gleicher Entfernung bilden den sogenannten Horopter, eine gedachte Raumlinie, auf der sich die Objekte befinden, die zum Betrachter eine äquivalente Distanz aufweisen. Alle anderen peripher wahrgenommenen Objekte, die sich in Bezug auf das fixierte Objekt in divergierenden Entfernungen befinden, werden folglich auf nicht-korrespondierende (disparate) Netzhautpunkte projiziert ($R' \neq L'$). Die entstehende Disparität zwischen den beiden retinalen Abbildungen wird vom Gehirn physiologisch ausgewertet, so dass in nahen und mittleren Entfernungen eine sehr gute Wahrnehmung von räumlicher Tiefe entsteht.

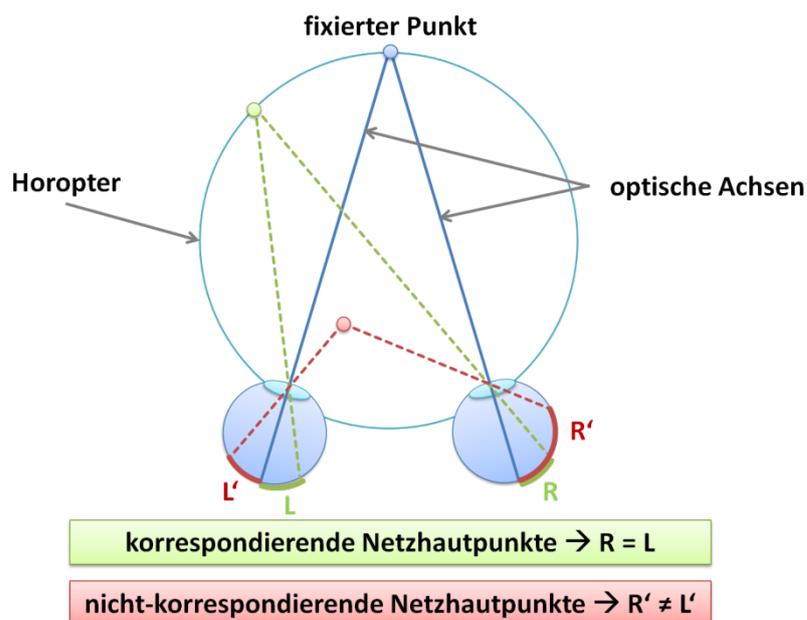


Abbildung 3–8: Funktionsprinzip der Disparität

Nach dem Wahrnehmungsmodell von Lindsay et al. (1972) basieren all diese monokularen und binokularen Tiefenkriterien auf dem Abgleich optischer Informationen mit bekannten Gedächtnisinhalten zur Interpretation des dreidimensionalen Raums (siehe Kapitel 3.1.2). Laut Bubb (1993) spielt bei diesem Prozess die Redundanz von Informationen zur Verringerung der Fehlerrate hinsichtlich der korrekten Interpretation eine wichtige Rolle. Übertragen auf die visuelle Informationsaufnahme im Rahmen der primären Fahraufgabe bedeutet dies, dass vom Fahrer eine zuverlässigere Einschätzung von Objektentfernungen und Relativgeschwindigkeiten zu erwarten ist, je mehr redundante, in sich konsistente

Informationen der dreidimensionalen Raumkonstellation über monokulare und binokulare Tiefenkriterien rückgemeldet werden.

Von besonderer Wichtigkeit ist eine zuverlässige Informationsaufnahme insbesondere im Bereich der Führungsebene zur Antizipation und Planung (Kapitel 3.1.2). Die entfernungsabhängige Qualität der Tiefenkriterien stellt ein wesentliches Defizit des visuellen Sinneskanals dar; gerade die für das Fahren wichtigen Informationsbereiche liegen aber in mittleren und großen Entfernungen (10 m – 200 m). Nach Gegenfurtner (2003) ist die Reichweite der Akkommodation auf lediglich 3 m begrenzt. Jenseits dieser Distanz erhält das Gehirn über das monokulare, okulomotorische Tiefenkriterium keine Entfernungsinformation mehr und muss sich ausschließlich auf die anderen Tiefenkriterien stützen. Das zweite okulomotorische Tiefenkriterium, die Konvergenz, ist in ihrer Reichweite umstritten; Gegenfurtner (2003) gibt einen Bereich von lediglich 3 m an, wohingegen Nagata (1991) einen maximalen Aktionsradius von ca. 20 m annimmt. Die beiden letztgenannten Tiefenkriterien spielen für die Entfernungsschätzung von Objekten im Straßenverkehr jedoch keine wesentliche Rolle, sondern sind primär zum Ablesen von Displays und Anzeigen im Fahrzeuginnenraum relevant.

Anders verhält es sich bei der Bewegungsparallaxe, die maximal bis ca. 250 m reicht (Nagata, 1991), sowie den statischen monokularen Tiefenkriterien, deren maximale Reichweite bis ca. 500 m angenommen wird (Nagata, 1991), und dem in nahen und mittleren Entfernungen dominantesten Tiefenkriterium, der Disparität, über deren Reichweite, die sich in einem Spektrum von 30 m bis 700 m bewegt, jedoch sehr stark divergierende Meinungen existieren (siehe Goldstein, 1997; Rock, 1998; Biedermann, et al., 1982; Müller-Limmroth, 1993; Nagata, 1991; Palmer, 1999; Gegenfurtner, 2003; Gregory, 2001; Bruce, et al., 2003; Mallot, 1998; Hoffman, 2001).

Diese drei Tiefenkriterien werden vom menschlichen Gehirn primär herangezogen, um Objektentfernungen, Relativgeschwindigkeiten von Objekten, sowie die eigene Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung abzuschätzen. Untersuchungen bestätigen jedoch die abnehmende Rückmeldequalität dieser Tiefenkriterien bei größeren Entfernungen. In Abweichung zu den in der Literatur angegebenen Maximalreichweiten, sind schon in viel geringeren Entfernungen merkbare Wahrnehmungs- bzw. Schätzdefizite feststellbar.

Ergebnisse von Häkkinen (1974) zeigen, dass Entfernungen zu vorausfahrenden Fahrzeugen bis 50 m noch relativ genau geschätzt werden können, wohingegen jenseits von 50 m der Abstand sicherheitskritisch überschätzt wird. Im Weiteren zeigen Untersuchungen in Bezug auf die Wahrnehmung von Differenzgeschwindigkeiten, dass die abnehmende Tiefenwahrnehmung bei größeren Objektabständen die nötige Beobachtungsdauer erheblich

erhöht. Demzufolge muss laut Probst (1986) bei einem Abstand von 20 m ein Objekt mindestens 0,8 s und bei 40 m mit einer Beobachtungsdauer von 1,4 s schon erheblich länger fixiert werden, um eine Änderung der Relativgeschwindigkeit visuell feststellen zu können (siehe auch Pflieger, et al., 1994).

Es kann als bestätigt angesehen werden, dass mit größerer Entfernung der Informationsgehalt der Tiefenkriterien kontinuierlich abnimmt. Als negative Folge ergibt sich eine objektiv ungenügende Entfernungs- und Differenzgeschwindigkeitsschätzung zu anderen Objekten. Nach Bubb et al. (1991) wirkt sich dies wiederum negativ auf die Längsführung aus. Die Spurhaltung wird laut Chatziastros et al. (1999) nicht beeinflusst; sie konnten bei Fahrsimulatorversuchen nachweisen, dass nur der periphere Nahbereich für die Spurhaltung wichtig ist.

Zusätzlich zu den eben beschriebenen allgemeinen Defiziten der visuellen Informationsaufnahme kommen insbesondere bei Dunkelheit und schlechter Witterung weitere visuelle Wahrnehmungseinschränkungen für den Fahrer hinzu. Beispielsweise steht ihm ein durch den Lichtkegel beschränkter und im Vergleich zum Tageslicht kontrastschwacher Wahrnehmungsbereich zur Verfügung. Mit Hilfe des Fernlichts kann dieser Bereich um ein Vielfaches erweitert werden, jedoch wird bei dieser Art der Sichtverbesserung zugleich der Gegenverkehr geblendet, so dass nur in etwa 25 % der Fälle, in denen ein Einsatz möglich wäre, das Fernlicht tatsächlich genutzt wird. Deshalb steht im Folgenden ausschließlich die Abblendlichtfahrt im Mittelpunkt der weiteren Betrachtungen.

Viele Automobilhersteller werben heute mit enormen Abblendlichtleuchtweiten von teilweise bis zu 200 m. Eine mögliche Objekterkennung in einer solch großen Distanz würde bei hohen Geschwindigkeiten völlig ausreichen, um die Gefahr eines Unfalls weitestgehend auszuschließen. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass diese Leuchtweite die mit technischen Messgeräten ermittelte maximale physikalische Reichweite des Scheinwerfers meint. Fälschlicherweise wird in der Praxis oft davon ausgegangen, dass Objekte, die sich in der physikalischen Scheinwerferreichweite befinden, vom Fahrer auch umgehend und zuverlässig wahrgenommen werden. Dem ist jedoch nicht so, da die Wahrnehmungsentfernung ganz erheblich von den individuellen Objekteigenschaften (Helligkeit, Kontrast, ...), den Umweltbedingungen und den individuellen visuellen Eigenschaften und Fähigkeiten des Fahrers abhängt.

Zur besseren Beurteilung der Scheinwerferleistung wurde deshalb die „Sichtweite“ eingeführt, ein neues empirisches Maß, das die maximale Wahrnehmungsentfernung beschreibt. Sie wird für gewöhnlich im Rahmen von Probandenversuchen mit definierten

Rahmenbedingungen ermittelt und liegt weit unterhalb der physikalischen Scheinwerferreichweite. Ein Grund hierfür ist unter anderem die in die Ferne abfallende geometrische Leuchtcharakteristik des Lichtkegels, die ein Objekt, wie beispielsweise einen Fußgänger, bei Annäherung erst allmählich von unten her beleuchtet. Beim Eintritt in den Lichtkegel ist maximal die untere Beinpartie erkennbar und erst in relativ geringer Distanz die komplette Silhouette des Menschen. Markierten vor Jahren noch Entfernungen von 25 - 30 m den Grenzwert, so werden heutzutage mit modernen Xenonscheinwerfern Sichtweiten von 50 - 60 m erreicht (Locher, et al., 2004).

Ein wesentliches Problem dieser Maßeinheit stellen die bislang noch nicht normierten Rahmenbedingungen dar. Eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse unterschiedlicher Hersteller erscheint daher fragwürdig. Im Weiteren sind diese Ergebnisse nur bedingt auf die Realität übertragbar. Laut Bartmann et al. (1993) ist es nämlich problematisch, beim Autofahren von einer exakten Sichtweite zu reden, da diese, wie zu Beginn erwähnt, für unterschiedliche Bezugsobjekte, Personen und Situationen stark divergieren kann. So ist es keine Seltenheit, dass bei Dunkelheit manche Objekte aufgrund ihrer geringen Reflexionseigenschaften, sowie ihres geringen Kontrastes, gegenüber der Umwelt erst ab einer sehr geringen Distanz die individuelle visuelle Wahrnehmungsschwelle des Fahrers erreichen, wogegen andere helle Objekte bereits aus relativ großen Entfernungen wahrgenommen werden können.

Es muss die Schlussfolgerung gezogen werden, dass bei einer nächtlichen Fahrt keine exakte visuelle Reichweite des Fahrers existiert, sondern vielmehr für jeden Gegenstand in der Umwelt unterschiedliche Sichtweiten vorliegen. Eckstein et al. (1995) sprechen in diesem Zusammenhang von der „Erkennbarkeitsentfernung“, bezogen auf das jeweilige Objekt und die jeweilige Situation.

Übertragen auf den ergonomischen Kontext wirkt auf den Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis eine Belastung ein, die als Funktion der Scheinwerferreichweite, der Objekteigenschaften und der Umwelteigenschaften definiert ist. Des Weiteren resultiert für den Fahrer aus dieser Belastung eine individuelle Beanspruchung, die wiederum durch eine Funktion der Belastung und der individuellen visuellen Eigenschaften und Fähigkeiten des Fahrers beschrieben werden kann. Der Begriff der Beanspruchung ist folglich in einem konträren Zusammenhang mit der Erkennbarkeitsentfernung zu sehen, da diese mit geringerer Beanspruchung des Fahrers steigt. Durch eine Minimierung der Belastung und eine Maximierung der visuellen Eigenschaften und Fähigkeiten kann die Beanspruchung theoretisch positiv beeinflusst werden.

Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit liegt der Fokus auf der Belastungsreduktion durch technische Verbesserungsmaßnahmen am Fahrzeug, auf die jedoch erst später intensiver eingegangen wird. Ebenso ist eine Verbesserung der Objekteigenschaften und der

Umfeldcharakteristik denkbar, um eine bessere Erkennbarkeit zu gewährleisten, die auf Seiten des Objektes im Wesentlichen durch die Größe und den Reflexionsgrad und auf Seiten des Umfeldes durch die Straßenbeleuchtung und Verkehrsteilnehmerbeleuchtung (Blendungsreduktion) bestimmt wird. Diesbezüglich stellt der sogenannte Leuchtdichtekontrast eine wichtige Größe dar, der einen Bezug zwischen der Objektleuchtdichte und der Umfeldleuchtdichte herstellt. Es wird zwischen dem photometrischen Kontrast, der physikalisch erfassbar und berechenbar ist, und dem für die aktuelle Fragestellung wichtigen subjektiven Kontrast unterschieden. Letzterer wird nach Kokoschka (2003) als die Wahrnehmung des Leuchtdichteunterschiedes zwischen einem Objekt und seiner Umgebung definiert. Dieser kann durch unterschiedlichste Maßnahmen erhöht werden. Insbesondere bei der Verkehrssicherheit von ungeschützten Verkehrsteilnehmern ist eine der am häufigsten diskutierten Maßnahmen zur Verbesserung des „Gesehenwerdens“ die Kontrastverbesserung durch Verwendung von retroreflektierenden Materialien an Kleidungsstücken, Schulranzen oder Fahrrädern. Dies wird damit begründet, dass 80 % der bei Nacht tödlich verunglückten Fußgänger dunkel gekleidet sind (Langwieder, et al., 1997). Leider sind diese Maßnahmen nur bedingt erfolgsversprechend, da zu wenige gesetzliche Reglementierungen existieren und sie auf freiwilliger Basis zu selten Anwendung finden.

Im Vergleich zu den eben beschriebenen Ansätzen der Belastungsminimierung ist eine Reduktion der Beanspruchung durch eine Maximierung der visuellen Eigenschaften und Fähigkeiten bei Nacht einer aktiven Optimierung praktisch nicht zugänglich. Es ist zwar möglich, nicht ausreichende Sehfunktionen mit Sehhilfen auszugleichen, jedoch bringt gerade das Fahren bei Nacht oder witterungsbedingter Sichtreduktion weitere Beeinträchtigungen des visuellen Sinneskanals mit sich, die durch eine Korrektur nicht behoben werden können. Diese Defizite der visuellen Informationsaufnahme des Menschen bei nacht- oder witterungsbedingter Sichtreduktion sind die Nachtmyopie¹, die Nachtblindheit, das reduzierte Farbsehen und die Blendungsempfindlichkeit. Ihre Ursachen können anhand unterschiedlicher Effekte im Rahmen der Hell-/Dunkel-Adaptation des menschlichen Auges erklärt werden.

In Abhängigkeit der Lichtverhältnisse hat das Auge anhand der Iris, der Linse und der beiden Rezeptor-Arten (Zapfen und Stäbchen) die Fähigkeit sich zu adaptieren, um eine bestmögliche Informationsaufnahme gewährleisten zu können. Es wird zwischen dem photopischem Sehen (ausreichende Helligkeit: $L_u = 10^1 \text{ cd/m}^2$ bis 10^5 cd/m^2), skotopischem

¹ Kurzsichtigkeit bei Dunkelheitseintritt

Sehen (geringe Helligkeit: $L_u = 10^{-5} \text{ cd/m}^2$ bis 10^{-3} cd/m^2) und mesopischem Sehen (Dämmerung: $L_u = 10^{-3} \text{ cd/m}^2$ bis 10^1 cd/m^2) unterschieden, wobei insbesondere der mesopische Bereich für eine nächtliche Landstraßenfahrt charakteristisch ist. Der notwendige Anpassungsvorgang des Auges wird als Hell-/Dunkel-Adaptation bezeichnet, wobei die Dunkeladaptation ihrerseits in die Sofortadaptation und die darauffolgende Daueradaptation zu gliedern ist. Diesbezüglich wird der sich nach 2 - 4 Minuten einstellende Dunkeladaptationszustand als Sofort-Adaptation bezeichnet. Hierbei öffnet sich unter anderem die Pupille sehr weit, um möglichst viel Restlicht aus der Umgebung einfangen zu können. Darunter leidet jedoch, vergleichbar zu einer Fotokamera, die Tiefenschärfe, da Randstrahlen einen größeren Anteil an der Linsenabbildung gewinnen und das Auge aufgrund der daraus resultierenden sphärischen Aberration mit ca. 0,3 dpt relativ myop wird (Kokoschka, 2003; Schober, 2004). Dies ist einer von drei Effekten der Dunkeladaptation, der zur Nachtmyopie des menschlichen Auges beiträgt und die Detailauflösung bei Nacht merklich reduziert. Ein weiterer Effekt hängt mit der im Rahmen der Dunkeladaptation näher zum Auge hin wandernden Akkommodationsruhelage zusammen, durch die ein verändertes Distanzbewusstsein hervorgerufen wird (Schober, 2004). Das Auge akkommodiert auf eine näher vor dem Auge liegende Ebene, wodurch sich eine zusätzliche Kurzsichtigkeit einstellt. Zugleich ergibt sich jedoch der positive Effekt, dass der foveale Bereich aufgeweitet wird, was eine bessere Ausnutzung der lichtempfindlichen Stäbchen begünstigt, deren Dichteverteilung im peripheren Bereich bekannter Weise zunimmt.

Der Vorteil der Stäbchen, dass sie schon geringe Lichtimpulse erfassen können, geht aber wiederum zu Lasten des Scharfsehens und des Farbsehens. Beim skotopischen und mesopischen Sehen besteht aufgrund dessen ein weiteres Defizit des menschlichen Auges darin, dass kein bzw. nur ein stark reduziertes Farbsehen möglich ist und somit alles in Grautönen wahrgenommen wird.

Durch die beschriebenen Adaptationsvorgänge der Pupille und Linse können kurzfristige Leuchtdichteunterschiede sehr schnell, aber nur bis zu einem gewissen Grad, kompensiert werden. Bei längerfristigen Helligkeitsänderungen passt sich das menschliche Auge durch einen weiteren physiologischen Prozess an, bei dem die relative Lichtempfindlichkeit der Fotorezeptoren durch das Protein Rhodopsin gesteuert wird. Bei starker Lichteinstrahlung nimmt die Lichtempfindlichkeit des photopisch sehenden Auges durch den Abbau dieses Stoffes, der wegen seiner roten Farbe auch Sehpurpur genannt wird, ab. Dieser Vorgang erfolgt sehr schnell, wohingegen die Bildung von Rhodopsin für die vollständige Dunkeladaptation zwischen 30 - 45 Minuten dauert (Müller-Limmroth, 1993). Die daraus resultierende Dunkeladaptationskurve setzt sich aus zwei Abschnitten zusammen. In der ersten Phase wird im Rahmen der Sofortadaptation bis zum sogenannten Kohlrausch'schen

Knick die Empfindlichkeitsanpassung von den photopischen Elementen bestimmt (Zapfen), wohingegen in der zweiten Phase im Rahmen der Daueradaptation nur skotopische Rezeptoren (Stäbchen) für die Anpassung ausschlaggebend sind. Beide Adaptationsarten sind voneinander unabhängig, so dass Menschen über eine gute Sofort-, aber schlechte Daueradaptation verfügen können. Dies ist auf die individuelle Güte der beiden Rezeptor-Arten zurückzuführen. Menschen mit angeborener Nachtblindheit verfügen über funktionsuntüchtige Stäbchen, so dass eine Adaptation nur bis zur ersten Phase stattfinden kann. Diese Menschen haben bei Nacht ein sehr stark eingeschränktes Sehvermögen. Bei einem vollständig dunkeladaptierenden gesunden Auge liegt die relative spektrale Lichtempfindlichkeit des skotopischen Stäbchen-Sehens bei einem Wellenlängenbereich von $V' = 505$ nm, 128 mal höher, als das Maximum des photopischen Zapfen-Sehens, das bei einer Wellenlängen von $V = 555$ nm liegt (siehe Abbildung 3–9). Dennoch hat diese Sensitivitätserhöhung gleichzeitig einen negativen Einfluss auf das Scharfsehen bei Nacht, da die Maxima-Verschiebung von ca. 50 nm aufgrund der chromatischen Aberration einer Änderung der Brechkraft um 0,3 dpt entspricht. Somit ergibt sich ein dritter Effekt, der zur Nachmyopie beiträgt und sich auch bei Menschen ohne Brechungsfehler einstellt (Schober, 2004). Im Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Nachmyopie mit steigendem Lebensalter zunimmt (Aulhorn, et al., 1970; Schmidt-Clausen, et al., 2004).

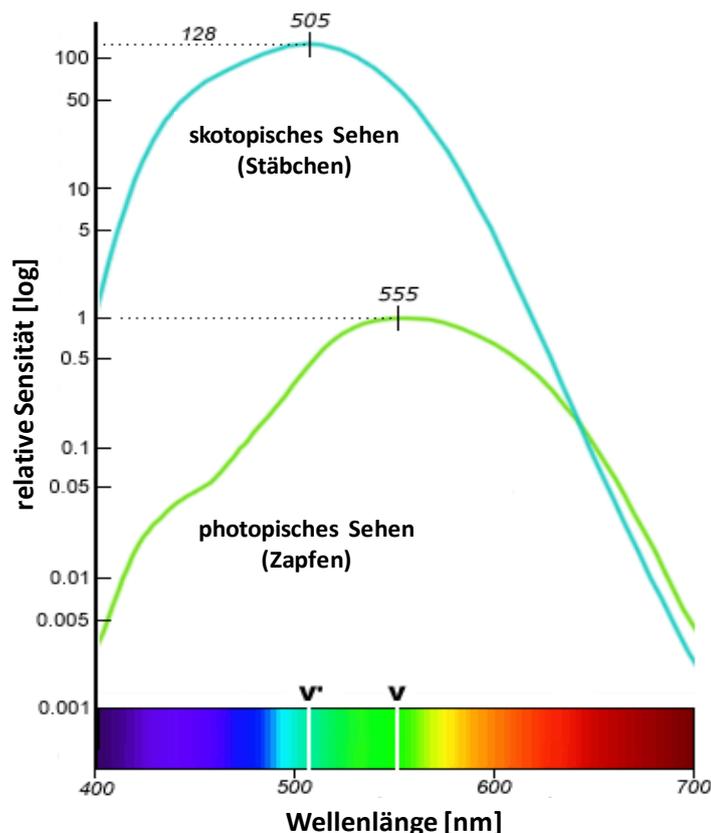


Abbildung 3–9: Empfindlichkeit des menschlichen Auges bei Hell- und Dunkeladaptation (Kaiser, et al., 1996)

Neben den bisher beschriebenen Defiziten der visuellen Informationsaufnahme bei Nacht stellen die wohl gravierendsten Einschränkung des nächtlichen Sehens die Blendungen durch andere Verkehrsteilnehmer dar. Besonders bei Regen erschweren zusätzliche Reflexionen von der nassen Fahrbahn eine zuverlässige visuelle Informationsaufnahme. Der physiologische Grund ist die Blendempfindlichkeit des menschlichen Auges. Wie im Fall der Dunkeladaptation erklärt, ist beim mesopischen und skotopischen Sehen die Pupille des adaptierten Auges sehr weit geöffnet, um noch das letzte Restlicht auflösen zu können. Die im Falle einer Nachtfahrt an die Dunkelheit angepassten Rezeptor-Zellen haben ihre Lichtempfindlichkeit durch die Produktion von Rhodopsin stark erhöht. Eine plötzlich aus der Nacht auftauchende grelle Lichtquelle fällt durch die weit geöffnete Pupille ungefiltert mit großer Intensität auf die Retina. Hierdurch erfolgt ein schneller Abbau des Rhodopsins. Die somit helladaptierten Rezeptor-Zellen benötigen ab dem Zeitpunkt des Verschwindens der Blendquelle mindesten 2 - 4 Minuten, bis sie sich erneut einigermaßen an die geringere Helligkeit des eigenen Abblendlichtes adaptiert haben. Währenddessen legt der Fahrer mit deutlich reduzierten Sehfunktionen eine erhebliche Wegstrecke zurück, in der er zuvor erkannte Kontraste nicht mehr wahrnehmen kann. Die Blendempfindlichkeit nimmt im Alter zu.

Viele Unfallexperten stellen sowohl das schlechte Dämmerungssehvermögen aufgrund von Nachtblindheit, Nachtmyopie und reduziertem Farbsehen, als auch die Blendempfindlichkeit des menschlichen Auges in einen Zusammenhang mit dem erhöhten Unfallrisiko bei Nacht, da die Objekterkennungseigenschaften und das bei guter Sicht schon ohnehin ungenügende Entfernungs- und Differenzgeschwindigkeitsschätzvermögen zu anderen Objekten zusätzlich reduziert werden.

3.1.2 Funktionsweise und Defizite der multimodalen Informationsverarbeitung

Neben den bei Dunkelheit und witterungsbedingter Sichtreduktion auftretenden Defiziten der visuellen Informationsaufnahme sind noch weitere menschliche Faktoren von Bedeutung, die das sichere Führen eines Fahrzeugs bei Nacht negativ beeinflussen. Diese sind in dem der Informationsaufnahme nachstehenden Prozess der multimodalen Informationsverarbeitung zu finden. Das menschliche Gehirn verfolgt im Rahmen dieses Prozesses zwei fundamentale Ziele, die aus dem in Abbildung 3–10 dargestellten Modell der Informationsverarbeitung, das auf dem Reafferenzprinzip nach von Holst (1957) aufbaut, hergeleitet werden können (Bubb, 1993).

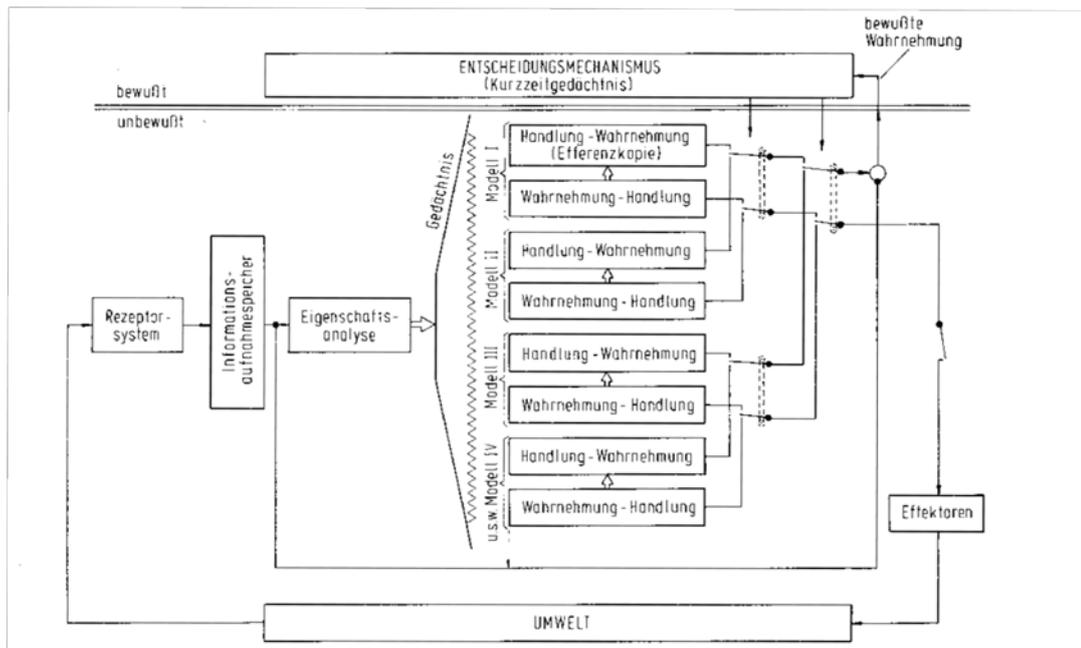


Abbildung 3–10: Modell der Informationsverarbeitung (Bubb, 1993)

Das primäre Bestreben des menschlichen Gehirns besteht darin, durch eine Eigenschaftsanalyse der wahrgenommenen Informationen und deren Reflexion an Gedächtnisinhalten eine kognitive Gesamtschau der vermittelten Umwelteindrücke zu erreichen (Lindsay, et al., 1972). Hierbei verschmelzen die vielen unterschiedlichen multi-modal wahrgenommenen Sinneseindrücke des Rezeptorsystems zu einer einzigen Wahrnehmung der eigenen Lage und Bewegung im Raum in Relation zu ortsfesten und bewegten Gegenständen, so dass ein möglichst objektives Bild der Außenwelt im Inneren des Organismus entsteht (Bubb, 1993).

Das zweite Ziel des menschlichen Gehirns besteht darin, basierend auf dieser wahrgenommenen Ist-Konstellation, von sich selbst und der Umwelt, eine situativ optimal angepasste Reaktion vorzubereiten und diese als detaillierten Bewegungsentwurf an die Mechanismen der Informationsumsetzung (Effektoren) auf der Stabilisierungsebene weiterzuleiten. Zur Bewältigung dieser hochkomplexen Aufgabe spielt das Gedächtnis, das mit zunehmender Erfahrung immer mehr Zusammenhänge und Ereignisse der Umwelt verstehen lernt und in sogenannten inneren Modellen abspeichert, eine fundamentale Rolle (Holst, 1957). Die auf diese Weise aufgebauten inneren Strukturen im Gehirn, stellen eine adäquate Repräsentation der Welt mit ihren Gesetzmäßigkeiten dar. Dies birgt den Vorteil in sich, dass der Informationsverarbeitungsprozess nicht mehr bedingungslos abhängig von einer konsistenten multimodalen Informationsrückmeldung der Sinneskanäle ist, sondern, davon losgelöst, die Konsequenz einer Aktion oder die Konstellation der Umweltgegebenheit vom Fahrer selbst durch eine mentale Simulation abgeschätzt werden kann (Lindsay, et al., 1972). Dieser Schätzvorgang wird als Antizipation bezeichnet und ist für gewöhnlich im

Vergleich zur tatsächlich eintretenden Situation mit einer gewissen Ungenauigkeit bzw. einem Fehler behaftet. Dieser bleibt jedoch in den meisten Fällen ohne Konsequenz, da sich der Fahrer sehr schnell auf eine abweichende Ist-Situation einstellen kann. Dennoch birgt diese Schätzungenauigkeit ein gewisses Unfallrisiko in sich, das nicht von der Hand zu weisen ist.

Die antizipatorischen Fähigkeiten des Menschen umfassen nicht nur die zu erwartenden Abläufe in der Außenwelt, sondern auch die reaktiv zu erwartenden Eindrücke über die Sinneskanäle. Ein inneres Modell besteht folglich immer aus einem sogenannten Wahrnehmungs-Handlungsmodell und einem adversativen Handlungs-Wahrnehmungsmodell (siehe Abbildung 3–10). Ersteres entspricht, ausgehend von einer Wahrnehmung, wie beispielsweise dem Sehen einer Rechtskurve, dem Anregen einer Handlung, die sich im Falle des Beispiels als Einschlagen des Lenkrades nach rechts und gegebenenfalls dem Betätigen des Gas- oder Bremspedales darstellt. Durch diesen Eingriff wird sich die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs ändern, die wiederum anhand des adversativen Handlungs-Wahrnehmungsmodells des Fahrers im Voraus abgeschätzt werden kann. Der Mensch ist somit in der Lage, in einem bestimmten Rahmen vorherzusagen, wie sich das Fahrzeug abhängig von der geplanten Lenkrad- und Pedalstellung durch die Kurve bewegen wird. Dieser hochgeübte Vorgang läuft bei erfahrenen Fahrern im Unterbewusstsein ab, wenn die Erwartung mit der Wahrnehmung übereinstimmt. Bei Abweichungen, beispielsweise ein Über- oder Untersteuern des Fahrzeugs aufgrund von Glatteis, wird dem Fahrer der Informationsverarbeitungsprozess umgehend bewusst, so dass er im Rahmen diverser Entscheidungsmechanismen fieberhaft nach alternativen inneren Modellen sucht, die auf den Anwendungsfall übertragbar sind und Aussicht auf Abhilfe versprechen. Die Grenze zwischen den eben beschriebenen höchst geübten unbewussten Handlungen und den bewussten ungeübten Entscheidungstätigkeiten darf nicht diskret, sondern als fließend betrachtet werden.

Rasmussen (1987) führt eine Zwischenebene ein und unterscheidet zwischen den drei ineinanderfließenden Ebenen des

- verhaltensbasierten Handelns (höchstgeübte Tätigkeiten),
- regelbasierten Handelns (Tätigkeiten auf der Basis von erlernten Regeln durch Schulungen) und
- wissensbasierten Handelns (Entscheidungstätigkeiten),

die in aufsteigender Reihenfolge an Komplexität gewinnen. Mit steigender Komplexität benötigt das Gehirn zur Bewältigung der Aufgabe mehr Zeit. In diesem Fall ist dazu die beschränkte Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses zu berücksichtigen, die nach Miller (1956) 7 ± 2 psychologische Einheiten beträgt. In Anbetracht dessen bilden ungeübte wissens-

basierte Entscheidungstätigkeiten, wie sie bei unvorhersehbaren plötzlich eintretenden Verkehrssituationen vorzufinden sind, die höchste kognitive Ebene mit dem größten Fehlerpotenzial.

Zu diesem erhöhten Fehlerpotenzial trägt unter anderem die Tatsache bei, dass die Entscheidungsmechanismen des Fahrers im erheblichen Maße durch seine individuelle subjektive Risikobereitschaft beeinflusst werden. Das Risiko an sich ist aus psychologischer Sicht als die abgeschätzte Wahrscheinlichkeit definiert, die durch mangelnde Vorhersehbarkeit des Kommenden das Auftreten eines unerwünschten Ereignisses und der möglichen Schadenshöhe beinhaltet (Dorsch, 2003; Hoyos, 1980).

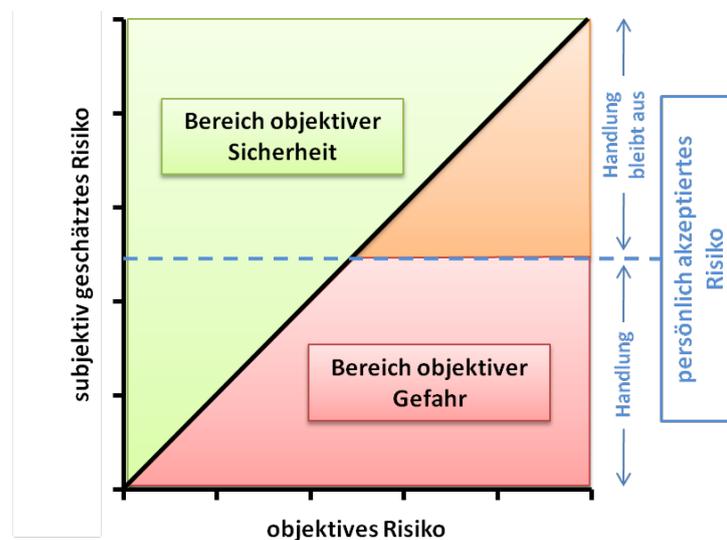


Abbildung 3–11: Zusammenhang zwischen objektivem und subjektivem Risiko (Bubb, 1993)

Nach Bubb (2003) ist die Sicherheit der Handlung folglich von der Güte der subjektiven Risikoschätzung und dem tatsächlich vorhandenen objektiven Risiko abhängig (Abbildung 3–11). Hiernach ästimiert ein Fahrer für jede Entscheidungssituation das mit einer bestimmten Handlung verbundene Risiko. Darauf basierend fällt er die Entscheidung zur Durchführung der Handlung, wenn er das subjektiv abgeschätzte Risiko für niedriger hält, als sein situativ abhängiges, akzeptiertes Grenzkrisiko. Im gegenteiligen Fall wird er die Handlung vermeiden. Das Problem dieses Entscheidungsmechanismus liegt in der vom Fahrer durchzuführenden Schätzung des tatsächlich vorhanden Risikos, da dem subjektiv geschätzten Risiko das tatsächlich vorhandene objektive Risiko gegenübersteht. Nur wenn der Mensch in der Lage wäre dieses objektive Risiko korrekt zu schätzen, würde er sich immer im Bereich objektiver Sicherheit bewegen. Leider ist er dazu nicht fähig, so dass im Grunde genommen zwei Fälle zu unterscheiden sind:

Den sicherheitsunkritischen Fall stellt das Überschätzen des objektiven Risikos dar. In diesem Fall befindet sich der Fahrer, selbst wenn er an seine subjektive Risikogrenze geht,

oder diese sogar minimal überschreitet, stets im sicheren Bereich. Sicherheitskritisch wird es hingegen, wenn das objektive Risiko unterschätzt wird. In diesem Fall wird eine Handlung durchgeführt, deren Risiko über der maximal zulässigen Risikogrenze liegt. Die Folge ist ein stark erhöhtes Unfallpotenzial. Der Grund für ein solches Fehlverhalten ist der Mangel an Erlebnismöglichkeit. Oft können sicherheitskritische Grenzsituationen nur einmalig erlebt werden. Es liegen somit keine ausgeprägten inneren Modelle für eine situationsadäquate Schätzung des Risikos vor, auf die der Mensch zurückgreifen kann.

Welche konkreten negativen Auswirkungen diese Defizite der wissensbasierten Entscheidungsmechanismen, der Risikoschätzung und der Antizipation wahrgenommener und dynamischer Größen für die Fahrsicherheit bedeuten, wird im Folgenden anhand einer detaillierten Analyse der Führungsaufgabe verdeutlicht. Abbildung 3–12 repräsentiert ein nach Bubb (1993) erweitertes schematisches Flussdiagramm dieses Prozesses, wobei vom Fahrer durchzuführende Teilaufgaben als Quadrate und Entscheidungsprozesse als Rauten dargestellt sind.

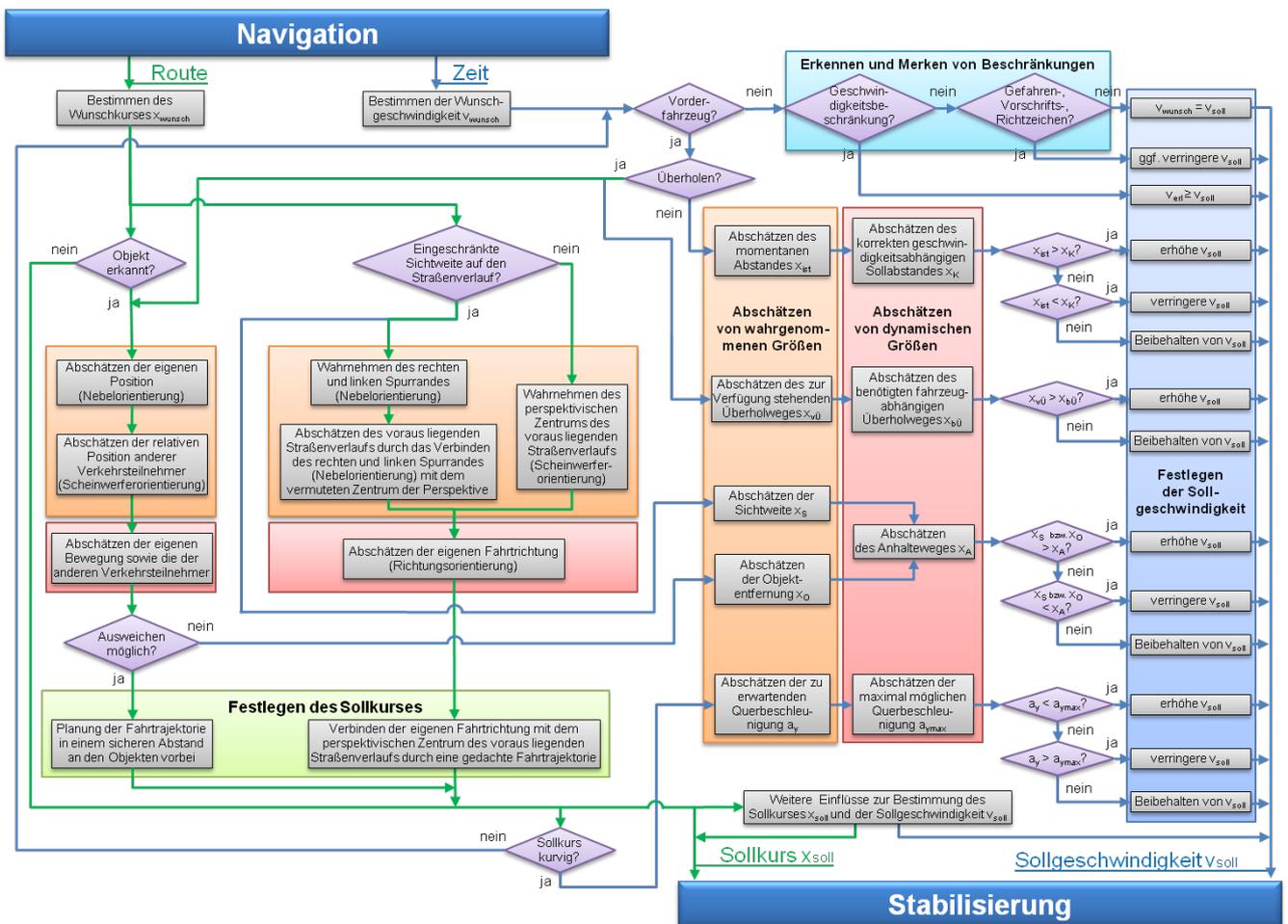


Abbildung 3–12: Entscheidungsmodell der Fahrzeugführungsebene (erweitert nach Bubb, 1993; Lange, 2008)

Basierend auf dem Drei-Ebenen-Modell nach Bernotat (1970) ist die von der Navigationsebene vorgegebene Aufgabenstellung durch die zu fahrende Route und die zulässige Zeit definiert. Die Führungsaufgabe ergibt sich stets aus der gegebenen Fahrsituation. Aufgabe des Fahrers ist es, im Rahmen der Führungsaufgabe sowohl die für die Regelung der Längsdynamik notwendige Sollgeschwindigkeit, als auch den für die Regelung der Querdynamik notwendigen Sollkurs, durch einen hochkomplexen multimodalen Informationsaufnahme- und Informationsverarbeitungsprozess zu bestimmen und als Führungsgrößen an das nächst niedrigere Niveau der Stabilisierung weiterzuleiten. Die durchzuführenden Teilaufgaben des Sollkursfestlegungsprozesses sind innerhalb des Flussdiagramms durch grüne Pfeile und die des Sollgeschwindigkeitsfestlegungsprozesses durch blaue Pfeile verbunden.

Ausgangspunkt bildet in beiden Fällen die Bestimmung der Wunschführungsgrößen in Form des individuellen Wunschkurses x_{wunsch} und der individuellen Wunschgeschwindigkeit v_{wunsch} . Bei Letzterem entspricht die Wunschgeschwindigkeit v_{wunsch} der Sollgeschwindigkeit v_{soll} , wenn keine Anpassung aufgrund von Vorderfahrzeugen, Geschwindigkeitsbeschränkungen, diversen Verkehrszeichen, sicherheitskritischen Objekten, eingeschränkter Sichtweite oder einem kurvigen Straßenverlauf erforderlich ist. Im Weiteren entspricht der Wunschkurs x_{wunsch} dem Sollkurs x_{soll} , wenn keine Adaption aufgrund des vorausliegenden Straßenverlaufs oder sicherheitskritischer Objekte stattzufinden hat. Andernfalls werden beide Führungsgrößen durch den Fahrer anhand zahlreicher antizipatorischer Teilaufgaben an die Umweltfaktoren der aktuellen Situation angepasst.

Im Falle der Sollgeschwindigkeit stellt beispielsweise ein vorausfahrendes Fahrzeug eine für den Fahrer anspruchsvolle Adaptationsaufgabe dar. Der Kraftfahrer muss zu Beginn entscheiden, ob das Vorderfahrzeug überholt werden soll oder nicht. Sowohl die Folgefahrt als auch der Überholvorgang stellen hohe Ansprüche an die antizipatorischen Fähigkeiten des Menschen. Für den Fall der Folgefahrt muss der Fahrer zum einen den momentanen Abstand zum Vorderfahrzeug x_{ist} und zum anderen den korrekten geschwindigkeitsabhängigen Sollabstand x_{K} bestimmen. Durch einen Abgleich dieser abgeschätzten wahrgenommenen und abgeschätzten dynamischen Größen entscheidet sich der Fahrer zum Erhöhen, Verringern oder Beibehalten der Geschwindigkeit, so dass aus subjektiver Sicht des Fahrers bei einem abrupten Abbremsen des Vordermanns zu jeder Zeit noch rechtzeitig angehalten werden kann. Das Problem liegt im Wesentlichen beim Abschätzen des geschwindigkeitsabhängigen Sicherheitsabstandes x_{K} , der sich aus dem analytischen Zusammenhang

$$x_{\text{K}} = v t_{\text{R}} \quad (\text{Formel 1})$$

berechnet, wobei v die gefahrene Geschwindigkeit und t_{R} die eigene Reaktionszeit darstellt. Unter der Annahme, dass das vorausfahrende Fahrzeug den gleichen Bremsweg benötigt

wie das eigene Fahrzeug, muss der Fahrer folglich gewährleisten, dass der Sicherheitsabstand ausreicht, um mindestens die eigene Reaktionszeit kompensieren zu können. Experimentelle Untersuchungen von Assmann (1985) zeigen jedoch, dass der Mensch nicht in der Lage ist, die Geschwindigkeitsabhängigkeit des adäquaten Abstandes bei dieser Schätzung zu berücksichtigen. Der Fahrer hält stattdessen einen absoluten Abstand für sicher und regelt diesen nahezu unabhängig von der Geschwindigkeit ein. Dies hat zur Folge, dass bei unkritischen niedrigen Geschwindigkeiten zu große und bei kritischen hohen Geschwindigkeiten zu geringe, sicherheitskritische Abstände zum vorausfahrenden Fahrzeug eingehalten werden. Bei schlechten Witterungsverhältnissen verschärft sich diese Problematik, da die Abschätzung des momentanen Abstandes x_{ist} zum vorausfahrenden Fahrzeug und dessen Geschwindigkeitsänderungen durch die reduzierten visuellen Fähigkeiten schlechter und langsamer wahrgenommen werden können.

Noch komplexer gestaltet sich der Überholvorgang. Hierbei muss zum einen der zur Verfügung stehende Überholweg $x_{vÜ}$ abgeschätzt werden, der durch den Straßenverlauf und entgegenkommende Fahrzeuge begrenzt ist. Im Weiteren hat durch den Fahrer eine Schätzung des minimal benötigten Überholwegs $x_{bÜ}$ zu erfolgen, der sehr stark von den fahrphysikalischen Eigenschaften des eigenen Fahrzeugs abhängig ist. Für den Fall, dass aus Sicht des Fahrers der zur Verfügung stehende Überholweg kürzer ist als der minimal benötigte, wird sich der Mensch gegen den Überholvorgang entscheiden und die Geschwindigkeit im Rahmen der zuvor erklärten Folgefahrt regeln. Im anderen Fall wird er den Überholvorgang durchführen und die Geschwindigkeit erhöhen. Zusätzlich hat bei dieser Planungsfolge eine Anpassung des Sollkurses durch ein Vorbeilegen der Fahrtrajektorie an dem vorausfahrenden Fahrzeug zu erfolgen. Dieser Vorgang wird erst später im Rahmen des Sollkursbildungsprozesses ausführlich erklärt. Besonders problematisch gestaltet sich beim Überholvorgang die trilaterale, primär visuelle Antizipation von wahrgenommenen und dynamischen Größen. Diese sind die Längs- und Querdynamik der eigenen Bewegung, des vorausfahrenden Fahrzeuges und des entgegenkommenden Fahrzeuges. Eine fehlerfreie Bewältigung dieser Aufgabe setzt erfahrungsbasierte innere Modelle voraus, die durch häufiges Erleben vergleichbarer Situationen hervorragend ausgeprägt sind (Cordon, et al., 1970). Andernfalls können diese hochkomplexen Planungsaufgaben vermehrt zu unfallträchtigen Fehlern führen.

Alle weiteren, die Sollgeschwindigkeit beeinflussenden Entscheidungsprozesse und Schätzaufgaben, sind aus dem zweiten, in der Abbildung 3–12 grün gekennzeichneten Festlegungsprozess des Sollkurses abzuleiten. Dieser wird zum einen durch den vorausliegenden Straßenverlauf bestimmt, der bei guten Sichtverhältnissen problemlos in

Form der Scheinwerferorientierung wahrzunehmen ist. Zum anderen schätzt der Fahrer über die visuelle Richtungsorientierung die eigene Fahrtrichtung ab, die er in einem dritten Schritt mit dem zuvor wahrgenommenen perspektivischen Zentrum des vorausliegenden Straßenverlaufs durch eine gedachte Fahrtrajektorie verbindet und somit den vorläufigen Sollkurs bestimmt. Im Weiteren beeinflussen natürlich auch sicherheitskritische Objekte auf, bzw. neben der Fahrspur, die Sollkursbildung. Im Falle einer solchen Objektdetektion muss der Fahrer visuell sowohl über die Nebelorientierung die eigene Ist-Position, als auch über die Scheinwerferorientierung die relative Ist-Position der übrigen Verkehrsteilnehmer, abschätzen. Darauf basierend erfolgt in einem weiteren Schritt die Antizipation der eigenen Bewegung und die der anderen wahrgenommenen Fahrzeuge und Passanten. Bei einem frühzeitigen Erkennen derartiger sicherheitskritischer Objekte ist ein Ausweichen in der Regel ohne weiteres möglich. Hierfür passt der Fahrer seine zuvor an den Straßenverlauf adaptierte Fahrtrajektorie erneut an, indem er diese an den erkannten Objekten unter Berücksichtigung ihrer antizipierten Bewegungen in einem sicheren Abstand vorbeilegt. In manchen Fällen erfordert eine derartige Situation zusätzlich eine Anpassung der momentanen Geschwindigkeit durch einen mentalen Abgleich der wahrgenommenen Objektentfernung x_O mit dem abgeschätzten eigenen Anhalteweg x_A . Diesbezüglich stellt besonders die Abschätzung des Anhalteweges x_A den Fahrer vor große Probleme.

Dieser setzt sich additiv aus dem bereits beschriebenen physiologisch bedingten Reaktionsweg x_R und dem Bremsweg x_B zu

$$x_A = x_R + x_B \quad (\text{Formel 2})$$

zusammen, wobei der Bremsweg x_B sehr stark durch die technischen Fahrzeugdaten und die Fahrbahneigenschaften beeinflusst wird. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit folgt aus Formel 2 unter Berücksichtigung der Fahrphysik

$$x_A = v t_R + \frac{v^2}{2\mu g} \quad (\text{Formel 3}),$$

wobei v die Ausgangsgeschwindigkeit, t_R die Reaktionszeit des Fahrers, μ der Kraftschlussbeiwert der Straßenoberfläche und g die Erdbeschleunigung darstellt. Die Aufgabe des Fahrers besteht nun darin, zusätzlich zu der am Beispiel der Folgefahrt erklärten mangelhaften Reaktionswegschätzung, sowohl den von der Straßenbeschaffenheit und den Witterungsverhältnissen abhängigen Kraftschlussbeiwert, als auch die quadratische Geschwindigkeitsabhängigkeit des Anhalteweges x_A , richtig abzuschätzen. Diese hochkomplexe Aufgabe ist aller Erfahrung nach vom Fahrer nicht zu bewältigen. Im diskutierten Fall einer sehr früh erkannten Gefahrenquelle hat dieses Defizit des Menschen noch keine gravierenden Auswirkungen auf die Fahrsicherheit, da dem Fahrer zusätzlich zur Längsdynamikanpassung noch genügend Zeit zur Verfügung steht, ein situativ angemessenes Ausweichmanöver einzuleiten. Diese beschriebene Teilaufgabe der

Geschwindigkeitsanpassung kann sich aber im Falle eines zu spät erkannten sicherheitskritischen Objektes auch als Vollbremsung darstellen, wenn ein Ausweichen aufgrund eines zu geringen Zeitfensters nicht mehr möglich ist.

Es kann festgehalten werden, dass der Sollkurs in dem vorliegenden Flussdiagramm aus Abbildung 3–12 primär über die beiden Äste des Straßenverlaufs und der Objekterkennung festgelegt wird. Für den Fall, dass die aus dieser Determinierung resultierende Fahrtrajektorie eine kurvige Charakteristik aufweist, hat der Fahrer in einem letzten Schritt eine weitere Adaption der Längsdynamik vorzunehmen. Hierfür schätzt er zunächst, basierend auf seinen individuellen Erfahrungen, die zu erwartende Querbearschleunigung a_y ab. Zusätzlich muss er die maximal mögliche Querbearschleunigung $a_{y\max}$ abschätzen und durch einen Abgleich dieser beiden antizipierten Werte bestimmen, ob die Geschwindigkeit erhöht, verringert oder beibehalten werden kann. Nach Herrin et al. (1974) wird die Geschwindigkeit in Kurven und die damit verbundene Querbearschleunigung primär unter Komfortaspekten gewählt. Bis zu Geschwindigkeiten von 130 km/h beträgt im Durchschnitt die akzeptierte maximale Querbearschleunigung 0,3 g. Bei höheren Geschwindigkeiten wird dieser Wert noch wesentlich kleiner. Folglich sind bei einer vorangegangenen fehlerfreien Sollkursbestimmung, die bei guten Sichtverhältnissen problemlos möglich ist, bezüglich der querbearschleunigungsabhängigen Geschwindigkeitsbestimmung keine, bzw. nur geringe Fehler zu erwarten.

Nach Bubb (1975) ist unter der Voraussetzung idealer Sichtverhältnisse beim direkten Vergleich des Querdynamik- und Längsdynamikregelkreises die Hauptproblematik in der Regelung der Längsdynamik des Fahrzeugs zu sehen. Die Folgefahrt, der Überholvorgang und die Schätzung des Anhalteweges zeigen, dass die Führungsgröße in Form der Soll-Geschwindigkeit einer objektiven Grenze unterliegt, die der Fahrer nur zu einer ungenügenden Qualität wahrnehmen und verarbeiten kann. Diese objektive Grenze wird von Schlesinger et al. (1963), basierend auf dem Modell von Gibson et al. (1938), als die „kleinste Bremszone“ bezeichnet. Sie beschreibt den Bereich vor dem Fahrzeug, der zum Anhalten des PKWs benötigt wird und in dem sich folglich keine Objekte befinden dürfen (Schlesinger, 1964). Die „kleinste Bremszone“ legt die unbedingt nötige einsehbare Fahrstrecke und damit die benötigte Voranzeigzeit der Führungsgröße fest. Leider weicht in der Regel die vom Fahrer subjektiv festgelegte Bremszone im negativen Sinne von der gerade noch sicheren objektiven „kleinsten Bremszone“ ab; die Soll-Geschwindigkeit und der subjektive Sicherheitsabstand hängen ganz erheblich von der individuellen Risikobereitschaft des Fahrers und seinen auf Erfahrungen basierenden antizipatorischen Fähigkeiten, die zur adäquaten Gefährlichkeitseinschätzung der gegenwärtigen Situation von Nöten sind, ab.

Da der Fahrer nur in den seltensten Fällen - nämlich bei einem Unfall oder einer gerade noch abgewendeten sicherheitskritischen Situation - Rückmeldung über eine zu hoch gewählte Geschwindigkeit erhält und somit in den meisten Fällen eine objektive Fehleinschätzung der Geschwindigkeit ohne Folgen bleibt, lehrt ihn die Erfahrung, schneller und dichter auffahren zu können, als das eigentliche, für ihn nicht wahrnehmbare, objektive Risiko erlaubt. Die Folge ist eine vom Fahrer häufig zu klein abgeschätzte Bremszone und eine daraus resultierende überhöhte Geschwindigkeit.

Aufgrund dessen fordert Bubb (1975) eine Assistenz des Fahrers durch eine systemadäquate Rückmeldung der Längsdynamik in Form eines auf der Straße liegenden Bremsbalkens, der über ein kontaktanaloges Head-Up-Display (kHUD) der realen Sicht des Fahrers superpositioniert wird und in Abhängigkeit von der aktuellen Geschwindigkeit in der exakten Entfernung des berechneten Anhalteweges wahrzunehmen ist. Assmann (1985) konnte in einem Feldversuch bestätigen, dass mit dieser Anzeige der geforderte Sicherheitsabstand weitaus besser eingehalten wird als ohne Assistenz. Lange (2008) übertrug dieses Konzept auf aktuelle Adaptive-Cruise-Control-Systeme (ACC) und erweiterte diese mit einem aktiven Gaspedal und einer automatisierten Verkehrszeichenerkennung. In einer Fahrsimulatoruntersuchung konnte er einen signifikanten Sicherheitsgewinn nachweisen. Mit einem solchen System werden sowohl Geschwindigkeitsbegrenzungen exakter eingehalten als auch Betriebszustände intuitiver und somit ablenkungsminimierter zurückgemeldet.

Im Gegensatz zur eben beschriebenen Längsdynamikregelung stellt sich nach Bubb (1975) die Problematik der Führungsgrößenschätzung bei der Regelung der Querdynamik nicht, da die über den visuellen Sinneskanal wahrgenommenen Grenzen für den Soll-Kurs relativ eindeutig durch den Straßenverlauf und die sicherheitskritischen Objekte definiert sind. Somit kann die Führungsgröße eindeutig bestimmt werden. Nach Schlesinger et al. (1963) werden diese visuell gut wahrnehmbaren objektiven Grenzen, in denen der Soll-Kurs verlaufen muss, als „sichere Fahrzone“ bezeichnet. Ebenso ist die über die Richtungs- und Nebelorientierung feststellbare Nachführgröße der Ist-Lage des Fahrzeugs zuverlässig wahrnehmbar. Es liegt somit eine aus primär visuellen Informationen gebildete exakte Führungs- und Nachführgröße vor, die eine gute Qualität des Regelsystems begünstigt.

Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass dieser systemergonomischen Analyse idealisierte Umweltbedingungen zu Grunde liegen, die eine bestmögliche Arbeitsweise der menschlichen Sensorik gewährleisten. Wie bereits in Kapitel 3.1.1 beschrieben, stellen gerade Dunkelheit, aber auch schlechte Witterung, eine enorme Belastung für den visuellen Sinneskanal dar, die sich in einer stark reduzierten Wahrnehmungsqualität widerspiegeln. Welche konkreten Folgen diese beeinträchtigte visuelle Informationsaufnahme auf die

nachfolgende Informationsverarbeitung im Bereich der Fahrzeugführungsebene hat, wird bei einem erneuten Blick auf das in Abbildung 3–12 dargestellte Entscheidungsmodell deutlich.

Bei eingeschränkter Sichtweite besteht eine anspruchsvolle Schätzaufgabe des Fahrers darin, die Längsdynamik durch eine tendenzielle Reduktion der Sollgeschwindigkeit anzupassen. Zu Beginn muss der Fahrer die aktuelle Sichtweite x_S abschätzen. Wie bereits in Kapitel 3.1.1 erklärt, ist die Erkennbarkeitsentfernung sehr stark von den Objekteigenschaften abhängig, so dass ein kontrastschwaches Objekt erst in einer sehr viel geringeren Entfernung erkannt werden kann, als ein kontraststarker Gegenstand. Aufgrund dieser Tatsache erfolgt eine subjektive Täuschung, die darin besteht, dass ein Fahrer das entfernteste eben sichtbare Objekt mit seinem jeweiligen Sichtabstand gleichsetzt und somit von einer viel größeren Sichtweite ausgeht, als sie tatsächlich vorhanden ist (Cohen, 1993). Ein weiteres Problem besteht in der Abschätzung des Anhalteweges x_A , wozu der Fahrer, wie bereits erklärt, nicht in der Lage ist. Durch einen Abgleich der überschätzten Sichtweite x_S mit dem unterschätzten Anhalteweg x_A bestimmt der Fahrer seine Sollgeschwindigkeit und erhöht diese, wenn $x_S > x_A$ ist, verringert diese im Falle von $x_S < x_A$, oder behält für $x_S = x_A$ die aktuelle Geschwindigkeit bei.

Es ist somit der Schluss zu ziehen, dass ein Autofahrer aufgrund der Fehleinschätzung der Sichtweite und des Anhalteweges für gewöhnlich bei nacht- oder witterungsbedingter Sichtreduktion nicht in der Lage ist, ein Fahrzeug objektiv sicher zu führen. Er fährt in der Regel schneller als er hinsichtlich der objektiven Grenzen fahren dürfte. Diese theoretische Annahme wird von diversen Untersuchungen gestützt: die vom Fahrer geforderte Antizipations- bzw. Vorausschauzeit ist unabhängig von der Geschwindigkeit und liegt nach Yuhara et al. (1999), Guan et al. (2000) und Schweigert (2003) bei 1,5 s. Ältere Untersuchungen von Donges (1978) ergeben eine von den Probanden geforderte Vorausschauzeit von minimal 1 s, wohingegen Robinson (1972) und Poulton (1966) eine optimistische 2s-Grenze definieren.

Aus den erläuterten Tatsachen lassen sich bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion zwei Hauptunfallszenarien ableiten, die im Folgenden anhand eines Fallbeispiels verdeutlicht werden (siehe Abbildung 3–13). Diese sind „Kollision mit unbeleuchteten Objekten auf der Fahrbahn“ und „Abkommen von der Fahrbahn aufgrund nichtangepasster Geschwindigkeit“.

Szenario: Gerade Landstraße; $v = 100\text{km/h}$; Abblendlicht = 55m; trockene Straße $\mu = 0,8$
 \emptyset Bremsverzögerung = $6,5\text{m/s}^2$

Subjektives Risiko: Menschliche Voraussicht $\approx 2\text{s} \rightarrow 55,6\text{m}$ (Poulton, 1966 / Robinson, 1972)

Objektives Risiko: Anhalteweg = Reaktionsweg (1s bzw. 27,8m) + Bremsweg (59,4m) $\rightarrow 87,1\text{m}$

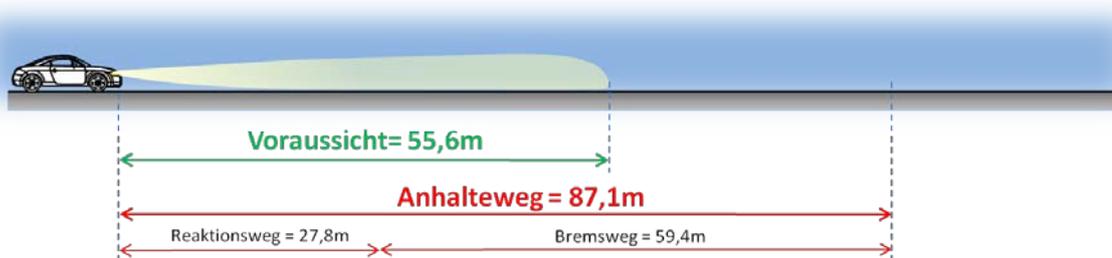


Abbildung 3–13: Fallbeispiel einer Landstraßenfahrt

Bei einer gewöhnlichen nächtlichen Fahrt mit 100 km/h auf einer geraden trockenen Landstraße hat ein Fahrer mit eingeschaltetem Abblendlicht bei modernen Xenonscheinwerfern im Mittel eine Sichtweite von ca. 55 m (Locher, et al., 2004). Diese Scheinwerfervoraussicht entspricht relativ exakt der von Poulton (1966) geforderten experimentell ermittelten Voraussichtzeit von 2 s, so dass ein Autofahrer unter Berücksichtigung seiner subjektiven Risikogrenze ohne weiteres mit gutem Gefühl mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h durch die Nacht fährt. Wird dieser Tatsache jedoch das objektive Risiko in Form des minimal benötigten Anhalteweges x_A gegenübergestellt, offenbart sich ein gravierendes Unfallpotenzial. Demnach würde ein durchschnittlicher Fahrer mit einer Reaktionszeit t_R von 1 s (Gramberg-Danielsen, 1967; Johannsen et al., 1971) unter Annahme einer für gewöhnlich stattfindenden Komfortbremsung² mit einer durchschnittlichen Bremsverzögerung von $6,5 \text{ m/s}^2$ (Nilgens, 2007) nach Formel 2 einen minimalen Anhalteweg x_A von 87,1 m benötigen. Im Falle eines auf der Fahrbahn stehenden unbeleuchteten Hindernisses hätte diese Fehleinschätzung des objektiven Risikos fatale Folgen. Ein auf der Straße stehender Fußgänger würde frühestens in ca. 55 m im Abblendlicht erkannt werden, so dass der Fahrer lediglich 2 s Zeit hätte, um eine Kollision zu vermeiden. Nach Fastenmeier et al. (2001) ist die Spurwechseldauer nahezu geschwindigkeitsunabhängig und beträgt im Mittelwert ca. 2,5 s. Aufgrund dieser Tatsache ist es beim plötzlichen, relativ späten Erkennen der Gefahr in Anbetracht der objektiv

² Die von Fahrzeugherstellern angegebenen Bremsverzögerungen moderner Fahrzeuge weisen in der Regel bessere Verzögerungswerte auf. Diese Daten werden jedoch mit geübten Testfahrern unter bekannten Rahmenbedingungen ermittelt. Ein gewöhnlicher Fahrer hingegen tendiert dazu, in einer für ihn unvorhersehbaren Situation, anfangs zaghaft und erst zeitversetzt stark zu bremsen. Diese Art der Bremsung wird als Komfortbremsung bezeichnet.

überhöhten Geschwindigkeit unmöglich auszuweichen, so dass aus dem Abgleich der abgeschätzten Objektentfernung x_0 mit dem abgeschätzten Bremsweg x_B eine Vollbremsung resultiert, die jedoch eine Kollision nicht mehr vermeiden kann. Das Fahrzeug wird mit einer Aufprallgeschwindigkeit von 73,6 km/h mit dem Fußgänger kollidieren und erst 31,5 m hinter der Unfallstelle zum Stehen kommen.

Untersuchungen von Johansson et al. (1968) beweisen die theoriegeleitete Annahme des Fallbeispiels. Sie weisen erhebliche Defizite des Menschen beim Abschätzen der Bremszone nach. Hierfür mussten Versuchspersonen bei Nacht mit abgeblendeten Scheinwerfern auf einen geparkten Wagen mit selbstgewählter Geschwindigkeit auffahren und das eigene Fahrzeug durch eine Vollbremsung zum Stillstand bringen, sobald sie neben dem geparkten Wagen eine dunkel gekleidete Puppe entdeckten. Über die Hälfte der 649 Versuchspersonen konnte ihr Fahrzeug nicht rechtzeitig zum Stehen bringen. Die Fahrzeuge hielten zum Teil erst bis zu 40 m dahinter an.

Neben einem plötzlich aus der Dunkelheit auftauchenden Objekt ist ein zweites theoretisches Hauptunfallszenario bei Nacht auf den nur begrenzt einsehbaren Straßenverlauf zurückzuführen: der Fahrer muss nach Abbildung 3–12 bei eingeschränkter Sicht eine enorme mentale Aufgabe bewältigen, die aus der Antizipation des sich noch im Dunklen befindenden vorausliegenden Straßenverlauf besteht. Hierzu muss der Mensch zunächst visuell über die Nebelorientierung die Krümmung des rechten und linken Spurrandes im Nahbereich wahrnehmen. Durch die mentale Verbindung dieser Krümmungslinien mit dem abgeschätzten perspektivischen Zentrum der Straße kann der vorausliegende Straßenverlauf abgeschätzt werden. Bei dieser stark erfahrungsbasierten mentalen Simulation werden im Gehirn gespeicherte innere Modelle herangezogen, die zu erwartende Straßenverläufe beinhalten. In den meisten Fällen treffen die Vermutungen zu, so dass der Sollkurs, wie am Tag, problemlos festgelegt werden kann. Dies erfolgt durch das Verbinden der zuvor über die Richtungsorientierung abgeschätzten Fahrtrichtung mit dem antizipierten Zentrum des vorausliegenden Straßenverlaufs durch eine gedachte Fahrtrajektorie. Die darauf basierende Abschätzung der zu erwartenden und maximal möglichen Querbewegung stellt für den Fahrer bekanntermaßen kein Problem dar. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass diese Schätzung bei Nacht eine zuverlässige Antizipation des Straßenverlaufs voraussetzt.

Dies ist allerdings nicht immer gewährleistet und identifiziert somit ein weiteres Unfallpotenzial bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion. Beim Durchfahren einer gewöhnlichen langgezogenen Linkskurve auf einer Landstraße mit beispielsweise 190 m Radius, die für gewöhnlich in Bezug auf die Querbewegung keine Geschwindigkeitsreduktion verlangt, verringert sich die Reichweite des Abblendlichts

aufgrund der asymmetrischen Lichtkegelgeometrie um weitere 25 m, so dass eine direkte Sichtweite von lediglich 30 m verbleibt (Abbildung 3–14).

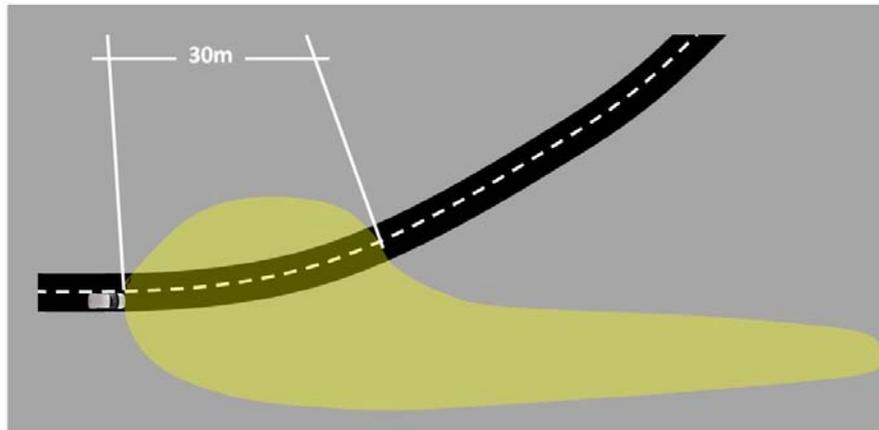


Abbildung 3–14: Reduktion der Abblendlichtreichweite bei einer Linkskurve

Jedoch reduziert für gewöhnlich ein Fahrer in einer solchen Situation seine Geschwindigkeit nur ungenügend oder gar nicht, da er sich auf seine zumeist richtige Antizipation des vorausliegenden Straßenverlaufs verlässt und somit die zur Verfügung stehende Voraussicht in Bezug auf seine subjektive Risikobereitschaft ausreicht. Auf einer unbekanntem Strecke kann dieses blinde Vertrauen im Falle einer von den inneren Modellen abweichenden engeren Kurvencharakteristik schwerwiegende Folgen haben, da der Fahrer basierend auf der falschen Straßenverlaufsantizipation, eine falsche zu erwartende und maximal mögliche Querbeschleunigung abschätzt und folglich objektiv mit zu hoher Geschwindigkeit in die unerwartet enge Kurve einfährt. Aufgrund der geringen Voraussicht von 30 m erkennt er den Fahrfehler erst zu spät, so dass ein Abkommen von der Fahrbahn durch eine Korrektur der Längs- und Querdynamik nicht mehr vermieden werden kann.

Basierend auf dieser theoretischen Analyse ist sowohl nachts, als auch bei witterungsbedingter Sichtreduktion, vermehrt mit Unfällen zu rechnen, bei denen unbeleuchtete Verkehrsteilnehmer, insbesondere Fußgänger, involviert sind, sowie Fahrzeuge aufgrund von nicht angepasster Geschwindigkeit insbesondere auf kurvigen Landstraßen von der Straße abkommen.

3.2 Unfalldatenanalyse

2004 kamen allein in Deutschland 2431 Menschen bei nächtlichen Verkehrsunfällen ums Leben, was in Bezug auf die Gesamtmenge der jährlich Verunglückten einem Anteil von 42 % entspricht. Somit kommen bei Tag, absolut gesehen, geringfügig mehr Menschen ums

Leben als nachts. Im Weiteren ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Verkehrsdichte während der Nachtstunden um ein Vielfaches reduziert ist. Mit ca. 303 Mio. km entspricht die durchschnittliche nächtliche Fahrleistung in Deutschland lediglich 35 % der durchschnittlichen Gesamtfahrleistung. Bei einer Normierung der Unfalltoten auf die Fahrleistung ergibt sich somit ein weitaus höheres Risiko bei Nacht tödlich zu verunglücken, als am Tage. Das Unfallrisiko bei Nacht ist für Pkws mit einer Unfallrate von 0,36 (Unfällen mit Personenschäden)/(10⁶ Fahrzeugkilometern) fast doppelt so hoch als am Tage mit einer Unfallrate von 0,2 (Unfällen mit Personenschäden)/(10⁶ Fahrzeugkilometern) (Rüth, 1988).

Es liegt die Vermutung nahe, dass in erster Linie die menschlichen Defizite der visuellen Informationsaufnahme die Hauptursache für das erhöhte Unfallrisiko bei Nacht darstellen. Lachenmayer et al. (1996) untersuchten diesbezüglich das Dämmerungssehvermögen, die Kontrastempfindlichkeit und die Blendempfindlichkeit bei verunfallten Fahrern in Referenz zu einem durchschnittlichen Kontrollkollektiv. Sie konnten nachweisen, dass bei Verunfallten signifikant häufiger pathologische Befunde, vor allem hinsichtlich der Blendempfindlichkeit und des Dämmerungssehvermögens, zu beobachten waren. Im Weiteren zeigte sich, dass die verunfallten Fahrer bei einer Selbsteinschätzung das eigene Sehvermögen erheblich überschätzten und somit das subjektive Unfallrisiko weitaus tiefer ansetzten. Eine weitere Untersuchung von Scott (1980) bestätigt einen eindeutigen Zusammenhang zwischen Fahrbahnleuchtdichte und Unfallgeschehen. Er fand heraus, dass die Erhöhung der mittleren Fahrbahnleuchtdichte von 1 cd/m² auf 2 cd/m² die Unfallzahlen um ca. 30 % reduzierte.

Identische Ergebnisse werden von zahlreichen weiteren Untersuchungen nachgewiesen (Cohen, 1994; Shinar, et al., 1991), so dass die Commission Internationale des Examens de Conduite Automobile (CIECA) den Zusammenhang zwischen nächtlichen Unfällen und den reduzierten visuellen Fähigkeiten des Menschen als bewiesen ansieht (CIECA, 1999). Dennoch ist bislang noch nicht geklärt, wie stark dieser negative Einfluss auf das nächtliche Unfallgeschehen ist, da Dunkelheit nicht nur gleichbedeutend für ein visuelles Informationsdefizit steht, sondern oftmals auch mit gesteigertem Alkoholkonsum, erhöhter Müdigkeit, Monotonie und daraus resultierendem herabgesetztem Reaktionsvermögen einhergeht (Bartmann, et al., 1993; Sprenger, 2001 ; Krüger, et al., 1996).

Zur Klärung dieser Frage und zur Identifikation der Hauptunfallursache bei Nacht hat die Bundesanstalt für Straßenwesen eine umfangreiche Unfalldatenanalyse durchgeführt (Lerner, et al., 2005). Im Rahmen dieses Berichtes zur Analyse des Unfallgeschehens bei Nacht wird als Kennzahl die sogenannte „mittlere Unfallschwere“ herangezogen, die ausschließlich zur Vergleichbarkeit von Unfällen unterschiedlicher Kategorien dient. Sie ist definiert als die durchschnittliche Höhe der volkswirtschaftlichen Kosten für Personen-

schäden, geteilt durch die Anzahl der Straßenverkehrsunfälle mit Personenschäden [KPS/U(P)], wobei die Art der Personenschäden hinsichtlich der volkswirtschaftlichen Kosten wie folgt eingeteilt (Höhnscheid, et al., 2003):

- Getötete: 1.174.064 €
- Schwerverletzte: 83.412 €
- Leichtverletzte: 3.737 €

Der wesentliche Vorteil dieser Datenaufbereitung besteht in der Differenzierung zwischen Schwer- und Leichtverletzten, die bei der häufig verwendeten einfachen Referenzierung der Getöteten oder der Verunglückten auf die Zahl der Unfälle nicht gewährleistet ist (Kühnen, et al., 1995). Im Weiteren wird für eine näherungsweise Ableitung des Unfallhergangs eine Einteilung des Unfalls hinsichtlich der beiden Merkmale „Unfalltyp“ und „Unfallart“ vorgenommen. Der Unfalltyp mit den Kategorien „Fahrunfall“, „Abbiegen“, „Einbiegen-Kreuzen“, „Überschreiten der Straße“, „ruhender Verkehr“, „Längsverkehr“ und „sonstiger Unfall“ beschreibt die eigentliche Ursache, die den weiteren Ablauf nicht mehr kontrollierbar macht und dem tatsächlichen Unfall vorausgeht. Die Unfallart hingegen definiert mit den Hauptkategorien „Zusammenstoß mit einem Fahrzeug“, „Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger“, „Auffahren auf ein Hindernis“, „Abkommen von der Fahrbahn“ und „Unfall anderer Art“ die eigentliche Kollision, die zum Sachschaden, zur Verletzung oder zum Tode geführt hat.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass zwischen 1991 bis 2002 sowohl die Anzahl der Getöteten, als auch die der Schwerverletzten, kontinuierlich gesunken ist. Grund hierfür ist in erster Linie die immer besser werdende aktive und passive Sicherheit moderner Fahrzeuge, die Unfälle vermeidet oder Unfallfolgen mindert. Demzufolge ist auch der Anstieg der Leichtverletzten innerhalb des betrachteten Zeitraums durch die Milderung der Unfallfolgen zu erklären. Dennoch sind besonders Nachtunfälle aufgrund ihrer enormen mittleren Unfallschwere, die um über 50 % höher ist als bei Tag, sehr negativ auffällig. Noch detaillierter betrachtet stellen sich vor allem Nachtunfälle auf Landstraßen als außerordentlich schwerwiegend dar. 2002 verunglückten 60 % aller bei Nachtunfällen Getöteten auf Landstraßen, was einer Anzahl von 1711 Menschen entspricht. Im Vergleich dazu waren es innerorts mit 746 Opfern lediglich 26 % und auf Bundesautobahnen mit 427 Opfern nur 14 %. Aufgrund dieser offensichtlichen Gefährlichkeit und Folgeschwere nächtlicher Landstraßenfahrten wird bei der folgenden Unfalldatenanalyse der Focus auf dieses Unfallszenario gelegt.

Ein charakteristisches Merkmal zur Beschreibung der Unfallumstände in Form der eigentlichen Kollision ist, wie eingangs erklärt, die „Unfallart“. In der Tabelle 3-2 ist sie für

Nachtunfälle auf Landstraßen, kumuliert für den Zeitraum von 2000 bis 2002, aufgeführt. Hierbei wird zwischen Alleinunfällen und Unfällen mit zwei oder mehr Beteiligten differenziert.

Tabelle 3-2: Anzahl der Nachtunfälle auf Landstraßen nach Unfallart (2000-2002) (Lerner, et al., 2005)

	Alleinunfälle			2 u.m. Beteiligte			Gesamt		
	Anzahl	Anteil	Nachtanteil	Anzahl	Anteil	Nachtanteil	Anzahl	Anteil	Nachtanteil
Zus.stoß mit einem Fahrzeug, das									
anfährt, anhält o.i. ruh. Verk. steht (1)				2.356	4,4	21,8	2.356	2,2	21,8
vorausfährt oder wartet (2)				9.110	16,9	20,5	9.110	8,7	20,5
seitlich in gleicher Richtung fährt (3)				1.881	3,5	21,1	1.881	1,8	21,1
entgegenkommt (4)				14.129	26,2	29,0	14.129	13,5	29,0
einbiegt oder kreuzt (5)				15.856	29,4	24,0	15.856	15,1	24,0
Zus.stoß zw. Fahrz. u. Fußgänger (6)				3.594	6,7	56,1	3.594	3,4	56,1
Auffahren auf ein Hindernis (7)	1.472	2,9	64,4	441	0,8	58,3	1.913	1,8	62,9
Abkommen von der Fahrbahn									
nach rechts (8)	25.451	49,8	42,4	1.799	3,3	33,7	27.250	26,0	41,7
nach links (9)	20.031	39,2	48,4	1.499	2,8	33,2	21.530	20,5	46,9
Unfall anderer Art (10)	4.105	8,0	32,1	3.275	6,1	26,6	7.380	7,0	29,4
Gesamt	51.059	100,0	43,8	53.940	100,0	25,9	104.999	100,0	32,3

Bei näherer Betrachtung des relativen Nachtanteils der einzelnen Kategorien fällt auf, dass die zwei in Kapitel 3.1.2 theoretisch ermittelten nächtlichen Hauptunfallszenarien „Kollision mit unbeleuchteten Objekten auf der Fahrbahn“ und „Abkommen von der Fahrbahn aufgrund von nichtangepasster Geschwindigkeit“ auch objektiv typische Nachtunfälle darstellen. So ereigneten sich von 2000 bis 2002 die Unfallarten „Zusammenstoß zwischen Fahrzeugen und Fußgängern“ zu 56,1 %, „Auffahren auf ein Hindernis“ zu 62,9 %, „Abkommen von der Fahrbahn nach rechts“ zu 41,7 % und „Abkommen von der Fahrbahn nach links“ zu 46,9 % nachts (siehe Tabelle 3-2). In Relation zum reduzierten Verkehrsaufkommen bei Nacht gewinnen diese Werte im Hinblick auf die Objektivierung des Assistenzbedarfs bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion massiv an Bedeutung.

Bezogen auf die absoluten Zahlen sind Nachtunfälle mit der Unfallart „Abkommen von der Fahrbahn nach rechts oder links“ nicht nur nachtypisch, sondern mit 46,5 % von allen nächtlichen Landstraßenunfällen auch am häufigsten. Im Weiteren ist auffällig, dass insbesondere bei Alleinunfällen mit einem absoluten Anteil von 49,8 % die Unfallart „Abkommen von der Fahrbahn nach rechts“ um 10,6 % häufiger eintritt, als das mit 39,2 % auftretende Ereignis „Abkommen von der Fahrbahn nach links“. Eine Erklärung für diese erhöhte Gefährlichkeit von Linkskurven ist in erster Linie die bei Rechtskurven zusätzlich zur Verfügung stehende Spur des Gegenverkehrs, die im Falle eines Fahrfehlers, sofern kein Gegenverkehr vorhanden ist, quasi als Puffer zur Fehlerkorrektur verwendet werden kann. Das in Kapitel 3.1.2 theoretisch ermittelte Defizit der asymmetrischen linksseitig reduzierten Reichweite des Abblendlichts, das insbesondere bei Linkskurven eine erhebliche

Einschränkung der zur Verfügung stehenden Voraussicht bewirkt, kann hingegen nicht bestätigt werden. Der relative Nachtanteil bei Linkskurven ist gegen die Erwartungen mit 42,4 % sogar um 6 % niedriger als bei Rechtskurven. Grund hierfür sind die schon bei geringer Lichteinstrahlung sehr gut reflektierenden Straßenpfosten, die sowohl bei Linkskurven, als auch bei Rechtskurven indirekt die Sicht auf den Straßenverlauf erweitern und folglich die Antizipation des vorausliegenden Streckenverlaufs unterstützen. Deshalb ist bezüglich der Unfallträchtigkeit von Linkskurven oder Rechtskurven bei reduzierter Sicht kein merklicher Unterschied feststellbar. Dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass Linkskurven auf Straßen ohne reflektierende Straßenpfosten unfallträchtiger sind.

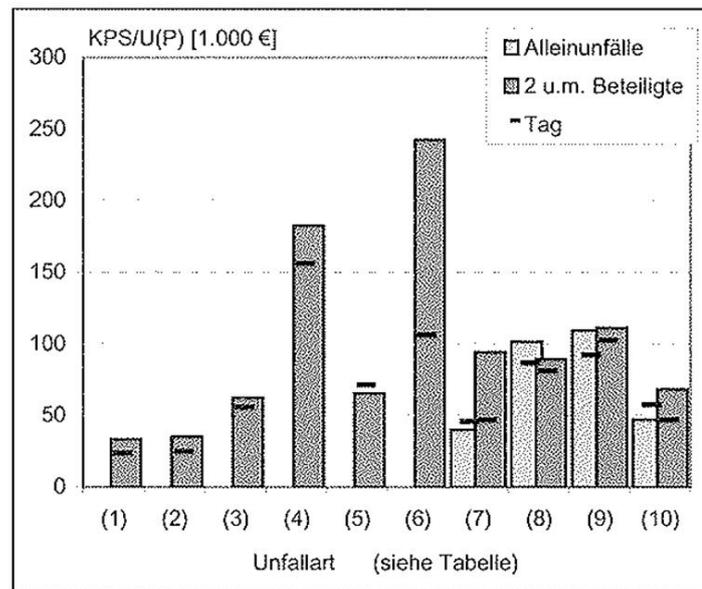


Abbildung 3–15: Mittlere Unfallschwere bei Nachtunfällen auf Landstraßen nach Unfallart (2000-2002) (Lerner, et al., 2005)

Zusätzlich zu der Bestätigung, dass die Unfallart „Abkommen von der Fahrbahn“ charakteristisch für Nachtunfälle auf Landstraßen ist, weist sie in Abbildung 3–15 mit Werten von ca. 100 KPS/U(P) (volkswirtschaftliche Kosten für Personenschäden pro Anzahl der Straßenverkehrsunfälle mit Personenschäden) die im Mittel drittschwersten Unfallfolgen auf. Die Ursache für diese hohe Unfallschwere beim Abkommen von der Fahrbahn ist auf den mit 40 % hohen Anteil von Kollisionen mit einem Hindernis neben der Fahrbahn zurückzuführen. Bei der Hälfte dieser Kollisionen handelt es sich um Baumunfälle, die im Mittel eine besonders hohe Unfallschwere aufweisen. Im Vergleich zum Unfallgeschehen bei Tag sind in Bezug auf die Unfallschwere in Abbildung 3–15 nur geringfügige Unterschiede feststellbar. Der Grund hierfür ist die nahezu identische Geschwindigkeit mit der die Fahrzeuge bei Nacht, bzw. bei Tag von der Fahrbahn abkommen. Wie in Kapitel 3.1.2 erläutert, bleibt eine Geschwindigkeitsreduktion bei Nacht aus, da dem Fahrer die zur Verfügung stehende Voraussicht des Abblendlichtes subjektiv ausreicht, um rechtzeitig auf gefährliche

Situationen reagieren zu können. Dies ist jedoch objektiv gesehen ein Trugschluss, wie mit Hilfe der Unfalldaten bestätigt werden konnte.

Wie eingangs erwähnt, stellen neben dem Abkommen von der Straße auch die beiden Unfallarten „Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger“ und „Auffahren auf ein Hindernis“ aufgrund ihres hohen Nachtanteils typische Nachtunfälle dar, wenngleich der Absolutanteil in Bezug auf die Gesamtzahl der nächtlichen Unfälle mit 3,4 % und 1,8 % verhältnismäßig gering ist (Tabelle 3-2). Trotz dieser geringen Ereignishäufigkeit ist jedoch zu beachten, dass insbesondere Fahrzeug-Fußgängerkollisionen mit 240 KPS/U(P) (volkswirtschaftliche Kosten für Personenschäden pro Anzahl der Straßenverkehrsunfälle mit Personenschäden) den höchsten Wert für die mittlere Unfallschwere aufweisen (Abbildung 3–15). Der Grund hierfür ist die sehr große Aufprallgeschwindigkeit, die zugleich den Beweis für die im Fallbeispiel theoretisch ermittelte hohe Risikobereitschaft des Fahrers und das zu späte Erkennen von sicherheitskritischen Objekten aufgrund „reduzierter Sichtweite“ liefert. Im Falle eines plötzlich im Abblendlicht auftauchenden Hindernisses hat ein Fahrzeuglenker aufgrund der geringen Sichtweite und des daraus resultierenden minimalen Zeitfensters kaum eine Chance seine Geschwindigkeit vor dem Aufprall zu reduzieren. Bei Tag ist folglich die Unfallschwere mit einem Wert von 110 KPS/U(P) um über 50 % geringer, da Objekte in den meisten Fällen früher erkannt werden, so dass die Geschwindigkeit und damit die Unfallfolge merklich reduziert werden kann, auch wenn das Zeitfenster zur Kollisionsvermeidung nicht ausreicht. Der hohe Nachtanteil dieser Unfälle, als auch die hohe mittlere Unfallschwere, zeigen für Fußgänger ein deutlich erhöhtes Unfall- und Todesrisiko bei Dunkelheit, wenngleich die absolute Häufigkeit dieser Unfälle vergleichsweise gering ist. Gleiches ist bei Kollisionen mit Hindernissen feststellbar, wenn auch die Unfallschwere aufgrund der geringeren Beteiligung von ungeschützten Verkehrsteilnehmern einen kleineren Wert annimmt.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle die Unfallart „Zusammenstöße mit entgegenkommenden Fahrzeugen“ erwähnt, die in Abbildung 3–15 die zweithöchste mittlere Unfallschwere aufweist und in Tabelle 3-2 immerhin 14 % aller nächtlichen Landstraßenunfälle ausmacht. Somit können auch diesbezüglich die in Kapitel 3.1.2 theoretisch ermittelten Defizite der Informationsaufnahme und -verarbeitung bestätigt werden. Allerdings ist diese Unfallart mit einem Nachtanteil von lediglich 29 % nicht nachttypisch, so dass ihr im Rahmen dieser Arbeit keine weitere Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Im Folgenden wird den identifizierten nachttypischen Unfallarten „Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Fußgänger“ und „Abkommen von der Straße“ die zweite Kategorie „Unfalltyp“ gegenübergestellt, so dass der Unfallhergang rekonstruiert werden kann.

Tabelle 3-3: Nachtunfälle nach Unfallart, Unfalltyp und Ortslage in 2002 (Lerner, et al., 2005)

	Unfalltyp								
	Fahrerfall	Abbiegen	Einbiegen-Kreuzen	Überschreiten	Ruhender Verkehr	Längsverkehr	sonstiger Unfall	Gesamt	
				innerorts					
Auffahren auf haltendes Fahrzeug	812 2,8%	176 1,5%	161 0,9%	12 0,2%	1.902 70,9%	1.263 6,2%	620 5,4%	4.946 4,9%	
Auffahren auf fahrendes Fahrzeug	251 0,9%	936 7,9%	59 0,3%	13 0,2%	95 3,5%	5.188 25,6%	227 2,0%	6.769 6,8%	
seitlich in gleicher Richtung	49 0,2%	305 2,6%	45 0,3%	0 0,0%	54 2,0%	1.063 5,2%	116 1,0%	1.632 1,6%	
Entgegenkommend	704 2,4%	1.392 11,7%	112 0,6%	3 0,0%	54 2,0%	1.369 6,7%	177 1,5%	3.811 3,8%	
Einbiegen-Kreuzen	124 0,4%	5.035 42,4%	13.035 72,8%	35 0,5%	69 2,6%	108 0,5%	484 4,2%	18.890 18,9%	
Fahrzeug-Fussgänger	217 0,8%	1.156 9,7%	94 0,5%	6.220 89,7%	29 1,1%	500 2,5%	1.242 10,7%	9.458 9,4%	
Auffahren auf Hindernis	177 0,6%	2 0,0%	0 0,0%	3 0,0%	28 1,0%	10 0,0%	218 1,9%	438 0,4%	
Abkommen von der Fahrbahn nach rechts	3.322 11,5%	28 0,2%	13 0,1%	4 0,1%	60 2,2%	85 0,4%	392 3,4%	3.904 3,9%	
Abkommen von der Fahrbahn nach links	2.508 8,7%	29 0,2%	12 0,1%	2 0,0%	18 0,7%	72 0,4%	279 2,4%	2.920 2,9%	
Unfall anderer Art	1.997 6,9%	308 2,6%	385 2,2%	213 3,0%	221 8,2%	411 2,0%	2.673 23,1%	6.208 6,2%	
Gesamt	10.161 35,3%	9.367 78,9%	13.916 77,8%	6.505 92,8%	2.530 94,4%	10.069 49,6%	6.428 55,5%	58.976 58,9%	
				außerorts ohne BAB					
Auffahren auf haltendes Fahrzeug	97 0,3%	74 0,6%	28 0,2%	0 0,0%	91 3,4%	381 1,9%	93 0,8%	764 0,8%	
Auffahren auf fahrendes Fahrzeug	193 0,7%	342 2,9%	26 0,1%	0 0,0%	18 0,7%	2.089 10,3%	120 1,0%	2.788 2,8%	
seitlich in gleicher Richtung	50 0,2%	74 0,6%	15 0,1%	0 0,0%	2 0,1%	425 2,1%	21 0,2%	587 0,6%	
Entgegenkommend	1.258 4,4%	566 4,8%	46 0,3%	0 0,0%	4 0,1%	2.116 10,4%	168 1,5%	4.158 4,2%	
Einbiegen-Kreuzen	33 0,1%	1.324 11,2%	3.624 20,3%	0 0,0%	3 0,1%	38 0,2%	86 0,7%	5.108 5,1%	
Fahrzeug-Fussgänger	80 0,3%	26 0,2%	2 0,0%	457 6,5%	2 0,1%	442 2,2%	165 1,4%	1.174 1,2%	
Auffahren auf Hindernis	94 0,3%	0 0,0%	1 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	9 0,0%	547 4,7%	651 0,7%	
Abkommen von der Fahrbahn nach rechts	7.186 25,0%	8 0,1%	13 0,1%	2 0,0%	4 0,1%	303 1,5%	976 8,4%	8.492 8,5%	
Abkommen von der Fahrbahn nach links	5.695 19,8%	7 0,1%	10 0,1%	1 0,0%	1 0,0%	247 1,2%	703 6,1%	6.664 6,7%	
Unfall anderer Art	737 2,6%	63 0,5%	95 0,5%	18 0,3%	10 0,4%	327 1,6%	999 8,6%	2.249 2,2%	
Gesamt	15.423 53,6%	2.484 20,9%	3.860 21,6%	478 6,8%	135 5,0%	6.377 31,4%	3.878 33,5%	32.635 32,6%	
				BAB					
Auffahren auf haltendes Fahrzeug	40 0,1%	0 0,0%	3 0,0%	0 0,0%	11 0,4%	115 0,6%	34 0,3%	203 0,2%	
Auffahren auf fahrendes Fahrzeug	226 0,8%	9 0,1%	23 0,1%	0 0,0%	4 0,1%	2.183 10,8%	170 1,5%	2.615 2,6%	
seitlich in gleicher Richtung	119 0,4%	4 0,0%	27 0,2%	0 0,0%	0 0,0%	762 3,8%	61 0,5%	973 1,0%	
Entgegenkommend	17 0,1%	1 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	19 0,1%	5 0,0%	42 0,0%	
Einbiegen-Kreuzen	5 0,0%	1 0,0%	43 0,2%	0 0,0%	0 0,0%	16 0,1%	2 0,0%	67 0,1%	
Fahrzeug-Fussgänger	4 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	25 0,4%	0 0,0%	4 0,0%	10 0,1%	43 0,0%	
Auffahren auf Hindernis	15 0,1%	0 0,0%	0 0,0%	1 0,0%	1 0,0%	17 0,1%	101 0,9%	135 0,1%	
Abkommen von der Fahrbahn nach rechts	1.549 5,4%	0 0,0%	3 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	214 1,1%	423 3,7%	2.189 2,2%	
Abkommen von der Fahrbahn nach links	1.041 3,6%	0 0,0%	5 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	220 1,1%	202 1,7%	1.468 1,5%	
Unfall anderer Art	198 0,7%	2 0,0%	16 0,1%	3 0,0%	0 0,0%	304 1,5%	258 2,2%	781 0,8%	
Gesamt	3.214 11,2%	17 0,1%	120 0,7%	29 0,4%	16 0,6%	3.854 19,0%	1.266 10,9%	8.516 8,5%	
Gesamt	28.798 100,0%	11.868 100,0%	17.896 100,0%	7.012 100,0%	2.681 100,0%	20.300 100,0%	11.572 100,0%	100.127 100,0%	

Es ist zu erkennen, dass außerorts die Mehrzahl aller Fahrzeug-Fußgänger-Kollisionen durch kontrastschwache dunkel gekleidete Fußgänger verursacht werden, die sich am Straßenrand in Längsrichtung zum Fahrzeug bewegen oder die Fahrbahn überqueren. Allein auf Landstraßen ereigneten sich im Jahre 2002 auf diese Art und Weise 899 folgenschwere Nachtunfälle, deren Reduktion primär im Fokus dieser Arbeit steht. Aber auch auf Autobahnen kam es im selben Jahr zu 25 Unfällen beim Überschreiten der Fahrbahn, die aufgrund der hohen Aufprallgeschwindigkeiten überwiegend tödliche Folgen hatten. Der Hauptgrund für diese Unfälle ist eindeutig auf die „reduzierte Sichtweite“ zurückzuführen. Viele dieser Unfälle hätten möglicherweise durch eine bessere Voraussicht des Fahrers verhindert werden können. Gleiches ist auch innerorts feststellbar, wenngleich das Optimierungspotenzial der Hauptunfallursache „reduzierte Sichtweite“ wegen einer viel besseren externen Beleuchtungssituation relativiert werden muss. Im Weiteren stehen diese Unfälle aufgrund der viel geringeren Unfallfolgen nicht im Focus dieser Arbeit. Dennoch veranschaulichen sowohl die 500 Unfälle, bei denen Fußgänger am Straßenrand erfasst wurden, als auch die 6220 Unfälle, bei denen Fußgänger während des Überquerens einer Straße mit einem Fahrzeug kollidierten, selbst innerorts das große Optimierungspotenzial.

Jedoch ist insbesondere bei diesen Überschreitungsunfällen innerorts zu berücksichtigen, dass neben visuellen Defiziten des Fahrers auch andere Ursachen eine große Rolle spielen. Beispiele hierfür sind das Übersehen von Ampelsignalen, Verkehrszeichen oder anderen Verkehrsteilnehmern aufgrund des erhöhten Workloads, reduzierte Aufmerksamkeit aufgrund von Ablenkung durch tertiäre Aufgaben, aber auch massives Fehlverhalten von Fußgängern, die in vielen Fällen ein Eingreifen des Fahrers wegen der zu kurzen Reaktionszeit unmöglich machen. Allein durch eine Unterstützung der visuellen Wahrnehmung des Fahrers kann das Unfallrisiko innerorts nur teilweise kompensiert werden. In solchen Fällen beginnt beispielsweise der Wirkungsbereich sogenannter Pre-Crash-Systeme, die unter anderem eine automatisierte Vollbremsung einleiten, wenn die Reaktionsfähigkeit des Fahrers nicht mehr ausreicht, um eine Kollision zu vermeiden.

Im Weiteren kann anhand von

Tabelle 3-3 für das Abkommen von der Fahrbahn, das die zweite nachtcharakteristische Unfallart auf Landstraßen darstellt, ein bestimmter Unfalltyp identifiziert werden, durch den der Unfallhergang eindeutig analysiert werden kann. Dieser ist der sogenannte „Fahrerunfall“, der die Ursache für den Kontrollverlust über das Fahrzeug definiert. Aufgrund dessen ereigneten sich im Jahre 2002 12881 Fahrerunfälle auf Landstraßen, die das Abkommen von der Fahrbahn nach links, bzw. rechts zur Folge hatten. Hierbei ist in sehr vielen Fällen der eigentliche Fahrfehler „überhöhte Geschwindigkeit“. Dies resultiert, wie in Kapitel 3.1.2 theoretisch ermittelt, zum einen aus der falschen Abschätzung der Querschleunigung, die wiederum ihrerseits aus einer bei Nacht durchzuführenden falschen Antizipation des vorausliegenden Straßenverlaufs hervorgeht, als auch aus der besonders nachts zu niedrig angesetzten subjektiven Risikogrenze.

Zusätzlich zu den bislang objektivierten Hauptunfallursachen „reduzierte Sichtweite“ und „überhöhte Geschwindigkeit“ verschärft sich die Unfallgefahr signifikant bei jüngeren Autofahrern zwischen 18 - 24 Jahren, die besonders bei Nacht auf Landstraßen eine erheblich stärkere Unfallbeteiligung aufweisen als die übrigen Altersgruppen. Eine Ursache hierfür sind in jedem Fall die aufgrund mangelnder Fahrerfahrungen noch ungenügend ausgeprägten inneren Modelle, die eine adäquate Situationseinschätzung nicht zulassen und somit ein hohes Fehlerpotenzial in sich bergen. Nach Bubb (2003) wird eine Fahrerfahrung von durchschnittlich 7 Jahren benötigt, um die meisten Situationen richtig einschätzen zu können. Einen zweiten Grund stellen die sogenannten Discounfälle dar, die sich im unfallkritischen Zeitbereich zwischen 21:00 und 04:00 Uhr in den Nächten von Freitag auf Samstag und von Samstag auf Sonntag ereignen. Diesbezüglich spielt neben den bereits bestätigten Unfallursachen „überhöhte Geschwindigkeit“ und „reduzierte Sichtweite“ auch der Einfluss von „Alkohol“ eine wesentliche Rolle, der beim Führen eines Fahrzeugs die

Handlungssteuerung, die Handlungskontrolle und das Reaktionsvermögen stark negativ beeinflusst (Krüger, et al., 1996). Nachtunfälle mit der Ursachennennung „Alkohol“ bzw. „nicht angepasste Geschwindigkeit“ wiesen bei den Unfallhauptverursachern im Jahre 2002 mit 16 %, bzw. 28 % die höchsten Anteile aller Nachtunfälle auf. Der Einfluss der „Übermüdung“, die auch oft als Hauptunfallursache bei Nachtunfällen diskutiert wird, spielt mit nur 1 % eine untergeordnete Rolle. Bezüglich dieser Statistik ist zu beachten, dass die bereits bestätigte Unfallursache „reduzierte Sichtweite“ in polizeilichen Unfallprotokollen keine Berücksichtigung findet. Aufgrund dessen kann keine Angabe über den exakten prozentualen Anteil der nächtlichen Unfallbeteiligung gegeben werden.

3.3 Assistenzbedarf

Anhand der im Rahmen von Kapitel 3.1 ermittelten menschlichen Defizite der visuellen Informationsaufnahme und multimodalen Informationsverarbeitung können bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion die beiden Hauptunfallszenarien „Kollision mit Objekten auf der Fahrbahn“ und „Abkommen von der Fahrbahn“ abgeleitet werden. Durch einen Abgleich der theoriegeleiteten systemergonomischen Analyseergebnisse mit den Ergebnissen der objektivierenden Unfalldatenanalyse aus Kapitel 3.2 können diese theoretischen Annahmen zweifelsohne als nachttypisch identifiziert werden und definieren somit den objektivierten Assistenzbedarf bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion. Des Weiteren resultiert aus dieser Gegenüberstellung das Optimierungspotenzial in Form der drei bestätigten Hauptunfallursachen „reduzierte Sichtweite“, „nicht angepasste Geschwindigkeit“ und „Alkohol“. Alle diese drei nächtlichen Hauptunfallursachen verbindet die Tatsache, dass sie den analytischen Zusammenhang zwischen Voraussicht und Anhalteweg negativ beeinflussen. Um eine Kollision mit einem Objekt vermeiden zu können, muss die minimale Voraussicht x_V größer sein, als der benötigte Anhalteweg x_A , der sich bekannter Weise nach Formel 2 aus dem Reaktionsweg x_R und dem Bremsweg x_B additiv zusammensetzt, so dass sich in Anlehnung an Formel 3 für eine sichere Fahrt folgender analytischer Zusammenhang ergibt:

$$x_V \geq v t_R + \frac{v^2}{2\mu g} \quad (\text{Formel 4})$$

Diesbezüglich ist eindeutig zu erkennen, dass sowohl eine Reduktion der Sichtweite x_V in Form des Ablendlichts, als auch eine Verlängerung des Anhalteweges x_A durch eine überhöhte Geschwindigkeit, oder eine durch Alkohol verlängerte Reaktionszeit t_R , die Unfallwahrscheinlichkeit stark erhöhen.

Eine mögliche Herangehensweise zur Verbesserung der Verkehrssicherheit bei Nacht besteht folglich darin, die Voraussicht x_V zu maximieren und den Anhalteweg x_A des

Fahrzeugs zu minimieren. Bezüglich letzterem ist eine bewährte Methode, den Fahrer durch den Erlass von Regeln und Vorschriften, unter Androhung von Bußgeldern und Strafen dazu zu veranlassen, seine Geschwindigkeit situativ anzupassen und nicht unter Alkoholeinfluss zu fahren. Diese Art der Erhöhung der Verkehrssicherheit ist unbedingt notwendig und verringert auch die Wahrscheinlichkeit einer unfallträchtigen Situation.

Auf der anderen Seite versuchen Automobilhersteller das Unfallrisiko bzw. die Unfallfolgen durch technische Maßnahmen im Bereich der passiven und aktiven Sicherheit zu reduzieren. Das Antiblockiersystem (ABS) stellt ein solches Sicherheitssystem dar, das sowohl den Anhalteweg verringert, als auch die Steuerbarkeit des Fahrzeugs bei einer Vollbremsung gewährleistet. Aber auch diesbezüglich ist der Sicherheitsgewinn nicht in dem Maße erkennbar, wie eigentlich erhofft. Nach einer Untersuchung von Aschenbrenner et al. (1992), bei der die Unfallrate von Taxis mit und ohne ABS über einen Zeitraum von vier Jahren analysiert wurde, ist mit ABS keine Unfallreduktion feststellbar, wenngleich die technischen Vorteile auf der Hand liegen.

Der Grund für diese nur bedingte Steigerung der Verkehrssicherheit durch Reglementierungen oder technische Verbesserungsmaßnahmen ist mit der sogenannten Risikohomöostasetheorie nach Wilde (1982) zu erklären (siehe auch O'Neil, 1977). All diese bisher aufgeführten sicherheitssteigernden Maßnahmen verfolgen nämlich einzig und allein das Ziel, das objektive Risiko eines möglichen Unfalls zu senken, und vernachlässigen bei dieser Betrachtung die Komponente Mensch völlig. Nach Wilde (1982) handelt jeder Mensch nach dem Prinzip der Homöostase. Dies bedeutet, dass Organismen trotz ständig wechselnder externer Lebensbedingungen stets das Bestreben haben, das interne Gleichgewicht beizubehalten. Im Falle der Risikohomöostase bedeutet dies, dass der Mensch sein subjektiv akzeptiertes Risiko mit dem von ihm wahrgenommenen objektiven Risiko durch eine Verhaltensadaption zu Null ausregelt. Ein durch technische Maßnahmen erzielter objektiver Sicherheitsgewinn wird folglich durch einen risikoreicheren Fahrstil kompensiert, da dem Fahrer das neu wahrgenommene, objektive Risiko zu niedrig erscheint.

Untersuchungen von Janssen (1994) bestätigen diese Theorie. Hierbei wurde das Verhalten von Autofahrern untersucht, die kategorisch keinen Sicherheitsgurt verwenden. Im Rahmen der Versuche wurden diese Nichtbenutzer gezwungen, den Sicherheitsgurt anzulegen, was einer Reduktion des vom Fahrer wahrgenommenen objektiven Risikos entspricht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Probanden daraufhin ihre Geschwindigkeit deutlich erhöhten und infolgedessen zumindest eine Teilkompensation des Sicherheitsgewinns durchführten. Aus der somit bestätigten Risikohomöostase darf jedoch nicht die falsche Schlussfolgerung gezogen werden, dass eine Steigerung der Verkehrssicherheit durch technische Maßnahmen kategorisch nicht möglich sei.

Im aufgeführten Beispiel ist nämlich objektiv gesehen das Risiko bei einem Unfall tödlich zu verunglücken durch den Sicherheitsgurt um ein Vielfaches mehr reduziert, als es durch die anschließende kompensatorische Geschwindigkeitserhöhung wieder angehoben wird. Folglich kennzeichnet das Delta zwischen dem geringeren, tatsächlich vorhandenen, objektiven Risiko und dem vom Menschen als höher wahrgenommenen objektiven Risiko den effektiven Sicherheitsgewinn.

Dennoch wird für künftige aktive Sicherheitssysteme die alleinige Verbesserung der Fahrzeugtechnik zur weiteren Unfallreduktion nicht ausreichen. Vielmehr wird es in Zukunft notwendig sein, das Subsystem Mensch bei der Optimierung der Verkehrssicherheit intensiver mit einzubeziehen. Nach Bubb (2003) besteht in Anbetracht dessen ein vielversprechender Optimierungsansatz zukünftiger Assistenzsysteme darin, dem Fahrer in kritischen Situationen das objektive Risiko transparent zu machen. Begründet wird dies mit der Unfähigkeit des Menschen das tatsächlich vorhandene, objektive Risiko situationsbezogen fehlerfrei abzuschätzen, was letztendlich eine darauf basierende falsche Handlung zur Folge hat, die wiederum vermehrt zu Unfällen führt. Die von Bubb (1975) entwickelte Bremsweganzeige setzt genau an diesem Punkt an, indem sie dem Fahrer das objektive Risiko des Bremsweges durch einen kontaktanalogen Bremsbalken veranschaulicht, und beweist weiter, dass auf diese Art und Weise ein enormer Sicherheitsgewinn erzielt werden kann.

In Anlehnung an diese Optimierungsstrategie wird im Folgenden für die beiden aus der primären Fahraufgabe abgeleiteten und anhand der Unfalldatenanalyse bestätigten nachtypischen Hauptunfallszenarien „Abkommen von der Fahrbahn“ und „Kollision mit Objekten“ ein abstraktes Lösungskonzept entwickelt, das zum einen das bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion entstehende Informationsdefizit bezüglich der Straße und sicherheitskritischer Objekte kompensiert und zum anderen das objektive Risiko situationsbezogen transparent macht. In Bezug auf Formel 4 entspricht dieser Optimierungsansatz folglich einer Erweiterung der Voraussicht x_V und zugleich einer Reduktion des Anhalteweges x_A durch eine vom Fahrer selbständig durchgeführte situationsadäquate Anpassung der Geschwindigkeit, da ihm die Gefährlichkeit der Situation bewusst wird. In Abbildung 3–16 sind diesbezüglich für die beiden Kategorien „Straße“ und „Objekte“ die notwendigen Informationen aufgeführt, die dem Fahrer durch ein bislang noch nicht definiertes Assistenzsystem möglichst intuitiv und ablenkungsminimiert, vermittelt werden müssen.

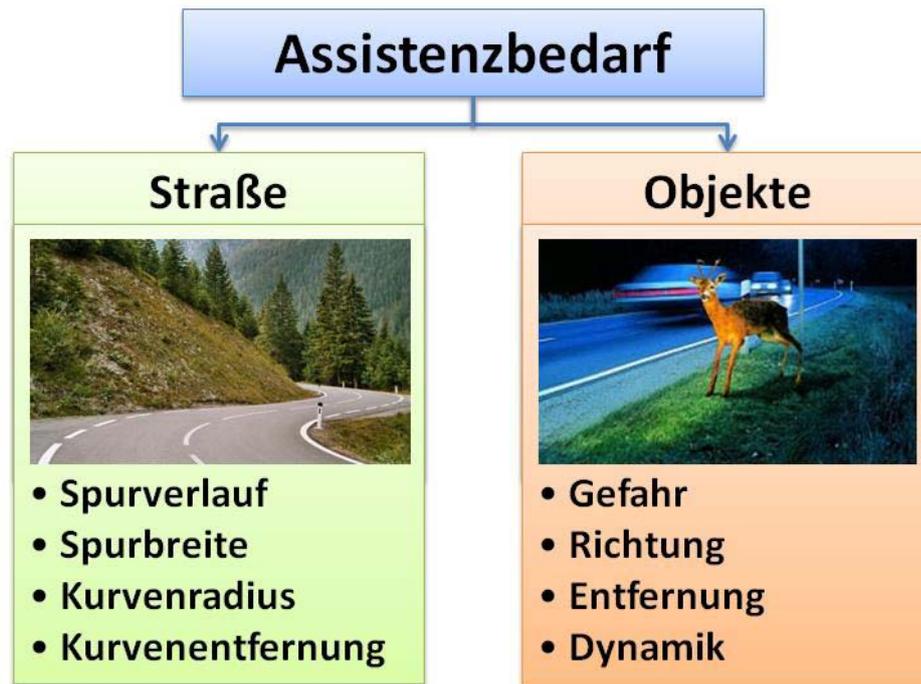


Abbildung 3–16: Assistenzbedarfskategorien

Hinsichtlich der Kategorie „Straße“ ist es primär wichtig, dem Fahrer die bei nacht- oder witterungsbedingter Sichtreduktion visuell nicht wahrnehmbaren Informationen des Straßenverlaufs jenseits der Reichweite des Abblendlichts zu vermitteln. In diesem Fall sind die notwendigen Informationen zur Kompensation des Informationsdefizits bei reduzierter Sicht in erster Linie der „Spurverlauf“ und die „Spurbreite“ der eigenen Fahrspur. Anhand dieser Informationen kann somit verhindert werden, dass die Abschätzung der Querbeschleunigung auf einer bei Nacht durchzuführenden falschen Abschätzung des Straßenverlaufs basiert. Auch die bei Tag hohen Unfallzahlen der Unfallart „Abkommen von der Straße“ aufgrund des Unfalltyps „Fahrfehler“ zeigen, dass der Mensch auch bei guter Sicht eine zusätzliche Unterstützung bei der Antizipation des Straßenverlaufs benötigt. Aufgrund dessen muss sowohl bei Tag, als auch bei Nacht, eine qualitative Information des Kurvenradius und der Kurvenentfernung vermittelt werden. Erst mit diesen prädiktiven Streckendaten ist für den Fahrer frühzeitig die aus dem Straßenverlauf resultierende objektive Gefahr transparent genug, um annähernd fehlerfrei die Querbeschleunigung abzuschätzen und, darauf basierend, die adäquate Kurvengeschwindigkeit abzuleiten. Eine Bestätigung hierfür zeigt ein Blick auf hochgeübte Rallye-Fahrer, die auf einer unbekanntem Strecke mit sehr hohen Geschwindigkeiten durch Kurven fahren und dabei relativ selten von der Straße abkommen. Charakteristisch für eine solche Rallye ist der Beifahrer, der dem Fahrer während der Fahrt mit einem zuvor bei Besichtigungsfahrten erstellten Aufschrieb Entfernungsangaben und Kurvenradien, sowie Sprungkuppen, Belagwechsel und sonstige Besonderheiten der Fahrbahn ansagt.

In Bezug auf die zweite Kategorie „Objekte“ ist es wichtig, das visuelle Defizit des Fahrers nicht zwangsläufig für jedes Objekt zu kompensieren, sondern in Abhängigkeit von der aktuellen Situation nur sicherheitskritische Objekte zurückzumelden, um die Ablenkung durch irrelevante Informationen zu reduzieren. Im Falle einer Gefahr muss der Fahrer somit so früh wie möglich aktiv gewarnt werden. Für eine adäquate Einschätzung der Situation, bzw. des objektiven Risikos, ist die Information der exakten Objektposition relativ zum eigenen Fahrzeug, die sich aus Objektrichtung und -entfernung zusammensetzt, und das dynamische Verhalten des Objektes berücksichtigt, essentiell. Bei einer schnellen frühzeitigen Übermittlung dieser Objektinformationen stellt es für den Fahrer in der Regel kein Problem dar, die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs so anzupassen, dass eine Kollision verhindert werden kann.

4 Stand der Technik

Im Folgenden wird geklärt, inwieweit aktuelle technische Systeme die Forderungen des abstrakten Lösungskonzeptes zur idealen Unterstützung des Fahrers bei nächtlichen Landstraßenfahrten hinsichtlich der beiden Kategorien „Straße“ und „Objekte“ erfüllen. Diesbezüglich werden insbesondere für die Entwicklungsbereiche „lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme“ und „Nachtsichtsysteme“ Potenziale und Grenzen aufgezeigt.

4.1 Lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme

Neue ECE-/EU-Regelungen erlauben die Lichtverteilung moderner Scheinwerfer so zu verändern, dass im Abblendlichtmodus der linke Fahrbahnrand heller und weiträumiger als bisher ausgeleuchtet wird. Hier vergrößert sich die Sichtweite des Autofahrers um rund 10 m. Darauf basierend markiert das Ende 2003 in den Markt eingeführte dynamische Kurvenlicht den Beginn lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme. In diesem Fall erweitern bei Kurvenfahrt insbesondere auf Landstraßen zwei mitlenkende Bi-Xenon-Projektionsscheinwerfer mit einem Schwenkbereich von $\pm 15^\circ$ die Sicht auf den vorausliegenden Straßenverlauf um bis zu 90 % (Kessler, et al., 2006). Die optimale Scheinwerferausrichtung erfolgt geschwindigkeitsabhängig durch eine kontinuierliche Erfassung des Lenkwinkels, der Gierrate und der Querbeschleunigung. In Bezug auf das unter Kapitel 3.1.2 aufgeführte kritische Beispiel einer gewöhnlichen langgezogenen Linkskurve mit einem Radius von 190 m bewirkt das Kurvenlicht eine theoretische Sichterweiterung um ca. 25 m (Abbildung 4–1).

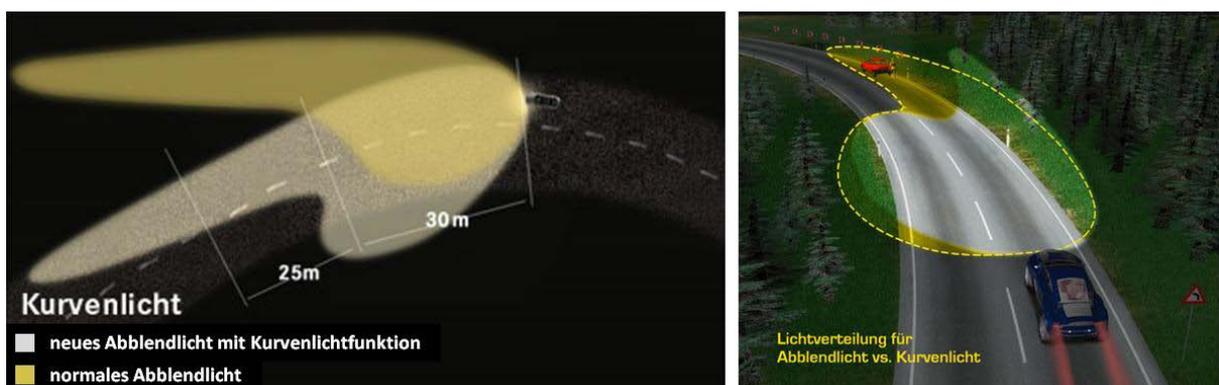


Abbildung 4–1: Kurvenlicht (Mercedes-Benz, 2008; Automotive Lighting, 2008)

Diese somit auf ca. 55 m gesteigerte Kurvenvoraussicht entspricht bei 100 km/h zwar nicht dem theoretisch benötigten Anhalteweg von 87 m, jedoch ist durch diese Innovation eine signifikante Reduktion der Unfallfolgen im Falle einer Fußgängerollision zu erwarten, da sicherheitskritische Objekte zuverlässiger und in größeren Entfernungen erkannt werden. Im Weiteren ist zu vermuten, dass sich durch diese optimierte Straßenvoraussicht eine merkliche

Verbesserung in Bezug auf die nachttypische Hauptunfallursache „Abkommen von der Straße“ erzielen lässt. Diese theoretischen Annahmen werden durch eine Untersuchung des TÜV Rheinland-Berlin-Brandenburg bestätigt, bei dem Probanden auf einem sehr kurvigen Rundkurs Objekte am Straßenrand erkennen mussten (Cieler, 2003). Demnach führt das Kurvenlicht im Vergleich zum konventionellen Abblendlicht, insbesondere in engen und unübersichtlichen Kurven, zu einer um 50 % verbesserten Detektionsleistung und einen um 14 % verkürzten Reaktionsweg. Im Weiteren belegen die Untersuchungsergebnisse, dass der Fahrer durch das Kurvenlicht bei der Antizipation des Straßenverlaufs merklich unterstützt wird, was sich gemäß der Risikohomöostasetheorie in einer moderaten Erhöhung der Geschwindigkeit bemerkbar macht. Es kann folglich als bewiesen angesehen werden, dass bei guten Witterungsverhältnissen im Hinblick auf das abstrakte Lösungskonzept aus Kapitel 3.3 mit Hilfe des Kurvenlichts, bezüglich der Kategorie „Straße“, eine enorme Verbesserung der visuellen Wahrnehmung des „Spurverlaufs“, der „Spurbreite“ und des „Kurvenradius“ erzielt wird. Im Weiteren wird bei sehr engen Kurven, bezüglich der Kategorie „Objekt“, die visuelle Wahrnehmung der „Richtung“, „Entfernung“ und „Dynamik“ unterstützt, wenngleich dieser Effekt bei größeren Kurven verloren geht. Außerdem reicht die Kurvenvoraussicht bei hohen Geschwindigkeiten dennoch nicht aus, um zuverlässig eine Kollision zu vermeiden.

Zukünftig werden Entwickler zusätzlich zur kontinuierlichen Erfassung des Lenkwinkels, der Gierrate und der Querschleunigung auch prädiktive Streckendaten des Navigationssystems in den Steueralgorithmus integrieren, um dem technischen System in gewisser Art und Weise antizipatorische Fähigkeiten zu implizieren und somit eine noch bessere Adaption an den vorausliegenden Straßenverlauf erzielen zu können. Laut Klein (2006) könnten diese Sensorinformationen auch für ein Kurvenwarnsystem genutzt werden, das den Fahrer automatisch warnt, wenn er mit zu hoher Geschwindigkeit in eine Kurve hineinfährt. Bezüglich einer sinnvollen HMI-Lösung schweigt er sich jedoch aus.

Speziell innerorts gelangt das Kurvenlicht bei extrem engen Kurven und Kreuzungen an seine Grenzen. Ergänzt wurde es deshalb 2004 mit dem sogenannten Abbiegelicht, das unterhalb von 70 km/h abhängig von Blinkerbetätigung und Lenkradeinschlag automatisch eine im äußeren Scheinwerferbereich befindliche LED hinzuschaltet. Mit einem dadurch auf bis zu 65° und etwa 30 m weit ausgeleuchteten Bereich seitlich vom Fahrzeug wirkt dieses System beim Abbiegen besonders innerorts dem Übersehen unbeleuchteter Verkehrsteilnehmer entgegen (siehe Abbildung 4–2). Hierbei ist der Sicherheitsgewinn innerorts als sehr hoch einzustufen, da sich im Jahre 2002 mit dem Unfalltyp „Abbiegen“ und der Unfallart „Fußgänger-Fahrzeug“ alleine nachts 1156 Unfälle ereigneten (siehe

Tabelle 3-3). Außerorts spielt diese Art der Sichtverbesserung jedoch eine eher untergeordnete Rolle.

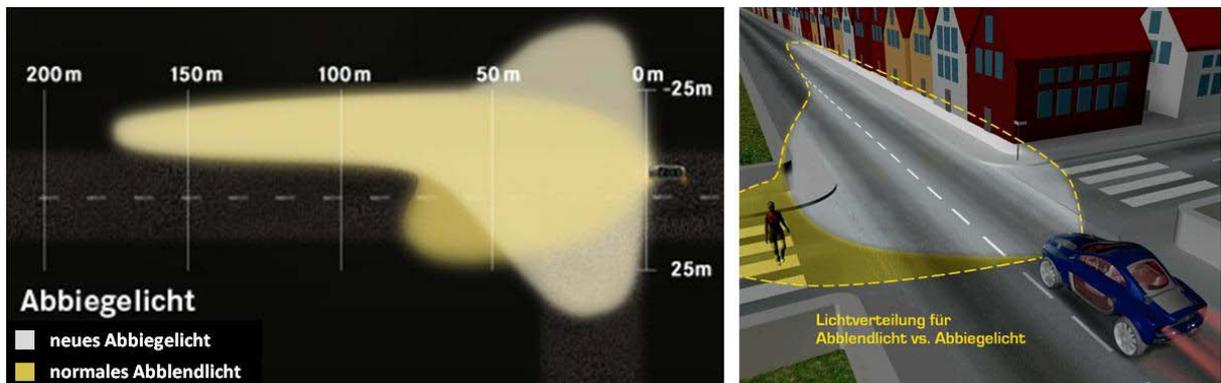


Abbildung 4-2: Abbiegelicht (Mercedes-Benz, 2008; Automotive Lighting, 2008)

Im Herbst 2005 wurde mit dem Fernlichtassistenten ein weiteres lichtbasiertes Fahrerassistenzsystem eingeführt. In diesem Fall detektiert ein bildverarbeitendes Steuergerät über eine Kamera auf der Rückseite des Innenspiegels Lichter entgegenkommender, bzw. vorausfahrender Verkehrsteilnehmer, und schaltet automatisiert das Fernlicht ab, um eine Blendung anderer Verkehrsteilnehmer zu vermeiden, bzw. auf, um die Voraussicht für den Fahrer auf das Maximum zu erhöhen. Das Ziel dieses Systems besteht in erster Linie darin, den mit nur 25 % geringen Anteil der Fernlichtnutzung auf Landstraßen zu erhöhen. Dies würde sowohl in Bezug auf die Kategorie „Straße“, als auch auf die Kategorie „Objekt“, eine enorme Verbesserung darstellen. Jedoch besteht ein wesentliches Problem des Fernlichtassistenten darin, dass entgegenkommende Fahrzeuge häufig geblendet werden, da die Sensorik bislang noch nicht in der Lage ist, andere Verkehrsteilnehmer frühzeitig genug zu erkennen. Das menschliche Verhalten hingegen, das von der Technik in diesem Fall imitiert werden soll, zeichnet sich durch ausgezeichnete antizipatorische Fähigkeiten aus. Beispielsweise erkennt ein Mensch im Falle einer Kuppe schon bei geringen Helligkeitsänderungen des Horizonts entgegenkommende Fahrzeuge und schaltet aufgrund dessen frühzeitig das Fernlicht ab, obwohl die eigentlichen Lichter des Gegenverkehrs noch nicht sichtbar sind. Bisherige Fernlichtassistenten verfügen über derartige antizipatorische Fähigkeiten nicht und reagieren deshalb erst zu spät, so dass der Fahrer des entgegenkommenden Fahrzeugs sicherheitskritisch geblendet wird. Aus diesem Grund muss der Nutzen des Fernlichtassistenten in seiner aktuellen Ausführung in Frage gestellt werden. Eine mögliche Lösung dieses Problems könnte in Zukunft eine zuverlässige Car-to-Car Communication darstellen. Auf diese Art und Weise kann die Reichweite der Sensorik über den Sichtbereich hinaus erweitert werden, so dass die Sensorik folglich „um die Ecke schauen kann“ (Lübke, 2004; Franz, 2004; Wewetzer, et al., 2007).

Das bis dato letzte lichtbasierte Fahrerassistenzsystem stellt das sogenannte Advanced Frontlighting System (AFS) dar, das zusätzlich zum Kurvenlicht, Abbiegelicht und Fernlichtassistenten, eine Adaption der Lichtkegelgeometrie an Stadtstraßen, Landstraßen, Autobahnen und Schlechtwettersituationen vornimmt (Kessler, et al., 2006). Dies erfolgt neben der Adaption der Scheinwerferausrichtung und -leistung primär durch eine, entsprechend diesen vier Lichtverteilungen konturierte Walze, die sich innerhalb der Brennweite des Xenon-Projektionsscheinwerfers befindet. In Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit wird auf die aktuelle Straßenart (innerorts, außerorts, Bundesautobahn) zurückgeschlossen und die Walze über einen Schrittmotor in die entsprechende Position gedreht, um dadurch die aktuell benötigte Lichtverteilung zu erzeugen. Auf diese Art und Weise wird in Städten bis zu einer Geschwindigkeit von 50 km/h eine, im Vergleich zum normalen Abblendlicht, respektive Landstraßenlicht, eher breitere als weitreichende Ausleuchtung der Fahrbahn erzeugt, um insbesondere innerorts bei Kreuzungssituationen den peripheren Sichtbereich zu erweitern (siehe Abbildung 4–3).

Das Landstraßenlicht wird in einem für Überlandfahrten charakteristischen Geschwindigkeitsspektrum von 50 bis 110 km/h verwendet und entspricht, ausgehend von der Lichtkegelgeometrie, dem konventionellen Abblendlicht. Ab Geschwindigkeiten von 110 km/h wechselt das System automatisch in den Autobahnmodus, der einen schmaleren aber dafür längeren Lichtkegel erzeugt und somit die Voraussicht bei sehr hohen Geschwindigkeiten verbessert und zugleich die Blendungsgefahr vorausfahrender Verkehrsteilnehmer reduziert. Die vierte Lichtverteilungsanpassung des AFS stellt der Schlechtwettermodus dar, der bis zu einer maximalen Geschwindigkeit von 110 km/h, bei manueller Betätigung der Nebelschlussleuchte, aktiviert wird. Hierbei wird zusätzlich zu den konventionellen Nebelscheinwerfern der linke Scheinwerfer um 8 Grad nach außen und gleichzeitig nach unten geschwenkt, um eine breitere Ausleuchtung der Straße zugunsten der Querführung zu erzeugen und zugleich die Eigenblendung durch das vom Nebel reflektierte Licht zu reduzieren.

Die unterschiedlichen Leuchtmodalitäten des AFS optimieren im Vergleich zum konventionellen Abblendlicht primär innerorts und auf Bundesautobahnen die visuelle Wahrnehmung des Fahrers. Der Schlechtwettermodus bewirkt auch in Bezug auf den Unfallschwerpunkt „Landstraße“ eine weitere, wenn auch geringe Verbesserung der visuellen Wahrnehmung der Kategorie „Spurbreite“. Nichtsdestotrotz ist mit diesem verbesserten Nebellicht die visuelle Wahrnehmung des Fahrers bei schlechten Witterungsverhältnissen immer noch erheblich beeinträchtigt und stellt folglich eine große Gefahr dar. Insbesondere bei Regen, Schnee oder Nebel gelangt die Lichttechnik an unüberwindbare Grenzen. Auch in Zukunft wird es nämlich selbst die beste automobilen Lichttechnik nicht ermöglichen, dass der Fahrer seine eigene Fahrspur bei einer

schneebedeckten oder aufgrund von Nässe sehr stark reflektierenden Fahrbahn zuverlässig wahrnehmen kann, noch dass er Objekte durch eine Wolkenmauer hindurch frühzeitig erkennt.

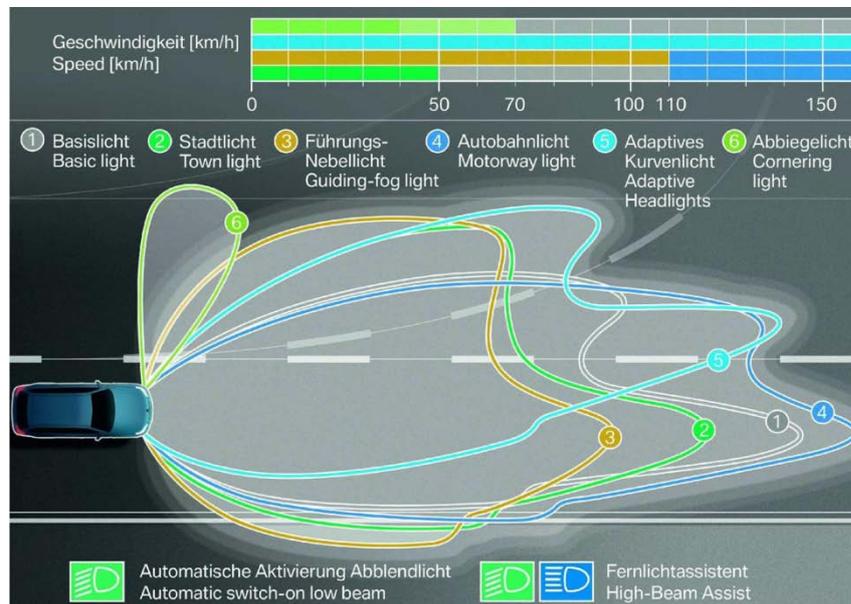


Abbildung 4–3: Advanced Frontlighting System (BMW AG, 2007)

Der Fokus zukünftiger lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme wird vermehrt auf dem Unfallschwerpunkt „Landstraße“ liegen. Diesbezüglich verfolgen Forscher und Entwickler die Vision der blendfreien kontinuierlichen Fernlichtfahrt (Enders, 2001 und 2003; Götz, et al., 2004; Kauschke, 2004; Kauschke, 2005; Wallaschek, et al., 2003).

Auf dem Weg dorthin wird die adaptive Hell-Dunkel-Grenze den nächsten Innovationsschritt markieren. Mit ihr wird vorerst die bestehende Lücke zwischen Fern- und Abblendlicht durch eine automatisierte Anpassung der Lichtverteilung an die Verkehrsraumsituation geschlossen (Böhm, et al., 2007). Hierbei wird über eine Nachtsichtkamera und einen Bildverarbeitungsrechner die exakte Position vorausfahrender und entgegenkommender Verkehrsteilnehmer ermittelt. Anhand dieser Sensorinformationen wird das auf der AFS-Technik basierende Lichtmodul die Reichweite des Abblendlichts über eine Anpassung der Walzenposition so adaptieren, dass die Hell-Dunkel-Grenze exakt an der Vorderkante des detektierten Fahrzeugs endet. Somit hat der Fahrer stets, situationsabhängig, die maximal mögliche Abblendlichtreichweite zur Verfügung. Eine Unterfunktion dieses Systems wird ein Fernlichtassistent darstellen, der das Fernlicht automatisch aufschaltet, sobald kein Verkehrsteilnehmer detektiert wird (Kessler, et al., 2006).

Das eigentliche Hauptziel der kontinuierlichen Fernlichtfahrt wird mit sogenannten adressierbaren Scheinwerfern realisiert, die auf einem Projektionsmodul basieren, bei dem an Stelle des Xenonbrenners ein LED-Array, DMD-Chip oder LCD-Display angebracht ist (Kessler, et al., 2006; Kauschke, et al., 2004). Auf diese Art und Weise können Teilsegmente des Lichtkegels selektiv ausgeblendet werden, um folglich bei einer kontinuierlichen Fernlichtfahrt eine Blendung anderen Verkehrsteilnehmer zu vermeiden (siehe Abbildung 4–4). Diese Art der Sichtverbesserung stellt insbesondere auf große Entfernungen enorme Ansprüche an die Detektionszuverlässigkeit und die Beleuchtungspräzision. Ein derartiges lichtbasiertes Fahrerassistenzsystem würde bei guten Witterungsverhältnissen hinsichtlich des Straßenverlaufs eine ideale Unterstützung bei Nacht darstellen. Im Weiteren würde auch die Sicht auf Objekte immens verbessert werden. Dennoch besteht bei fehlender aktiver Warnung stets die Gefahr, dass sehr dunkel gekleidete Fußgänger selbst im Fernlicht schlecht bzw. zu spät erkannt werden.

Diesbezüglich besteht eine weitere visionäre Innovation darin, den adressierbaren Scheinwerfer auch invers zu verwenden und sicherheitskritische Objekte gemäß Abbildung 4–4 durch ein Spotlight zu markieren (Florissen, et al., 2007). Im Falle eines Fußgängers oder Radfahrers würde jedoch dies zu einer inakzeptablen Blendung des Verkehrsteilnehmers führen. Ebenso würde auch Wild aufgrund der Blendung bewegungslos auf der Fahrbahn verharren. Diese Art der Markierung kann folglich für lebende Objekte als suboptimal bewertet werden.

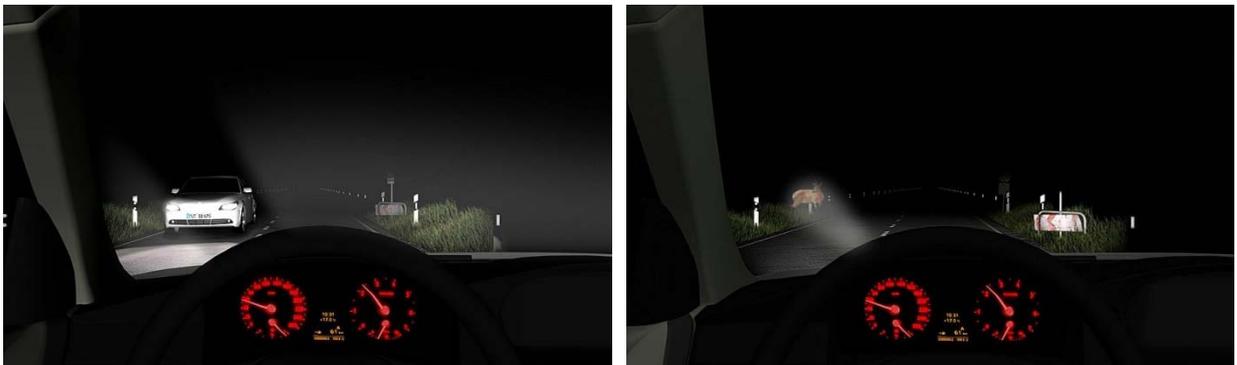


Abbildung 4–4: Kontinuierliche Fernlichtfahrt / markierendes Fernlicht (autolook, 2008)

4.2 Nachtsichtsysteme

Ein aus den drei Komponenten Sensorik, Bildverarbeitungsrechner und Human Machine Interface (HMI) bestehendes Nachtsichtsystemen kann dem Fahrer Informationen des frontalen Verkehrsraums zugänglich machen, die sich bei konventionellem Abblendlicht außerhalb seiner visuellen Reichweite befinden. Hierfür nutzt es die für das menschliche

Auge unsichtbare infrarote elektromagnetische Strahlung in einem Wellenlängenspektrum von 780 nm bis 20000 nm aus (Hamm, 2006). Mit Hilfe der Sensorik, die aus einer infrarot empfindlichen Kamera besteht, wird die frontale Fahrszenerie erfasst. Dieses Videobild wird anschließend über diverse Bildverarbeitungsalgorithmen qualitativ aufbereitet und optional interpretiert. Zuletzt werden dem Fahrer diese Informationen möglichst ablenkungsminimiert und intuitiv in einem entsprechend ausgelegten HMI präsentiert. Auch wenn diese Funktionsweise vom Prinzip her bei jedem Nachtsichtsystem immer gleich ist, existieren bezüglich der drei Systemkomponenten Sensorik, Bildverarbeitungsrechner und HMI gravierende Unterschiede.

4.2.1 Variationsspektrum

Im Bereich der Sensorik wird zwischen den beiden konkurrierenden Technologien Fern-Infrarot (FIR) und Nah-Infrarot (NIR) differenziert (Abbildung 4–5). Beide Systeme arbeiten mit infrarotem Licht, jedoch liegt der entscheidende Unterschied im genutzten Wellenlängenspektrum.



Abbildung 4–5: Videobild einer NIR-Sensorik (links) und einer FIR-Sensorik

Nachtsichtsysteme auf Nahinfrarotbasis sind sogenannte Restlichtverstärker. Diese optoelektronischen Geräte verwenden die in der Umgebung durch Mond, Sterne oder künstliche Lichtquellen vorhandene minimale infrarote Strahlung im Spektrum zwischen 780 nm und 2500 nm. Diese elektromagnetische Strahlung wird von der Kamera aufgefangen, elektronisch umgewandelt, respektive verstärkt, und auf einem Bildschirm wiedergegeben. Im Automotivebereich verwendete NIR-Kamerasensoren weisen eine Lichtempfindlichkeit von ca. 800 nm bis 1500 nm auf und benötigen aufgrund dessen eine zusätzliche Infrarotlichtquelle (Hamm, 2006). Diese ist in den Scheinwerfermodulen des Fahrzeugs integriert und leuchtet den Frontbereich, unsichtbar für Fahrer und Gegenverkehr, mit einer fernlichtähnlichen Lichtkegelgeometrie auf eine maximale Reichweite von ca. 150 m aus. Auf diese Art und Weise wird die Intensität der infraroten Strahlung in der Umgebung auf ein Optimum angehoben. Dieses ausgesendete IR-Licht wird von Objekten in der Umgebung reflektiert und kann von der NIR-Kamera sensorisch erfasst werden. In der Regel

sind NIR-Kameras im Bereich des Rückspiegels angebracht. Diese Kameraposition beinhaltet neben der fahrerähnlichen Perspektive die weiteren Vorteile geringer Verschmutzung und niedriger Steinschlaggefahr. Durch Pulsbetrieb der Infrarot-LEDs wird im Weiteren eine blendungsfreie Begegnung zweier Fahrzeuge mit einem NIR-Nachtsichtsystem ermöglicht. Das von der NIR-Kamera generierte monochromatische Videobild stellt die Umwelt in ähnlichen Kontrast- und Leuchtdichteverhältnissen dar, wie sie auch im sichtbaren Spektralbereich erscheint. NIR-Sensoren haben somit den Vorteil, dass Konturen von Menschen und Objekten, Straßenschilder und auch die Fahrbahnmarkierungen im Videobild einwandfrei identifizierbar sind. Außerdem sind die Kosten geringer als bei der konkurrierenden FIR-Technologie. Als nachteilig ist die im Vergleich zur FIR-Technologie geringere Reichweite von ca. 150 m zu erwähnen, die über dies hinaus, aufgrund der zusätzlich benötigten Beleuchtung auch durch witterungsbedingte Störeinflüsse wie Schnee, Regen oder Nebel, aber auch durch Blendlichter, stark beeinträchtigt wird.

Die konkurrierenden FIR-Nachtsichtsysteme basieren hingegen auf Kamerasensoren mit einem Empfindlichkeitsbereich von 8000 nm bis 20000 nm (Hamm, 2006). Diese Sensoren benötigen keine zusätzliche Ausleuchtung des Frontbereiches mit einem IR-Strahler, da sie in der Lage sind, die direkt von den Objekten emittierte infrarote Wärmestrahlung sensorisch zu erfassen, die dann vorhanden ist, wenn ein Objekt eine Energie über dem absoluten Nullpunkt besitzt. Aufgrund dessen werden diese Wärmebildkameras auch nicht wie die konkurrierenden NIR-Kameras an der präferierten Rückspiegelposition hinter der wärmereflektierenden Windschutzscheibe verbaut, sondern relativ niedrig im Fahrzeugschweller. Ein FIR-Kamerasensor liefert folglich ein Videobild, das perspektivisch stark von der Fahrersicht abweicht und in dem kalte Objekte dunkel, bzw. warme Objekte hell erscheinen. Sowohl die ungewohnte Perspektive, als auch die vom sichtbaren Spektralbereich abweichenden Kontrast- und Leuchtdichteverhältnisse der Umgebung, wirken sich nachteilig auf die Interpretation des Videobildes aus, da folglich eine verschobene Raumkonstellation vorliegt und vertraute Objekte ungewohnte Konturen aufweisen. Im Weiteren sind Fahrbahnmarkierungen, Verkehrszeichen und kalte Objekte auf der Straße in einem Wärmebild kaum zu erkennen. Diese Eigenschaft prädestiniert FIR-Systeme jedoch zugleich zur Erkennung lebender Objekte wie beispielsweise Fußgänger, die mit einer Temperatur von ca. 300 K nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz und dem Wien'schen Verschiebungsgesetz ein Strahlungsmaximum von ca. 9500 nm aufweisen und somit hell und deutlich aus dem Wärmebild hervorstechen (Hamm, 2006). Außerdem besitzt diese Technologie im Vergleich zu NIR-Systemen den wesentlichen Vorteil, dass die Reichweite mit ca. 300 m doppelt so weit ist und diese auch nicht durch Witterungseinflüsse

wie Regen, Schneefall oder Nebel verringert wird, wenngleich die Gesamthelligkeitsverteilung des Wärmebildes in Abhängigkeit von der Jahreszeit leicht variiert.

Auch bei der zweiten Nachtsichtkomponente, dem Bildverarbeitungsrechner, werden zwei unterschiedliche Ausprägungen unterschieden. Diesbezüglich ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese beiden unterschiedlichen Bildverarbeitungsverfahren nicht konkurrieren, sondern aufeinander aufbauen und speziell auf die jeweils verwendete IR-Technologie abgestimmt sind. Das erste dieser beiden Verfahren verbessert mit Hilfe von digitalen Filtern lediglich die Qualität des IR-Videobildes, indem das Bildrauschen minimiert, Objektkanten geschärft und, speziell bei NIR-Systemen, nichtlineare Lichtintensitäten aufgrund von Blendungslichtern unterdrückt werden (Bischoff, et al., 2006).

Das darauf aufbauende optionale zweite Bildverarbeitungsverfahren führt im Anschluss daran eine Analyse des qualitativ aufbereiteten Videobildes hinsichtlich Kontrast-, Helligkeitsverteilungen, charakteristischen Konturen und Bewegungsdynamiken durch (Bertozzi, et al., 2003). Ziel ist es hierbei sicherheitsrelevante Umweltinformationen, wie beispielsweise Fußgänger, Fahrzeuge, Straßenmarkierungen oder Verkehrsschilder, automatisiert zu detektieren (Bertozzi, et al., 2004). Diese Informationen werden auch für andere Fahrerassistenzsysteme verwendet, wenngleich für die Applikation Night Vision primär die automatisierte Fußgänger- und Spurdetektion relevant ist. FIR-Kameras eignen sich diesbezüglich ausgezeichnet für eine automatisierte Objektdetektion (Fußgänger und Tiere). NIR-Kameras stoßen hingegen hierbei an ihre Grenzen (Ruß, 2008). Diese haben jedoch wiederum ihre Vorzüge im Bereich der automatisierten Spurdetektion. Um die Zuverlässigkeit dieser automatisierten Umweltinterpretation zu erhöhen, werden die Kamerasensordaten in der Regel mit anderen Sensordaten fusioniert (Wisselmann, 2006). Infolgedessen werden für eine zuverlässige Objektdetektion Lidar- (**l**ight **d**etection **a**nd **r**anging) oder Radarsensordaten (**r**adiowave **d**etection **a**nd **r**anging) herangezogen, die eine exakte Entfernungsinformation des Objektes bereitstellen. Objekterkennungsalgorithmen fusionieren diese Informationen mit den zeitgleich erfassten FIR-Kamerasensordaten, so dass die erwünschten Objektinformationen, wie Abmessungen, Richtung, Entfernung, Dynamik und Gefährlichkeit, in Echtzeit generiert werden. Diese automatisierte Objektdetektion arbeitet zuverlässig, unabhängig von Witterungseinflüssen, bis zu einer maximalen Entfernung von ca. 100 m (Ruß, 2008; Teichmann, 2007).

Die Spurdetektion ist einer derartigen Sensorfusion nicht zugänglich, da diese Straßeninformationen bislang ausschließlich von NIR-Kameras sensorisch erfasst werden können. Entwickler spielen zwar mit dem Gedanken, diese NIR-Daten mit prädiktiven Streckendaten des Navigationssystems zu fusionieren, jedoch weisen diese bis dato eine noch zu große Ungenauigkeit auf. Erschwerend kommt hinzu, dass eine NIR-basierte

Spurdetektion stark witterungsabhängig ist und folglich genau in diesen Situationen, in denen der Fahrer Assistenz benötigt, versagt.

Die Aufgabe des HMIs, das folglich die dritte und letzte Komponente eines Nachtsichtsystems darstellt, besteht darin, dem Fahrer die außerhalb des Sichtbereichs sensorisch erfassten Informationen zu priorisieren, d.h. nach Wichtigkeit intuitiv verständlich so zu vermitteln, dass die Ablenkung von der primären Fahraufgabe minimiert und die Fahrsicherheit maximiert wird.

Die hierfür zur Verfügung stehenden Informationen umfassen folglich das hochinformativ NIR- bzw. FIR-Videobild und die in Abhängigkeit vom Bildverarbeitungsrechner automatisiert detektierten situationsspezifischen Umweltinformationen, die in der Regel in Symbolform präsentiert werden. Ein Beispiel hierfür wäre ein automatisch erscheinendes Warnicon im Falle eines detektierten Fußgängers auf der Straße.

Zur Vermittlung dieser beiden Informationsarten (Videobild und Icon) stehen in einem modernen Fahrzeug vier konventionelle Anzeigen zur Verfügung. Diese sind das zentrale Informationsdisplay rechts neben dem Lenkrad auf Höhe des Armaturenbretts (CID), die Instrumentenanzeigetafel hinter dem Lenkrad (Kombi), das aufklappbare Scheibenwurzeldisplay direkt auf der Kombihutze (SWD) und das in ca. 3 m Entfernung über der Motorhaube schwebende Head-Up-Display (HUD). Alle diese vier Anzeigen verwenden bislang konventionelle Flüssigkristalldisplays und können somit sowohl einfache Icons als auch hochinformativ IR-Videobilder darstellen. Unterschiede weisen sie primär hinsichtlich des Blickabwendungswinkels auf, der bei der Informationsaufnahme eine wichtige Rolle spielt und in aufsteigender Reihenfolge beim CID am größten und beim HUD am geringsten ist (Collewijn, et al., 1988; Schweigert, 2003; Gengenbach, 1997). Nach Gengenbach (1997) beträgt der Blickabwendungswinkel im Kombi 18° und kann im HUD auf 4° reduziert werden. Im Weiteren beeinflusst der Akkommodationsaufwand, der auch in diesem Fall beim HUD aufgrund der optischen Entfernung des virtuellen Displays am geringsten ist, die Güte der Informationsaufnahme. Diese beiden Einflussfaktoren sind im Wesentlichen ausschlaggebend dafür, dass dem Fahrer bei konventionellen Anzeigen die Informationsaufnahme im Head-Up-Display am schnellsten gelingt (Gengenbach, 1997). Das HUD besitzt aber auch einen Nachteil, der jedoch nur bei der Darstellung des hochinformativen IR-Videobildes eine Rolle spielt. Dieser ist darauf zurückzuführen, dass ein Head-Up-Display für gewöhnlich die Windschutzscheibe als Kombiner verwendet und es sich folglich um ein semitransparentes Display handelt (Bubb, et al., 1991). Ein im HUD dargestelltes Videobild weist somit eine im Vergleich zu den anderen Anzeigen schlechtere Bildqualität auf, die aus einem geringeren Kontrastverhältnis und störenden Helligkeitsänderungen des Straßenhintergrundes resultiert.

Scheibenwurzel-Displays, die wie das HUD auf dem Reflexionsgesetz an ebenen Flächen basieren, verwenden deshalb einen Spiegelkombiner, um die erwähnten Defizite zu kompensieren. Dies beinhaltet jedoch zugleich die Nachteile einer niedrigeren Display-Position und einer geringeren optischen Entfernung.

Ein innovatives HMI, das sich von den konventionellen Anzeigen abhebt, ist das ereignisbasierte LED-Array, das speziell für den Fall einer automatisierten Fußgängerdetektion entwickelt wurde und folglich ausschließlich bei dieser Night-Vision-Ausprägung Verwendung findet (Mahlke, et al., 2007). Hierbei handelt es sich um kein freiprogrammierbares Display, sondern um ein einfaches LED-Array, das direkt an der Scheibenwurzel angebracht ist (siehe Abbildung 4–7). Im Falle einer Fußgängerdetektion wird der Fahrer durch das Aufblitzen einer richtungskodierten LED gewarnt, die sich immer auf der Fluchtlinie zwischen einer definierten fixen Fahrerkopfposition und der detektierten Objektposition befindet. Auf diese Art und Weise wird der Fahrer nicht nur aktiv gewarnt, sondern erhält zugleich die Information der Gefahrenrichtung, so dass von einer richtungsanalogen Warnung gesprochen werden kann.

Neben der sehr schnellen und intuitiven Informationsvermittlung sind als weitere Vorteile das geringe Bauvolumen, die minimalen Kosten und der sehr große Warnbereich zu erwähnen, der, wenn es die Sensortechnik erlauben würde, auf die gesamte Windschutzscheibe erweitert werden könnte. Der Nachteil dieser Anzeige besteht jedoch darin, dass zusätzliche Objektinformationen wie „Entfernung“ und „Dynamik“ nicht vermittelt werden können, die aber für den Fahrer zur adäquaten Einschätzung der Verkehrssituation unerlässlich sind.

Zusammenfassend sind in Tabelle 4-1 für die drei NiVi-Hauptkomponenten Sensorik, Bildverarbeitungsrechner und HMI alle Ausprägungen aufgeführt, die bis dato realisiert sind. Folglich beschreibt diese Auflistung das Variationsspektrum aktueller Nachtsichtassistenten und somit den Stand der Technik.

Tabelle 4-1: Variationsspektrum aktueller Nachtsichtsysteme

NiVi Komponenten		Ausprägungen				
Sensorik		NIR			FIR	
Bildverarbeitungsrech.		qual. Videobildaufbereitung			aut. Objektdetektion	
HMI	Information	IR-Videobild			Icon	
	Anzeige	CID	Kombi	SWD	HUD	LED-Array

4.2.2 Stand der Forschung

Eine sich aus der Tabelle 4-1 ergebende Variante stellt das im Jahre 2005 in den Markt eingeführte Nachtsichtsystem von Mercedes Benz dar, das als Sensorik eine NIR-Kamera verwendet und dem Fahrer ein qualitativ aufbereitetes NIR-Videobild im Kombi präsentiert (Abbildung 4–6). BMW folgte im selben Jahr mit einem Nachtsichtassistenten auf Ferninfrarotbasis, der das FIR-Videobild im CID darstellt. Folglich unterscheiden sich beide Systeme primär hinsichtlich ihrer HMIs, die in Bezug auf die präsentierte Information und den verwendeten Anzeigeort stark divergieren.

Im Rahmen einer systemergonomischen Analyse fällt hinsichtlich des Anzeigeortes auf, dass der Fahrer laut Collewijn et al (1988) für einen Sakkadensprung auf das Kombi weniger Zeit benötigt als auf das CID. Ein weiterer Nachteil der BMW-Variante besteht in der sekundären Inkompatibilität des HMIs, das auf die in Referenz zur Fahrerposition außermittige Anzeigenposition des CIDs zurückzuführen ist. Folglich wird dem Fahrer, wie in der im Bild dargestellten Beispielsituation, das FIR-Videobild rechts präsentiert, obwohl sich die sicherheitskritischen Objekte relativ zu ihm links befinden. Aus dieser sekundären Inkompatibilität resultiert für den Fahrer ein unnötiger Dekodieraufwand, der sich in einem längeren Zeitbedarf und einer höheren Fehlerwahrscheinlichkeit bemerkbar macht (Hyos, 1974; Timpe, 1990). Die Anzeige des Mercedes Benz ist hingegen voll kompatibel.



Abbildung 4–6: Bildgebendes NIR-NiVi im Kombi (Mercedes-Benz, 2008) / Bildgebendes FIR-NiVi im CID (BMW AG, 2007)

In Bezug auf das verwendete FIR- bzw. NIR-Videobild sind bei einem Vergleich dieser beiden Systemvarianten weitere gravierende Unterschiede feststellbar. In Anbetracht des ermittelten Assistenzbedarfs aus Kapitel 3.3 liefert nämlich ausschließlich das NIR-Videobild Informationen des vorausliegenden Straßenverlaufs. Aufgrund der realitätsnahen Darstellung ist es dem Fahrer möglich, sowohl die Information des „Spurverlaufs“, als auch der „Spurbreite“, aus dem Videobild zu ermitteln. Gemäß der Risikohomöostasethorie beweisen

Untersuchungen, dass diese erweiterte Straßenvoraussicht den Fahrer unterstützt, was sich in einer höheren Geschwindigkeit bemerkbar macht.

Nilsson et al. (1996) untersuchten diesbezüglich in einem Fahrsimulator die bei Tagnebelfahrten auftretenden Fahrverhaltensänderungen in Folge der Assistenz durch ein im Head-Up-Display präsentiertes klares Videobild des frontalen Verkehrsraums. Die Ergebnisse zeigen, dass die Testpersonen mit dieser vom Informationsgehalt NIR-ähnlichen Sichterweiterung bei einer durch Nebel auf 50 m reduzierten Sichtweite um bis zu 50 % schneller fahren als ohne Assistenz, aber dennoch langsamer, als bei klaren Sichtverhältnissen. Untersuchungen von Stanton et al. (2000) liefern ähnliche Resultate. Sie fanden mit einem vergleichbaren Versuchsdesign heraus, dass die Testpersonen mit dieser simulierten Sichterweiterung bei Nacht oder Nebel genauso schnell fahren, wie bei perfekten Sichtverhältnissen am Tage. Im Weiteren untersuchten sie den Einfluss eines Systemfehlers auf das Fahrverhalten. Hierbei fiel auf, dass die durch Assistenz stark erhöhte Geschwindigkeit von den Versuchspersonen wieder etwas reduziert wurde, nachdem sie ein Versagen des Systems erlebt hatten. Im Gegensatz dazu konnten Padmos et al. (1996) im Rahmen von nächtlichen Realversuchen bei einem im Kombi dargestellten NIR-Videobild lediglich eine moderate Geschwindigkeitserhöhung feststellen. Als sicherheitskritisch erweist sich jedoch die Tatsache, dass sich der Fahrer primär auf das Videobild konzentriert und es häufig als Ersatz für die reale Sicht verwendet. Aufgrund der relativ kleinen zweidimensionalen Darstellung der Umwelt, den unterschiedlichen Größenverhältnissen und dem sensorisch bedingten eingeschränkten Blickfeld, ist beim „Fahren nach Display“ zu befürchten, dass der Autofahrer die eigene Geschwindigkeit falsch abschätzt, sicherheitskritische Objekte übersieht und Objektentfernungen falsch einschätzt. Aufgrund dessen ist eine erweiterte Straßenvoraussicht in Form eines NIR-Videobildes mit konventionellen Anzeigetechnologien als kritisch zu bewerten.

In Bezug auf die zweite Assistenzbedarfskategorie „Objekt“ weisen beide IR-Technologien, bei der vom Fahrer selbständig durchzuführenden Interpretation des Videobildes individuelle Vor- und Nachteile auf. Generell muss der Fahrer in der Lage sein, sicherheitskritische Objekte zuverlässig und schnell zu erkennen, unmittelbar nachdem sie im Videobild erscheinen. Nach Piccione et al. (1997) gelingt dies bei warmen Objekten wie Autos, Fußgängern und Tieren in FIR-Videos am besten. Gleiches zeigen auch Untersuchungen von Tsimhoni et al. (2004), bei denen NIR-Videobilder schlechter abschneiden. Neben der schnellen und zuverlässigen Objektdetektion darf es für den Fahrer im Weiteren kein Problem darstellen, die Objektrichtung, -entfernung und -dynamik effektiv und effizient aus dem Videobild herauszufiltern und diese Informationen anschließend durch einen iterativen Abgleich des Videobildes mit der Realität auf die reale Sicht zu übertragen. Für diesen

Abgleichprozess referenziert der Fahrer die aus dem Videobild ermittelten Objektinformationen auf weitere Umgebungsinformationen, die sich in der Sichtweite des Abblendlichtes befinden, und kann somit auf die ungefähre Objektposition in der Realität schließen. Diese Schätzung nimmt relativ viel Zeit in Anspruch und ist nach Rumar (2002 und 2003) in einem FIR-Videobild schwieriger durchzuführen als in einem NIR-Videobild, da wichtige Orientierungshinweise, wie Straßenmarkierungen oder Bäume, im Videobild fehlen. Untersuchungen von Brickner (1989) bestätigen, dass im Vergleich zu NIR-Videobildern bei der Interpretation von FIR-Videobildern erhebliche Probleme auftreten.

Unabhängig von den soeben erörterten individuellen Vor- bzw. Nachteilen des Anzeigeortes und des IR-Videobildes weisen jedoch beide HMI-Varianten gleichermaßen ein entscheidendes Defizit auf, das den Nutzen beider Night-Vision-Varianten auf ein Minimum reduziert. Die Rede ist von der reinen Darstellung eines qualitativ optimierten, aber hinsichtlich des Informationsgehalts „Gefahr“, „Richtung“, „Entfernung“ und „Dynamik“ nicht weiter aufbereiteten IR-Videobildes der Nachtszenarie. Folglich besteht für den Fahrer nur dann die Möglichkeit, sicherheitskritische Objekte frühzeitig zu erkennen, wenn er zufällig, just in dem Moment, auf das Display schaut, in dem auch gerade ein Objekt im IR-Videobild erscheint. Dieser glückliche Zufall ereignet sich jedoch nur in den seltensten Fällen, so dass sicherheitskritische Objekte, bevor sie ins Abblendlicht eintreten, meist zu spät oder gar nicht im IR-Videobild erkannt werden. Diese Tatsache bestätigen Fahrversuche von Gish et al. (1999), die mit rein bildgebenden Nachtsichtsystemen keinen Sicherheitsgewinn feststellen können. Kiefer (1995) berichtet sogar, dass Fahrer ohne ein bildgebendes Nachtsichtsystem bessere Objekterkennungsergebnisse vorweisen und sich subjektiv geringer belastet fühlen, da das IR-Videobild von der primären Fahraufgabe ablenkt.

Aufgrund dessen verfügen Nachtsichtsysteme der nächsten Generation über eine aktive Objektdetektion, die dem Fahrer die Aufgabe der selbstständigen Gefahrenerkennung abnimmt und eine Warnung bei automatisiert detektierten potenziellen Gefahren präsentiert. Das von Honda Ende 2004 vorgestellte warnende Nachtsichtsystem verwendet ein Scheibenwurzeldisplay mit Spiegelkombiner in dem ein FIR-Videobild präsentiert wird (siehe Abbildung 4–7). Mit Hilfe einer Stereoskopiesensorik können Fußgänger bis zu einer Entfernung von ca. 80 m automatisiert detektiert werden, die in diesem Fall direkt im FIR-Videobild mit einem roten Rahmen markiert werden (Honda, 2004). Redundant erhält der Fahrer zur Steigerung der Aufmerksamkeitsbindung ein akustisches Warnsignal, da das rote Warnicon bei großen Entfernungen noch sehr klein ist und folglich leicht übersehen werden kann. In Bezug auf den ermittelten Assistenzbedarf aus Kapitel 3.3 vermittelt diese Nachtsichtvariante alle geforderten Objektinformationen. Der Fahrer wird aktiv vor „Gefahr“

gewarnt und erhält im Weiteren durch das FIR-Videobild die Informationen der „Richtung“, „Entfernung“ und „Dynamik“, die er iterativ auf die Realität übertragen kann.



Abbildung 4–7: Warnendes FIR-NiVi mit Scheibenwurzeldisplay (links) (Honda, 2004) / Warnendes FIR-NiVi mit LED-Array (rechts) (Mahlke, et al., 2007)

Ein ebenfalls aktiv warnendes Nachtsichtsystem stellt das in Abbildung 4–7 dargestellte innovative ereignisbasierte LED-Array dar, dessen Funktionsweise bereits im Rahmen des in Tabelle 4-1 dargestellten Variantenspektrums aus Kapitel 4.2.1 beschrieben wurde (Mahlke, et al., 2007). Dieses HMI kann im Vergleich zum großen Objektinformationsumfang des Honda-Systems nur einen auf die beiden Kategorien „Gefahr“ und „Richtung“ reduzierten Objekthinweis liefern. Dennoch zeigt eine Untersuchung von Mahlke et al. (2007), dass dieses informationsreduzierte HMI, im Vergleich zu aktuellen bildgebenden oder warnenden Night-Vision-Varianten, Maßstäbe setzt. Hierbei wurden im Rahmen von Realversuchen vier konventionelle bildgebende und zwei warnende Nachtsichtsysteme hinsichtlich Effektivität, Effizienz und Gefallen untersucht. Die beiden aktiv warnenden Varianten umfassen das ereignisbasierte LED-Array und ein mit dem Honda-System vergleichbares Scheibenwurzeldisplay auf Ferninfrarotbasis. Die Untersuchung beweist, dass selbst im Vergleich zum warnenden Scheibenwurzeldisplay, dessen Informationsumfang von allen Varianten am größten ist, das ereignisbasierte LED-Array von allen sechs Varianten die besten Ergebnisse hinsichtlich Effektivität und Effizienz erzielt und folglich das größte Sicherheitspotenzial beinhaltet.

Der Grund hierfür wird bei einem Blick auf das Fallbeispiel aus Kapitel 3.1.2 ersichtlich. Demnach muss bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h auf einer trockenen Landstraße gemäß der Formel 4 aus Kapitel 3.3 die minimale reale Voraussicht des Fahrers x_V dem Anhalteweg x_A entsprechen, um gerade noch vor einem auf der Straße stehenden sicherheitskritischen Objekt anhalten zu können. Ein warnendes Nachtsichtsystem erweitert diese Fahrervoraussicht x_V künstlich von ca. 55 m im Abblendlicht auf die sensorbedingte

Fußgängerdetektionsreichweite x_D , die nach Ruß (2008) bei den neuesten Nachtsichtsystemen im Mittel 100 m beträgt (siehe Abbildung 4–8). In Bezug auf den Anhalteweg x_A , der im Fallbeispiel bei idealen Sichtbedingungen 87,1 m beträgt, hat es den Anschein, dass diese Sensordetektionsreichweite den Anforderungen einer nächtlichen Landstraßenfahrt genügt. Jedoch ist in diesem Zusammenhang zu berücksichtigen, dass die Informationen der realen Voraussicht um ein Vielfaches intuitiver und somit schneller vom Menschen gesehen, wahrgenommen und erkannt werden können, als es in einer konventionellen künstlichen Anzeige der Fall ist (Schmidt-Clausen, et al., 2004). Aufgrund dessen muss die Detektionsreichweite der Sensorik x_D größer sein als eine vergleichbare reale Voraussicht x_V , damit dem Fahrer genügend Zeit bleibt, um die im HMI verschlüsselten Informationen wieder zu dekodieren und auf die Realität zu übertragen. In diesem Zusammenhang stellt sich nun die entscheidende Frage, wie viel Zeit dem Fahrer bei einer automatisierten Fußgängerdetektion in 100 m verbleibt, um Informationen aus dem HMI aufzunehmen, bzw. in welcher Zeit ein HMI dem Fahrer alle wesentlichen Objektinformationen vermitteln muss, damit ein Unfall noch vermieden werden kann (siehe Abbildung 4–8).

Zur Berechnung dieses maximal zur Verfügung stehenden Zeitfensters wird die Formel 4 in eine Gleichung umgewandelt und die Voraussicht x_V durch die sensorische Detektionsreichweite x_D ersetzt, so dass sich folgender analytischer Zusammenhang ergibt:

$$x_D = v t_R + \frac{v^2}{2\mu g} \quad (\text{Formel 5}).$$

Im Weiteren wird die Reaktionszeit t_R in drei chronologisch aufeinander folgende Handlungsphasen des Fahrers unterteilt (Zomotor, 1987). Diese sind die Informationsvermittlungszeit t_I , die Betätigungszeit t_{Bt} und die Schwellzeit t_S aus denen mit

$$t_R = t_I + t_{Bt} + \frac{t_S}{2} \quad (\text{Formel 6})$$

die Gesamtreaktionszeit t_R resultiert. Diesbezüglich ist die Informationsvermittlungszeit t_I der Zeitabschnitt, den ein Mensch zur Blickzuwendung auf die Anzeige, Wahrnehmung, Erkennung, Entscheidung und Reizleitung benötigt und definiert folglich das zu ermittelnde Zeitfenster, in dem Objektinformationen über ein irgendwie geartetes HMI vermittelt werden müssen. Der darauffolgende Zeitbereich, ab der Wegnahme des Fußes vom Gaspedal (Zeitpunkt 2) bis zum Fahrzeugverzögerungsbeginn (Zeitpunkt 3), wird als Betätigungszeit t_{Bt} bezeichnet. Hierunter sind im Falle einer Bremspedalbetätigung die Umsetz-, Anlege- und Ansprechzeit subsumiert. Nach Zomotor (1987) kann diese Phase in Abhängigkeit der individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten des Fahrers 0,2 s bis 0,45 s dauern.

Den letzten Zeitbereich stellt die Schwellzeit t_S dar, im Rahmen derer der Bremsdruck bis zur maximalen Fahrzeugverzögerung (Zeitpunkt 4) aufgebaut wird. Diese Phase dauert ca. 0,2 s

(Zomotor, 1987). Zur Berücksichtigung der Tatsache, dass innerhalb dieser Schwellzeit t_s bereits eine Verzögerung des Fahrzeugs stattfindet, geht dieser Zeitabschnitt nur mit dem halben Wert in die Formel 6 ein. Wird nun Formel 6 in Formel 5 eingesetzt und dieser Term nach der Informationsvermittlungszeit t_i aufgelöst, erhält man zur Berechnung des zur Verfügung stehenden Zeitfensters folgenden analytischen Zusammenhang:

$$t_i = \frac{x_D}{v} - \frac{v}{2\mu g} - t_{Bt} - \frac{t_s}{2} \quad (\text{Formel 7}).$$

In Bezug auf das Fallbeispiel einer gewöhnlichen Landstraßenfahrt ergibt sich somit bei einer Detektionsreichweite der Sensorik von $x_D = 100$ m (Ruß, 2008), einer durchschnittlichen Bremsverzögerung von $a = 6,5$ m/s² (Nilgens, 2007), einer durchschnittlichen Betätigungszeit von $t_{Bt} = 0,33$ s (Zomotor, 1987) und einer Schwellzeit von $t_s = 0,2$ s (Zomotor, 1987) eine maximale Informationsvermittlungszeit t_i von 1,03 s (siehe Abbildung 4–8).

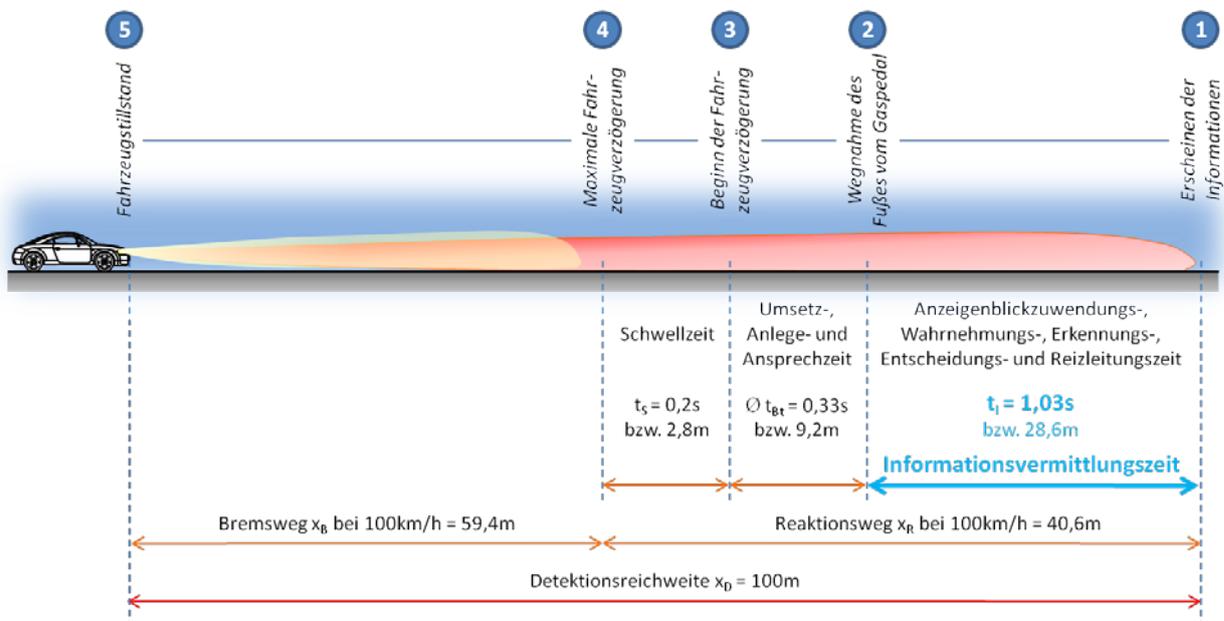


Abbildung 4–8: Zur Verfügung stehende Informationsvermittlungszeit eines Nachtsichtsystems

Im Vergleich dazu benötigt ein Fahrer zum Ablesen einer Geschwindigkeitsanzeige in einem konventionellen Head-Up-Display im Mittel 0,45 s und in einem konventionellen Kombi 0,63 s (Gengenbach, 1997). In Bezug auf das CID ergaben Untersuchungen von Vilimek (2007), bei denen Probanden einfache Icons erkennen mussten, eine durchschnittliche Blickabwendungsdauer von 0,79 s. Folglich ist es bei einer Detektionsentfernung von 100 m möglich mit konventionellen Anzeigen einfache Informationen, wie beispielsweise ein Warnicon zu vermitteln, um den Fahrer vor einer Gefahr zu warnen.

Problematisch wird es jedoch im Rahmen dieses kleinen Zeitfensters, das hochinformatives IR-Videobild aktiv zu interpretieren, um zusätzliche Objektinformationen über Richtung,

Entfernung und Dynamik herausfiltern zu können. Dieser Sachverhalt spitzt sich zu, da die Zuverlässigkeit der automatisierten Objektdetektion stark von externen Einflüssen abhängig ist und somit in vielen Fällen auch mit einer geringeren Detektionsreichweite der Sensorik zu rechnen ist. Werden Objekte erst in 90 m detektiert, ist es gemäß Tabelle 4-2 bereits für einen Fahrer, unter Vernachlässigung der peripheren Wahrnehmung, nicht mehr möglich in einem konventionellen CID ein einfaches Warnicon im Rahmen einer Blickzuwendung wahrzunehmen.

Tabelle 4-2: Benötigte Informationsaufnahmezeit konventioneller Anzeigetechnologien im Vergleich zur Verfügung stehenden Informationsvermittlungszeit

x_D	t_i	HUD (Ø 0,45 s)	Kombi (Ø 0,63 s)	CID (Ø 0,79 s)
80 m	0,31 s	-	-	-
90 m	0,67 s	+	o	-
100 m	1,03 s	+	+	+

Bei der von Grund auf schlechten Sensorreichweite des Honda-Systems, im Mittel lediglich 80 m, ist die Informationsvermittlung durch eine Blickzuwendung mit konventionellen Anzeigetechnologien bereits ausgeschlossen. Diese geringe Sensordetektionsentfernung tritt aber auch bei besseren Sensorsystemen relativ häufig auf. Selbst in diesen Fällen muss jedoch ein HMI in der Lage sein, dem Fahrer alle wichtigen Informationen zu vermitteln. Dies ist nur durch ein hohes Maß an Intuitivität möglich.

Das ereignisbasierte LED-Array wird diesen Anforderungen gerecht, indem es dem Fahrer in kürzester Zeit durch eine selbsterklärende, richtungsanaloge Warnung eine Gefahrensituation bewusst macht und über dies hinaus noch eine grobe Gefahrenrichtungsinformation vermittelt. Obwohl das warnende Scheibenwurzeldisplay im Gegensatz dazu über das gesamte Informationsspektrum des Assistenzbedarfs aus Kapitel 3.3 verfügt, schneidet es dennoch hinsichtlich Effektivität und Effizienz schlechter ab (Mahlke, et al., 2007). Der wesentliche Grund hierfür besteht folglich darin, dass der Fahrer innerhalb dieses minimalen Zeitfensters unterm Strich alle Informationen des LED-Arrays aufnehmen kann (Assistenzbedarfskategorie „Gefahr“ und „Richtung“), aber im Vergleich dazu keine aus dem hochinformativen IR-Videobild im Scheibenwurzeldisplay. Die zur Verfügung stehende Zeit reicht zur Decodierung dieser schlecht aufbereiteten Informationen nicht aus, so dass sich die Informationsvermittlung dieser Night-Vision-Variante auf eine aktive Warnung (Assistenzbedarfskategorie „Gefahr“) reduziert. Der Fahrer erhält folglich mit dem warnenden Scheibenwurzeldisplay effektiv weniger Informationen als mit dem gut ausgelegten HMI des LED-Nachtsichtsystems.

Aber auch das ereignisbasierte LED-Array weist noch Verbesserungspotenziale auf. Probanden bewerten nämlich dieses HMI bei den Versuchen von Mahlke et al. (2007) hinsichtlich des „subjektiven Gefallens“ zwar gut, aber dennoch schlechter als bei einem einfachen bildgebenden NIR-System, dessen qualitativ erstklassiges IR-Videobild hochwertiger auf die Probanden wirkt.

Ein weiterer wesentlicher Nachteil besteht darin, dass mit dem LED-Array hinsichtlich des ermittelten Assistenzbedarfs aus Kapitel 3.3 lediglich bezüglich der Kategorie „Objekt“ Informationen vermittelt werden können und auch diese leider nur partiell. Um jedoch die Gefährlichkeit der gegenwärtigen Situation richtig einschätzen und situationsadäquate Handlungen ableiten zu können, ist es für den Fahrer unerlässlich, sowohl die weiteren Objektinformationen „Entfernung“ und „Dynamik“, als auch die exakten Straßenverlaufsinformationen „Spurverlauf“, „Spurbreite“, „Kurvenradius“ und „Kurvenentfernung“ zu erhalten.

4.2.3 Methoden der kontaktanalogen Visualisierung

Um die hohe Wertigkeit und den enormen Informationsgehalt bildgebender IR-Nachtsichtsysteme mit den Vorzügen der schnellen Informationsaufnahme und der Interpretationsleichtigkeit des ereignisbasierten LED-Arrays in einem einzigen HMI vereinen zu können, bedarf es einer neuen innovativen Anzeigetechnologie im Kraftfahrzeug, da konventionelle Anzeigen diesen Anforderungen nicht genügen. Augmented Reality ist eine solche innovative Anzeigetechnologie, die sich durch ein hohes Maß an Intuitivität auszeichnet. Die Grundidee dieser Technologie besteht darin, virtuelle Informationen, die das Verhalten imaginärer realer Objekte plagiiert, dreidimensional im direkten Blickfeld des Menschen in der Realität darzustellen. Folglich verschmelzen diese virtuellen Informationen für den Betrachter mit der Realität, da sie sich, konträr zu konventionellen Anzeigeeinformationen, hinsichtlich Entfernung und Dynamik, analog zum visuellen Raumverständnis des Menschen in die Umwelt integrieren und dadurch sowohl eine extrem effektive als auch effiziente Informationsaufnahme und -verarbeitung gewährleisten. Aufgrund dieser Eigenschaft ist im Automotivebereich auch oft von sogenannten kontaktanalogen Fahrerassistenzinformationen die Rede (Bubb, 1975). Für die Applikation Night-Vision sind visionäre Szenarien das kontaktanaloge Markieren sicherheitskritischer Objekte in der Realität oder das kontaktanaloge Nachführen des realen Straßenverlaufs.

Leider können aktuelle AR-Systeme unter automotive-tauglichen Gesichtspunkten nicht bestehen, da sie den räumlichen Eindruck primär über den Stereoskopieeffekt erzielen. Aufgrund dessen besitzen diese technischen Lösungen den Nachteil, dass sie kopfbasiert sind und ein Head-Tracking-System benötigen, das wiederum, unter Voraussetzung der

Berührungslosigkeit, eine erhöhte Fehleranfälligkeit und einen erhöhten Kalibrierungsaufwand nach sich zieht. Bei der Entwicklung einer automotive-tauglichen AR-Anzeige muss deshalb die Zielsetzung darin bestehen, dass ein beliebig großer Fahrer berührungslos und ohne Kalibrierungsaufwand kontaktanaloge Informationen in mittleren bis großen Entfernungen vor dem Fahrzeug auch bei Kopfbewegungen zuverlässig wahrnehmen kann.

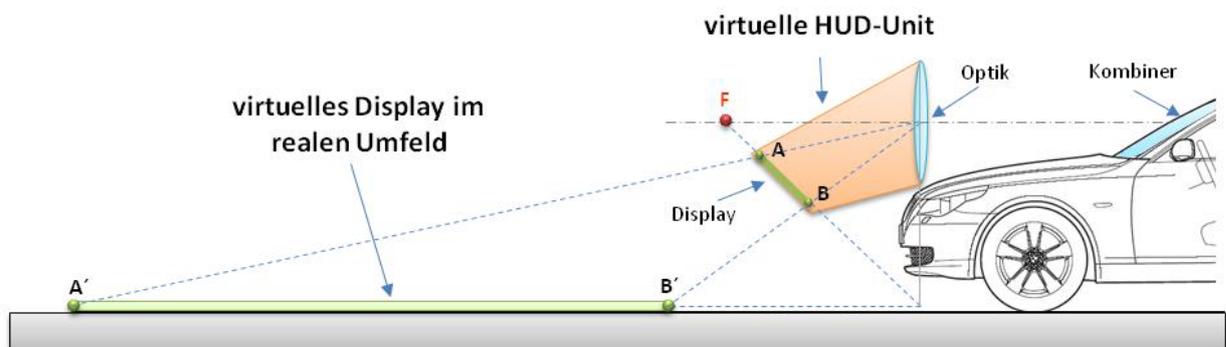


Abbildung 4–9: Methode des auf der Fahrbahn liegenden virtuellen Displays (Bubb, 1975)

Um diesen Forderungen Rechnung zu tragen, entwickelte Bubb (1975) bereits in den 80er Jahren das erste kontaktanaloge Head-Up-Display. Das Geniale der hierbei verwendeten Methode besteht darin, dass zur Erzeugung der Kontaktanalogie die gleichen technischen Komponenten (Kombiner, Optik und Display) ausreichen, wie sie in heutigen konventionellen Head-Up-Displays im Fahrzeug Verwendung finden. Der einzige Unterschied besteht darin, dass zur Erzeugung der Kontaktanalogie das reale Display innerhalb der Brennweite des optischen Elements so geneigt wird, dass ein nach dem ersten optischen Abbildungsgesetz auf dem Boden liegendes virtuelles Display erzeugt wird. Auf diese Art und Weise können in einer größeren Entfernung auf der Straße liegende virtuelle Objekte A' dargestellt werden, indem der obere Bereich A des Displays ausgenutzt wird, bzw. nähere Objekte B', wenn der untere Bereich B des Displays verwendet wird (siehe Abbildung 4–9). Im Weiteren haben Kopfbewegungen des Fahrers, unter Vernachlässigung der optischen Abbildungsfehler, keine negativen Auswirkungen auf den kontaktanalogen Eindruck, da sich die virtuellen Objekte tatsächlich in der exakten realen Entfernung befinden und folglich die analoge Bewegungsparallaxe zu realen Objekten in der gleichen Entfernung aufweisen.

Diese Methode zur Erzeugung der Kontaktanalogie wurde von Assmann (1985) in einem Realfahrzeug umgesetzt und deren Funktionsweise und Nutzen für eine Bremsweganzeige in Form eines auf der Fahrbahn liegenden kontaktanalogen Bremsbalkens verifiziert. Die wesentlichen Vorteile dieser Methode zur kontaktanalogen Visualisierung bestehen darin, dass sie sich hervorragend eignet, um auf der Straße liegende Fahrerassistenzinformationen, wie beispielsweise einen Bremsbalken, die Fahrtrajektorie, Navigationspfeile,

ACC-Informationen (Adaptive Cruise Control), HC-Informationen (Heading Control) oder die virtuelle Nachführung des realen Straßenverlaufs, kontaktanalog wirken zu lassen. Im Weiteren erfüllt sie die Forderungen der Berührungslosigkeit und der Vermeidung eines Head-Tracking-Systems. Dennoch weist diese Methode zwei Nachteile auf, die gerade eine Applikation im Bereich Night-Vision ausschließen. Diese bestehen darin, dass zum einen keine stehenden Objekte, wie beispielsweise Fußgängermarkierungen, und zum anderen, aufgrund physikalischer Grenzen, keine Objekte in einer größeren Entfernung als ca. 80 m visualisiert werden können.

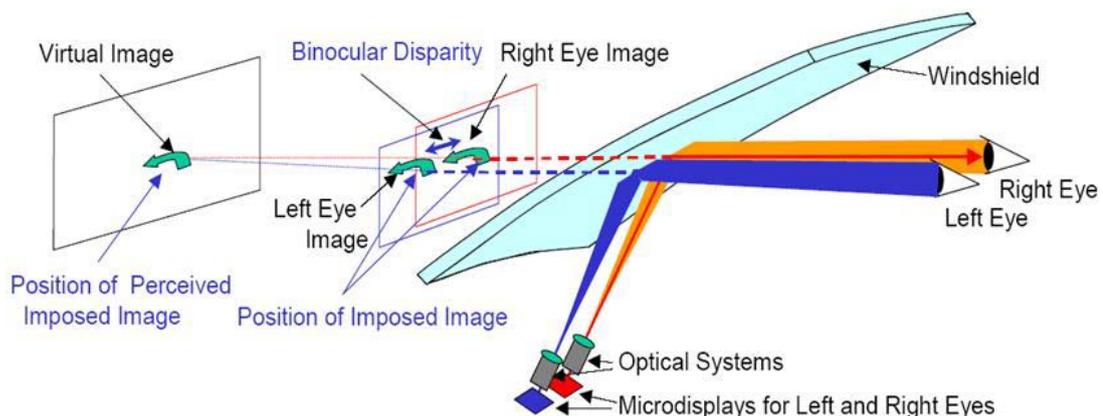


Abbildung 4–10: Stereoskopiebasiertes Head-Up-Display (Koji, et al., 2006)

Einen anderen, nicht besonders Erfolg versprechenden Versuch haben Koji et al. (2006) gewagt, indem sie die stereoskopiebasierte AR-Technologie eins zu eins auf den Fahrerarbeitsplatz übertragen haben. Hierbei wurde ein Mock-Up mit planem Kombiner entwickelt, das über zwei monokulare Head-Up-Displays mit einer jeweiligen Bildweite von 2 m auf Basis der Stereoskopie einen räumlichen Eindruck erzeugt (siehe Abbildung 4–10). Das Problem dieses Versuchsaufbaus besteht in erster Linie in der Vernachlässigung der variablen Fahrerkopfposition, da diese durch eine Kinnauflage fixiert ist. Es ist zwar denkbar dieses Problem durch ein hochgenaues markerloses Eye-Tracking-System zu kompensieren, jedoch würde dies wiederum die bereits angesprochenen Probleme der erhöhten Fehleranfälligkeit und des erhöhten Kalibrieraufwands nach sich führen. Dazu wird diese Problematik verschärft, wenn kein planer Kombiner, sondern die asphärische Windschutzscheibe zur Superpositionierung verwendet wird. Dies stellt ein praktisch schwer zu lösendes Problem dar.

Folglich existiert bislang keine Möglichkeit, dem Fahrer unter automotive-tauglichen Gesichtspunkten kontaktanaloge Night-Vision-Informationen zu visualisieren.

5 Abgeleitete HMI-Lösungskonzepte

Im Folgenden wird zunächst, durch einen Abgleich des objektivierten Assistenzbedarfs aus Kapitel 3.3 mit den in Kapitel 4 erörterten Potenzialen und Grenzen der neuesten technischen Systeme, das vorhandene Optimierungspotenzial hinsichtlich der beiden Assistenzbedarfskategorien „Straße“ und „Objekte“ aufgezeigt. Darauf basierend werden im Weiteren, unter der Berücksichtigung des technisch Machbaren, für beide Kategorien neue innovative HMI-Lösungskonzepte abgeleitet, um die vorhandene Assistenzlücke zu schließen und so die visuelle Wahrnehmung des Fahrers bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion in idealer Weise zu unterstützen.

In Tabelle 5-1 sind die in Kapitel 4 ausführlich erörterten Potenziale und Grenzen aktueller Fahrerassistenzsysteme anhand einer sechsstufigen Bewertungsskala herausgearbeitet.

Tabelle 5-1: Grenzen des Stands der Technik und daraus resultierendes Optimierungspotenzial

		Assistenzbedarf								
		Straße				Objekte				
		Spurverlauf	Spurbreite	Kurvenradius	Kurvenentfernung	Gefahr	Richtung	Entfernung	Dynamik	
Stand der Technik	Lichtbasierte FAS	Kurvenlicht	-	---	++	---	---	+	+	+
		Abbiegelicht	---	---	+	---	---	+++	+++	+++
		Fernlichtassistent	+	+	--	++	---	--	--	--
		Stadtlcht	+	++	--	+	---	++	++	++
		Landstraßenlicht	++	+	--	++	---	--	--	--
		Autobahnlicht	+++	-	--	+++	---	---	---	---
		Schlechtwetterlicht	---	+++	---	---	---	---	---	---
		Hell-Dunkel-Grenze	++	++	--	++	---	+	-	+
		kontinuierl. Fernlicht	+++	+++	--	+++	---	++	++	++
		markieren. Fernlicht	---	---	---	---	+	++	++	++
	NIVI-Systeme	bildgebendes NIR	-	-	-	-	--	--	--	--
		bildgebendes FIR	---	---	---	---	-	---	---	---
		bildg. + Warnung	---	---	---	---	++	---	---	---
		LED-Array	---	---	---	---	+++	++	---	---

Diese Gegenüberstellung zeigt sehr anschaulich, wie gut sowohl die neuesten lichtbasierten Fahrerassistenzsysteme, als auch die modernsten Nachtsichtsysteme in der Lage sind, dem Fahrer die geforderten Informationen des objektivierten Assistenzbedarfs zu vermitteln. Die

hierbei auftretenden Defizite bzw. Grenzen des Stands der Technik kennzeichnen folglich das Optimierungspotenzial für neue innovative Lösungskonzepte.

5.1 Straßenverlauf

Bei einem Blick auf die Tabelle 5-1 ist deutlich zu erkennen, dass der Fahrer durch lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme im Falle von nachtbedingter Sichtreduktion hinsichtlich der Assistenzbedarfskategorie „Straße“ sehr gut unterstützt wird, wohingegen bildgebende NIR-Systeme, die als einzige Nachtsichtsysteme Informationen des Straßenverlaufs liefern, an dieser Stelle kläglich versagen. Die letzte Innovationsstufe lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme, das kontinuierliche Fernlicht, sticht diesbezüglich besonders positiv hervor, da es insbesondere auf geraden Landstraßen die Straßenvoraussicht des Fahrers bezüglich der Informationen „Spurverlauf“, „Spurbreite“ und „Kurvenentfernung“ hervorragend erweitert. Das lediglich bei Kurvenfahrt auftretende Defizit, bezüglich des „Kurvenradius“, wird durch eine zusätzliche Unterstützung in Form des Kurvenlichts annähernd kompensiert. Durch die Kombination dieser beiden lichtbasierten Fahrerassistenzsysteme erhält der Fahrer bei nachtbedingter Sichtreduktion, sehr intuitiv und bis zu sehr großen Entfernungen, alle geforderten Informationen des Straßenverlaufs. Auf diese Art und Weise wird das Risiko, bei Nacht aufgrund schlechter Sicht von der Straße abzukommen, stark reduziert.

Jedoch offenbart sich bei witterungsbedingter Sichtreduktion ein wesentliches Optimierungspotenzial bezüglich der Assistenzbedarfskategorie „Straße“, da in diesen Fällen die bei Dunkelheit hervorragend unterstützenden, lichtbasierten Fahrerassistenzsysteme an ihre physikalischen Grenzen stoßen. Das für diese Situationen vorgesehene Schlechtwetterlicht kann zwar bei Nebel die Informationsaufnahme der „Spurbreite“ verbessern, aber die ebenso wichtigen Informationen des „Spurverlaufs“, des „Kurvenradius“ und der „Kurvenentfernung“ nur mangelhaft vermitteln (siehe Tabelle 5-1). Im Weiteren stellt eine bei Regen stark reflektierende oder bei Schneefall bedeckte Fahrbahn ein für lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme unlösbares Problem dar. Bei derartigen Witterungsverhältnissen kann dem Fahrer auch mit der besten Scheinwerfertechnologie nahezu keine der geforderten Informationen der Assistenzbedarfskategorie „Straße“ mit nur annähernd guter Qualität vermittelt werden.

Um dieses Optimierungspotenzial auszunutzen, besteht ein visionärer Lösungsansatz darin, dem Fahrer bei witterungsbedingter Sichtreduktion alle relevanten Straßeninformationen über ein kontaktanaloges Head-Up-Display zu visualisieren (siehe Abbildung 5–1). Hierfür muss der reale Straßenverlauf zunächst mit einer allwettertauglichen Sensorik detektiert werden, um ihn dann nach der Abbildungsmethode von Bubb (1975) kontaktanalog in der

Realität nachführen zu können. Somit würde der Fahrer sehr intuitiv und ablenkungsminimiert bei witterungsbedingter Sichtreduktion alle relevanten Informationen des Straßenverlaufs erhalten. Jedoch stellt ausgerechnet bei schlechten Witterungsverhältnissen die Sensierung der Straße bis dato ein unlösbares Problem dar. Es ist nämlich bislang ausschließlich auf Basis von NIR-Kamerasensoren möglich den Straßenverlauf über entsprechende Bildverarbeitungsalgorithmen automatisiert zu detektieren. Allerdings wird auch deren Reichweite bei schlechter Witterung durch Nebel, Regen oder Schnee stark reduziert, so dass eine Sensierung der Straße jenseits des menschlichen Sichtbereiches nicht möglich ist. Es ist zwar denkbar, eine kontaktanaloge virtuelle Straßennachführung durch einen Abgleich der eigenen Fahrzeugposition mit prädiktiven Streckendaten zu realisieren, jedoch sind die hierfür benötigten satellitengestützten Ortungssysteme bislang noch zu ungenau, um eine zuverlässige und exakte kontaktanaloge Superpositionierung zu gewährleisten. Aufgrund dessen ist im Folgenden eine detaillierte Untersuchung dieses Lösungskonzeptes im Rahmen von Realversuchen nicht möglich.

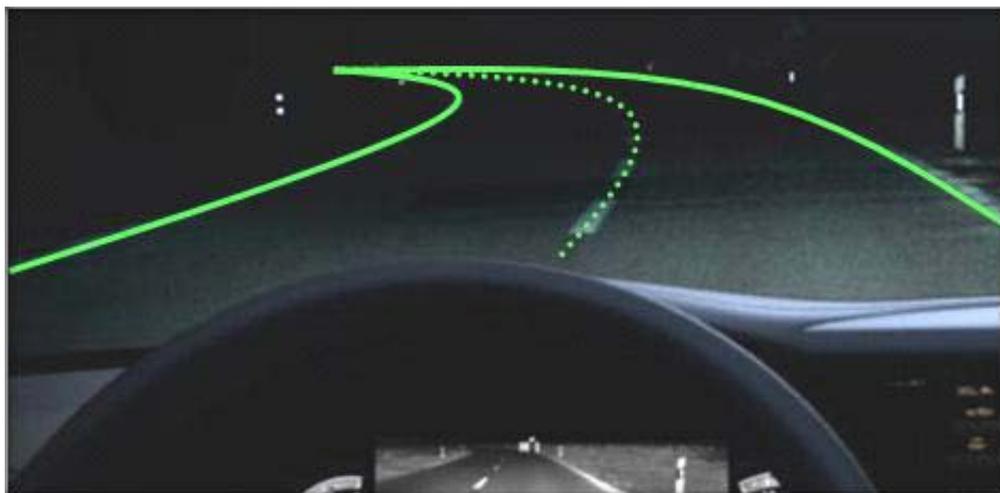


Abbildung 5–1: Kontaktanaloge Nachführung des Straßenverlaufs

Sowohl diese kontaktanaloge Nachführung des Straßenverlaufs, als auch die zuvor erwähnte Idealkombination aus kontinuierlichem Fernlicht und Kurvenlicht verfolgen das primäre Ziel, dem Fahrer bei witterungs- und nachtbedingter Sichtreduktion tagähnliche Sichtverhältnisse zu verschaffen. Jedoch zeigen die Unfalldaten aus Kapitel 3.2, dass selbst bei einer solchen idealen Straßenvoraussicht noch vermehrt mit Unfällen der Kategorie „Abkommen von der Fahrbahn“ zu rechnen ist. Der Grund hierfür besteht darin, dass der Mensch nicht in der Lage ist, den häufig durch topologische Gegebenheiten, wie beispielsweise Büsche, Bäume, Felsen oder Kuppen, verdeckten Kurvenverlauf fehlerfrei zu antizipieren und aufgrund dessen eine für den tatsächlichen Kurvenradius überhöhte Geschwindigkeit festlegt (siehe Kapitel 3.1.2). Folglich muss dem Fahrer zusätzlich durch

eine besonders geartete Assistenz das vom Kurvenradius bestimmte objektive Risiko, jenseits der maximalen visuellen Voraussicht, zuverlässig und intuitiv vermittelt werden.

Klein (2006) schlägt zur Kompensation dieses Optimierungspotenzials ein Kurvenwarnsystem vor, das dem Fahrer eine Warnung präsentiert, sobald ein derartiger Geschwindigkeitsfehler sensorisch erfasst wird. Bei dieser Art von Assistenz besteht jedoch das Hauptproblem darin, in Abhängigkeit von der Pedalstellung, dem Lenkwinkel, der Geschwindigkeit, der Querbefleunigung und der prädiktiven Streckendaten, den exakten Zeitpunkt zu ermitteln, zu dem die Warnung ausgegeben werden muss. Wird dieser zu spät gewählt, ist ein aktives Eingreifen des Fahrers nicht mehr möglich. Warnt das System zu früh, wird ein Fahrer häufig fälschlicherweise reglementiert, was besonders bei sportlichen Fahrern der Fall sein wird. Diese Tatsache wirkt sich dann wiederum stark negativ auf die Systemakzeptanz aus, was soweit gehen kann, dass der Fahrer das Assistenzsystem entnervt abschaltet und somit der Sicherheitsgewinn schlagartig auf Null reduziert wird.

Eine weitaus sinnvollere Assistenz stellt im Gegensatz zur Reglementierungsstrategie von Klein (2006) eine auf prädiktiven Streckendaten basierende kurvenadaptive Geschwindigkeitsempfehlung dar. Ziel dieser Strategie ist es folglich nicht, den Fahrer auf einen bereits erfolgten Fahrfehler aufmerksam zu machen, sondern ihm, durch eine bestmögliche Informationsaufbereitung, eine aktive Fehlervermeidung zu ermöglichen. Hierbei zeigt das System bei Kurven, die keine Geschwindigkeitsanpassung benötigen, stets die aktuell erlaubte Höchstgeschwindigkeit an. Diese muss in der Nähe des Tachometers visualisiert werden, um dem Fahrer einen möglichst ablenkungsminimierten Geschwindigkeitsabgleich zu gewährleisten. Bei engeren Kurvenradien präsentiert das System dem Fahrer mindestens 2 s vor der Kurve eine reduzierte Geschwindigkeitsempfehlung.

Sinn dieser Assistenz ist es nicht, dass der Fahrer die empfohlene geringere Kurvengeschwindigkeit exakt einhält, sondern in Abhängigkeit davon indirekt rückschließen kann, mit welchem Kurvenverlauf er jenseits seiner visuellen Reichweite zu rechnen hat. Somit wird dem Fahrer, gemäß dem Optimierungsansatz nach Bubb (2003), das objektive Risiko transparent gemacht, das er ohne Assistenz abschätzen müsste, wozu er bekanntermaßen nur bedingt in der Lage ist (siehe Kapitel 3.1.2). Gemäß der Risikokompensationstheorie ist zu erwarten, dass der Fahrer nach einer gewissen Zeit in Abhängigkeit seiner subjektiven Risikogrenze selbständig eine Risikoanpassung vornimmt, indem er referenziert auf die Geschwindigkeitsempfehlung einen individuellen Geschwindigkeitsoffset bildet (Wilde, 1982). Hieraus wird eine in der Regel höhere Geschwindigkeit resultieren, die jedoch sowohl nach dem subjektiven Risikoempfinden des Fahrers, als auch hinsichtlich des objektiven Risikos, eine sicherere Kurvendurchfahrt gewährleistet, da die Wahrscheinlichkeit einer falschen Kurvenantizipation durch die objektive Geschwindigkeitsempfehlung reduziert wird.

Ein ähnlicher Sicherheitsgewinn ist auch bei einer sogenannten Bird-View-Anzeige (BVA) zu erwarten, da sie dem Fahrer gleichermaßen das vom Straßenverlauf ausgehende objektive Risiko jenseits topologischer Sichtbarrieren transparent macht (siehe Abbildung 5–2). Überdies hinaus assistiert sie dem Fahrer zusätzlich bei witterungsbedingter Sichtreduktion. Für dieses Szenario stellt natürlich die kontaktanaloge Nachführung des realen Straßenverlaufs die ultimative HMI-Lösung dar. Mit der Bird-View-Anzeige liegt aber ein technisch realisierbares HMI-Konzept vor, das sowohl das Optimierungspotenzial witterungsbedingter Sichtreduktion, als auch topologischer Sichtreduktion, zumindest partiell, ausnutzt.

Unter einer solchen Bird-View-Ansicht wird eine auf ausschließlich prädiktiven Streckendaten basierende, stark vereinfachte, virtuelle Darstellung des vorausliegenden Straßenverlaufs verstanden (siehe Abbildung 5–2). Ampeln, Verkehrszeichen und andere Verkehrsteilnehmer werden folglich nicht dargestellt. Der Fahrer sieht in dieser Anzeige lediglich sich selbst und den vorausliegenden Straßenverlauf von schräg hinten aus einer exozentrischen Betrachterperspektive in einer virtuellen Höhe von ca. 30 m. Durch diese erhöhte Vogelperspektive erweitert sich die Voraussicht auf den stark vereinfachten Straßenverlauf, unabhängig von den Witterungsverhältnissen oder topologischen Sichtbarrieren, auf ca. 350 m. Die exakte Ist-Position des eigenen Fahrzeugs auf der Fahrbahn ist für den Nutzer aus der Anzeige aufgrund der abstrakten Darstellungsform nicht zu entnehmen. Dies hat den Vorteil, dass ein sicherheitskritisches „Fahren nach Display“ vermieden wird, wie es bei der realitätsnahen Darstellung eines bildgebenden NIR-Nachtsichtsystems im Kombi festzustellen ist (Padmos, et al., 1996). Um eine möglichst effektive, effiziente und ablenkungsminimierte Informationsaufnahme zu gewährleisten, wird dem Fahrer diese Bird-View-Ansicht in einem konventionellen Head-Up-Display mit einer Bildweite von 2,5 m präsentiert.



Abbildung 5–2: Bird-View-Anzeige

Eine solche Bird-View-Anzeige hat den entscheidenden Vorteil, dass sie dem Fahrer sowohl bei topologisch- als auch bei witterungsbedingter Sichtreduktion mit ausreichend guter Qualität die Informationen des vorausliegenden Spurverlaufs, des Kurvenradius und der Kurvenentfernung liefert, die sich jenseits der maximalen visuellen Reichweite des Fahrers befinden. Es wird vermutet, dass durch diese verbesserte Informationsaufbereitung des vorausliegenden Straßenverlaufs das Fehlerpotenzial beim Abschätzen wahrgenommener Größen stark reduziert wird und folglich Kurven stets richtig antizipiert werden. Überdies hinaus könnte die BVA in unbekanntem Terrain orientierungsunterstützend wirken und dem Fahrer dadurch ein sichereres Fahrgefühl vermitteln.

Um eine zuverlässige Aussage über die positiven und negativen Auswirkungen der Bird-View-Anzeige auf das Fahrerverhalten treffen zu können, wird sie im Rahmen von Realversuchen einer umfangreichen Analyse unterzogen (siehe Kapitel 6.1).

5.2 Sicherheitskritische Objekte

Innerhalb von Ortschaften und Städten wird die Sichtweite des Fahrers grundsätzlich durch ortsfeste Straßenbeleuchtungen immens verbessert. Im Weiteren genügt auch die Reichweite des breiter ausleuchtenden Stadtabblendlichts aufgrund der geringeren Geschwindigkeiten völlig aus, um Fußgänger frühzeitig erkennen zu können. Einzig und allein beim Abbiegen existieren noch Bereiche, die sich für den Fahrer im Dunkeln befinden. Anhand der Tabelle 5-1 ist jedoch deutlich zu erkennen, dass durch das sogenannte Abbiegelicht dieses Defizit kompensiert werden kann. Auf diese kurze Distanz können somit Fußgänger sehr gut im seitlich zugeschalteten Lichtkegel erkannt werden. Der Fahrer erhält folglich gemäß der Assistenzbedarfskategorie „Objekte“ auf diese Art und Weise in idealer Weise die Information der „Richtung“, „Entfernung“ und „Dynamik“. Folglich verfügt der Fahrer nachts durch die ortsfesten Straßenbeleuchtungen, das Stadtabblendlicht und das Abbiegelicht über einen gut ausgeleuchteten, relativ breiten und großen Sichtbereich.

Die Unfallstatistik zeigt jedoch, dass sich innerorts dennoch viele Fußgängerkollisionen ereignen (siehe Kapitel 3.2). Ein Grund hierfür ist gewiss auf das Versagen des Fahrers zurückzuführen, der trotz guter Sichtverhältnisse sicherheitskritische Objekte einfach übersieht, da vielleicht die Kontrastverhältnisse dunkel gekleideter Fußgänger für seine individuellen Sehfähigkeiten nicht ausreichen, er möglicherweise verstärkt abgelenkt ist oder eventuell situativ einen erhöhten Workload zu bewältigen hat. Außerdem kommt noch erschwerend hinzu, dass insbesondere innerorts, aufgrund der niedrigeren Geschwindigkeiten, Informationen in einem viel größeren Winkelbereich relevant sind und folglich eine größere Gefahr darin besteht, dass häufiger Objekte im peripheren Blickfeld des Fahrers übersehen werden.

Neben dieser Unaufmerksamkeit und dem daraus resultierenden Übersehen von Fußgängern spielt jedoch auch das massive Fehlverhalten der Fußgänger selbst eine entscheidende Rolle. Wenn beispielsweise ein Fußgänger aus Unachtsamkeit völlig unerwartet kurz vor einem Fahrzeug aus einer Parklücke oder vom Gehsteig auf die Straße tritt, bleibt für den Fahrer in der Regel nicht viel Zeit, um entsprechende Abhilfemaßnahmen einzuleiten.

Sowohl in diesen Situationen, als auch bei erhöhter Unaufmerksamkeit des Fahrers, ist es nicht notwendig die bereits gute Sichtweite zu vergrößern, sondern die Aufmerksamkeit des Fahrers durch eine aktive hochintuitive Warnung schnellstmöglich auf das sicherheitskritische Objekt zu lenken. Ziel ist es, dem Fahrer auf diese Art und Weise möglichst frühzeitig das Unfallrisiko bewusst zu machen. Nach Cohen et al. (1990) nimmt mit zunehmendem Abstand eines Reizes zur Fovea die Latenz bis zur Einleitung einer Reaktion zu. Aufgrund dessen müssen Objekte, die zu einer Gefährdung führen könnten, fixiert werden, damit im Falle eines Konfliktes möglichst schnell reagiert werden kann.

Um diesen Anforderungen Rechnung zu tragen, stellt das „richtungskodierte LED-Array“ eine ideale Lösung dar (siehe Tabelle 5-1). Mit Hilfe dieses Nachtsichtsystems wird der Fahrer durch die aufblitzende LED aktiv vor der „Gefahr“ gewarnt, wobei sein Blick zugleich durch die intuitive Aufmerksamkeitslenkung in die entsprechende Richtung dirigiert wird. Da sich Objekte innerorts größtenteils in mittleren Entfernungen zum Fahrzeug befinden, können diese umgehend im Lichtkegel des Stadtabblendlichts oder Abbiegelichts erkannt werden. Aufgrund dieser schnellen, intuitiven Aufmerksamkeitslenkung und der problemlosen Realisierung großer Anzeigebereiche, bis über die gesamte Windschutzscheibe des Fahrzeugs, eignet sich das LED-Array in Kombination mit den lichtbasierten Fahrerassistenzsystemen „Stadtlicht“ und „Abbiegelicht“ hervorragend, um innerorts die visuelle Wahrnehmung des Fahrers zu unterstützen und somit die Verkehrssicherheit bei Nacht zu erhöhen.

Auf Landstraßen, die wegen ihrer Unfallschwere den Brennpunkt nächtlichen Unfallgeschehens bilden, stößt jedoch diese Anzeige an ihre Grenzen. Der Grund ist in erster Linie, dass durch die bei Überlandfahrten auftretenden, hohen Geschwindigkeiten primär Informationen in sehr großen Entfernungen und in einem daraus resultierenden relativ kleinen Winkelbereich relevant sind. Auf diese großen Distanzen ist jedoch das richtungskodierte LED-Array nicht mehr in der Lage, die Richtungsinformation bezüglich des Objektes mit der erforderlichen Genauigkeit zu vermitteln. Die Winkelauflösung des LED-Arrays ist zu gering und außerdem verursachen minimale Kopfbewegungen des Fahrers massive Richtungsfehler. Erschwerend kommt noch hinzu, dass diese Fehler vom Fahrer nicht, wie innerorts, durch einen Abgleich mit dem realen Objekt kompensiert werden

können, da sich die von der Sensorik detektierten Objekte in der Regel noch außerhalb der visuellen Reichweite des Fahrers befinden. Überdies hinaus ist anhand von Tabelle 5-1 zu erkennen, dass mit dem richtungskodierten LED-Array keine Möglichkeit besteht, dem Fahrer weitere Objektinformationen bezüglich Entfernung und Dynamik zu vermitteln. Diese zusätzlichen Informationen sind jedoch unerlässlich, um eine Gefahrensituation adäquat einschätzen zu können.

Das kontinuierliche Fernlicht könnte diesbezüglich Abhilfe schaffen, indem es die Voraussicht nicht nur auf den Straßenverlauf, sondern auch auf Objekte immens verbessert. Dennoch beweisen zahlreiche Untersuchungen, dass die Erkennbarkeitsentfernung von kontrastschwachen Objekten, trotz idealer Ausleuchtung des frontalen Verkehrsraums, weit unterhalb der maximalen Scheinwerferreichweite liegen kann. Folglich ist es nicht ausgeschlossen, dass trotz kontinuierlichem Fernlicht eine dunkel gekleidete, kontrastschwache Person zu spät erkannt wird. Das markierende Fernlicht, das eine Alternative zur kontinuierlichen Fernlichtfahrt darstellt, wirkt zwar diesem Übersehen von Objekten entgegen, indem durch den ereignisbasierten punktuellen Spot eine gewisse Aufmerksamkeitslenkung des Fahrers erfolgt, dennoch ist diese Warnung relativ dezent und überdies hinaus dadurch erkauft, dass im Vergleich zur kontinuierlichen Fernlichtfahrt die Straßenvoraussicht erneut stark reduziert wird.

Unabhängig davon hat jedoch sowohl das markierende, als auch das kontinuierliche Fernlicht gleichermaßen den entscheidenden Nachteil, dass in Bezug auf die Assistenzbedarfskategorie „Objekte“, Tiere oder Fußgänger, durch den hellen Lichtkegel stark geblendet werden. Dies ist jedoch aus Gesichtspunkten der Verkehrssicherheit unter allen Umständen zu vermeiden. Im Weiteren stellt natürlich auch in diesem Fall eine witterungsbedingte Sichtreduktion für lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme ein unlösbares Problem dar. Warnende FIR-Nachsichtsysteme haben zwar aufgrund ihrer witterungsunabhängigen Sensorreichweite das Potenzial diesbezüglich Abhilfe zu schaffen, jedoch weisen die aktuellen HMI-Varianten immer noch gravierende Mängel auf. So ist es für den Fahrer aufgrund der schlechten Informationsaufbereitung unmöglich, in dem nur begrenzt zur Verfügung stehenden Zeitfenster, neben der aktiven Warnung noch weitere Objektinformationen bezüglich der „Richtung“, „Entfernung“ und „Dynamik“ aufzunehmen.

Angesichts dessen besteht folglich auf Landstraßen weder mit aktuellen Nachsichtsystemen noch mit lichtbasierten Fahrerassistenzsystemen die Möglichkeit, dem Fahrer mit ausreichend guter Qualität alle geforderten Informationen der Assistenzbedarfskategorie „Objekte“ zu vermitteln. Die Anforderungen an neue innovative sichtverbessernde Assistenzsysteme bestehen folglich darin, den Fahrer bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion nicht nur zuverlässig vor Gefahren zu warnen, sondern überdies hinaus in

kürzester Zeit, möglichst intuitiv und ablenkungsminimiert alle weiteren Informationen der Objektrichtung, -entfernung und -dynamik zu vermitteln, ohne dabei andere Verkehrsteilnehmer zu beeinträchtigen. Nur dann wird es einem Fahrer ermöglicht, eine sicherheitskritische Situation frühzeitig zu erkennen, diese adäquat einzuschätzen und eine bevorstehende Kollision durch entsprechende Maßnahmen abzuwenden.



Abbildung 5–3: Kontaktanaloge Markierung sicherheitskritischer Objekte im direkten Blickfeld des Fahrers

Um dieses Optimierungspotenzial voll auszuschöpfen, besteht ein vielversprechendes Lösungskonzept in der kontaktanalogen Markierung sicherheitskritischer Objekte im direkten Blickfeld des Fahrers (siehe Abbildung 5–3). Bei hohen Geschwindigkeiten und einer geringen Scheinwerfervoraussicht stellt diese HMI-Variante die wohl effektivste und effizienteste Möglichkeit dar, um dem Fahrer sicherheitsrelevante Informationen schnellstmöglich zu vermitteln. Grund hierfür ist der auf ein Minimum reduzierte Dekodieraufwand, da dem Fahrer die virtuellen Informationen, analog zu seinem räumlichen Vorstellungsvermögen visualisiert werden und somit keine Interpretationsschwierigkeiten auftreten. Ein noch nicht im Sichtbereich befindliches Objekt wird anhand einer allwettertauglichen FIR-Sensorik in einer Entfernung von ca. 100 m automatisiert detektiert und mit einer virtuellen Warnsymbolik im direkten Blickfeld des Fahrers in der Realität markiert. Dieses Icon nimmt der Fahrer kontinuierlich exakt an der Position wahr, an der sich auch das bislang noch nicht sichtbare reale Objekt befindet. Folglich wird der Fahrer schnellstmöglich gewarnt und erhält zugleich sehr intuitiv und ablenkungsminimiert die sicherheitsrelevanten Informationen der Objektrichtung, -entfernung und -dynamik.

Nach Bergmeier et al. (2008) eignet sich für eine derartige kontaktanaloge Markierung von sicherheitskritischen Objekten ein informationsreduzierter roter Rahmen hervorragend, um

dem Fahrer diese geforderten Objektinformationen zuverlässig und ablenkungsminimiert zu vermitteln. Untersucht wurde mit Hilfe von animierten Videoszenen die subjektive Güte unterschiedlicher kontaktanaloger Warnicons. Im Rahmen dieser Probandenversuche erzielt der einfache rote Rahmen im Vergleich zu anderen Alternativsymboliken, wie Manikin oder Warnschild, bezüglich der subjektiven Akzeptanz, mit Abstand die besten Ergebnisse. Grund hierfür sind die minimalen Maskierungseffekte, sobald das markierte reale Objekt in den visuellen Sichtbereich des Fahrers eintritt (Schmidt, 2006).

Zwei weitere Untersuchungen im Lichtkanal, bei denen die Probanden unter Variation der Okularität und der Kopffreiheit die Entfernung der virtuellen Warnsymboliken schätzen mussten, lieferten jedoch bezüglich des einfachen roten Rahmens anfangs schlechtere Ergebnisse (Scharpf, 2005; Hofbeck, et al., 2007). Die beiden Studien zeigen, dass Symboliken mit einem besseren Bodenbezug, wie es die Icons Manikin und Warnschild vorweisen, beim Erstkontakt und ohne referenzierbarem Realobjekt exakter in der erwünschten Suggestionse Entfernung wahrgenommen werden. Beim einfachen roten Rahmen treten hingegen signifikante Schätzfehler auf. Jedoch verflüchtigt sich dieser Negativeffekt, sobald die Probanden gelernt haben, dass die Größe des Rahmens der Größe eines realen Menschen entspricht. Nach diesem Lerneffekt schätzen die Probanden die Entfernung des einfachen roten Rahmens genauso gut wie im Falle der alternativen Symboliken (Bergmeier, 2008). Folglich vermittelt der einfache rote Rahmen nach dem Erstkontakt eine exakte Tiefeninformation, ohne dabei, wie alle anderen Symboliken, den Fahrer durch Maskierungseffekte von der primären Fahraufgabe abzulenken.

Die zeitliche Darbietung der kontaktanalogen Objektmarkierung ist nach Bergmeier et al. (2008) idealer Weise so zu gestalten, dass der rote Rahmen umgehend in der exakten Entfernung des realen Objektes erscheint, sobald die Sensorik eine Gefahrensituation detektiert hat (ca. 80 m bis 120 m). Bis zu einer Entfernung von ca. 50 m vor dem Fahrzeug wandert diese virtuelle Markierung mit voller Leuchtdichte passgenau mit dem sicherheitskritischen Objekt mit. Erst wenn das reale Objekt für den Fahrer im Lichtkegel des Abblendlichts, das im Mittel eine Erkennbarkeitsentfernung von ca. 50 m aufweist, sichtbar wird, beginnt die kontaktanaloge Warnsymbolik auszufaden, so dass sie für den Fahrer in einer Entfernung von ca. 30 m völlig verblasst. Auf diese Art und Weise ist für den Fahrer das reale Objekt und die virtuelle Objektmarkierung, lediglich in einem sehr kurzen Zeitbereich, synchron sichtbar. Durch diese Performance wird die Ablenkungsgefahr aufgrund von Maskierungseffekten, bei denen das reale Objekt vom virtuellen Warnicon verdeckt wird, zusätzlich reduziert. Im Weiteren wird durch diese Informationsdarbietung die Fahreraufmerksamkeit primär auf das reale Objekt gelenkt und die Gefahr eines sicherheitskritischen „Attention Capture“ unterbunden (Prinzel, et al., 2004).

Kirchner (2006) untersuchte diese kontaktanaloge HMI-Variante im Rahmen eines umfangreichen Fahrsimulatorversuches. Neben der hervorragenden Reproduzierbarkeit und der problemlosen Eliminierung von ergebnisverfälschenden Störeinflüssen, wie beispielsweise situations- und sensorbedingte Schwankungen der Detektionsentfernung, haben Fahrsimulatorversuche den weiteren Vorteil, dass die kontaktanaloge Variante als makellose technische Ausführung untersucht werden kann. Die Simulationsumgebung ermöglicht es nämlich problemlos Objekte exakt kontaktanalog zu markieren, ohne dass dabei die Darstellungsqualität für den Fahrer durch denkbare Störeinflüsse wie beispielsweise in der Realität zu erwartende Latenzzeiten der Kamerasensorik, optische Abbildungsfehler, eine beschränkte Eye-Box-Größe, Vibrationen oder Nick- und Wankbewegungen des Fahrzeugs, in irgendeiner Art und Weise negativ beeinflusst wird. Dieses perfekt kontaktanalog markierende Nachtsichtsystem wurde innerhalb dieser Fahrsimulatorversuche mit einem bildgebenden und vier unterschiedlich warnenden Night-Vision-Varianten verglichen, die als Anzeigeort das konventionelle CID und HUD verwenden. Für die Versuche wurden insgesamt 24 Probanden herangezogen, die nach einer assistenzfreien Baselinefahrt jede der sechs HMI-Varianten innerhalb einer 25-minütigen Nachtfahrt erprobten. Die erhobenen Daten umfassten ein Versuchsprotokoll, Blickdaten, CAN-Daten und Fragebogendaten.

Die Ergebnisse bestätigen, dass bei einer derartig perfekten Visualisierung, ohne jegliche Art von Störeinflüssen, die kontaktanaloge Variante sowohl objektiv, als auch subjektiv, hinsichtlich Effektivität, Effizienz, Ablenkung und Gefallen, ausnahmslos die besten Ergebnisse erzielt. Die Fahrsimulatorversuche eignen sich somit hervorragend, um die HMI-Varianten bei perfekten Rahmenbedingungen untereinander qualitativ zu differenzieren. Da jedoch im Vergleich zur Realität sowohl die Sichtverhältnisse, als auch das Risikobewusstsein des Fahrers stark divergieren, ist eine quantitative Übertragung der Ergebnisse auf die Realität nicht ohne weiteres möglich. Des Weiteren ist es fraglich, ob eine kontaktanaloge Visualisierung in der Realität, in Anbetracht der zahlreichen Störeinflüsse, so makellos realisiert werden kann, wie sie im Fahrsimulator untersucht wurde. Bereits die technische Realisierung eines realen Night-Vision tauglichen kontaktanalogen Head-Up-Displays stellt nämlich ein bis dato ungelöstes Problem dar. Wie bereits in Kapitel 4.2.3 erklärt, genügt keine der bislang existierenden Visualisierungsmethoden den Anforderungen einer Applikation im Bereich Night-Vision. Hierfür müssen nämlich dem Fahrer, unter Berücksichtigung kleiner Kopfbewegungen, berührungslos und ohne zeitraubende Kalibrierung aufrechtstehende virtuelle Informationen zuverlässig in mittleren bis sehr großen Entfernungen kontaktanalog visualisiert werden. Ein vielversprechender Ansatz von Bubb (1975), der sich hervorragend zur kontaktanalogen Visualisierung von Navigations-, Längs-

und Querführungsinformationen eignet, ermöglicht es jedoch nicht, stehende virtuelle Informationen in sehr großen Entfernungen darzustellen, so dass eine Übertragung dieser Technologie auf die Applikation Night-Vision ausgeschlossen ist.

In Anbetracht dessen wird in Kapitel 6.2.1.1 eine neue automotive-taugliche Methode vorgestellt, um auch stehende sicherheitskritische Objekte in großen Entfernungen kontaktanalog markieren zu können. Dieses Funktionsprinzip wird anschließend in Form eines konzeptionellen kontaktanalogen Head-Up-Displays, unter Berücksichtigung der Berührungslosigkeit, in ein Realfahrzeug integriert und zur Realisierung einer kontaktanalogen Markierung von sicherheitskritischen Objekten mit einer FIR-Sensorik verknüpft, die über diverse Bildverarbeitungsalgorithmen automatisiert, Fußgänger detektiert (siehe Kapitel 6.2.1.2). Abschließend wird diese innovative HMI-Variante im Rahmen eines umfangreichen Feldexperiments unter Realbedingungen mit aktuell auf dem Markt befindlichen Nachtsichtsystemen und Nachtsichtsystemen der nächsten Generation verglichen.

Diese Untersuchungen werden klären, ob es trotz der erschwerenden Störeinflüsse, in Form von variierenden Fahrerkopfpositionen, Fahrzeugvibrationen, Nick- und Wankbewegungen, Sensorgrenzen (Detektionsentfernung, Latenzzeiten, False Alarms und Miss Alarms), Abbildungsfehlern und Maskierungseffekten, technisch machbar ist, eine derartige innovative HMI-Variante berührungslos und ohne zeitraubenden Kalibrierungsaufwand mit ausreichend guter Qualität zu realisieren, so dass in dem abschließenden Realversuch, im Vergleich zu den vorangegangenen Fahrsimulatorversuchen, vergleichbar gute Ergebnisse erzielt werden.

6 Versuchsreihen

Die Realversuche klären, inwieweit die Bird-View-Anzeige und das kontaktanalog markierende Head-Up-Display die ermittelten Assistenzlücken bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion kompensieren können. Für die vorliegenden Versuche werden ausnahmslos verbundene Stichproben verwendet und über versuchsspezifische Messeinrichtungen sowohl subjektive als auch objektive Daten ermittelt. Zur Auswertung dieser gemessenen Rohdaten werden diese zunächst versuchsspezifisch aufbereitet, um sie einer statistischen Analyse zugänglich zu machen. Die anschließende Vorgehensweise zur statistischen Überprüfung der Datensätze ist für alle Versuchsreihen wie folgt standardisiert (Bortz, 2005).

Zunächst werden die gewonnenen Daten mittels des Kolmogorov-Smirnov-Tests auf Normalverteilung überprüft. Liegt diese vor und haben die zu analysierenden Daten mindestens Intervallskalenniveau, werden zur weiteren Analyse parametrische Testverfahren (Varianzanalyse und t-Test) herangezogen. Sind die Daten hingegen nicht normalverteilt oder lediglich auf Nominal- bzw. Ordinalskalenniveau, müssen im Gegensatz dazu nicht-parametrische Prüfverfahren (Friedmann-Test und Wilcoxon-Test) verwendet werden. Nach dieser Überprüfung werden die Datensätze in einem zweiten Schritt zunächst global hinsichtlich auftretender Effekte analysiert. Zu diesem Zweck wird, in Abhängigkeit der Verteilungsart und des Skalenniveaus, die Varianzanalyse als parametrisches Testverfahren, bzw. der Friedmann-Test als nicht-parametrisches Testverfahren, verwendet. Resultiert aus dieser Überprüfung eine größere Fehlerwahrscheinlichkeit als das festgelegte Signifikanzniveau, so kann keine zuverlässige Aussage über den Einfluss der unabhängigen Variable auf die abhängige Variable getroffen werden. Von einer aufwändigen Detailanalyse kann in diesem Fall abgesehen werden. Ergibt die globale Überprüfung hingegen eine geringere Fehlerwahrscheinlichkeit als das festgelegte Signifikanzniveau, so liegen Effekte vor, die durch einzelne paarweise Vergleiche spezifiziert werden müssen. Für einen solchen Vergleich zweier Variablen wird als parametrisches Verfahren der sogenannte zweiseitige t-Test und als nicht-parametrisches Verfahren der zweiseitige Wilcoxon-Test verwendet. Ziel dieser letzten Analyse besteht darin, eine zuverlässige Aussage darüber treffen zu können, ob sich zwei Variablen signifikant unterscheiden, bzw. identisch sind. Für ersteres wird im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit bei allen Versuchsreihen als akzeptierte Irrtumswahrscheinlichkeit ein α -Fehler von kleiner oder gleich 5 % angesetzt. Als absolut identisch werden die Variablen bei einem α -Fehler von größer als 25 % angenommen. Manche Fragestellungen verlangen eine multiplikative Überprüfung mehrerer unabhängiger

Variablen in der gleichen Grundgesamtheit. Hieraus resultiert eine Kumulation des α -Fehlers, die mittels der Bonferroni-Korrektur berichtigt wird.

Auf eine detaillierte numerische Darstellung dieser statistischen Analyseergebnisse wird verzichtet. Stattdessen werden die Signifikanzen und Gleichheiten direkt in den Diagrammen durch zusätzliche graphische Elemente kenntlich gemacht. Identische Varianten werden mit einer Linie verbunden, an deren Enden jeweils ein Punkt ist. Auf diese Art und Weise werden die unabhängigen Variablen bei Identität gewissermaßen miteinander verschränkt. Signifikante Unterschiede werden hingegen mit einem Doppelpfeil gekennzeichnet, der ein Abstoßen der Varianten symbolisiert. Liegt der α -Fehler im Graubereich zwischen 5 % und 25 % ist keine verlässliche Aussage möglich, ob die Nullhypothese beibehalten oder abgelehnt werden muss. In diesem Fall werden die Ergebnisse auch durch keine graphischen Elemente in Beziehung gesetzt.

6.1 Bird-View-Anzeige

Inwieweit die ermittelten Defizite aktueller sichtverbessernder Assistenzsysteme durch die Bird-View-Anzeige (BVA), die bereits in Kapitel 5.1 beschrieben wurde, kompensiert werden können, wird folgender Realversuch klären. Die BVA wird im Vergleich zu einer nichtassistierten Reverenzfahrt hinsichtlich Unterstützung, Ablenkung, Fahrverhaltensänderungen und Gefallen analysiert (Rindle, et al., 2006).

6.1.1 Versuchsdesign

Das Versuchsdesign umfasst die Beschreibung des Probandenkollektivs, des Versuchsträgers, der Versuchsstrecke, der erfassten Messdaten und des Versuchsablaufs. Für die Versuche werden, mit 9 Frauen und 15 Männern, insgesamt 24 Probanden herangezogen. Das Probandenkollektiv weist, mit einem Altersspektrum zwischen 20 und 76 Jahren, ein Durchschnittsalter von 37 Jahren auf. Keine der Testpersonen verfügt über Erfahrungen mit Head-Up-Displays, so dass der beim Erstkontakt auftretende Gewöhnungseffekt bei allen Probanden gleichermaßen zum Tragen kommt (Gengenbach, 1997). Des Weiteren erfüllen alle Versuchspersonen die anthropometrischen Voraussetzungen, um das HUD zuverlässig wahrnehmen zu können. Durch diese Anforderungen an das Probandenkollektiv wird einer möglichen Ergebnisverfälschung entgegengewirkt.

Der Versuchsträger, ein Audi A8 Quattro, verfügt über Xenonscheinwerfer und ein integratives Head-Up-Display (Abbildung 6–1). Dieses hat einen Öffnungswinkel von $4^\circ \times 2^\circ$, eine virtuelle Bildweite von 2,5 m, eine Eye-Box-Größe von 130 mm x 80 mm und eine

Bildposition von -7° in Reverenz zur horizontalen Sichtachse des Fahrers. Durch die hieraus resultierende gute Sichtbarkeit und den geringen Akkommodations- und Adaptionaufwand ist eine zuverlässige und schnelle Informationsaufnahme gewährleistet. Daneben verfügt das HUD über eine vertikale Verstellung, so dass die exakte Displayposition auf die individuellen anthropometrischen Eigenschaften der Probanden feinadaptiert werden kann. Eine zusätzliche Dimmfunktion vermeidet bei variierenden Lichtverhältnissen in der Umgebung eine störende Blendung des Fahrers. In diesem Head-Up-Display wird dem Fahrer als zusätzliche Assistenz eine abstrakte Bird-View-Ansicht des vorausliegenden Streckenverlaufs präsentiert, so dass seine Voraussicht bezüglich Spurverlauf, Kurvenentfernung und Kurvenradius auf ca. 350 m erweitert wird. Moderne Navigationssysteme verfügen bereits über eine solche abstrakte Streckendarstellung, so dass es naheliegend ist, diese prädiktiven Streckendaten zur Realisierung der BVA heranzuziehen. Zunächst wird hierfür der umfangreiche Informationsgehalt eines konventionellen Navigationssystems auf den perspektivischen Streckenverlauf reduziert. Da jedoch ein derartiges Gerät völlig proprietär ist, bietet es folglich keine Schnittstelle zur Datenextraktion. Aufgrund dessen wird das Navigationssystem zunächst mit einer Videokamera abgefilmt und das Videosignal in das HUD eingespeist. Störungen durch Streulichter und Vibrationen werden dadurch kompensiert, dass die Apparatur fest im Kofferraum des Versuchsträgers auf einer abdeckbaren Plattform montiert ist (siehe Abbildung 6–1). Die GPS-Antenne des Navigationssystems befindet sich direkt an der Heckscheibe des Fahrzeugs. Außerdem ist der Versuchsträger mit einem CAN-Datenlogger und einem Blickerfassungssystem (DIKABLIS) ausgerüstet (Ergoneers GmbH, 2008).



Abbildung 6–1: Versuchsträger der Bird-View-Anzeige

Als Versuchsstrecke wird ein Landstraßenkurs mit wenigen Ortsdurchfahrten gewählt. Die primäre Anforderung an diese Strecke besteht darin, dass sie relativ viele, aus dem Streckenverlauf resultierende Gefahrenquellen aufweist, die der Fahrer erst sehr spät aufgrund topologischer Sichtbarrieren erkennen kann. Aufgrund dessen wird ein schlecht-einsehbarer, sehr kurvenreicher Streckenverlauf mit vielen Kuppen gewählt. Hierbei ist es wichtig, dass es sowohl Kuppen mit darauf folgender Kurve als auch mit darauf folgender Gerade gibt. In solchen Situationen kann die Bird-View-Anzeige ihren Nutzen ausspielen, indem sie dem Fahrer Informationen liefert, die sich jenseits seiner maximalen visuellen Reichweite befinden. Somit lassen sich mögliche Auswirkungen der BVA auf das Fahrverhalten untersuchen.

Der kurvenreiche Landstraßenkurs verfügt über Fahrbahnmarkierungen und ein befestigtes Seitenbankett, um bei der visioanalytischen Datenermittlung, mittels Versuchsprotokoll, zuverlässig Spurfehler identifizieren zu können. Zudem zeichnet sich die Versuchsstrecke durch eine geringe Verkehrsdichte aus, um Ergebnisverfälschungen durch beispielsweise vorausfahrende Fahrzeuge zu vermeiden. Bei einer Folgefahrt orientiert sich ein Fahrer nämlich ausschließlich an dem vorausfahrenden Fahrzeug, so dass eine Antizipation des vorausliegenden Straßenverlaufs nicht mehr notwendig ist und die BVA keinen Mehrwert liefert. Die Strecke ist für alle Probanden unbekannt. Somit wird sichergestellt, dass alle schlechteinsehbaren Kurven regelbasiert abgeschätzt werden müssen und keine fertigkeitbasierten Handlungen darstellen (Rasmussen, 1983). Um die Vergleichbarkeit der beiden unabhängigen Variablen, BVA-Fahrt und Baseline-Fahrt, sicherzustellen, ist es essentiell, zwei ähnliche Versuchsstrecken auszuwählen. Bei lediglich zwei unabhängigen Variablen bietet es sich an, denselben Streckenabschnitt einmal hin und einmal wieder zurückzufahren. Dadurch wird eine sehr gute Vergleichbarkeit der BVA-Fahrt mit der Baseline-Fahrt bewirkt. Ein kleiner Wendeabschnitt zwischen den beiden Streckenabschnitten lässt den Fahrer nicht bemerken, dass er dieselbe Strecke in entgegengesetzter Richtung zurückfährt, so dass der Unbekanntheitscharakter erhalten bleibt.

Die ausgewählte Versuchsstrecke liegt nördlich von Freising, in einem kurvenreichen und bergigen Gebiet. Der kurze Anfahrtsweg von der TU München beträgt etwa 20 km und wird als Eingewöhnungsfahrt genutzt. Der Streckenabschnitt zur Erprobung einer Variante ist ca. 30 km lang und verfügt über sechs Kuppen, von denen drei unmittelbar danach eine Kurve aufweisen. Die Wendeschleife, bei der die Datenaufzeichnung gestoppt wird und alle Vorbereitungen für die zweite Variante getroffen werden, hat eine Länge von ca. 4 km (Abbildung 6–2).



Abbildung 6–2: Versuchsstrecke

Während der Versuchsfahrten werden für jede Variante über diverse Messmethoden subjektive und objektive Daten ermittelt. Die subjektive Datenerfassung erfolgt über versuchsspezifische Fragebögen. Es finden überwiegend gewichtete Fragestellungen Verwendung, bei denen der Proband auf einer sechsstufigen Bewertungsskala seine subjektive Entscheidung fällt. Die Versuchspersonen beantworten einen Anfangsfragebogen vor Beginn und einen Abschlussfragebogen nach Beendigung der Versuchsfahrten. Der Anfangsfragebogen dient zur Ermittlung personenspezifischer Hintergrundinformationen. Hierbei besteht das Hauptziel darin, die Probanden hinsichtlich ihrer Risikobereitschaft und ihres Fahrstils zu kategorisieren. Der Abschlussfragebogen hält die subjektive Meinung der Probanden bezüglich der BVA fest, die sich im Laufe der Erprobung herauskristallisiert. Die Fragestellungen sind gezielt zur Ermittlung des subjektiven Unterstützungsgrades, der subjektiven Fahrverhaltensänderung, der subjektiven Ablenkung und des subjektiven Gefallens ausgelegt.

Die objektiven Messdaten werden im Rahmen der Versuche mit einem CAN-Datenlogger, einem Blickerfassungssystem und einem Versuchsprotokoll zeitlich synchronisiert aufgenommen. Im Detail werden über den CAN-Bus des Versuchsträgers Lenk-, Pedal- und Fahrdynamikdaten mit einer Abtastrate von 25 Hz abgegriffen und in einem Datenfile aufgezeichnet. Durch den Lenkradwinkel, die -richtung und die -geschwindigkeit können Fahrfehler detektiert werden, die sich durch eine ruckartige Lenkbewegung auszeichnen und auf eine erhöhte Ablenkung des Fahrers schließen lassen. Anhand der Kennwerte

„Standardabweichung des Lenkradwinkels“ und „Lenkwinkelkorrekturen pro Sekunde“ kann im Weiteren der Einfluss der BVA auf die Querführung, respektive Spurhaltegüte, analysiert werden. Hinsichtlich der Pedaleriedaten wird das Hauptaugenmerk auf die Betätigung von Brems- und Gaspedal gelegt. Insbesondere bei Kuppen kann hierdurch ein riskanter Fahrstil quantifiziert werden. Bei den Fahrdynamikdaten werden insbesondere die Querbesehleunigung und die Geschwindigkeit betrachtet. Die Kennwerte „maximale und mittlere Querbesehleunigung in Kurven“, „maximale und mittlere Geschwindigkeit“ und „relativer Anteil der Geschwindigkeitsüberschreitungen“ geben Aufschluss über den Fahrstil bzw. eine objektive Fahrverhaltensveränderung.

Mit Hilfe des kopfbasierten Blickerfassungssystems „DIKABLIS“ wird das Blickverhalten der Probanden analysiert. Die versuchsspezifischen Areas-of-Interest (AOI) sind das Head-Up-Display, das Kombi und die Umwelt. Unter Letzterem sind alle AOIs subsumiert, die zur Erfüllung der primären Fahraufgabe benötigt werden. Diese sind die Fahrbahn, Verkehrszeichen, andere Verkehrsteilnehmer, sowie Innen- und Außenspiegel. Für jedes dieser AOIs werden die Blickhäufigkeiten und die Blickdauern ermittelt. Hieraus lassen sich diverse Kennwerte ableiten, die insbesondere Aufschluss über die Ablenkungswirkung und die Benutzungsstrategie der BVA liefern (SAE J-2396, 1999; ISO/TS 15007-2, 2001; EN ISO 15007-1, 2002; Schweigert, 2003; Menn, et al., 2005; Saito, 1992).

Das Versuchsprotokoll wird vom Versuchsleiter visioanalytisch erstellt. Ziel ist es, den Fahrstil und das Fahrverhalten der Probanden zu analysieren und dies ausschließlich in Situationen, in denen jegliche Ergebnisverfälschung durch externe Störeinflüsse ausgeschlossen werden kann. Neben dem Triggern von Schlüsselstellen und entgegenkommenden, bzw. vorausfahrenden Fahrzeugen besteht die wichtigste Aufgabe des Versuchsprotokolls in der Dokumentation von Spurfehlern, geschnittenen Kurven, Geschwindigkeitsüberschreitungen und der individuellen Richtgeschwindigkeit. Diese Daten lassen objektiv auf eine Fahrstiländerung rückschließen. Des Weiteren beinhaltet das Protokoll eine detaillierte Analyse des Fahrverhaltens beim Passieren der sechs Kuppen. Der generierte Kennwert „Kuppenverhalten“ stellt eines der wichtigsten Untersuchungskriterien dar, um den Einfluss der BVA bezüglich Unterstützung und Fahrverhaltensänderungen zu analysieren. Die Ergebnisse des Versuchsprotokolls werden stets in Kombination mit den objektiven CAN- und Blickdaten betrachtet. Bei der Analyse des Kuppenverhaltens werden zunächst alle unbrauchbaren Situationen anhand des Versuchsprotokolls herausgefiltert, bei denen eine Beeinflussung des Fahrers durch Gegenverkehr oder andere Störfaktoren vorliegt. Für alle anderen Situationen wird im Falle der BVA-Fahrt anhand der Blickdaten überprüft, ob die Probanden vor der Kuppe die Bird-View-Anzeige in Anspruch genommen haben. Anschließend werden für beide Varianten die CAN-Daten analysiert. Anhand des zeitlichen Geschwindigkeitsverlaufs und der Brems- und

Gaspedalaktivität kann festgestellt werden, ob die zusätzliche Information der BVA genutzt wird und in Folge dessen beim Passieren der Kuppe die Geschwindigkeit angepasst wird oder nicht.

Die beiden Versuchsfahrten, Baseline und BVA, werden ausschließlich nachts durchgeführt und nehmen ca. 2,5 Stunden in Anspruch. Zu Beginn eines Versuches erhält jeder Proband eine Einführung hinsichtlich des Versuchsablaufs. Danach werden die verwendeten technischen Systeme HUD, BVA, Blickerfassungssystem und Fahrzeug erklärt, so dass alle Probanden auf ein äquivalentes Wissensniveau angehoben werden. Im Anschluss daran wird der Anfangsfragebogen beantwortet. Als Nächstes stellt der Proband Sitz, Spiegel und HUD auf seine individuellen Bedürfnisse ein. Bei der Einstellung des HUDs ist darauf zu achten, dass es knapp über der Motorhaube schwebt und sich somit nicht im zentralen Blickfeld des Fahrers befindet. Im Weiteren wird die Helligkeit des HUDs, in Abhängigkeit von den externen Lichtverhältnissen so eingestellt, dass die BVA vom Fahrer einwandfrei wahrgenommen werden kann und ihn zugleich nicht blendet. Im Anschluss daran beginnt die 20-minütige Eingewöhnungsfahrt zum Startpunkt der Versuchsstrecke. Hierbei ist die BVA aktiviert, um nicht nur eine Kurzzeitgewöhnung an das Fahrzeug, sondern auch an das für die Probanden völlig neue HMI zu gewährleisten.

Bei Ankunft an der Versuchsstrecke wird das kopfbasierte Blickerfassungssystem für einen komfortablen rutschfreien Sitz an die Kopfform des Probanden angepasst und kalibriert. Anschließend wird die Datenaufzeichnung des CAN-Datenloggers und des Blickerfassungssystems gestartet. Danach beginnt die erste der beiden Versuchsfahrten. Da es sich, mit der Baseline-Fahrt und der BVA-Fahrt, um lediglich zwei unabhängige Variablen handelt, ist bei einer Kollektivgröße von 24 Probanden eine vollständige Permutation möglich. Somit beginnen 12 Versuchspersonen mit der BVA-Fahrt und die andere Hälfte mit der Baseline-Fahrt, um ergebnisverfälschende Lerneffekte zu egalisieren. Während der Versuchsfahrt erhält der Fahrer durch den Versuchsleiter stets die Information, wohin er fahren muss. Des Weiteren darf der Proband lediglich das Abblendlicht verwenden. Hierdurch wird für alle Probanden stets eine Vergleichbarkeit der Versuchsfahrten gewährleistet. Im Weiteren werden durch diese zusätzliche Reduktion der visuellen Straßenvoraussicht die Situationen gehäuft, in denen die BVA einen Mehrwert liefert. Die Probanden werden nicht dazu angehalten, sich strikt an die Geschwindigkeitsbegrenzungen zu halten. Stattdessen ist ein natürliches Fahrverhalten erwünscht. Während der gesamten Fahrt führt der auf der Beifahrerseite sitzende Versuchsleiter das Versuchsprotokoll. Auf dem Rücksitz kontrolliert ein Assistent die reibungslose Aufzeichnung der Blick- und CAN-Daten. Am Ende des ersten Streckenabschnitts werden die generierten Daten gesichert und die Vorbereitungen für die Erprobung der zweiten Variante getroffen. Hierfür bleibt während der Verbindungsschleife

genügend Zeit. Am definierten Startpunkt des zweiten Streckenabschnitts wird die Datenaufzeichnung erneut gestartet und der Proband fährt unwissentlich in entgegengesetzter Richtung zurück. Am Ende dieser zweiten Versuchsfahrt füllt die Testperson den Abschlussfragebogen aus. Die Versuche werden mit dieser standardisierten Vorgehensweise für alle 24 Probanden durchgeführt. Nach dem Abschluss aller Versuche werden die generierten Rohdaten aufbereitet, so dass sie einer statistischen Analyse unterzogen werden können (siehe Kapitel 6.1).

6.1.2 Hypothesen

Die Bird-View-Anzeige wird hinsichtlich der vier Kategorien „Unterstützung“, „Fahrverhaltensänderung“, „Ablenkung“ und „Gefallen“ analysiert. Die abgeleiteten Hypothesen beruhen auf der Tatsache, dass die BVA zusätzliche Informationen des vorausliegenden Streckenverlaufs anbietet, die der Fahrer aufgrund topologischer Sichtbarrieren oder witterungsbedingter Sichtreduktion nicht wahrnehmen kann.

Es wird vermutet, dass der Fahrer durch diese zusätzliche Assistenz bei der Abschätzung wahrgenommener Größen, respektive bei der Antizipation des vorausliegenden Streckenverlaufs, unterstützt wird. Hierdurch könnte in Kurven das Risiko reduziert werden, aufgrund eines Schätzfehlers von der Straße abzukommen. Im Rahmen der Ergebnisdarstellung könnte sich dies durch eine subjektive Steigerung der Fahrsicherheit und eine situationsadäquate Anpassung der Längsdynamik bemerkbar machen. Die bessere Kenntnis über den vorausliegenden Streckenverlauf könnte sich jedoch auch, gemäß der Risikohomöostasethorie nach Wilde (1982), in einer objektiv riskanteren Fahrverhaltensänderung äußern. Hierfür wird das Geschwindigkeits-, Kurven- und Kuppenverhalten der Probanden detailliert analysiert. Ein weiterer negativer Einfluss der BVA könnte eine verstärkte Ablenkung von der primären Fahraufgabe darstellen. Bekannte Effekte sind das „Attention Capture“ (Prinzel, et al., 2004) und das „Fahren nach Display“ (Padmos, et al., 1996). Hierüber gibt insbesondere das Blickverhalten der Probanden Aufschluss. Ein letzter wichtiger Untersuchungspunkt ist die Akzeptanz, bzw. das Gefallen der HMI-Variante. Dieser subjektive Systemgesamteindruck hat eine hohe Bedeutung. Erzielt die BVA keine ausreichend hohe Akzeptanz, wird ein wohlmöglich objektiver Sicherheitsgewinn ungenutzt bleiben.

Die auf diesen theoretischen Annahmen basierenden Hypothesenpaare bestehen jeweils aus einer Einfluss verneinenden Nullhypothese H_0 und einer adversativen Alternativhypothese H_1 . Sie sind zusammen mit den entsprechenden Untersuchungskennwerten, anhand derer eine objektive Verifizierung bzw. Falsifizierung vorgenommen wird, in Tabelle 6-1 aufgeführt.

Tabelle 6-1: Hypothesen / Bird-View-Anzeige

Hypothesen			Kennwerte	
Unterstützung	U_1	H ₀	Die Zusatzinformation der BVA hat keinen Einfluss auf die Antizipation des vorausliegenden Kurvenverlaufs.	<ul style="list-style-type: none"> • Subjektive Darstellungsqualität • Subjektive Interpretationsgenauigkeit • Subjektive Unterstützung • Kuppenverhalten
		H ₁	Die Zusatzinformation der BVA beeinflusst die Antizipation des vorausliegenden Kurvenverlaufs.	
	U_2	H ₀	Das Fahren mit BVA hat keinen Einfluss auf die Spurhaltegüte.	<ul style="list-style-type: none"> • Standardabweichung des Lenkradwinkels • Lenkwinkelkorrekturen pro Sekunde • Anzahl der Spurfehler
		H ₁	Das Fahren mit BVA beeinflusst im Vergleich zur Baseline-Fahrt die Spurhaltegüte.	
Fahrverhaltensänderung	F_1	H ₀	Das Fahren mit BVA hat keinen Einfluss auf das Kuppenverhalten.	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung der BVA vor der Kuppe durch Blickzuwendung • Brems- und Gaspedalaktivität • Zeitlicher Geschwindigkeitsverlauf
		H ₁	Das Fahren mit BVA beeinflusst das Kuppenverhalten.	
	F_2	H ₀	Das Fahren mit BVA hat keinen Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten.	<ul style="list-style-type: none"> • Subjektive Veränderung des Geschwindigkeitsverhaltens • Max. und mittlere Geschwindigkeit • Relativer Anteil der Geschwindigkeitsüberschreitungen • Individuelle Richtgeschwindigkeit
		H ₁	Das Fahren mit BVA beeinflusst das Geschwindigkeitsverhalten.	
	F_3	H ₀	Das Fahren mit BVA hat keinen Einfluss auf das Kurvenverhalten.	<ul style="list-style-type: none"> • Subjektive Sicherheit • Relative Häufigkeit der geschnittenen Kurven • Max. und mittlere Querbeschleunigung in Kurven
		H ₁	Das Fahren mit BVA beeinflusst das Kurvenverhalten.	
Ablenkung	A_1	H ₀	Die BVA hat keinen Einfluss auf die Ablenkung des Fahrers.	<ul style="list-style-type: none"> • Subjektive Ablenkung • Maximale Blickdauer BVA • Durchschnittliche Blickdauer BVA • Prozentuale Blickanteile der AOIs • Anzahl der Spurfehler
		H ₁	Die Benutzung der BVA beeinflusst die Ablenkung des Fahrers.	
Gefallen	G_1	H ₀	Die BVA hat im Vergleich zur Baseline-Fahrt keinen Einfluss auf die Akzeptanz des Fahrers.	<ul style="list-style-type: none"> • Subjektive Akzeptanz • Subjektives Gefallen
		H ₁	Die BVA beeinflusst die Akzeptanz des Fahrers.	

6.1.3 Ergebnisse

Die Grundvoraussetzung zur Unterstützung des Fahrers ist die von der technischen Realisierung abhängige gute Darstellungsqualität und Interpretationsgenauigkeit der Bird-View-Anzeige. Der Proband muss in der Lage sein, die im Head-Up-Display dargestellte virtuelle Straßenvoraussicht effektiv, effizient und zuverlässig wahrzunehmen, sowie diese abstrakten Informationen fehlerfrei und exakt auf die Realität übertragen zu können.

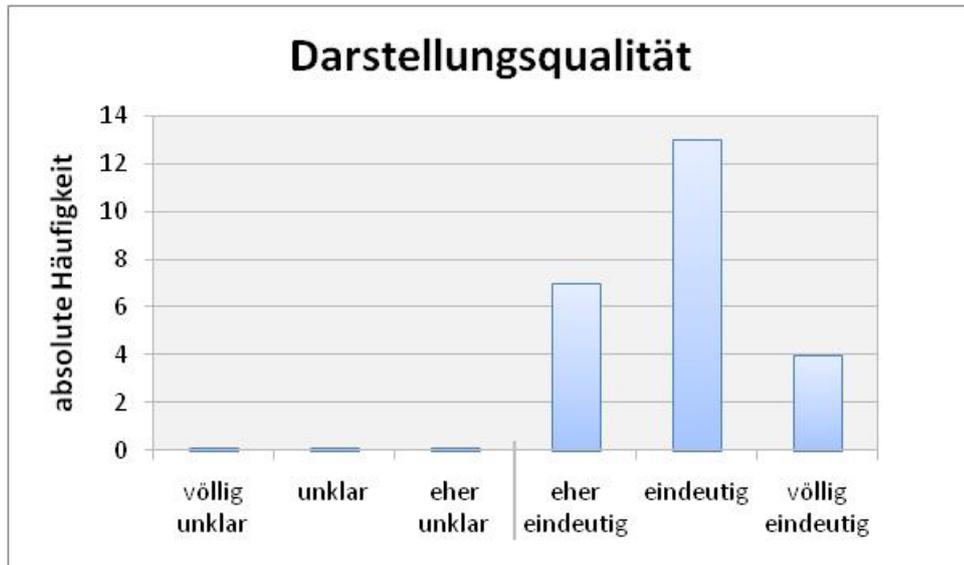


Abbildung 6–3: Unterstützung / subjektive Darstellungsqualität

Abbildung 6–3 und Abbildung 6–4 bestätigen diese beiden Grundvoraussetzungen. Alle 24 Probanden können das Head-Up-Display aufgrund der individuellen Adaptierbarkeit hervorragend einsehen und bewerten die Darstellungsqualität des virtuellen Streckenverlaufs der BVA im Mittel als gut (\bar{x} 2,1).

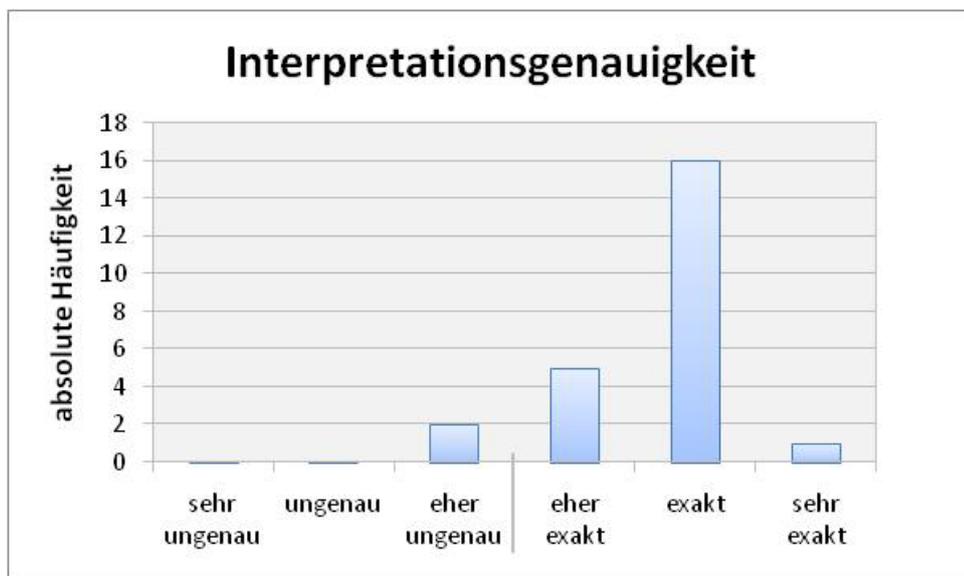


Abbildung 6–4: Unterstützung / subjektive Interpretationsgenauigkeit

Des Weiteren bestätigt Abbildung 6–4 mit einem Wert von \bar{x} 2,3 eine gute Interpretationsgenauigkeit der virtuellen Anzeige. 22 Probanden können den perspektivischen Streckenverlauf der BVA problemlos interpretieren und infolgedessen den vorausliegenden realen Straßenverlauf korrekt abschätzen. Lediglich zwei Versuchspersonen gelingt dies nur mit einer ausreichenden Genauigkeit. Grund ist der erhöhte Dekodieraufwand, den die abstrakte

Straßenvoraussicht von den Probanden abverlangt. Da die BVA im Vergleich zur realen Sicht unterschiedliche Größenverhältnisse und eine abweichende Perspektive aufweist, können die abstrakten Informationen von manchen Versuchspersonen erst nach einem wiederholten iterativen Abgleich mit der Realität fehlerfrei interpretiert werden. Die über die gesamte Versuchsdauer vermerkten Fehlinterpretationen bestätigen, dass besonders zu Beginn der BVA-Fahrt Kurven ungenau abgeschätzt werden. Sobald die Probanden den Umgang mit dem System gelernt haben, ist dieser Mangel nicht mehr feststellbar. Neben diesem Lerneffekt sind weitere Fehlinterpretationen vereinzelt auf technische Defizite der Datenbasis und des GPS-Empfängers zurückzuführen, da der virtuelle Spurverlauf in manchen Fällen falsch oder zeitverzögert dargestellt wird. Dennoch ist die subjektive Akzeptanz bezüglich der technischen Realisierung sehr groß.

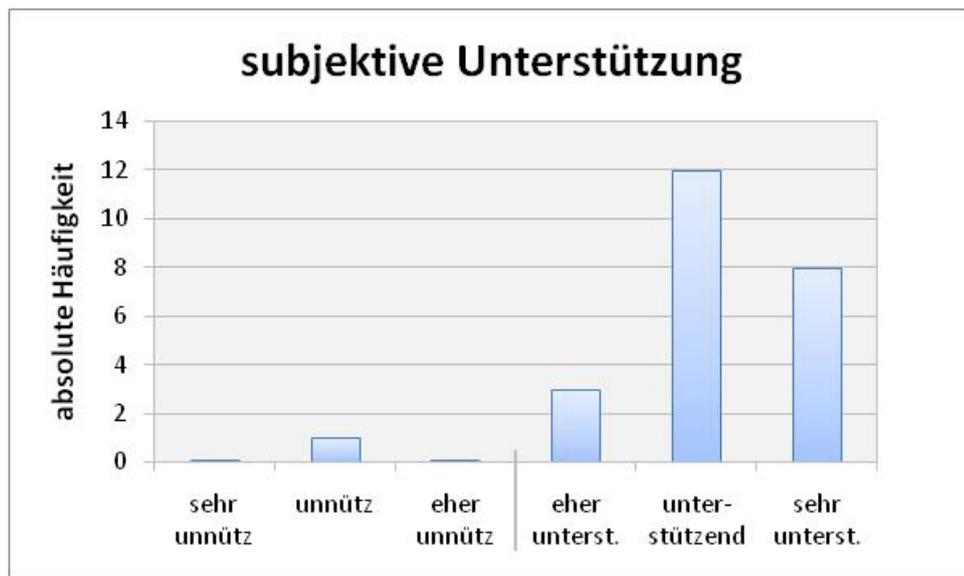


Abbildung 6–5: subjektive Unterstützung

Diese gute Darstellungsqualität und Interpretationsgenauigkeit trägt dazu bei, dass sich fast alle Probanden durch die Bird-View-Anzeige unterstützt fühlen (siehe Abbildung 6–5). Mit einem Mittelwert von 1,9 bewirkt diese Art der Assistenz eine gute subjektive Unterstützung. 23 Versuchspersonen schreiben der BVA besonders außerorts einen merklichen Mehrwert zu. Laut Probandenaussagen können aus dem Streckenverlauf resultierende Gefahrenquellen im Vergleich zur Baseline-Fahrt viel früher erkannt werden und somit unbekannte Kurvenverläufe mit einer höheren Zuverlässigkeit abgeschätzt werden. Sie geben an, mit BVA vorausschauender zu fahren. Lediglich ein Proband sieht in dieser Assistenzform keinen Nutzen.

Neben dieser bestätigten subjektiven Unterstützung des Fahrers stellt sich im Weiteren die Frage, ob diese Ergebnisse auch in objektiven Kennwerten nachweisbar sind. Bezüglich der Spurhaltequalität ist weder ein positiver noch ein negativer Einfluss der Bird-View-Anzeige

feststellbar. Analysen der Lenkwinkelkorrekturen pro Sekunde, der Spurfehler und der Standardabweichung des Lenkwinkels, ergeben mit variierenden α -Fehlern von mehr als 25 % identische Ergebnisse für Baseline- und BVA-Fahrt. Grund hierfür ist die abstrakte Darstellungsart der Bird-View-Anzeige, die das eigene Fahrzeug als Pfeil und die Straße als undetaillierte Linie visualisiert. In dieser informationsreduzierten Form ist eine exakte Referenzierbarkeit der eigenen Fahrzeugposition zur virtuellen Straße unmöglich. Zugleich wird jedoch ein „Fahren nach Display“ vermieden und einer starken Ablenkungswirkung der BVA entgegengewirkt.

Ziel der BVA ist es aber nicht, den Fahrer hinsichtlich der Querführung, sondern primär, gemäß des ermittelten Assistenzbedarfs aus Kapitel 3.3, hinsichtlich der Längsführung zu unterstützen. Dies erfolgt insbesondere bei einer reduzierten visuellen Voraussicht durch eine mit der BVA verbesserten Abschätzung des vorausliegenden Streckenverlaufs. Diesbezüglich wird im Folgenden analysiert, ob die Probanden bei topologischer Sichtreduktion die Zusatzinformation der BVA nutzen und dieses Wissen in ihr Fahrverhalten einfließen lassen. Kuppen bieten die idealen Rahmenbedingungen für eine derartige Untersuchung. Jeder Proband passiert während der Versuchsfahrt pro Variante sechs dieser Sichtbarrieren, die zu gleichen Teilen in die Kategorien „Gerade nach Kuppe“ und „Kurve nach Kuppe“ zu unterscheiden sind.

Um den Einfluss der Bird-View-Ansicht untersuchen zu können, ist es essentiell nur diejenigen Kuppen-Situationen zu betrachten, in denen die BVA auch definitiv genutzt wird. Eine Analyse der Blickdaten zeigt, dass die Probanden vor einer Kuppe in 85 % aller Fälle auf die BVA schauen. Diese häufige Verwendung verdeutlicht zugleich das große Vertrauen und die hohe Akzeptanz, die der BVA von Seiten der Probanden entgegengebracht wird. Die gefilterten Kuppensituationen werden für die Baseline-Fahrt und die BVA-Fahrt hinsichtlich einer hypothetischen Fahrverhaltensänderung analysiert. Anhand der Brems- und Gaspedalaktivitäten, sowie dem zeitlichen Geschwindigkeitsverlauf wird überprüft, ob vor einer Kuppe eine situative Anpassung der Längsdynamik stattfindet.

Abbildung 6–6 zeigt deutlich, dass die Geschwindigkeit v vor einer Kuppe, ohne die Unterstützung durch die Bird-View-Ansicht, mit einem Wert von 98,6 % so gut wie immer angepasst wird. In lediglich 1,4 % aller Fälle erfolgt keine Geschwindigkeitsreduktion. Mit BVA ist im Vergleich dazu eine signifikante Fahrverhaltensänderung feststellbar. Durch die erweiterte Voraussicht reduzieren die Probanden nur noch vor 54,9 % aller Kuppen ihre Geschwindigkeit. In 45,1 % aller Fälle wird die Fahrt über die topologische Sichtbarriere mit unverminderter oder sogar erhöhter Geschwindigkeit fortgesetzt.

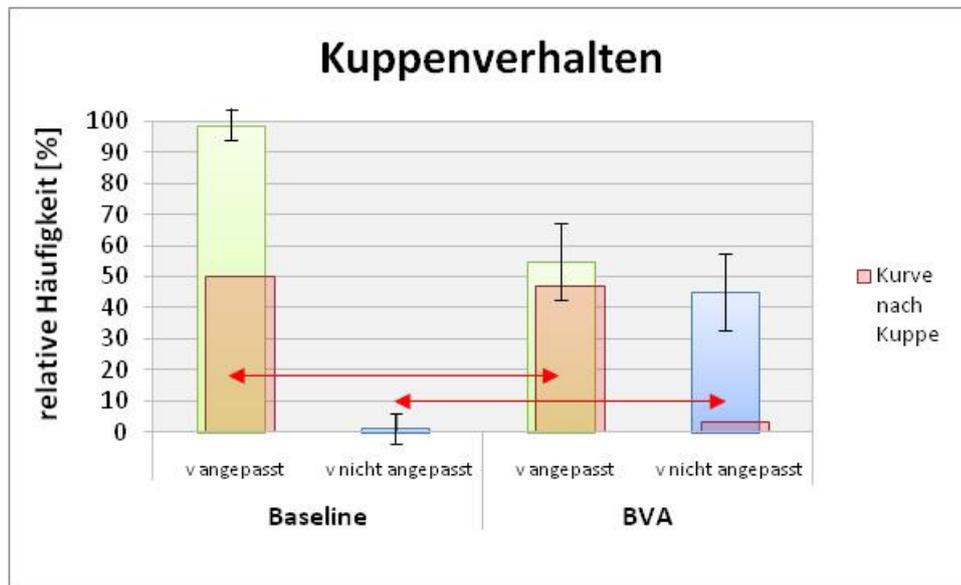


Abbildung 6–6: Unterstützung und Fahrverhaltensänderung / objektives Kuppenverhalten

Aufschluss bezüglich dieser signifikanten Verhaltensänderung kann eine nähere Betrachtung der nach einer Kuppe vorliegenden Streckenbeschaffenheit geben. Abbildung 6–6 zeigt im Weiteren für jede Variante die prozentuale Verteilung der drei zu durchfahrenden Gefahrenquellen „Kurve nach Kuppe“. Wie bereits erwähnt, wird im Fall der nicht assistierten Baseline-Fahrt die Geschwindigkeit vor einer Kuppe, unabhängig vom darauffolgenden Streckenverlauf, nahezu immer angepasst. Dieses Verhalten beruht auf der Tatsache, dass der Fahrer ohne Assistenz nicht weiß, was sich hinter der voraussichtreduzierenden Kuppe befindet. Aufgrund dessen verhält er sich immer so, als ob sich hinter der Kuppe eine Kurve bzw. eine aus dem Streckenverlauf resultierende Gefahr befindet.

Im Gegensatz dazu erhält der Fahrer durch die BVA die Zusatzinformation, ob sich hinter der Kuppe eine Kurve oder eine Gerade befindet. Es ist auffällig, dass die Kategorien „v angepasst“ und „Kurve nach Kuppe“, beziehungsweise „v nicht angepasst“ und „Gerade nach Kuppe“ stark korrelieren. Bei einer Kurve reduzieren die Probanden ihre Geschwindigkeit analog zur Baseline-Fahrt nahezu immer. In den seltenen Fällen, in denen die Geschwindigkeit trotz der Situation „Gerade nach Kuppe“ angepasst wird, erkennen die Probanden zwar, dass aus dem Streckenverlauf keine Gefahr zu erwarten ist, jedoch fehlt ihnen, insbesondere zu Beginn der Systemnutzung noch das nötige Vertrauen in die Technik. Erkennen die Versuchspersonen im Gegensatz dazu in der BVA einen nach der Kuppe weiterhin geraden Streckenverlauf, reduzieren sie Ihre Geschwindigkeit nicht. Gemäß der Risikokompensationstheorie nach Wilde (1974) passen die Probanden ihre subjektive Risikogrenze an das für sie nun transparente objektive Risiko an, was sich in einem gleichbleibenden oder steigenden Geschwindigkeitsverlauf bemerkbar macht.

Es kann folglich als bestätigt angesehen werden, dass die BVA nicht nur subjektiv, sondern auch objektiv bezüglich der Assistenzbedarfskategorie „Straße“ unterstützt, was sich bei Kuppen in einer situationsadäquaten Anpassung des Fahrverhaltens äußert. Das beim Abschätzen dieser wahrgenommenen Größe vorhandene Sicherheitsrisiko kann somit insbesondere bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion stark reduziert werden. Als problematisch ist jedoch zu bewerten, dass die BVA lediglich das objektive Risiko bezüglich des Straßenverlaufs transparent macht, eine von Objekten ausgehende Risikosteigerung jedoch nicht. Befindet sich also hinter der Kuppe ein Objekt auf der Fahrbahn, erhöht sich folglich das objektive Risiko eines Unfalls, da ein Fahrer durch die Unterstützung mit der BVA bei darauffolgendem geraden Streckenverlauf mit hoher Wahrscheinlichkeit keine Geschwindigkeitsreduktion vornimmt. Eine zuverlässige Objektdetektion bei topologischer Sichtreduktion ist bislang technisch nicht möglich. Aufgrund dessen ist es zwingend notwendig, die BVA-Voraussicht explizit bei Kuppen auf die reale Voraussicht zu reduzieren, um ein schnelleres und somit im Falle eines Objektes risikoreicheres Passieren von Kuppen zu vermeiden.

Im Weiteren stellt sich die Frage, ob die objektive Unterstützung der BVA im Bereich der Kategorie „Straße“ nicht nur bei Kuppen, sondern auch während der restlichen Versuchsfahrt durch eine schnellere oder risikoreichere Fahrstiländerung kompensiert oder sogar überkompensiert wird. Eine Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens bei Nutzung der BVA ergibt diesbezüglich weder subjektiv noch objektiv eine Veränderung im Vergleich zur Baseline-Fahrt. Die objektiven Daten, wie maximale und mittlere Geschwindigkeit, relativer Anteil der Geschwindigkeitsüberschreitungen und individuelle Richtgeschwindigkeit sind mit α -Fehlern von mehr als 25 % identisch. Des Weiteren sind sowohl für die relative Häufigkeit der geschnittenen Kurven, als auch für die maximale und mittlere Querbeschleunigung in Kurven für Baseline- und BVA-Fahrt keine Unterschiede feststellbar. Eine Veränderung des Kurvenverhaltens kann folglich ebenso ausgeschlossen werden.

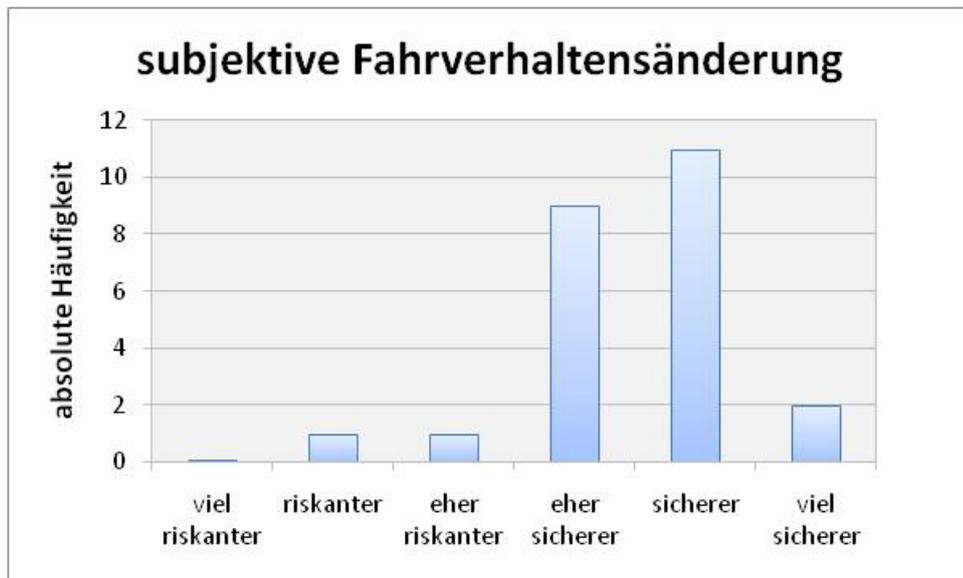


Abbildung 6–7: Subjektive Fahrverhaltensänderung

Stattdessen haben 22 der 24 Probanden subjektiv das Gefühl mit BVA sicherer zu fahren (Abbildung 6–7). In Anbetracht dessen kann durch die BVA ein merklicher Sicherheitsgewinn bei der Antizipation des vorausliegenden Straßenverlaufs attestiert werden.

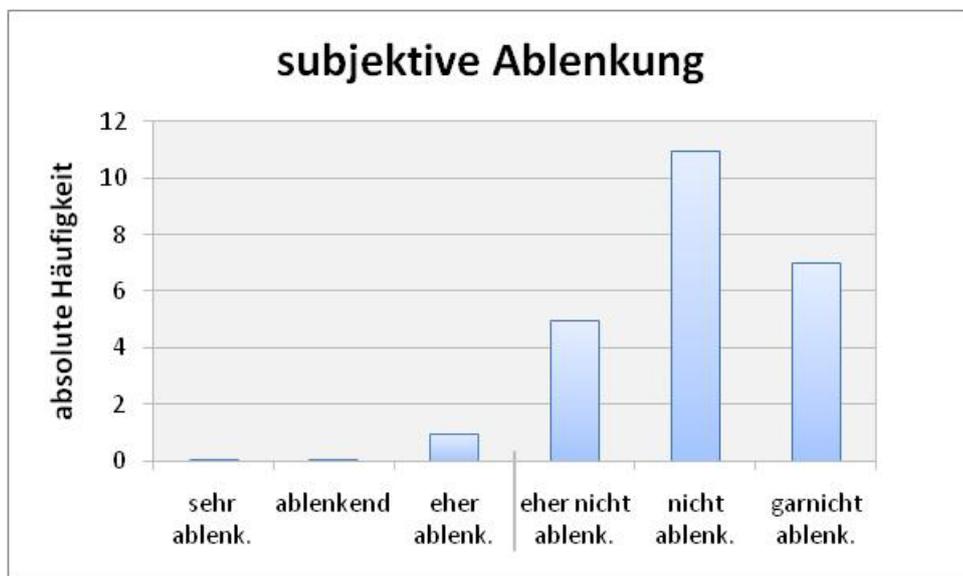


Abbildung 6–8: Subjektive Ablenkung

Abbildung 6–8 gibt Aufschluss über die subjektive Ablenkungswirkung der im Head-Up-Display präsentierten BVA. 23 der 24 Probanden fühlen sich subjektiv nicht abgelenkt. Lediglich eine Testperson verspürt eine leichte Ablenkung.

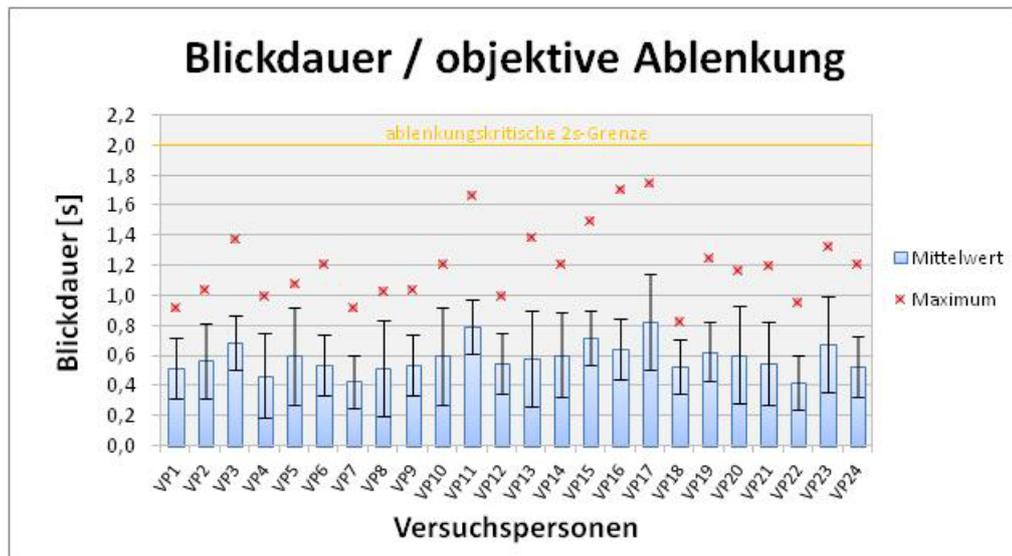


Abbildung 6–9: Ablenkung / mittlere und maximale Blickdauer auf BVA

Zur Objektivierung der Ablenkungswirkung werden die Blickdaten herangezogen. Abbildung 6–9 zeigt pro Versuchsperson die mittlere und die absolute maximale Blickdauer, die bei der BVA-Informationsaufnahme im Head-Up-Display auftritt. Im Mittel dauert ein BVA-Blick 0,59 s. Der absolut längste Blick ist während der halbstündigen Erprobungsfahrt bei Versuchsperson 17 feststellbar. Dieser Einzelblick dauert 1,75 s. Während der gesamten Versuchsreihe wird kein Blick gemessen, der über der ablenkungskritischen 2s-Grenze liegt (Schweigert, 2003). Dieses Ergebnis belegt eindeutig, dass objektiv keine Ablenkung durch „Attention Capture“ vorliegt (Prinzel, et al., 2004). Die Aufmerksamkeit des Fahrers wird durch die BVA zu keiner Zeit übermäßig lange vom eigentlichen Verkehrsgeschehen abgelenkt. Die Probanden geben an, dass die BVA für ein „Fahren nach Display“ zu abstrakt ist und somit nicht den direkten Blick auf die Straße ersetzt. Ein sicherheitskritisches „Fahren nach Display“ ist folglich zu negieren.

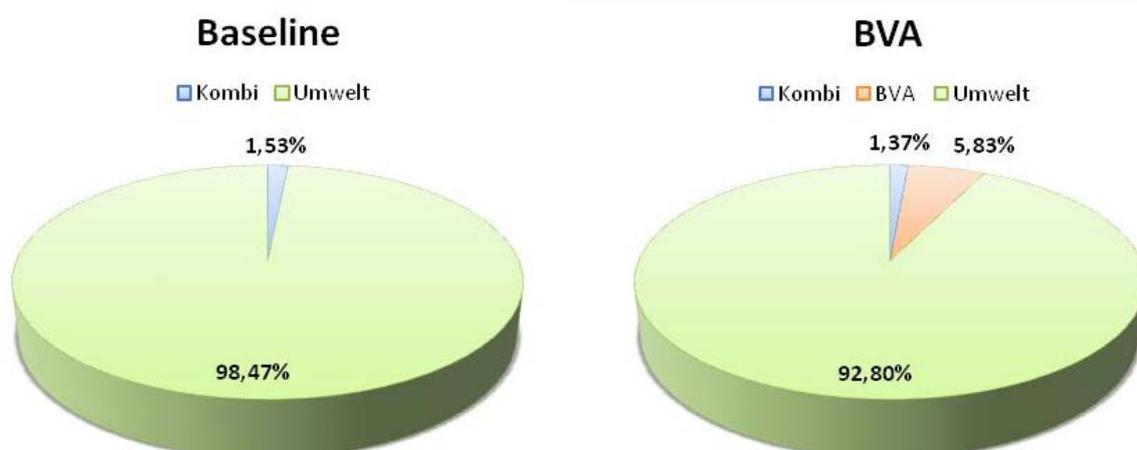


Abbildung 6–10: Ablenkung / Blickanteile der AOs während der gesamten Versuchsfahrt

Abbildung 6–10 zeigt sowohl für die Baseline- als auch für die BVA-Fahrt die prozentualen Anteile der kumulierten Blickkapazität hinsichtlich der drei AOIs: Umwelt, Kombi und BVA. Während der Baseline-Fahrt verwendet ein Fahrer im Mittel 1,53 % der Gesamtfahrzeit, um Informationen aus dem Kombi zu entnehmen. Die restliche Zeit scannt er zur möglichst fehlerfreien Bewältigung der primären Fahraufgabe die Umgebung.

Erhält der Fahrer zusätzlich die Information der BVA, verändert sich der kumulierte Zeitanteil der Kombiblicke mit 1,37 % im Vergleich zur Baseline-Fahrt nicht. Der für die BVA benötigte Zeitanteil von 5,83 % geht nahezu ausschließlich zu Lasten der Umgebungsblicke, die aber mit 92,80 % immer noch einen sehr großen Anteil der zur Verfügung stehenden Blickkapazität beanspruchen. Es kann ausgeschlossen werden, dass diese Reduktion der kumulierten Umgebungsblicke eine Beeinträchtigung der Verkehrssicherheit darstellt, da der Fahrer selbst über hervorragende Workload-Management-Eigenschaften verfügt (Kerkau, 2005). Eine Analyse des Blickverhaltens bestätigt diese Annahme, da kein Proband während einer sicherheitskritischen Situation, wie beispielsweise bei Gegenverkehr, seinen Blick auf die BVA lenkt. Stattdessen wird die komplette Aufmerksamkeit auf das Verkehrsgeschehen gerichtet, um die sicherheitskritische Situation unfallfrei zu bewältigen.

Ein letztes Indiz für eine Ablenkungswirkung der BVA ist eine erhöhte Spurfehlerrate. Auch hierbei ist im Vergleich zur Baseline-Fahrt kein Unterschied und somit keine erhöhte Ablenkung von der primären Fahraufgabe feststellbar.

Bezüglich der letzten Untersuchungskategorie „Gefallen“ schneidet die BVA sehr gut ab. 23 der 24 Versuchspersonen würden sich ein derartiges Assistenzsystem wünschen. Des Weiteren bestätigen die Blickdaten eine intensive und zugleich situationsadäquate Nutzung der BVA, was von einer hohen Akzeptanz gegenüber dem innovativen System zeugt.

6.1.4 Hypothesenüberprüfung

Tabelle 6-2 zeigt die anhand der Ergebnisse zu falsifizierenden bzw. verifizierenden Hypothesen, die in Kapitel 6.1.2 für die Assistenz durch die BVA aufgestellt wurden.

Der durch die BVA eindeutig dargestellte Streckenverlauf kann vom Fahrer richtig interpretiert werden und hat dadurch sowohl subjektiv, als auch objektiv einen eindeutigen Einfluss auf die zuverlässige und fehlerfreie Antizipation des vorausliegenden Streckenverlaufs. Durch den vergrößerten Antizipationsbereich wirkt die Anzeige orientierungsunterstützend. Die BVA hat vor allem in unbekanntem Terrain eine angenehme Wirkung auf den Fahrzeuglenker und vermittelt ihm ein sichereres Fahrgefühl. Die Bird-View-Ansicht stellt somit für die primäre Fahraufgabe eine enorme Unterstützung dar. Hypothese U_1 H₁ ist folglich zu halten. Auf die Spurhaltegröße hat sie hingegen keinen Einfluss, da ein

Referenzieren der eigenen Fahrzeugposition aufgrund der abstrakten Darstellungsart unmöglich ist. Hypothese U_2 H₀ ist folglich zu verifizieren.

Tabelle 6-2: Hypothesenüberprüfung für BVA

Hypothesen				
Unterstützung	U_1	H ₀	Die Zusatzinformation der BVA hat keinen Einfluss auf die Antizipation des vorausliegenden Kurvenverlaufs.	✗
		H ₁	Die Zusatzinformation der BVA beeinflusst die Antizipation des vorausliegenden Kurvenverlaufs.	✓
	U_2	H ₀	Das Fahren mit BVA hat keinen Einfluss auf die Spurhaltegüte.	✓
		H ₁	Das Fahren mit BVA beeinflusst im Vergleich zur Baseline-Fahrt die Spurhaltegüte.	✗
Fahrverhaltensänderung	F_1	H ₀	Das Fahren mit BVA hat keinen Einfluss auf das Kuppenverhalten.	✗
		H ₁	Das Fahren mit BVA beeinflusst das Kuppenverhalten.	✓
	F_2	H ₀	Das Fahren mit BVA hat keinen Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten.	✓
		H ₁	Das Fahren mit BVA beeinflusst das Geschwindigkeitsverhalten.	✗
	F_3	H ₀	Das Fahren mit BVA hat keinen Einfluss auf das Kurvenverhalten.	✓
		H ₁	Das Fahren mit BVA beeinflusst das Kurvenverhalten.	✗
Ablenk.	A_1	H ₀	Die BVA hat keinen Einfluss auf die Ablenkung des Fahrers.	✓
		H ₁	Die Benutzung der BVA beeinflusst die Ablenkung des Fahrers.	✗
Gefallen	G_1	H ₀	Die BVA hat im Vergleich zur Baseline-Fahrt keinen Einfluss auf die Akzeptanz des Fahrers.	✓
		H ₁	Die BVA beeinflusst die Akzeptanz des Fahrers.	✗

Die Bird-View-Ansicht zeichnet sich vor Kuppen durch eine hohe Nutzungsrate aus. Der Fahrer bedient sich der Möglichkeit, seinen Antizipationsbereich vor schlecht einzusehenden Stellen zu vergrößern. Er kann somit Gefahrenquellen, die aus dem Streckenverlauf resultieren, frühzeitig erkennen. Nimmt der Fahrer in der BVA eine solche wahr, so verringert er seine Geschwindigkeit. Ist aus dem Streckenverlauf keine Gefahr ersichtlich, wird die Geschwindigkeit vor einer Kuppe nicht reduziert. Die Hypothese F_1 H₁, dass die BVA das Kuppenverhalten beeinflusst, ist folglich eindeutig zu verifizieren. Das Geschwindigkeits- und Kurvenverhalten bleibt hingegen durch die BVA-Nutzung unberührt, so dass die Hypothesen

F₂ H₁ und F₃ H₁ falsifiziert werden müssen. Desweiteren ist festzuhalten, dass die BVA die Versuchspersonen weder subjektiv noch objektiv verstärkt vom Verkehrsgeschehen ablenkt. Es ist keine Gefahr des „Attention Capture“ zu erkennen, da die maximalen Ablesezeiten deutlich unter der 2s-Grenze liegen. Die Untersuchung zeigt nur sehr wenige Blicke auf die BVA in anspruchsvollen Verkehrssituationen, sowie eine verschwindend geringe und vom Einsatz der BVA unabhängige Anzahl an Spurfehlern. Die Hypothese A₁ H₁ einer verstärkten Ablenkung, bzw. einer negativen Auswirkung der BVA auf die primäre Fahraufgabe, ist somit zu falsifizieren. Bezüglich der letzten Untersuchungskategorie „Gefallen“ ist die Hypothese G₁ H₀ zu halten. Die BVA erzielt hervorragende Ergebnisse im Hinblick auf das subjektive Gefallen.

6.2 Das kontaktanalog markierende Head-Up-Display

In Bezug auf die Assistenzbedarfskategorie „Objekt“ besteht das primäre Defizit aktueller sichtverbessernder Assistenzsysteme darin, dass der Fahrer, insbesondere auf Landstraßen, keine exakte Information der Objektrichtung, -entfernung und -dynamik zu einem ausreichend frühen Zeitpunkt erhält. Der Fahrer hat folglich in den meisten Fällen kaum genügend Zeit, um adäquate Abhilfemaßnahmen einzuleiten.

Im Folgenden wird im Rahmen eines Realversuches geklärt, inwieweit dieser Sachverhalt durch ein kontaktanalog markierendes Head-Up-Display (kHUD), dessen theoretische HMI-Auslegung in Kapitel 5.2 beschrieben ist, verbessert werden kann.

Hierfür wird in Kapitel 6.2.1 zunächst eine neue innovative Methode zur kontaktanalogen Visualisierung von Fahrerassistenzinformationen unter automotiv-tauglichen Gesichtspunkten vorgestellt, sowie deren technische Umsetzung in einem Versuchsträger zu einem kontaktanalog markierenden Night-Vision-System erläutert. In Kapitel 6.2.2 wird dieses kHUD für die Applikation Night-Vision im Vergleich zu einer nichtassistierten Reverenzfahrt, einem bildgebenden und vier unterschiedlich warnenden NiVi-Systemen auf FIR-Basis hinsichtlich Effektivität, Effizienz, Ablenkung und Zufriedenheit im Rahmen eines Feldexperimentes analysiert.

6.2.1 Technische Realisierung

Kapitel 6.2.1.1 beschreibt die neu entwickelte Visualisierungsmethode, die es gemäß der Applikationsanforderungen ermöglicht, ohne die Verwendung eines kopfbasierten Systems, selbst stehende Objekte, insbesondere Fußgänger, in mittleren bis sehr großen Entfernungen mit einem virtuellen roten Rahmen kontaktanalog markieren zu können. Im Weiteren

wird in Kapitel 6.2.1.2 der technische Aufbau des Versuchsträgers beschrieben, der die Sensorik, den Bildverarbeitungsrechner und das kontaktanaloge Head-Up-Display umfasst.

6.2.1.1 Visualisierungsmethode

Die Zielsetzung besteht darin, eine Visualisierungsmethode zu entwickeln, die dem Fahrer berührungslos, ohne Verwendung eines Head-Tracking-Systems und mit den gleichen technischen Komponenten eines konventionellen Head-Up-Displays (Bildquelle, Optik und Kombiner) unter partieller Ausnutzung menschlicher Tiefenwahrnehmung einen dreidimensionalen Tiefeneindruck in mittleren bis sehr großen Entfernungen suggeriert.

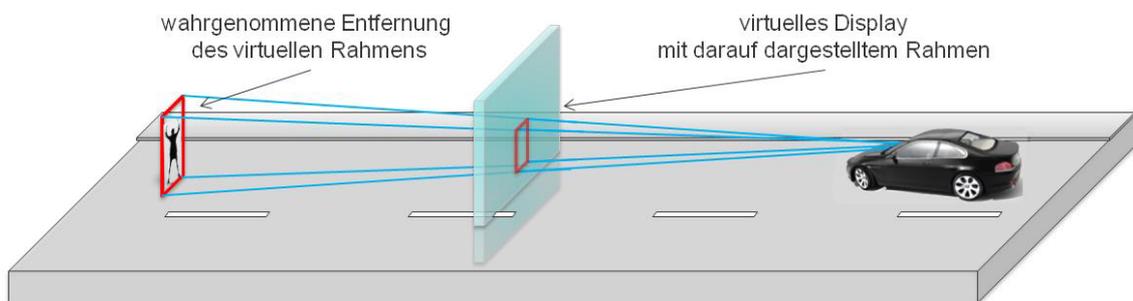
Die in Kapitel 3.1.1 erläuterten monokularen und binokularen Tiefenkriterien geben dem Menschen in Abhängigkeit von der Entfernung unterschiedlich stark und mit unterschiedlicher Genauigkeit Rückmeldung über die räumliche Konstellation seiner Umwelt. Hierbei gilt im Allgemeinen: Je größer die Distanz des Menschen zum fokussierten Objekt, desto ungenauer kann er die exakte Entfernung abschätzen. Der Grund hierfür ist die mit steigender Entfernung abnehmende Qualität der über die Tiefenkriterien rückgemeldeten Entfernungsinformation.

Monokulare Tiefenkriterien, wie beispielsweise die „relative Lage zum Horizont“ oder die „relative Größe“, liefern dem Gehirn auch noch in sehr großen Entfernungen eine verhältnismäßig gute Entfernungsrückmeldung. Okulomotorische Tiefenkriterien, wie beispielsweise die Akkommodation und die Konvergenz, haben hingegen einen konkreten maximalen Entfernungsbereich, bis zu dem sie wirksam sind (siehe Kapitel 3.1.1). Bei der Wirksamkeitsreichweite der Disparität, dem dominantesten binokularen Tiefenkriterium, gehen die Expertenmeinungen stark auseinander. So gibt Gregory (2001) an, dass Menschen ab einer Entfernung von 100 m rein einäugig sehen. Palmern (1999) hingegen nennt 30 m als Umschlagspunkt, während Goldstein (2001), Mallot (1998) und Hauske (1994) behaupten, dass Tiefenunterschiede allgemein bis zu einem Winkelunterschied von wenigen Winkelsekunden wahrnehmbar seien. Demnach würde die Disparität immer wirken und deren Dominanz in Bezug auf die räumliche Wahrnehmung mit zunehmender Entfernung zu minimieren sein.

Neben der individuellen Entfernungsabhängigkeit der einzelnen Tiefenkriterien ist ein weiteres wichtiges Phänomen der menschlichen visuellen Wahrnehmung die unbewusste Fehlinterpretation, wie sie bei sogenannten Sprungbildern oder optischen Täuschungen festzustellen ist. Hierbei zieht das menschliche Gehirn eine bestimmte Entscheidung der Unbestimmtheit vor, selbst dann, wenn sie zu 50 % falsch ist (Sachse, 1971).

Bisherige binokulare technische Lösungen zur kontaktanalogen Visualisierung virtueller Informationen basieren auf der Stereoskopie (siehe Kapitel 4.2.3). Hierbei werden die Disparität und alle weiteren Tiefenkriterien der virtuellen Objekte bestmöglich der Realität nachgeahmt. Besonders im Nahbereich ist die Information der Disparität unerlässlich. Jedoch ist für den Anwendungsfall der kontaktanalogen Visualisierung von Fahrerassistenzinformationen primär der Mittel- und Fernbereich von Interesse, der bei ca. 10 m beginnt. In diesen Entfernungen ist die Zuverlässigkeit, respektive die Dominanz der Disparität, stark reduziert, so dass insbesondere die monokularen Tiefenkriterien für das menschliche Gehirn an Bedeutung gewinnen, um die räumliche Konstellation exakt interpretieren zu können.

- 1. Fall:** Virtueller Rahmen wird in einer größeren als der tatsächlichen Entfernung wahrgenommen.



- 2. Fall:** Virtueller Rahmen wird in einer kleineren als der tatsächlichen Entfernung wahrgenommen.

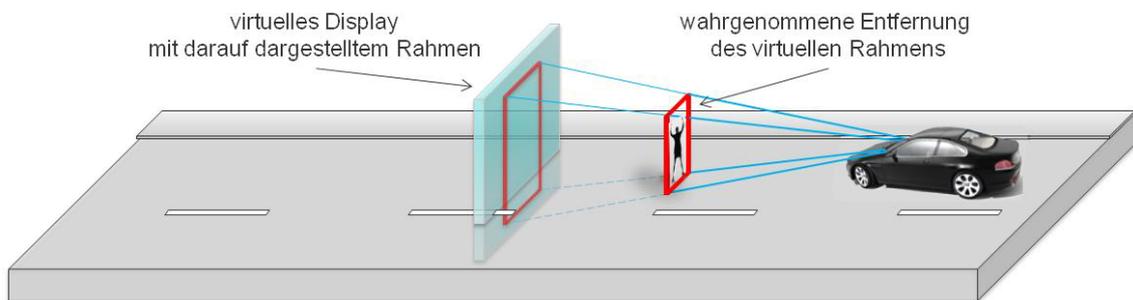


Abbildung 6–11: Methode der kontaktanalogen Visualisierung

In Anbetracht dessen besteht die Grundidee der neuen Visualisierungsmethodik konträr zu den bisherigen technischen Lösungen darin, die Entfernungsinformation der Disparität durch eine sehr große Bildweite so stark zu minimieren, dass vom Gehirn zur Entfernungsschätzung - gemäß der Theorie der unbewussten Fehlinterpretation - lediglich die in diesen Entfernungen dominanten monokularen Tiefenkriterien herangezogen werden. Diese könnten wiederum so manipuliert werden, dass dem menschlichen Gehirn eine von der Realität abweichende räumliche Konstellation vorgetäuscht wird (siehe Abbildung 6–11). Somit könnten dem Fahrer bei einer konstanten Bildweite des virtuellen Displays durch eine

technisch einfach zu realisierende Veränderung der monokularen Tiefenkriterien, insbesondere der „relativen Größe“ und der „relativen Lage zum Horizont“, ein virtuelles Objekt, wie beispielsweise ein markierender roter Rahmen, in größeren (Fall 1) aber auch in geringeren Entfernungen (Fall 2) suggeriert werden, da das menschliche Gehirn beim Widerspruch zwischen monokularen und binokularen Tiefenkriterien den in diesen Entfernungen zuverlässigeren monokularen Tiefenkriterien mehr Vertrauen schenken würde. Auch der Einfluss der Bewegungsparallaxe könnte in Anbetracht der im Fahrzeug herrschenden Rahmenbedingungen gering sein, da der Fahrer seine Kopfposition entlang der y-Achse lediglich um ca. ± 15 cm verändert, was relativ zu der großen Bildweite vernachlässigbar gering ist. Somit wäre weder eine Kalibrierung des Systems noch ein kontinuierliches Erfassen der Kopfposition notwendig.

Zur Überprüfung dieser Theorie werden in einem 100 m langen Lichtkanal mit 24 Probanden Versuche zur visuellen Wahrnehmung durchgeführt (siehe auch Hofbeck, et al., 2007; Bergmeier, et al., 2008; Bergmeier, 2008; Scharpf, 2005). Im Rahmen dieser Untersuchung wird ein Mock-Up verwendet, das über ein binokulares Head-Up-Display mit planem Kombiner verfügt (Kiefer, et al., 2007). Über eine Verstelleinheit kann eine Verschiebung des virtuellen Displays, bzw. eine variable Anpassung der Bildweite b auf 3 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m und 100 m, vorgenommen werden. Für jede dieser tatsächlichen Displayentfernungen wird ein 2 m großer und 0,8 m breiter roter Rahmen mit Hilfe einer Kalibrierfolie auf fünf unterschiedliche Suggestionseinstellungen „ s “ (10 m, 20 m, 40 m, 60 m und 80 m) vor, bzw. hinter dem tatsächlichen virtuellen Display, kalibriert. Dies erfolgt ausschließlich durch die Anpassung der monokularen Tiefenkriterien „relative Lage zum Horizont“ und „relative Größe“.

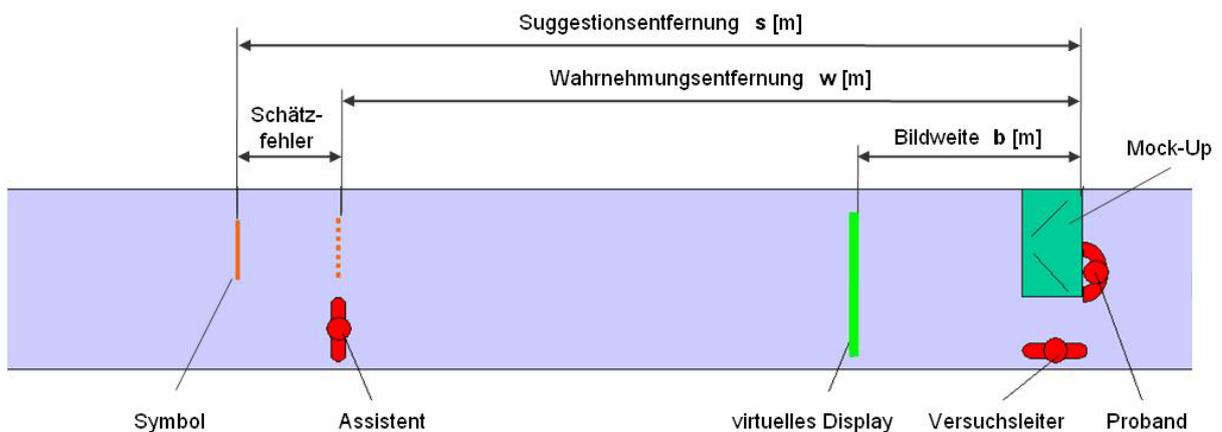


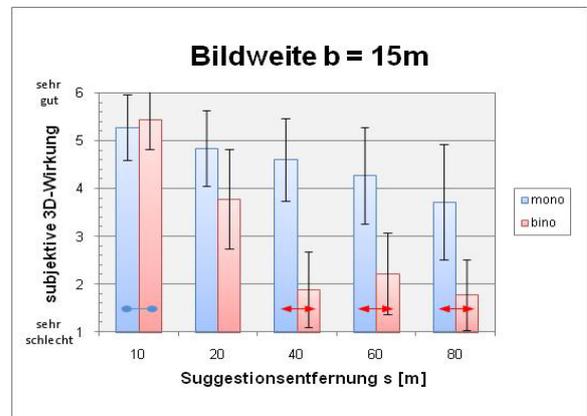
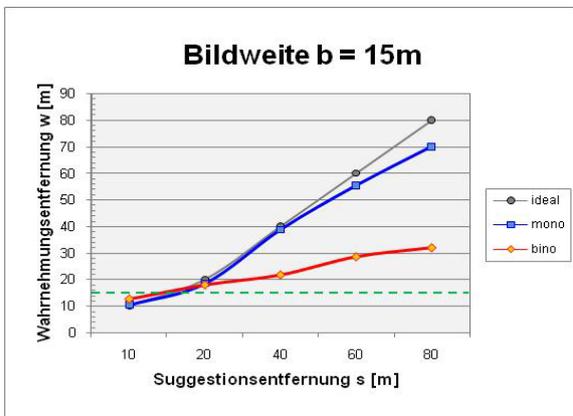
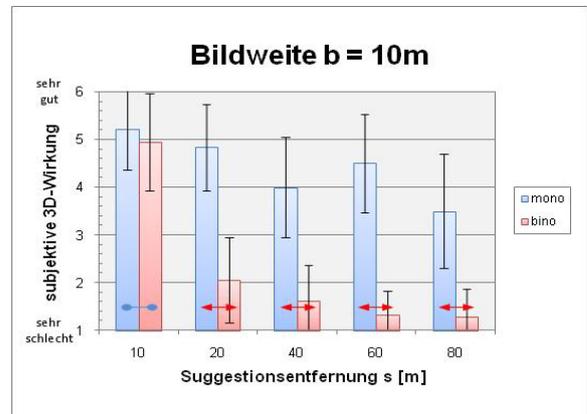
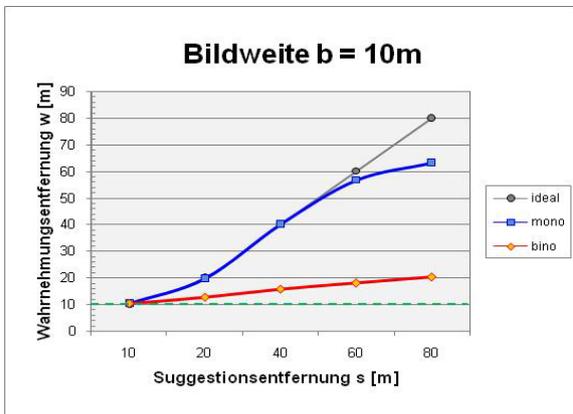
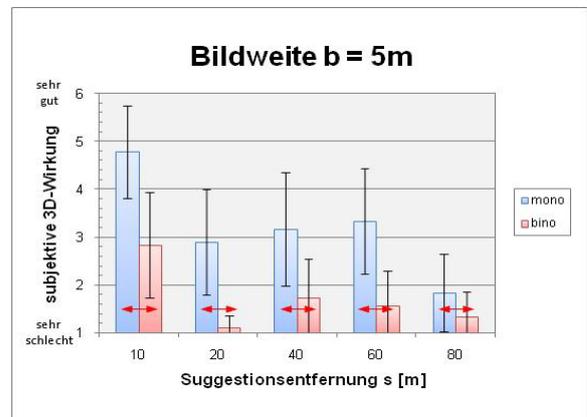
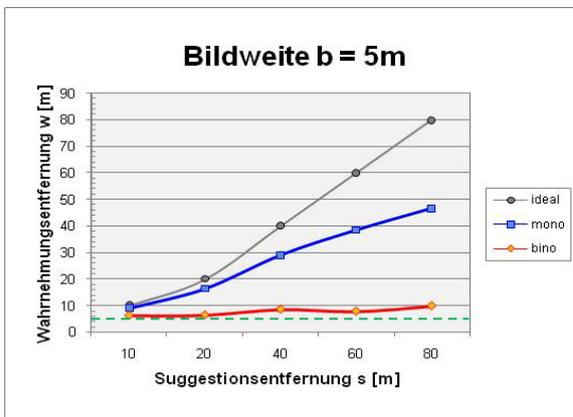
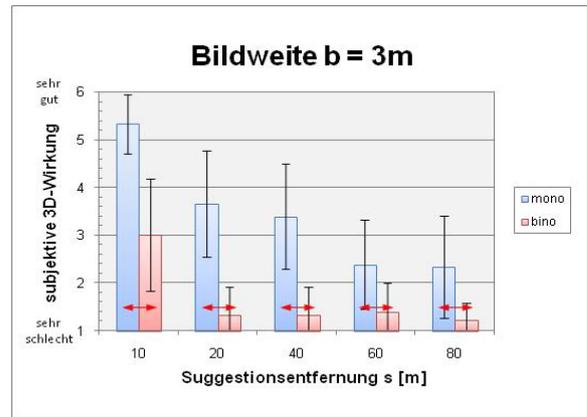
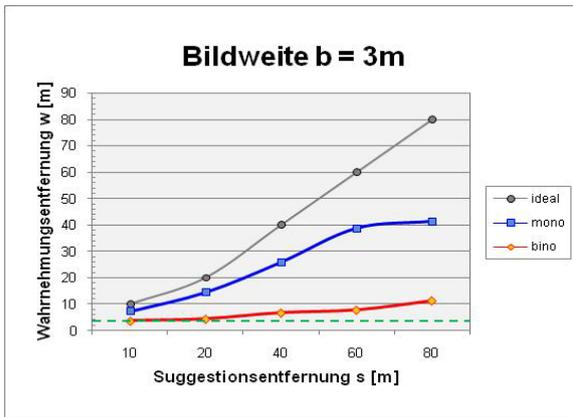
Abbildung 6–12: Prinzip der objektiven Datenermittlung

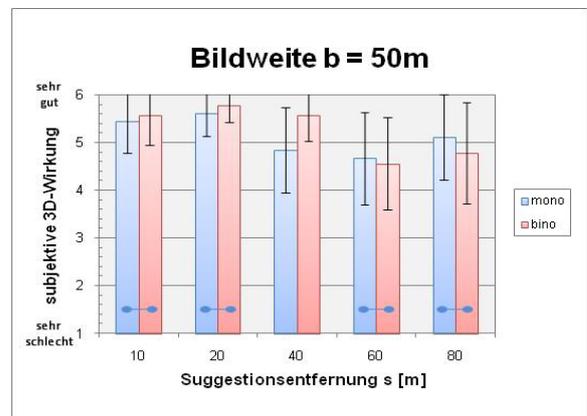
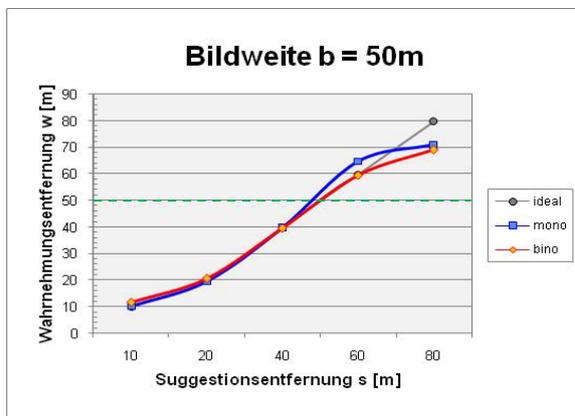
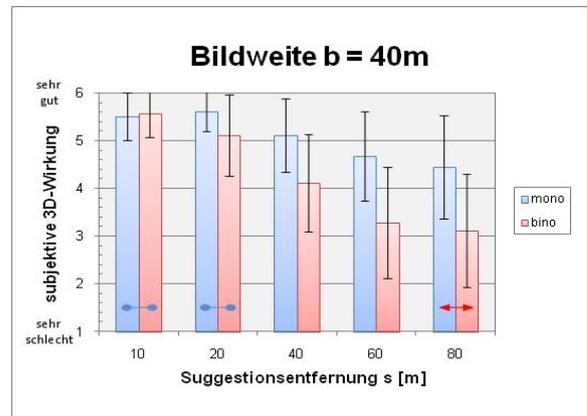
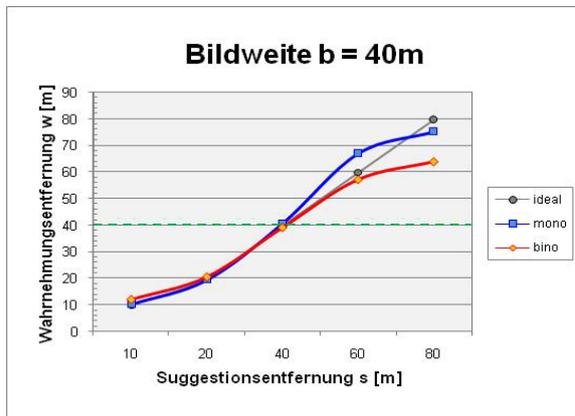
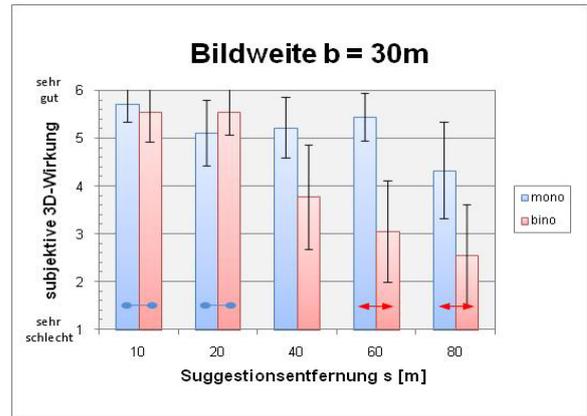
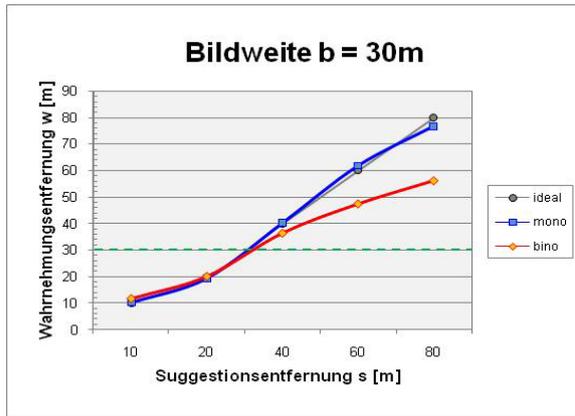
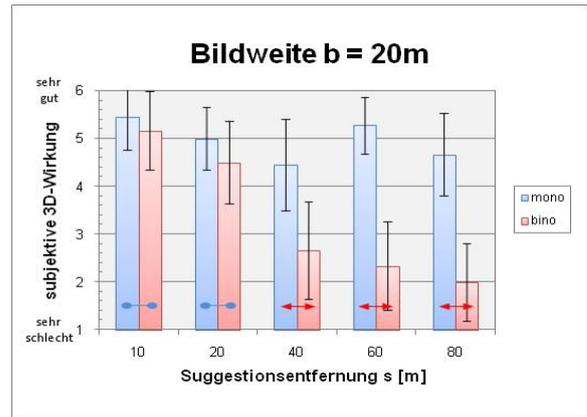
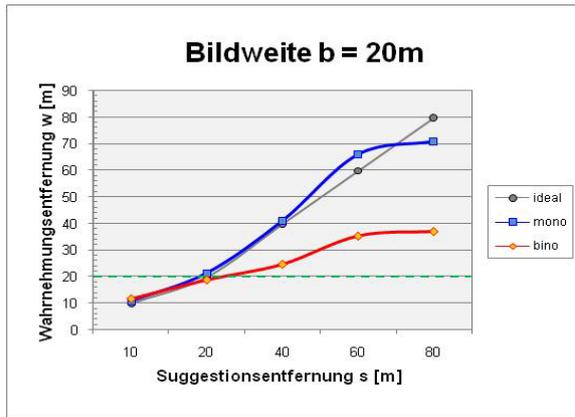
Die Versuchspersonen nehmen im Mock-Up auf einem konventionellen Autositz Platz. Während der gesamten Versuchsdauer werden die Testpersonen nicht dazu angehalten eine fixe Kopfposition einzuhalten, sondern dürfen diese variabel und frei wählen. Die Probanden müssen in permutierter Reihenfolge für jede einzelne Suggestionse Entfernung „s“ sowohl monokular – hierbei wird das schwächere Auge durch eine Augenklappe abgedeckt – als auch binokular die tatsächlich wahrgenommene Objektentfernung „w“ schätzen. Zur Ermittlung des objektiven Messwertes der Wahrnehmungsentfernung „w“, dirigieren die Probanden einen Assistenten durch Zuruf entlang des Lichtkanals an die Stelle, an der sich ihrer Meinung nach das über konventionelle HUD-Technologie eingeblendete virtuelle Symbol befindet (siehe Abbildung 6–12). Die gemessene Wahrnehmungsdistanz „w“ wird vom Versuchsleiter protokolliert. Die Abweichung zwischen Suggestionse Entfernung „s“ und Wahrnehmungsentfernung „w“ wird als Schätzfehler bezeichnet. Im Falle einer zu verifizierenden Visualisierungsmethode ist der Schätzfehler ab einer bestimmten Bildweite „b“ minimal. Daneben müsste die Wahrnehmungsentfernung „w“ für die getrennt durchzuführende monokulare und binokulare Schätzung identische Werte annehmen. Zusätzlich zu diesen objektiven Messungen werden über eine gewichtete sechsstufige Bewertungsskala die subjektive Güte der Entfernungsschätzung und der subjektive Einfluss der Bewegungsparallaxe bei massiven Kopfbewegungen ermittelt.

Die Ergebnisse der objektiven Wahrnehmungsentfernung der virtuellen Symbole sowie deren subjektive 3-D-Wirkung ist in Abbildung 6–13 für alle zehn untersuchten Bildweiten „b“ (3 m, 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m und 100 m) dargestellt. Auf der x-Achse der objektiven Ergebnisdiagramme sind die fünf Suggestionse Entfernungen „s“ (10 m, 20 m, 40 m, 60 m und 80 m) aufgetragen. Korrespondierend dazu weist die y-Achse die objektive Wahrnehmungsentfernung „w“ auf, in der die Probanden die virtuelle Symbolik wahrgenommen haben. Die gestrichelte horizontale Linie deutet die jeweils untersuchte Bildweite „b“ an, in der sich das virtuelle Display befindet. Die Kurve mit den quadratischen Messwerten, repräsentiert die Ergebnisse der monokularen Schätzung. Die Ergebnisse der binokularen Schätzung werden durch die zweite Kurve dargestellt, deren Messwerte ein rautenförmiges Symbol haben. Eine perfekte Entfernungsschätzung würde die diagonale Kurve 3 ergeben, deren Stützpunkte mit Kreisen dargestellt sind. Sowohl die monokulare als auch die binokulare Schätzkurve sollten sich an diese ideale Schätzkurve anschmiegen. In diesem Fall wäre bestätigt, dass virtuelle Objekte durch eine Manipulation der monokularen Tiefenkriterien in unterschiedlichen Entfernungen suggeriert werden können.

Objektive 3-D-Wirkung

Subjektive 3-D-Wirkung





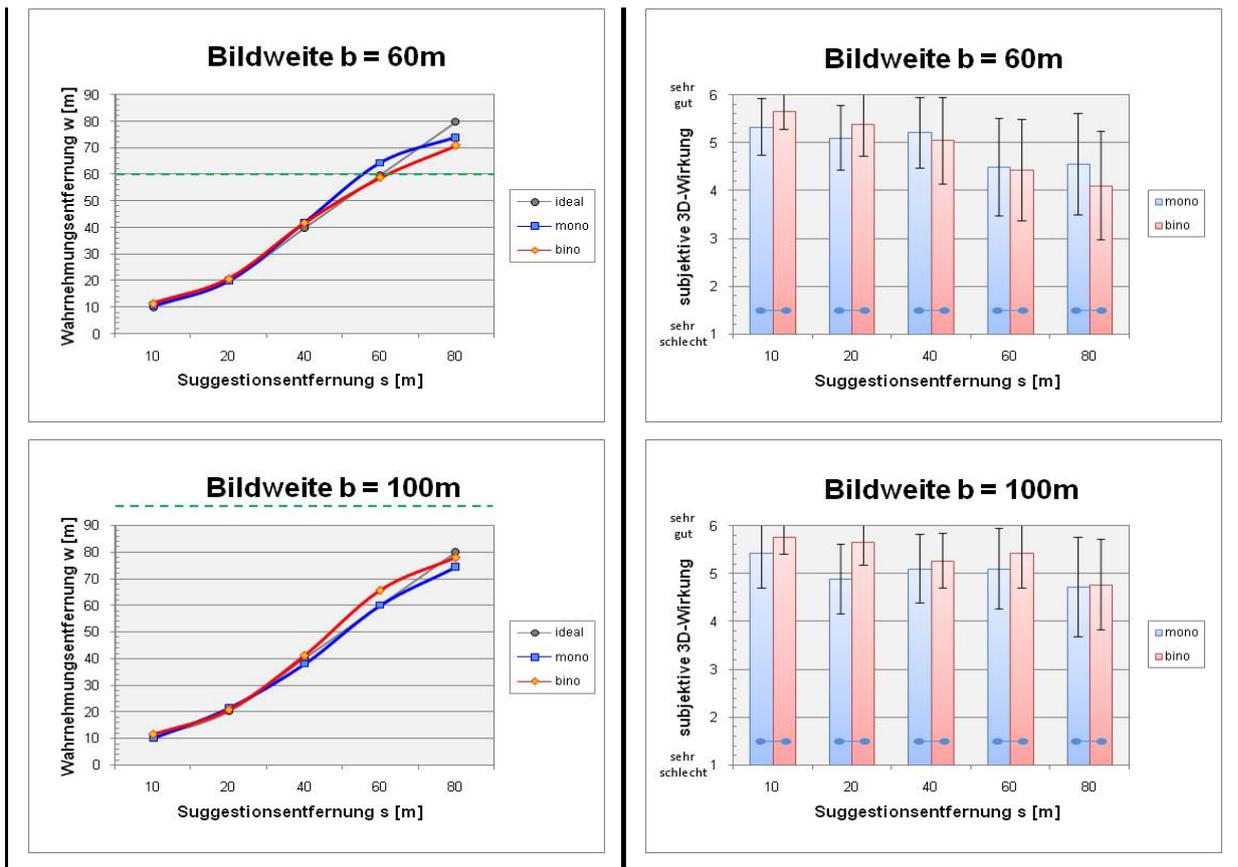


Abbildung 6–13: Ergebnisse der objektiven Wahrnehmungsentfernung (links) sowie der subjektiven 3-D-Wirkung (rechts) der virtuellen Objekte in Abhängigkeit der Bildweite b

Die auf der rechten Seite der Abbildung 6–13 dargestellten Diagramme geben die subjektiven Ergebnisse der 3-D-Wirkung wieder. Analog zu den objektiven Ergebnisdiagrammen weist die x-Achse auch in diesem Fall die fünf Suggestionentfernungen „s“ auf. Auf der y-Achse ist die subjektive 3-D Wirkung aufgetragen, die im Rahmen der Versuche anhand einer sechsstufigen Bewertungsskala ermittelt wurde. Symbole erhalten den Wert 1, wenn sie einen sehr schlechten dreidimensionalen Eindruck wiedergeben. In der Regel werden diese dann als schwebend in der Nähe der virtuellen Ebene wahrgenommen und nicht wie erwünscht in der entsprechenden Suggestionentfernung „s“. Liefert ein Objekt hingegen einen sehr guten Entfernungseindruck, wird es mit einem hohen Wert bewertet. Analog zu den objektiven Ergebnissen sind auch hier die Resultate der monokularen Schätzung mit denen der binokularen konfrontiert.

Abbildung 6–13 zeigt, dass die virtuellen Symbole bei einer Bildweite „b“ von lediglich 3 m weder monokular noch binokular in den gewünschten Suggestionentfernungen „s“ wahrgenommen werden. Bei der monokularen Schätzung erzielt zwar das virtuelle Symbol mit der Suggestionentfernung 10 m sowohl objektiv, als auch subjektiv einen sehr guten

Wert, jedoch verschlechtert sich dieser signifikant, sobald das Delta zwischen Suggestionse Entfernung „s“ und Bildweite „b“ größer wird. Das virtuelle Symbol mit der Suggestionse Entfernung 80 m wird von den Probanden im Mittel in einer viel näheren Entfernung von 40 m wahrgenommen. Diese schlechten Schätzergebnisse spiegeln sich in der subjektiven Bewertung wieder. Die monokulare 3-D-Wirkung des virtuellen Symbols mit der Suggestionse Entfernung 80 m wird mit einem Wert von 2,3 schlecht bewertet. Dieses Ergebnis ist auf den starken Einfluss der Akkommodation, sowie der Bewegungsparallaxe, zurückzuführen. Bereits minimale Kopfbewegungen der Probanden erzeugen bei derartig nahen Bildweiten eine gravierende Positionsveränderung des virtuellen Symbols. Je größer der Unterschied zwischen Bildweite „b“ und Suggestionse Entfernung „s“ ist, umso gravierender wird dieser negative Einfluss der Bewegungsparallaxe.

Erhält das menschliche Gehirn durch das Öffnen des zweiten Auges noch zusätzlich die Information der Disparität, so verschlechtern sich die Ergebnisse der Bildweite 3 m nochmals. Die objektiven Ergebnisse zeigen, dass binokular alle fünf virtuellen Objekte schwebend in der virtuellen Ebene wahrgenommen werden. Die Rückmeldung über die tatsächliche Entfernung der virtuellen Objekte, nämlich in 3 m, ist durch die Akkommodation, die Bewegungsparallaxe, die Konvergenz und insbesondere die Disparität so stark, dass sich das menschliche Gehirn von den monokularen Tiefenkriterien nicht täuschen lässt. Die subjektiven Ergebnisse bestätigen die objektiven, indem alle virtuellen Objekte mit einer größeren Suggestionse Entfernung „s“ als 10 m mit Werten zwischen 1,3 und 1,2 als sehr schlecht bewertet werden.

Eine Vergrößerung der Bildweite „b“ auf 5 m bewirkt keine merkliche Verbesserung. Sowohl monokular als auch binokular werden die virtuellen Symbole nicht in der erwünschten Suggestionse Entfernung „s“ wahrgenommen. Analog zur Bildweite 3 m werden auch bei 5 m alle virtuellen Symbole bei der binokularen Schätzung in der virtuellen Ebene über dem Boden schwebend wahrgenommen. Monokular werden die eingeblendeten Symbole zwar in größeren Entfernungen gesehen, jedoch ist der Schätzfehler im Vergleich zur angestrebten Idealkurve mit annähernd 35 m noch viel zu groß.

Erst ab einer Bildweite „b“ von 10 m ist eine merkliche Verbesserung der monokularen Schätzung feststellbar. Die virtuellen Symbole der Suggestionse Entfernung „s“ 10 m, 20 m, 40 m und 60 m werden relativ exakt in der gewünschten Entfernung wahrgenommen. Lediglich bei einer Suggestionse Entfernung von 80 m ist der bei Kopfbewegungen auftretende Bewegungsparallaxenunterschied noch so stark, dass die virtuelle Symbolik im Mittel 18 m näher und leicht über den Boden schwebend wahrgenommen wird.

Binokular sind sowohl die objektiven, als auch die subjektiven Ergebnisse unverändert schlecht. Nur das Symbol der Suggestionse Entfernung 10 m erzielt gute Resultate. Dies ist jedoch damit zu begründen, dass die Suggestionse Entfernung „s“ (10 m) in diesem Sonderfall der Bildweite „b“ (10 m) entspricht. Folglich wird das virtuelle Objekt analog zu den anderen vier Suggestionse Entfernungen in der virtuellen Ebene wahrgenommen und nicht in einer davon abweichenden Entfernung.

Bei einer Vergrößerung der Bildweite „b“ auf 15 m ist sowohl objektiv als auch subjektiv eine kontinuierliche Verbesserung der dreidimensionalen Wirkung feststellbar. Dennoch ist erst ab einer Bildweite von 20 m der negative Einfluss der Kopfbewegung so stark minimiert, dass die fünf virtuellen Objekte auch tatsächlich in den gewünschten Entfernungen wahrgenommen werden. Nur bei den beiden großen Suggestionse Entfernungen von 60 m und 80 m tritt eine geringe Schätzungenauigkeit von im Mittel 7 m und 9 m auf. Dies ist jedoch auf die natürliche Schätzungenauigkeit des Menschen zurückzuführen, die mit größerer Entfernung zum Objekt zunimmt. Ein Blick auf die subjektiven Ergebnisse bestätigt diese Annahme. Allen fünf virtuellen Objekten wird eine gute bis sehr gute dreidimensionale Wirkung attestiert. Die Probanden bestätigen, dass sie alle fünf eingeblendeten Symbole monokular in unterschiedlichen Entfernungen und auf dem Boden stehend wahrnehmen. Infolgedessen kann die Visualisierungsmethode für die monokulare Betrachtung virtueller Objekte ab einer Bildweite von 20 m als verifiziert angesehen werden. Der durch Kopfbewegungen hervorgerufene negative Einfluss der Bewegungsparallaxe ist in diesem Fall so stark minimiert, dass eine Suggestion unterschiedlicher Objektentfernungen zum Betrachter möglich wird. Eine Vergrößerung der Bildweite „b“ auf 30 m, 40 m, 50 m, 60 m und 100 m bewirkt monokular keine signifikante Verbesserung.

Im Gegensatz dazu werden bei einer Bildweite von 20 m und binokularer Betrachtung alle virtuellen Objekte in einer viel näheren Entfernung als der erwünschten Suggestionse Entfernung wahrgenommen. Der Grund hierfür ist die in diesen Entfernungen starke Rückmeldung der Disparität, die bislang noch eine Täuschung der räumlichen Wahrnehmung verhindert. Auffällig ist jedoch, dass die Symbole nicht mehr direkt in der virtuellen Ebene gesehen werden, was bereits ein Indiz für eine beginnende Disparitätsminimierung darstellt. Bei einer näheren Betrachtung der binokularen Schätzkurve der Bildweiten 20 m, 30 m, und 40 m ist erkennbar, dass die vor der virtuellen Ebene zu suggerierenden virtuellen Symbole bereits dreidimensional gesehen werden. Lediglich die virtuellen Objekte hinter der virtuellen Ebene werden noch als schwebend und näher als die gewünschte Suggestionse Entfernung wahrgenommen. Eine Erklärung dieses Effektes ist in der Dominanz des monokularen Tiefenkriteriums der „Verdeckung“ zu sehen. Gemäß

Abbildung 6–11 ragt das virtuelle Display im Fall 2 durch die Oberfläche in den Boden der Fahrbahn. Ein vor der virtuellen Ebene zu suggerierendes Objekt wird perspektivisch so kalibriert, dass es annähernd die gesamte Höhe des Displays in Anspruch nimmt. In der Realität würde der untere Teil des Icons durch die Fahrbahnoberfläche verdeckt werden. Aufgrund der virtuellen Projektion ist dies jedoch nicht der Fall, so dass der Mensch den sichtbaren unteren Teil des Icons auf die Fahrbahnoberfläche referenziert und somit in einer näheren Entfernung als der Bildweite wahrnimmt. Da dieser Effekt bei Symbolen mit einer größeren Suggestionse Entfernung als der Bildweite (Fall 1) nicht eintritt, sowie die Rückmeldung der Disparität bei einer Bildweite von 40 m noch zu ausgeprägt ist, werden diese Objekte in einer näheren Entfernung wahrgenommen.

Erst ab einer Bildweite von 50 m ist die Disparitätsdominanz ausreichend stark minimiert. Die objektiven und subjektiven Ergebnisse der Abbildung 6–13 bestätigen, dass virtuelle Objekte ab einer Bildweite von 50 m nicht nur vor der virtuellen Ebene, sondern auch hinter der virtuellen Ebene, kontaktanalog wirken. Eine statistische Überprüfung der objektiven Ergebnisse bestätigt mit einem α -Fehler von mehr als 25 % absolute Identität der monokularen und binokularen Schätzkurve. Infolgedessen markiert die Bildweite von 50 m die Umschlagsentfernung, in der die Dominanz der Disparität so stark minimiert ist, dass vom menschlichen Gehirn zur Generierung der räumlichen Konstellation ausschließlich monokulare Tiefenkriterien herangezogen werden und folglich durch Manipulation der Selben eine kontaktanaloge Visualisierung ermöglicht wird. Entsprechend korrelieren die subjektiven Ergebnisse, bei denen sowohl monokular als auch binokular alle Objekte der fünf Suggestionse Entfernungen mit gut bis sehr gut bewertet werden. Im Falle der 40 m Suggestionse Entfernung erzielt die binokulare Schätzung sogar im Mittel einen besseren Wert als die monokulare. Bei einer Erweiterung der Bildweite auf 60 m und 100 m ist keine weitere Verbesserung der Tiefenwirkung feststellbar. Sowohl die monokularen, als auch die binokularen Schätzkurven, schmiegen sich der Idealkurve an.

In Anbetracht dessen kann es als bestätigt angesehen werden, dass mit den gleichen technischen Komponenten eines konventionellen binokularen Head-Up-Displays berührungslos und ohne Verwendung eines Head-Tracking-Systems, sowohl stehende, als auch auf der Straße liegende virtuelle Fahrerassistenzinformationen in mittleren bis sehr großen Entfernungen vor dem Fahrzeug kontaktanalog suggeriert werden können. Eine grundlegende Voraussetzung dieser Visualisierungsmethode besteht in der Erweiterung der Bildweite auf mindestens 50 m. In diesen Entfernungen ist die Disparitätsrückmeldung der tatsächlichen Objektentfernung so stark minimiert, dass den monokularen Tiefenkriterien, die eine von der Realität abweichende räumliche Konstellation vortäuschen, mehr Vertrauen

geschenkt wird. Des Weiteren sind bei einer derartig großen Bildweite, die durch Kopfbewegungen hervorgerufenen Störungen der Bewegungsparallaxenunterschiede zwischen virtuellen und realen Objekten so gering, dass sie nicht mehr wahrgenommen werden. Durch diese verifizierte Visualisierungsmethode kann das komplexe Problem der kontaktanalogen Visualisierung unter automotive-tauglichen Gesichtspunkten gelöst werden.

Die Methode hat ihre Vorzüge insbesondere bei der Visualisierung stehender virtueller Informationen in mittleren bis sehr großen Entfernungen, so dass sie sich hervorragend zur kontaktanalogen Markierung sicherheitskritischer Objekte, insbesondere Fußgängern, eignet. Im Gegensatz dazu besitzt die in Kapitel 4.2.3 beschriebene Visualisierungsmethode der „schrägen virtuellen Ebene“ (Bubb, 1975) einen entscheidenden Vorteil in der Visualisierung liegender Fahrerassistenzinformationen, wie Hofbeck et al. (2007) im Rahmen von Lichtkanalversuchen nachweisen konnten. In Anbetracht dessen sind Hybridlösungen vorstellbar, die die Vorteile beider Visualisierungsmethoden vereinen.

Das kontaktanaloge Head-Up-Display nach Schneid (2008) stellt eine derartige Hybridlösung dar. Basierend auf den beiden Visualisierungsmethoden von Bubb (1975) und Bergmeier (2008) verwendet es mit einem Kombiner, einer Optik und einem Display die gleichen technischen Komponenten eines konventionellen Head-Up-Displays. Das virtuelle Display liegt im Nahbereich auf der Fahrbahnoberfläche und biegt sich mit steigender Entfernung stetig nach oben, so dass es im mittleren Entfernungsbereich vertikal steht. Schneid (2008) gelang es, dieses Lösungskonzept integrativ zu realisieren. Hierfür mussten jedoch zur Reduktion des Bauvolumens einige Kompromisse eingegangen werden, so dass die geforderte Bildweite von 50 m zur idealen Reduktion der Disparitätsdominanz nicht umgesetzt werden konnte. Infolgedessen leidet insbesondere in großen Entfernungen die Qualität der kontaktanalogen Darstellung.

6.2.1.2 Technischer Aufbau des Versuchsträgers

Als Basis wird ein BMW 730i verwendet, der mit einem modularen kontaktanalogen Head-Up-Display, einer Sensorik, einem Visualisierungs- und Bildverarbeitungsrechner sowie einem Datenaufzeichnungsrechner bestückt ist (Abbildung 6–14).



Abbildung 6–14: Versuchsträger A mit kontaktanalogem Head-Up-Display

Das modulare kontaktanaloge Head-Up-Display besteht aus einem Kombiner und einem HUD-Modul. Im Gegensatz zu bekannten Serienlösungen wird im vorliegenden Fall nicht die Windschutzscheibe als Kombiner verwendet, sondern eine zusätzliche plane Scheibe, die im Bereich zwischen Lenkrad und Fahrerkopf positioniert ist (siehe Abbildung 6–15). Zur Vermeidung von Doppelbildern ist sie mit einer Dicke von 1,5 mm sehr dünnwandig ausgeprägt. Befestigt ist sie in einer L-förmigen Kombinerhalterung, die wiederum mit dem Fahrzeug an den Anschraubpunkten der Sonnenblende und des Handhaltegriffs verbunden ist (Fu, 2007). Um eine Beeinträchtigung der Fahrersicht zu vermeiden, fluchtet die Kombinerhalterung aus Sicht des Fahrers mit der linken A-Säule des Fahrzeugs (siehe Abbildung 6–15). Ebenso ist auch der obere Teil der Kombinerhalterung außerhalb des primären Blickfelds des Fahrers angebracht. Zudem verfügt die Kombinerhalterung über vier unterschiedliche Nivellierungen, so dass eine schnelle und einfache Kalibrierung des Gesamtsystems gewährleistet ist. Die Geometrie des Kombiners ist so ausgelegt, dass sowohl ein ausreichend großes Blickfeld zur Superpositionierung virtueller Informationen gewährleistet ist, als auch der Fahrer beim Lenken in seiner Bewegungsfreiheit nicht eingeschränkt wird.



Abbildung 6–15: Anordnung der IR-Kamera, des Kombiners sowie des HUD-Moduls im Versuchsträger A

Das HUD-Modul ist im Bereich des Beifahrersitzes montiert und so eingestellt, dass der Fahrer weder bei Schulterblicken noch bei der Informationsaufnahme im rechten Außenspiegel beeinträchtigt wird (Israel, 2006) (siehe Abbildung 6–14 und Abbildung 6–15). Es besteht aus einer Fresnellinse, einem Umlenkspiegel, einem Beamer und einer Leinwand (Neubauer, 2007) (Abbildung 6–16). Der Beamer projiziert über den Umlenkspiegel die dazustellenden Informationen auf die Leinwand. Diese ist vertikal an einer definierten Stelle innerhalb der Brennweite positioniert, so dass ein Betrachter bei einem Blick durch die Fresnellinse, gemäß des ersten Abbildungsgesetzes, auf eine stark vergrößerte virtuelle Leinwand blickt, die sich in einer Entfernung von 50 m befindet. Durch diese sehr große Bildweite wird gemäß Kapitel 6.2.1.1 eine kontaktanaloge Wirkung der virtuellen Informationen erzeugt. Um Störungen durch Streulicht zu vermeiden, ist das komplette HUD-Modul mit einem schwarzen Gehäuse gekapselt. Der Kombiner superpositioniert das im HUD-Modul generierte virtuelle Bild mit dem natürlichen Blickfeld des Fahrers, so dass in einer Entfernung von 50 m vor dem Fahrzeug eine 30 m breite und 10 m hohe virtuelle Leinwand generiert wird. Die Kalibrierung der virtuellen Leinwand erfolgt über den Kombiner, der mit mehreren Feinjustiermechanismen ausgestattet ist. Sie muss nur einmalig bei Integration des kontaktanalogen HUDs ins Fahrzeug durchgeführt werden. Danach ist sie unabhängig von den anthropometrischen Eigenschaften des Fahrers stimmig. Die Größe der

Eye-Box beträgt $20^\circ \times 5^\circ$. Die Leuchtdichte der virtuellen Leinwand ist an die Umgebungshelligkeit so angepasst, dass sie vom Fahrer bei einem schwarzen Hintergrund nicht wahrgenommen werden kann. Gemäß der Visualisierungsmethodik aus Kapitel 6.2.1.1 können somit virtuelle Objekte durch eine technisch einfach zu realisierende Manipulation der monokularen Tiefenkriterien dreidimensional in unterschiedlichen Entfernungen vor, sowie hinter der virtuellen Leinwand, suggeriert werden (siehe Abbildung 6–11).

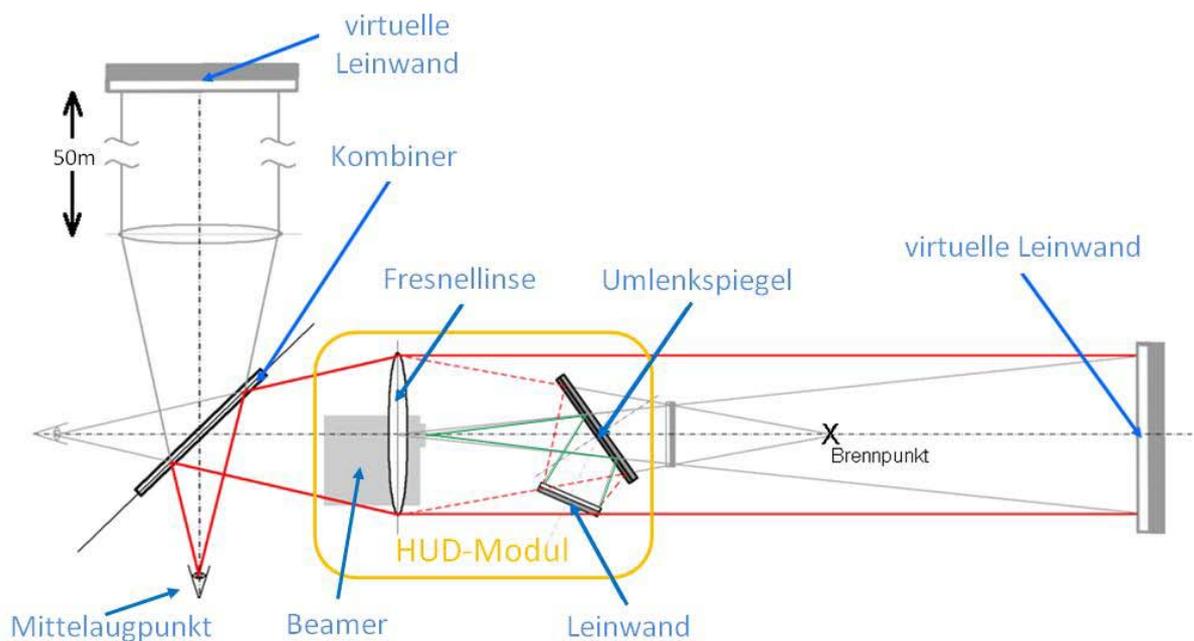


Abbildung 6–16: Schematischer Aufbau des kontaktanalogen Head-Up-Displays

Im Bezug auf die Applikation Night-Vision wird als Sensorik eine ferninfrarotempfindliche Kamera verwendet, die das nächtliche Verkehrsgeschehen bis zu einer Reichweite von 300 m vor dem Fahrzeug erfasst. Im Hinblick auf eine kontaktanaloge Visualisierung besteht ein erstes Problem darin, das von der Kamera erfasste FIR-Videobild mit dem realen Blickfeld des Fahrers in Überdeckung zu bringen. Da FIR-Sensoren aufgrund der wärmereflektierenden Windschutzscheibe nicht im Bereich des Rückspiegels verbaut werden können, sind sie in der Regel relativ nah über dem Boden, im Fahrzeugschweller, angebracht. Die Perspektive der FIR-Kamera weicht folglich erheblich von der des Fahrers ab, so dass eine Überlagerung des FIR-Videobildes mit der realen Sicht des Fahrers nicht möglich ist. Zur Kompensation dieses Versatzes besteht eine Möglichkeit darin, über zusätzliche Sensoren in Echtzeit die 3-D-Koordinaten der realen Objekte in der Umgebung zu erfassen und mittels einer Matrizen transformation auf die Fahrerperspektive umzurechnen. Dies kann über zwei zueinander beabstandete angeordnete FIR-Kameras oder durch die Kombination einer FIR-Kamera mit einem Radar- oder Lidarsensor erfolgen. Beim vorliegenden Versuchsträger wird hingegen ein alternatives Lösungskonzept gewählt,

dessen Prinzip darin besteht, die FIR-Kamera möglichst nah an die Mittelaugposition des Fahrers anzunähern, ohne dabei den verkehrsrelevanten Sichtbereich zu beeinträchtigen. Hierbei wird insbesondere auf die Kompensation des y- und z-Versatzes geachtet, wohingegen der x-Versatz aufgrund der großen Visualisierungsentfernung vernachlässigt wird. Infolgedessen ist die FIR-Kamera auf einem Dachträger mittig über dem Fahrerplatz montiert und bezüglich der z-Koordinate so an die Mittelaugposition des Fahrers angenähert, dass der Perspektivunterschied der FIR-Kamera zur Fahrersicht kompensiert wird (siehe Abbildung 6–15). Sowohl die FIR-Kamera, als auch der Dachträger sind schwarz lackiert, so dass die an das primäre Blickfeld des Fahrers angenäherten Aufbauten bei Nacht kaum wahrnehmbar sind. Eine Beeinträchtigung der Fahrersicht ist somit ausgeschlossen.

Das perspektivisch richtige Videobild der FIR-Kamera wird an die Rechneinheit übertragen, die wiederum mit dem Beamer des HUD-Moduls verbunden ist. Über eine Visualisierungssoftware wird das FIR-Videobild durch eine iterative Anpassung der vertikalen und horizontalen Lage, sowie des Skalierungsfaktors, mit der Realität in Überdeckung gebracht.

Ein weiteres Problem besteht in der Reduktion des hochinformativen FIR-Videobildes auf einen ablenkungsminimierten roten Rahmen, der sicherheitskritische Fußgänger auf der Fahrbahn intuitiv markiert. Das zu diesem Zweck programmierte Bildverarbeitungsprogramm erkennt und markiert sicherheitskritische Objekte. In einem ersten Schritt grenzt es das Videobild der FIR-Kamera vertikal auf den für die Personendetektion relevanten Bereich ein. Ein in 30 m vor dem Fahrzeug stehender 2 m großer Mensch befindet sich gerade noch im relevanten Auswertebereich. Stehende Objekte in einer näheren Entfernung werden folglich nicht mehr erfasst. Diese befinden sich jedoch ohnehin schon in der Reichweite des Abblendlichts, so dass eine zusätzliche Markierung unnötig wäre. Der Vorteil der vertikalen Beschränkung des FIR-Videobildes ist in der Reduktion störender Fehldetektionen zu sehen. Die Bildverarbeitungssoftware analysiert fortan jedes Frame des FIR-Videostreams separat. Zunächst werden anhand eines definierten Helligkeitsschwellwertes alle Pixel extrahiert, die mit einer für Menschen charakteristischen Temperatur von ca. 300 K nach dem Planck'schen Strahlungsgesetz und dem Wien'schen Verschiebungsgesetz ein Strahlungsmaximum von ca. 9500 nm aufweisen und somit hell und deutlich aus dem Wärmebild hervorstechen (Hamm, 2006). Diese Pixelansammlungen werden des Weiteren hinsichtlich einer definierten minimalen und maximalen Pixelanzahl gefiltert. In einem weiteren Schritt werden diese gefilterten Pixelgruppen nach speziellen Algorithmen zu zusammengehörigen Objekten gruppiert. Somit wird gewährleistet, dass ein wärmeemittierender und somit heller Kopf, sowie die davon separierten warmen Beine, bei einem mit einer gut isolierenden Winterjacke bekleideten Fußgänger, als ein gemeinsames

Objekt erkannt werden. Außerdem werden diese detektierten Objekte in Abhängigkeit ihrer Größe, Geometrie und relativen Lage zum Horizont analysiert, um sowohl die Wahrscheinlichkeit eines False-Alerts als auch eines Miss-Alerts weitestgehend ausschließen zu können. In einem letzten Schritt werden die hellen Konturen eines detektierten Fußgängers mit einem roten Rahmen markiert und anschließend ausgeblendet. Der Fahrer sieht folglich lediglich ein rotes Viereck, das umgehend einfadet, sobald von der Bildverarbeitungssoftware ein Passant erkannt wird. Sobald das reale Objekt im Abblendlicht erkennbar wird, fadet der rote Rahmen aus, so dass er in einer Entfernung von ca. 30 m völlig verblasst ist. Hierdurch werden Maskierungseffekte weitestgehend vermieden, sowie die gesamte Aufmerksamkeit des Fahrers innerhalb seiner visuellen Reichweite auf das reale Objekt gelenkt.

Neben der Visualisierung und Bildverarbeitung besteht eine weitere Aufgabe der Rechneinheit in der Aufzeichnung relevanter Fahrdynamikdaten während der Versuche. Zu jedem Zeitpunkt werden Parameter wie Brems- und Gaspedalstellung, Lenkwinkel, Geschwindigkeit sowie Längs- und Querschleunigungen des Fahrzeugs vom CAN-Bus abgegriffen und gespeichert.

6.2.2 Feldversuch

Das auf theoretischen Annahmen basierende HMI-Lösungskonzept zur kontaktanalogen Markierung sicherheitskritischer Objekte wird im Vergleich zu fünf alternativen HMI-Varianten und einer nicht assistierten Baselinefahrt im Rahmen eines Feldexperimentes hinsichtlich Effektivität, Effizienz, Ablenkung und Zufriedenheit evaluiert (siehe auch Haslbeck, et al., 2007). Unter dem Begriff der „Effektivität“ wird der eigentliche Mehrwert des Gesamtsystems verstanden, der an einer subjektiven und objektiven Sicherheitssteigerung der nächtlichen Fahrt gemessen wird. Ein Nachtsichtsystem ist um so sicherer, je zuverlässiger und früher sicherheitskritische Objekte in der Realität erkannt werden. Auch das Fahrverhalten spielt eine wesentliche Rolle, das vom Fahrer insbesondere in Bezug auf die Längsdynamik frühzeitig an die bevorstehende sicherheitskritische Situation angepasst werden muss. Zusammen mit der vom Fahrer subjektiv empfundenen Unterstützung und Sicherheitssteigerung kann auf die eigentliche Effektivität der unterschiedlichen Nachtsichtsysteme geschlossen werden.

Die zweite Untersuchungskategorie, die „Effizienz“, analysiert das Mensch-Maschine-System der Nachtsichtsysteme, wobei der Fokus insbesondere auf den Informationsgehalt, die Informationsaufbereitung und den Anzeigort gelegt wird. Ein effizienzgesteigertes HMI zeichnet sich durch eine zuverlässige und schnelle Informationsaufnahme der in Kapitel 3.3

geforderten Objektinformationen – Warnung, Richtung, Entfernung, und Dynamik – aus. Dies wird in erster Linie durch eine Analyse des Blickverhaltens ermittelt.

Die Untersuchungskategorie der „Ablenkung“ gibt Aufschluss über das objektive und subjektive Negativpotenzial der HMI-Varianten. Bekannte Effekte sind das „Attention Capture“ (Prinzel, et al., 2004) oder ein Überschreiten der 2s-Blickdauergränze (Schweigert, 2003). Aber auch eine stark erhöhte Fixationshäufigkeit kann ein Indiz für eine vermehrte Ablenkung darstellen, wenn keine merkliche Effektivitätssteigerung feststellbar ist. In diesen Fällen ist der Fahrer bei der Bewältigung der primären Fahraufgabe beeinträchtigt, was sich auf eine Reduktion der Fahrsicherheit auswirkt. Für diese Analyse werden insbesondere die Blickdaten der Probanden herangezogen. Die „Zufriedenheit“, die letzte der vier Untersuchungskategorien, prüft den subjektiven Gesamteindruck der Systeme. Neben der subjektiven Zufriedenheit und dem Einfluss von False- und Miss-Alarms wird ein finales Ranking der NiVi-Varianten ermittelt.

Das in den folgenden Kapiteln erläuterte Feldexperiment, umfasst zunächst die Beschreibung der unabhängigen Night-Vision-Varianten, sowie des Versuchsdesigns. Letzteres umfasst das Probandenkollektiv, die Versuchsträger, die Versuchsstrecken, die Datenermittlung und Kennwerte, sowie den Versuchsablauf. Anschließend werden die hinsichtlich der vier Untersuchungskategorien generierten Hypothesen vorgestellt, die in Verbindung mit den jeweiligen Kennwerten verifiziert bzw. falsifiziert werden. Dies erfolgt basierend auf der anschließenden Ergebnispräsentation, so dass der hypothetische Mehrwert des kontaktanalog markierenden Head-Up-Displays am Ende dieses Kapitels bestätigt bzw. negiert werden kann.

6.2.2.1 HMI-Varianten

Im Rahmen der Versuche werden sieben unterschiedliche HMI-Varianten untersucht (Abbildung 6–17). Diese unterscheiden sich bezüglich des Informationsgehalts (Warnung, Richtung, Entfernung, Dynamik) des Anzeigeortes (CID, HUD, kHUD) sowie der Informationsdarstellungsart (FIR-Videobild, Symbolik).

Die Baselinefahrt (BLF) dient als Referenz für die anderen unabhängigen Variablen. Sie entspricht einer nichtassistierten Nachtfahrt, bei der sowohl das Head-Up-Display (HUD), als auch das zentrale Informationsdisplay (CID) ausgeschaltet sind. Der Fahrer muss sich einzig und allein auf seine individuellen visuellen Eigenschaften und Fähigkeiten verlassen, um sicherheitskritische Objekte im Abblendlicht frühzeitig erkennen zu können. Bei allen weiteren Varianten wird der Fahrer durch unterschiedlich ausgeprägte Nachtsichtsysteme assistiert. Sie verwenden alle eine konventionelle FIR-Kamera und eine identische Sensorik

und unterscheiden sich ausschließlich hinsichtlich ihrer HMIs, das die für den Fahrer visuell nicht wahrnehmbaren Informationen des frontalen Verkehrsraumes auf unterschiedliche Art und Weise aufbereitet und darstellt.

Die Variante NVF (**N**ight-**V**ision-**F**IR) präsentiert dem Fahrer lediglich ein zusätzliches FIR-Videobild im CID. Der Fahrer wird im Falle einer sicherheitskritischen Situation nicht aktiv gewarnt, sondern muss als aktive Aufgabe kontinuierlich das Videobild im CID scannen, sicherheitskritische Objekte selbstständig detektieren, sowie die relevanten Objektinformationen der Richtung, Entfernung und Dynamik in einem iterativen Prozess mit der Realität abgleichen. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei den in Abbildung 6–17 dargestellten Varianten WCF, WCR, HCU, HCR und kHUD um aktiv warnende Nachtsichtsysteme, die mit Hilfe eines Bildverarbeitungsrechners automatisiert sicherheitskritische Objekte detektieren und dem Fahrer in diesem Fall eine Warnung präsentieren.

Die Varianten WCF (**W**arnung **C**ID **F**requentiert) und WCR (**W**arnung **C**ID **R**ichtungscodiert) verwenden als Anzeigeort ausschließlich das zentrale Informationsdisplay, in dem analog zur Variante 2 (NVF) permanent das FIR-Videobild präsentiert wird. Zusätzlich erscheint im Falle eines detektierten Fußgängers ein gelbes Warnsymbol, das bei der Variante WCF zentral im oberen Drittel des Videobildes aufleuchtet. Durch diese neutrale Position im Display werden weder wesentliche Informationen im FIR-Videobild verdeckt noch relativ zum Display ungewollte Richtungsinformationen vermittelt. Zur Erhöhung der Aufmerksamkeitsbindung ist die Symbolik frequentiert ausgelegt. Nach dem Erscheinen blinkt sie zwei Mal mit einer Frequenz von 2 Hz auf und erscheint dann dauerhaft. Sie erlischt erst wieder, wenn die detektierte Gefahrenquelle passiert wird. Der Fahrer muss folglich im Vergleich zur NVF-Variante nicht mehr aktiv im Videobild nach sicherheitskritischen Objekten suchen, sondern monitiv auf Warnungen achten. Seine aktive Aufgabe reduziert sich folglich auf den iterativen Abgleich des Videobildes mit der Realität, um die Zusatzinformationen der Objektrichtung, -entfernung und -dynamik zu ermitteln.

Die Variante WCR entspricht annähernd der Variante WCF, wobei sie noch zusätzlich bezüglich der Gefahr einen relativen Richtungshinweis liefert. Die frequentierte Warnsymbolik erscheint nicht ausschließlich zentral im oberen Bildschirm Drittel, sondern in Abhängigkeit der sensierten Objektrichtung rechts, mittig oder links im Videobild. In der Abbildung 6–17 sind alle drei Erscheinungsalternativen der Warnsymbolik dargestellt. Tatsächlich erscheint das Warnsymbol nur in dem Bereich des CIDs, der die Platzierung der Gefahrenquelle am besten wiedergibt.

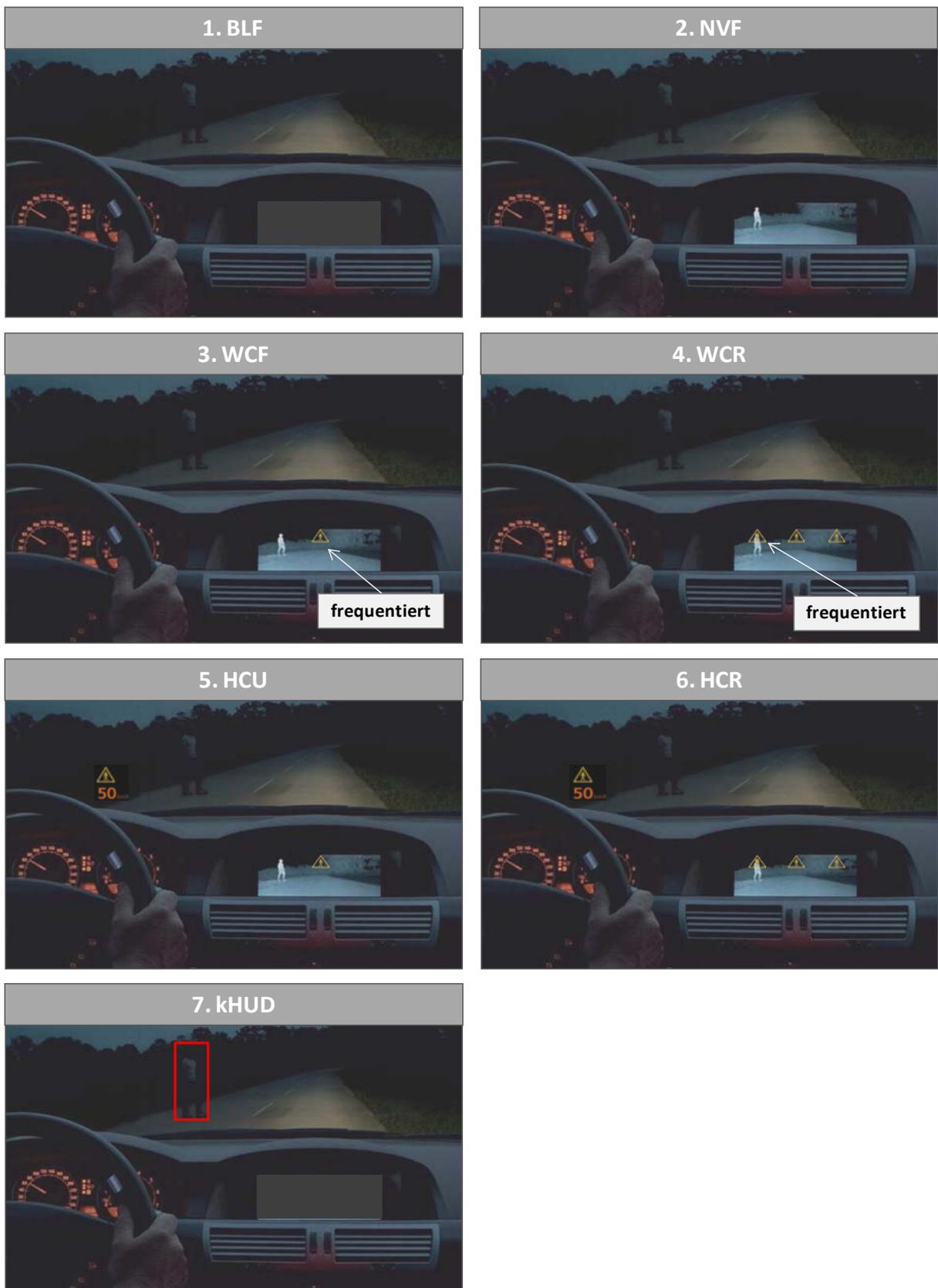


Abbildung 6–17: Untersuchungsvarianten

Die Varianten HCU (**H**ead-**U**p-**D**isplay **C**ID **U**nfrequentiert) und HCR (**H**ead-**U**p-**D**isplay **C**ID **R**ichtungskodiert) verwenden als zusätzliche Anzeige ein konventionelles HUD, in dem der Fahrer eine zum CID redundante Warnung erhält. Im Falle eines detektierten Fußgängers erscheint im HUD, oberhalb der digitalen Geschwindigkeitsanzeige, sowie zeitgleich im CID eine Objektwarnung, die wieder erlischt, sobald die Gefahr gebannt ist. Die Informationsdarstellung im CID ist im Falle der HCU-Variante in Bezug auf das FIR-Videobild und die Symbolposition analog zur WCF-Variante ausgelegt. Ebenso findet sich die richtungscodierte Warnung der WCR-Variante bei der HCR-Variante wieder. Der einzige Unterschied besteht in der Frequentierung, die bei beiden HUD-Varianten nicht vorhanden ist. Ein wesentlicher Vorteil der HUD-Varianten besteht im Vergleich zu den CID-Varianten in der schnellen und zuverlässigen Informationsaufnahme der Warnung im HUD.

Dennoch haben alle vier warnenden HMI-Varianten gleichermaßen einen entscheidenden Nachteil, der darin besteht, dass die in Kapitel 3.3 geforderten Objektinformationen der Richtung, Entfernung und Dynamik unzureichend aufbereitet sind. Der Fahrer benötigt folglich sehr viel Zeit zur Dekodierung der Informationen. Eine bessere Lösung stellt hier die kHUD-Variante (**k**ontaktanaloges **H**ead-**U**p-**D**isplay) dar, die sicherheitskritische Objekte kontaktanalog mit einem roten Rahmen im direkten Sichtfeld des Fahrers markiert (siehe Kapitel 5.2).

6.2.2.2 Versuchsdesign

Das Versuchsdesign umfasst die Beschreibung des Probandenkollektivs, der verwendeten Versuchsträger, sowie der definierten Versuchsstrecken. Des Weiteren werden die im Rahmen der Versuche ermittelten subjektiven und objektiven Daten beschrieben. Dann wird auf die daraus generierten Kennwerte zur Hypothesenüberprüfung eingegangen. Abschließend erfolgt eine detaillierte Beschreibung des Versuchsablaufs.

6.2.2.2.1 Probandenkollektiv

Im Rahmen der Versuche wird jede der sieben HMI-Varianten vom gesamten Probandenkollektiv getestet und bewertet. Insgesamt werden hierfür mit zwei Frauen und 24 Männern 26 Probanden herangezogen, die alle über gutes bis sehr gutes Sehvermögen verfügen. Der Altersdurchschnitt des Probandenkollektivs liegt bei 49,8 Jahren. Mit einer jährlichen Fahrleistung von mindestens 10000 km, sowie einem geforderten Führerscheinbesitz von mehr als 10 Jahren, handelt es sich bei den Testpersonen um ausschließlich geübte Autofahrer. Um eine gewisse Voreingenommenheit gegenüber der im Fokus stehenden NiVi- und HUD-Technologie ausschließen zu können, besteht eine zwingende

Voraussetzung zur Teilnahme an den Versuchen in der geringen Erfahrung mit derartigen Systemen. Zugleich gewährleistet diese Voraussetzung einen annähernd identischen Wissensstand, sowie eine vergleichbare Gewöhnungsphase. Die Versuchsstrecken sind für alle Versuchspersonen unbekannt.

6.2.2.2 Versuchsträger

Die Versuche werden mit zwei Versuchsträgern durchgeführt. Versuchsträger A, ein BMW 730i, wurde bereits in Kapitel 6.2.1.2 beschrieben. Er dient ausschließlich zur Untersuchung des kontaktanalog markierenden Head-Up-Displays, das im Rahmen der Versuche die Variante sieben (kHUD) darstellt. Alle anderen HMI-Varianten sind in einem zweiten Versuchsträger realisiert. Bei diesem Versuchsträger B handelt es sich um einen BMW 545i, der über eine FIR-Sensorik, eine Rechneinheit, sowie ein konventionelles CID und HUD verfügt (Abbildung 6–18).

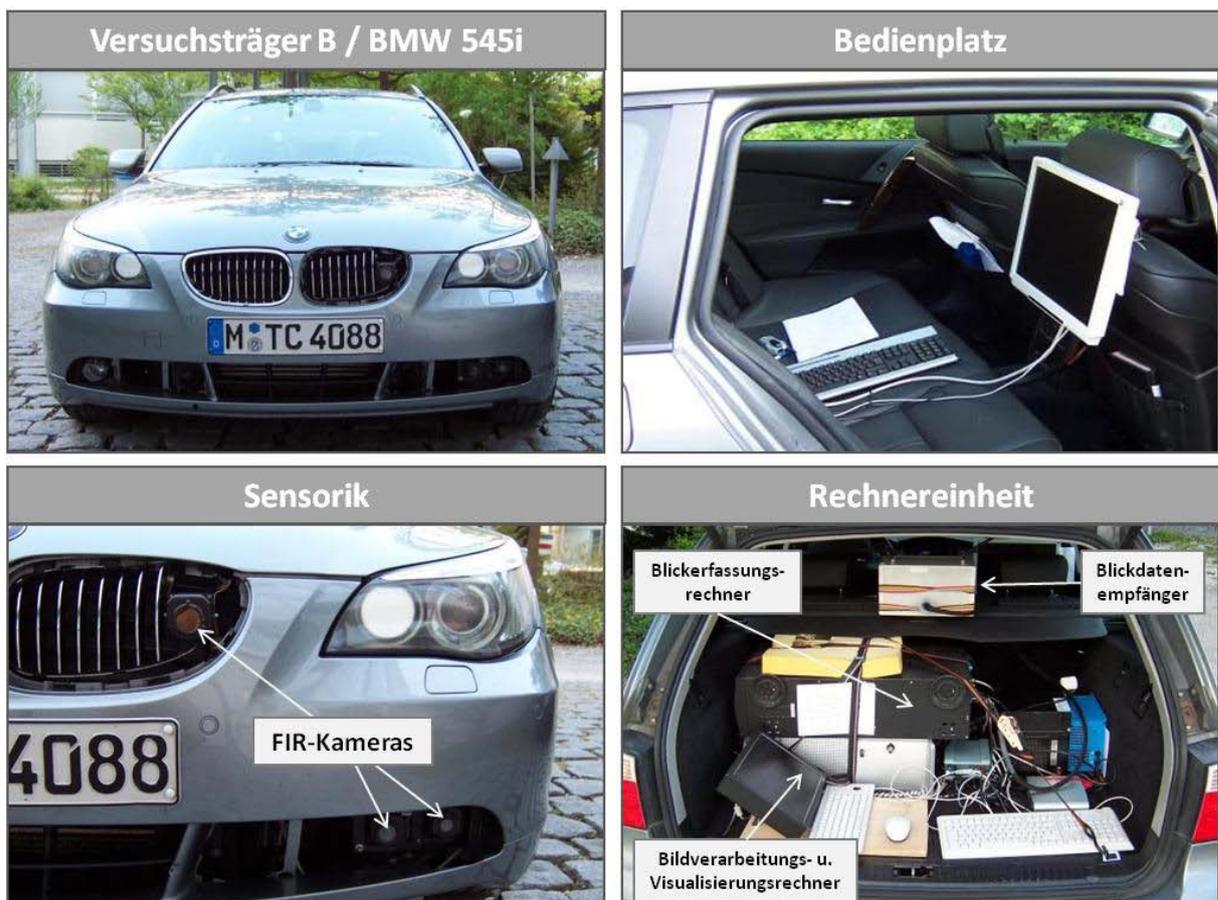


Abbildung 6–18: Versuchsträger B

Die Sensorik besteht aus drei FIR-Kameras, die im Schweller des Fahrzeugs verbaut sind. Aufgrund der besseren Perspektive wird das FIR-Videobild der am höchsten über der

Fahrbahn angeordneten FIR-Kamera an den Visualisierungsrechner im Kofferraum des Versuchsträgers übertragen, qualitativ aufbereitet und dem Fahrer im CID präsentiert. Die beiden anderen FIR-Kameras werden zur automatisierten Fußgängererkennung, sowie zur Realisierung der Richtungskodierung verwendet. Analog zu Versuchsträger A analysiert auch in diesem Fall eine Bildverarbeitungssoftware die eingespeisten Videosignale zur zuverlässigen Detektion sicherheitskritischer Objekte, insbesondere Fußgänger. Hat das System eine Gefahr erkannt, generiert der Visualisierungsrechner eine Warnung, die dem Fahrer - gemäß einer der in Kapitel 6.2.2.1 beschriebenen HMI-Varianten - im CID oder redundant im HUD präsentiert wird.

Für die Richtungskodierung der HMI-Varianten WCR und HCR werden die Signale beider FIR-Kameras verwendet. Der Sensorkegel der ersten FIR-Kamera wird so angepasst, dass er im Vergleich zum Sensorkegel der zweiten Kamera schmaler ist, aber dafür eine größere Reichweite aufweist (Abbildung 6–19). Wird ein Objekt im Sensorkegel 1 detektiert, erscheint die Warnsymbolik mittig im CID-Videobild. Sobald sich ein sicherheitskritisches Objekt ausschließlich im Sensorkegel 2 befindet, wird die Warnsymbolik im rechten, bzw. linken Bildschirmbereich präsentiert. Beide FIR-Kameras adaptieren ihre Sensorkegelgeometrie automatisch in Abhängigkeit des Lenkwinkels und der Geschwindigkeit. Somit wird eine gute Anpassung der Richtungskodierung an die Eigenschaften des vorausliegenden Straßenverlaufs gewährleistet.

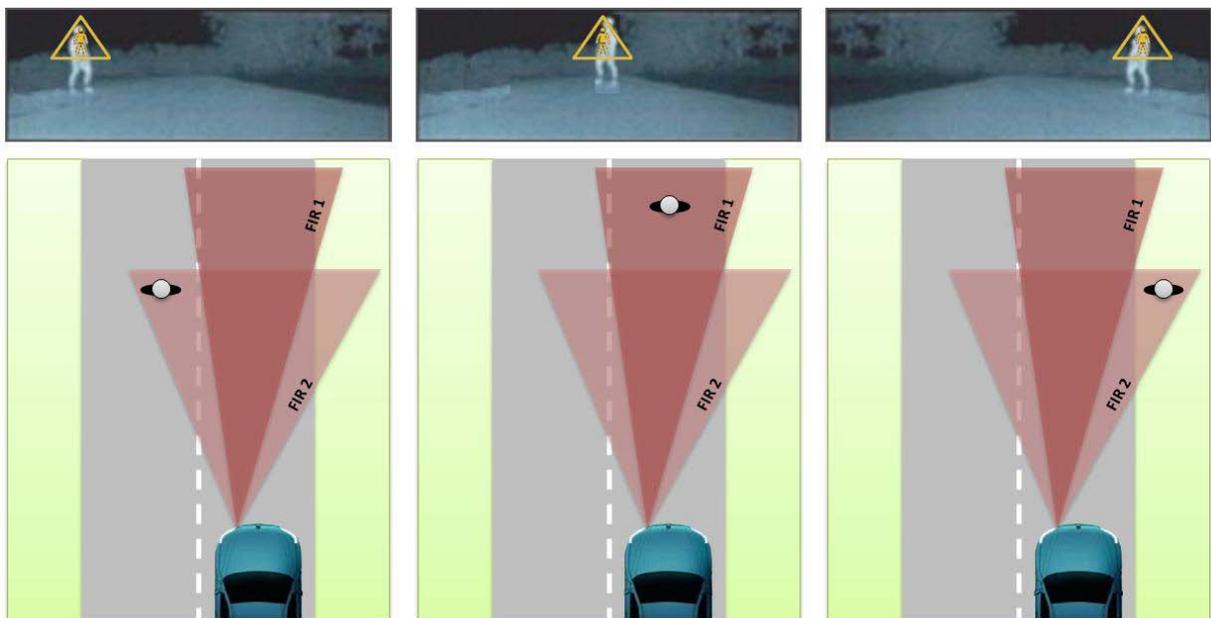


Abbildung 6–19: Sensorkegelgeometrie zur Realisierung der im CID präsentierten Richtungskodierung der beiden HMI-Varianten WCR und HCR

Die Messtechnik des Versuchsträgers B umfasst einen CAN-Datenlogger, sowie ein kabelloses Blickerfassungssystem (Ergoneers GmbH, 2008). Während der gesamten Versuchsfahrt werden über die Rechereinheit versuchsrelevante CAN-Daten, wie Objektdetektionen, Brems- und Gaspedalstellung, Lenkwinkel, Geschwindigkeit, Längs- und Querschleunigungen, sowie die FIR-Videosignale aufgezeichnet. Das Blickerfassungssystem besteht aus einer Head-Unit, einem Blickdatenempfänger und einem Blickerfassungsrechner (Abbildung 6–18). Das kopfbasierte Blickerfassungssystem erfasst über die Head-Unit das Blickverhalten der Probanden und sendet diese Daten per Funk an den Blickdatenempfänger, der wiederum mit dem Blickerfassungsrechner verbunden ist. Dieser bereitet die ermittelten Blickdaten auf und speichert sie während der gesamten Versuchsfahrt kontinuierlich ab. Die Reichweite der kabellosen Blickdatenübertragung reicht aus, um bei Folgefahrt auch in einem anderem Fahrzeug, wie beispielsweise dem Versuchsträger A, eine Blickdatenaufzeichnung durchführen zu können. Infolgedessen verfügt Versuchsträger A über kein eigenes Blickerfassungssystem.

6.2.2.2.3 Versuchsstrecke

Bei der Wahl der Versuchsstrecken wird darauf geachtet, dass eine sehr gute Reproduzierbarkeit und somit Vergleichbarkeit der sieben unterschiedlichen HMI-Varianten gewährleistet wird. Des Weiteren muss der Bekanntheitsgrad der Versuchsstrecken für alle Probanden gering sein. Kritische Situationen müssen unerwartet und nach einem undurchschaubaren Schema eintreten. Somit wird weitestgehend ein natürliches Fahrverhalten begünstigt und eine Ergebnisverfälschung aufgrund von Gewöhnungseffekten vermieden. Aufgrund dessen werden insgesamt sieben unterschiedliche Versuchsstrecken bestimmt, so dass jede der sieben HMI-Varianten auf einem anderen Kurs erprobt wird. Bei allen Versuchsstrecken handelt es sich um Landstraßenrundkurse mit Ortsdurchfahrten. Die benötigte Fahrzeit pro Rundkurs beträgt im Mittel ca. 25 Minuten. Das Verkehrsaufkommen ist gering, so dass hieraus resultierende Störeinflüsse minimiert werden. Jede der sieben Versuchsstrecken beinhaltet sechs gestellte sicherheitskritische Situationen, bei denen alle Objekte bis zum Passieren des Versuchsfahrzeugs statisch an einer definierten Position verharren. Diesbezüglich werden zu gleichen Teilen zwischen Einzel- und Doppelsituationen unterschieden. Bei den drei Einzelsituationen befindet sich immer nur ein Fußgänger am Fahrbahnrand, wobei in permutierter Reihenfolge zweimal die rechte und einmal die linke Straßenseite gewählt wird. Analog gestaltet sich die Objektpositionierung im Falle der Doppelsituationen, wobei der in diesem Fall zweite Passant stets auf der gegenüberliegenden Straßenseite in einer 20 m größeren Entfernung positioniert ist. Keiner der Fußgänger trägt weiße oder reflektierende Kleidung. Während eines Rundkurses beträgt

die durchschnittliche ereignisfreie Zeit zwischen den sechs Situationen 3,3 Minuten. Durch diese relativen langen Zeitfenster wird, insbesondere in Bezug auf das FIR-Videobild, eine natürliche Nutzungshäufigkeit sichergestellt.

Um sowohl die drei Einzelsituationen, als auch die drei Doppelsituationen einer einzelnen Versuchsfahrt, mit denen der anderen sechs Versuchsstrecken vergleichen zu können, erfüllen auch diese diverse Anforderungen. So befinden sie sich ausschließlich außerorts auf einem jeweils geraden und mindestens 200 m langen Landstraßenabschnitt, um eine Sichtreduktion aufgrund topologischer Ursachen, wie beispielsweise Kurven oder Kuppen auszuschließen. Des Weiteren erlaubt die Straßenbeschaffenheit der Situationsabschnitte eine Geschwindigkeit von mindestens 80 km/h. In unmittelbarer Nähe der gestellten sicherheitskritischen Situationen befinden sich keine Lichtquellen, insbesondere Straßenlaternen, die eine Beeinflussung der Erkennbarkeitsentfernung verursachen würden. Dem Fahrer steht somit ausschließlich der Lichtkegel des eigenen Abblendlichts zur Verfügung, um Objekte zu erkennen. Diese sicherheitskritischen Situationen sind folglich in Bezug auf die Unfallschwere nach einem der Hauptunfallszenarien bei Nacht definiert (siehe Kapitel 3.2).

Abbildung 6–20 zeigt den schematischen Aufbau einer Versuchsstrecke, die zusätzlich zu dem eigentlichen Rundkurs mehrere Abkürzungen aufweist. Diese werden benötigt, um die sechs definierten Situationen mit möglichst wenig Aufwand zu realisieren. Insgesamt werden lediglich zwei Teams benötigt, um alle sechs Situationen pro Versuchsfahrt darzustellen. Die Abkürzungen zwischen den einzelnen Situationen ermöglichen den Teams jeweils vor dem Versuchsfahrzeug auf der nächsten Position zu sein. Team A ist für die Einzelsituationen auf Position 1, 3, und 5 zuständig, während Team B die Doppelsituationen 2, 4 und 6 darstellt. Bevor die Versuchsfahrt beginnt, haben Team A und B bereits die Ausgangspositionen 1 und 2 bezogen. Sobald der Versuchsträger die erste sicherheitskritische Situation passiert, begibt sich Team A unverzüglich über eine der Abkürzungen auf die Position 3 zur nächsten Einzelsituation. Team B agiert in gleicher Art und Weise. Der Positionswechsel erfolgt pro Team zwei Mal, bis alle sechs sicherheitskritischen Situationen dargestellt sind.

Bei der Situationsdarstellung haben die Teams darauf zu achten, dass sie sich in Abhängigkeit der Versuchsstrecke und der Situation immer exakt an der gleichen Position auf der Straße befinden, um die Vergleichbarkeit der generierten Daten zu gewährleisten. Dies wird durch versuchsstreckenspezifische Markierungen neben der Fahrbahn bewirkt, die von den Versuchsteams leicht auffindbar, jedoch vom Probanden nicht wahrnehmbar sind. Des Weiteren stellen die Versuchsteams ihre erwärmten Fahrzeuge stets in großer

Entfernung zur Versuchsstrecke oder hinter Sichtbarrieren ab, um den Probanden keine zusätzlichen Hinweise auf eine bevorstehende sicherheitskritische Situation zu geben.

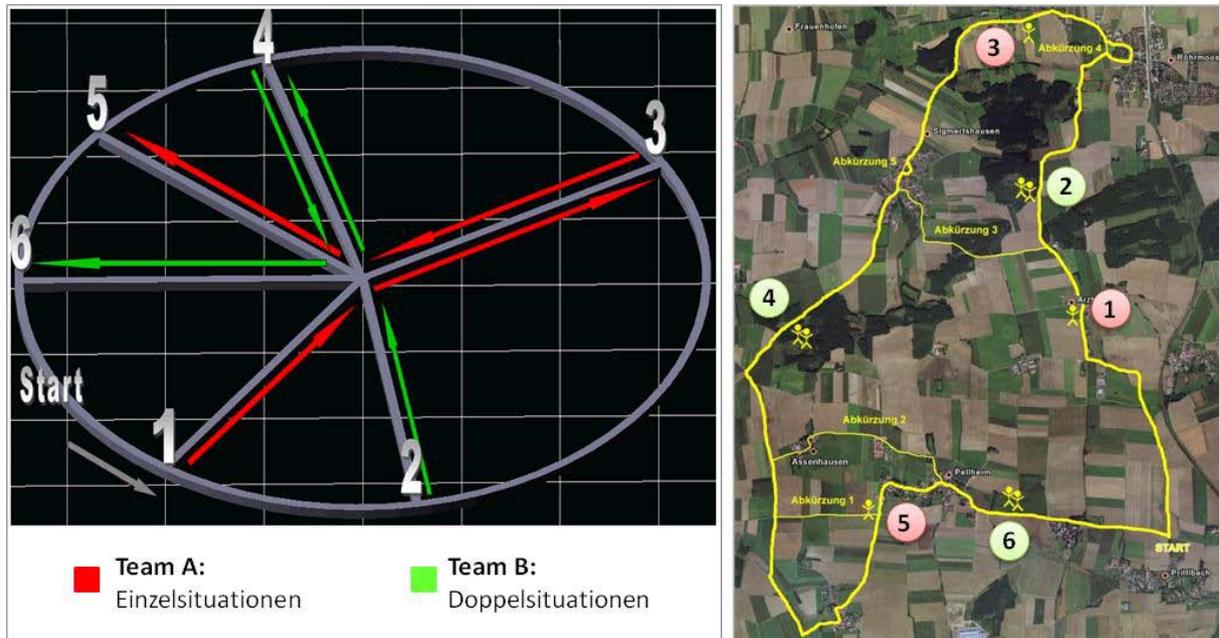


Abbildung 6–20: Schematischer Aufbau einer Versuchsstrecke

6.2.2.2.4 Datenermittlung und Kennwerte

Während der Versuche werden über diverse Messmethoden und -einrichtungen subjektive und objektive Daten ermittelt. Versuchsspezifische Fragebögen mit einer überwiegend gewichteten Fragestellung dienen primär der subjektiven Datenerfassung. Es wird zwischen einem Anfangsfragebogen, sieben Variantenfragebögen und einem Abschlussfragebogen unterschieden. Der Anfangsfragebogen wird von den Probanden vor Beginn der eigentlichen Versuchsfahrten beantwortet. Er dient zur Ermittlung personenspezifischer Hintergrundinformationen, wie beispielsweise Alter, Geschlecht, Fahrerfahrung, Technikinteresse oder Erfahrung mit HUDs und NiVis, die im Hinblick auf eine vergleichbare Gewöhnungsphase bei allen Probanden weitestgehend ausgeschlossen werden muss. Nach jeder der sieben Versuchsfahrten wird umgehend mit dem Variantenfragebogen das subjektive Feedback der Probanden hinsichtlich der gerade erst getesteten HMI-Variante eingeholt. Neben dem subjektiven Unterstützungsgrad, der subjektiven Ablenkung und dem subjektiven Gefallen wird durch den Variantenfragebogen außerdem die subjektive Fahrverhaltensänderung, sowie die subjektive Zuverlässigkeit des Gesamtsystems im Hinblick auf erfolgte False- und Missalarms ermittelt. Nachdem ein Proband alle sieben HMI-Varianten getestet hat, erstellt er am Ende des Versuches im Rahmen des Abschlussfragebogens ein finales Ranking der sieben HMI-Varianten.

Die objektiven Messdaten werden zeitlich synchronisiert und während der gesamten Versuchsdauer anhand eines CAN-Datenloggers, eines Blickerfassungssystems, sowie eines elektronischen und manuellen Versuchsprotokolls ermittelt. Die CAN-Daten umfassen die Geschwindigkeit, die Längs- und Querschleunigungen, den Lenkwinkel, die Gas- und Bremspedalstellungen, die FIR-Videos, sowie den exakten Zeitpunkt der Objektdetektionen. Das bei den Versuchen verwendete Blickerfassungssystem ermittelt während der gesamten Versuchsfahrt das Blickverhalten der Probanden bezüglich der sechs AOIs: Kombi, CID, HUD, Warnung (Warnsymbolik bzw. kontaktanaloge Markierung), Fußgänger und Umgebung.

Das Versuchsprotokoll beinhaltet in erster Linie definierte Trigger, die vom Versuchsleiter während der gesamten Versuchsfahrt bei speziellen Ereignissen und definierten Zeitpunkten gesetzt werden. Neben den Anfangs- und Endzeitpunkten der sechs gestellten sicherheitskritischen Situationen werden unter anderem auch während dieser Zeiträume sowohl die erkannten und übersehenen Warnungen, als auch die erkannten und übersehenen realen Objekte, protokolliert. Auch das Ausbleiben einer Warnmeldung (Miss-Alarm), eine fälschlicherweise erfolgte Warnung (False-Alarm), sowie zufallsbedingte Mehrdetektionen werden während der gesamten Versuchsfahrt aufgezeichnet. Außerdem dient das Versuchsprotokoll der Kenntlichmachung nicht auswertbarer Situationen aufgrund externer Störeinflüsse, wie beispielsweise Gegenverkehr.

Aus den erhobenen subjektiven und objektiven Messdaten werden im Rahmen eines aufwändigen Datenaufbereitungsverfahrens spezielle Kennwerte generiert, die einer statistischen Analyse zugänglich sind. Diesbezüglich wird zwischen situationsspezifischen und gesamtfahrtspezifischen Kennwerten differenziert. Im Fall der situationsspezifischen Kennwerte werden ausschließlich die Messdaten der sechs gestellten sicherheitskritischen Situationen betrachtet, wohingegen bei der zweiten Kennwertkategorie die über die gesamte Versuchsdauer erhobenen Messdaten eingehen. Abbildung 6–21 zeigt die hinsichtlich der vier Untersuchungskategorien Effektivität, Effizienz, Ablenkung und Zufriedenheit gruppierten situationsspezifischen und gesamtfahrtspezifischen Kennwerte.

1. Effektivität

(situationsspezifische Kennwerte)

- Detektionsrate Warnung
- Detektionsrate Objekt
- Detektionsentfernung Objekt
- Brems- und Gaspedalaktivität bei Warnungs- und Objekterkennung
- Subjektiver Sicherheitsgewinn

2. Effizienz

(situationsspezifische Kennwerte)

- Detektionszeiten Warnung
- Relative kumulierte Blickdauer auf AOIs
- Mittlere Fixationshäufigkeiten auf AOIs
- Mittlere Fixationsdauern auf AOIs



3. Ablenkung

(gesamtfahrtspezifische Kennwerte)

- Verteilungen der Blickhäufigkeiten über die Blickdauern
- Subjektiver Nutzen des Videobildes im CID
- Subjektive Ablenkung

4. Zufriedenheit

(gesamtfahrtspezifische Kennwerte)

- Subjektiver Nutzen
- Subjektive Zuverlässigkeit
- Einfluss von False- und Miss-Alarms auf die Akzeptanz

Abbildung 6–21: Situationsspezifische und gesamtfahrtspezifische Kennwerte in Abhängigkeit von den Untersuchungskategorien Effektivität, Effizienz, Ablenkung und Zufriedenheit

Aufschluss über die Effektivität der einzelnen HMI-Varianten liefern die situations-spezifischen Kennwerte: Detektionsrate Warnung, Detektionsrate Objekt, Detektionsentfernung Objekt, Brems- und Gaspedalaktivität bei Warnungs- und Objekterkennung und subjektiver Sicherheitsgewinn. Zur Generierung des Kennwertes „Detektionsrate Objekt“ wird das Versuchsprotokoll herangezogen. Der Kennwert der „Detektionsrate Warnung“ ist definiert als das arithmetische Mittel der erkannten Warnungen während der sechs Situationen. Diese können anhand des Versuchsprotokolls ermittelt werden. Die „Detektionsrate Objekt“ ist das arithmetische Mittel der erkannten Objekte während der sechs gestellten Situationen. Die „Detektionsentfernung Objekt“ ist definiert als der Mittelwert der relativen Entfernung der erkannten Objekte zum Fahrzeug zum Zeitpunkt der Objektfixierung. Hierfür werden sowohl die Blickdaten als auch die CAN-Daten herangezogen. Anhand der Blickdaten wird die Zeitdauer ab der ersten Fixierung des realen Objektes bis zu dessen Passieren extrahiert. In Kombination mit der aus den CAN-Daten gewonnenen mittleren Geschwindigkeit innerhalb dieses Zeitfensters, kann auf die Detektionsentfernung des realen Objektes geschlossen werden.

Die „Brems- und Gaspedalaktivität bei Warnungs- und Objekterkennung“, die den dritten situationsspezifischen Kennwert der Untersuchungskategorie „Effektivität“ darstellt, gibt Aufschluss darüber, ob und in welcher Art und Weise eine Fahrverhaltensänderung bei Assistenz durch ein Nachtsichtgerät stattfindet. Da die Sensorik aufgrund äußerer Einflussfaktoren, wie beispielsweise Temperatur, Witterung oder Objektwärme nicht immer exakt in der gleichen Entfernung warnt, muss der Betrachtungszeitraum so gewählt werden, dass auftretende Warnmeldungen auf jeden Fall innerhalb des definierten Analysebereiches liegen. Bei idealen Rahmenbedingungen kann die Bildverarbeitungssoftware Fußgänger in einer Entfernung von maximal 120 m vor dem Fahrzeug automatisiert detektieren. In Anbetracht dessen wird zur Analyse der Gas- und Bremspedalaktivität ein fester Betrachtungsbereich von 150 m definiert (siehe Abbildung 6–22).

Definierter Betrachtungsraum: 150m Entfernung zur sicherheitskritischen Stelle

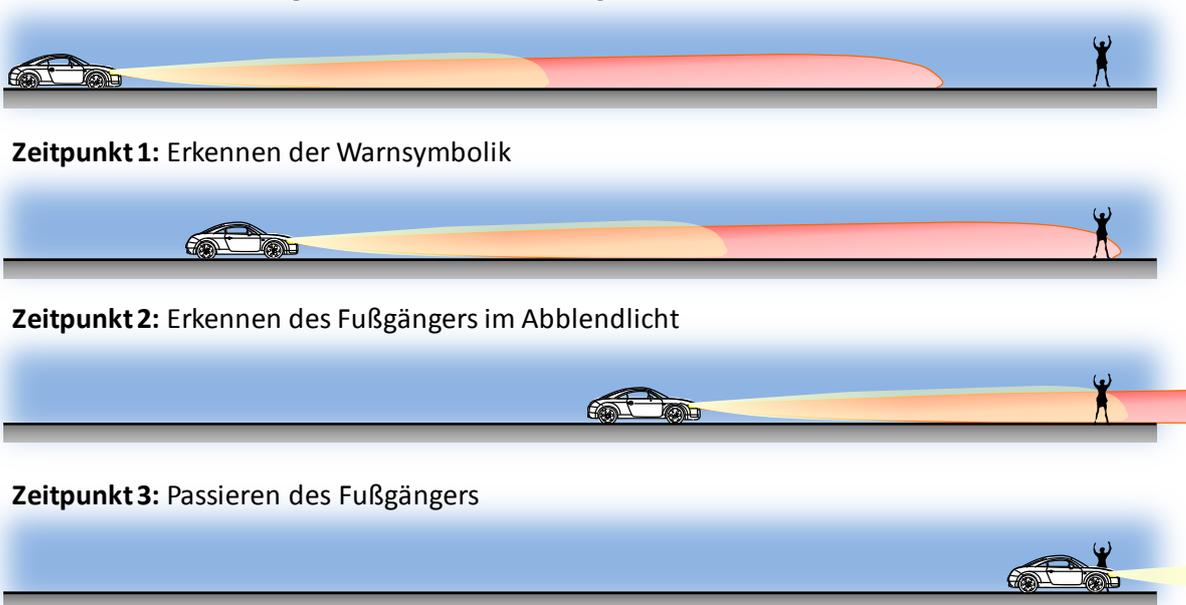


Abbildung 6–22: Definierte Zeitbereiche zur Analyse der Brems- und Gaspedalaktivität bei Warnungs- und Objekterkennung

Somit ist eine Vergleichbarkeit der Einzel- und Doppelsituationen trotz variierender Warnzeitpunkte gewährleistet. Innerhalb dieses definierten Betrachtungszeitraums sind zwei wichtige Ereignisse von Bedeutung. Diese sind zum einen das Erkennen der Warnsymbolik, sowie das Erkennen des realen Objektes. Um die Fahrerreaktion bei diesen Ereignissen analysieren zu können, wird der 150 m lange Betrachtungsbereich in zwei Analysezeiträume unterteilt. Diese sind einerseits der Zeitraum ab der Wahrnehmung der Warnung (Zeitpunkt 1), der anhand der Blickdaten durch die erste Fixierung der Warnsymbolik ermittelt wird, bis zum Erkennen des realen Objektes (Zeitpunkt 2), das ebenfalls anhand der

Blickdaten bestimmt wird. Der zweite Zeitraum beginnt ab dem Erkennen des realen Objektes (Zeitpunkt 2) bis zu dessen Passieren (Zeitpunkt 3). Für diese zwei Phasen wird die Gas- und Bremspedalaktivität analysiert. In Abhängigkeit der Gas- und Bremspedalstellung werden zwischen den drei Fahrerreaktionen

- keine Reaktion (*die Gas- bzw. Bremspedalstellung ändert sich im betrachteten Zeitraum nicht*),
- Bremsbereitschaft (*die Versuchsperson geht vom Gas, betätigt allerdings die Bremse nicht aktiv*) und
- aktives Bremsen (*der Proband betätigt das Bremspedal*)

unterschieden. Anhand dieser Kennwerte kann eine mögliche Fahrverhaltensänderung bei Erkennung der Warnsymbolik bzw. des Objektes festgestellt werden.

Die zweite Untersuchungskategorie stellt die „Effizienz“ dar. Die hierfür generierten Kennwerte sind ebenfalls situationsspezifisch und beziehen sich auf die Zuverlässigkeit und die Informationsübermittlungsgeschwindigkeit der unterschiedlichen HMI-Varianten. Sie umfassen die „Detektionszeiten Warnung“, „relative kumulierte Blickdauer auf AOIs“, „mittlere Fixationshäufigkeit auf AOIs“ und „mittlere Fixationsdauer auf AOIs“. Die „Detektionszeit Warnung“ ist die von den Probanden benötigte Zeit, um die Warnung wahrzunehmen. Hierfür werden die Blickdaten herangezogen und die Dauer ab dem Zeitpunkt der Warnungerscheinung bis zur ihrer ersten Fixation ermittelt. Die Kennwerte der „relativen kumulierten Blickdauer auf AOIs“, der „mittleren Fixationshäufigkeit auf AOIs“ und der „mittleren Fixationsdauer auf AOIs“ werden ebenfalls anhand der Blickdaten für den Zeitraum Warnungerscheinung bis Passieren des realen Objektes ermittelt.

Des Weiteren werden gesamtfahrtspezifische Kennwerte generiert, die eine Analyse der HMI-Varianten hinsichtlich ihres Ablenkungspotenzials ermöglichen. Diese werden in erster Linie aus den Blickdaten gewonnen und sind in Bezug auf die Gesamtfahrt die „Verteilungen der Blickhäufigkeiten über die Blickdauer“ in Abhängigkeit der entsprechenden AOIs. Weitere Kennwerte sind der anhand der Variantenfragebögen ermittelte „subjektive Nutzen des Videobildes im CID“, sowie die „subjektive Ablenkung“ der HMI-Varianten.

Die Kennwerte der letzten Untersuchungskategorie, Zufriedenheit, sind ausschließlich aus subjektiven Daten gewonnen. Diese sind der „subjektive Nutzen“, die „subjektive Zuverlässigkeit“ und der „Einfluss von False- und Miss-Alarms auf die Akzeptanz“.

6.2.2.2.5 Versuchsablauf

Jede der sieben HMI-Varianten wird von insgesamt 26 Probanden im Rahmen einer jeweils 25-minütigen Versuchsfahrt getestet. Die Reihenfolge der unabhängigen Variablen wird permutiert. Die Versuche werden ausschließlich nachts durchgeführt, wobei die Fahrer lediglich das Abblendlicht der Xenonscheinwerfer verwenden dürfen. Die Gesamtdauer eines Versuches beträgt ca. 4 Stunden. In Abhängigkeit der ständig erfassten Gemütslage, sowie auf individuellen Wunsch des Probanden, werden die Versuchsfahrten während einer Nacht oder an zwei direkt aufeinander folgenden Nächten durchgeführt. Der Versuch beginnt an der Technischen Universität München, da somit die ca. 20-minütige Anfahrtszeit zu den im ländlichen Umfeld von Dachau befindlichen Versuchsstrecken zur Gewöhnung an das Versuchsfahrzeug genutzt werden kann. Hierbei sind die zu untersuchenden Systeme vorerst ausgeschaltet. In dieser Zeit werden den Probanden alle technischen Systeme (NiVi, CID, HUD, kHUD, und Blickerfassungssystem), die zu untersuchenden HMI-Varianten und der Versuchsablauf erklärt. Bei Ankunft an der Versuchsstrecke weisen somit alle Probanden ein äquivalentes Wissensniveau auf.

Vor Beginn der ersten Versuchsfahrt füllt der Proband den Anfangsfragebogen aus. Anschließend wird das kopfbasierte Blickerfassungssystem für einen komfortablen rutschfreien Sitz an die individuelle Kopfform des Probanden angepasst und kalibriert. Danach wird das Interface des Versuchsträgers auf die erste zu untersuchende HMI-Variante eingestellt und deren Funktionsweise erläutert. Während dieser Zeit begeben sich die beiden Darstellungsteams A und B der sicherheitskritischen Einzel- und Doppelsituationen auf ihre definierten Ausgangspositionen. Die beiden Versuchsträger verfügen über eine markante Lichtmarkierung im Schweller, die den situationsdarstellenden Teams ermöglicht, selbst im Dunklen eindeutig den Versuchsträger zu identifizieren.

Sobald der Proband losfährt, startet der auf der Rücksitzbank sitzende Versuchsassistent die Datenaufzeichnung des Blickerfassungssystems, sowie des CAN-Datenloggers. Während der Versuche besteht seine Aufgabe darin, eine fehlerfreie Datenaufzeichnung zu gewährleisten, sowie wichtige Ereignisse zu dokumentieren. Diese sind Störungen, False-Alarms, Miss-Alarms, zufallsbedingte Mehrdetektionen, der Beginn und das Ende der definierten Einzel- und Doppelsituationen, sowie die vom Probanden verbal rückgemeldeten Warnsymbol- und Objektdetektionen. Während der Versuchsfahrt erhält der Fahrer vom Versuchsleiter stets die nötigen Navigationsinformationen. Neben dem sicheren Durchfahren der Versuchsstrecke besteht eine wichtige Aufgabe des Probanden darin, laut und deutlich rückzumelden, wenn eine Warnsymbolik, bzw. ein helles sicherheitskritisches Objekt im FIR-Videobild, sowie ein realer Fußgänger im Lichtkegel des Abblendlichts erkannt wurde.

Während der Versuchsfahrt müssen sich die Probanden nicht strikt an die Geschwindigkeitsbegrenzungen halten, jedoch werden sie dazu angehalten, im Landstraßenbereich keine Geschwindigkeiten unter 80 km/h und über 120 km/h zu fahren. Im Falle einer sicherheitskritischen Situation ist ein Abbremsen des Fahrzeugs und somit eine Unterschreitung der 80 km/h Grenze natürlich erlaubt, wenn es der Fahrer als notwendig erachtet. Sobald der Proband die gestellte Situation passiert hat, begibt sich das entsprechende Versuchsteam auf die nächste definierte Position. Während der gesamten Versuchsfahrt erstellt der auf der Beifahrerseite sitzende Versuchsleiter das schriftliche Versuchsprotokoll, in dem das Feedback der Probanden umgehend dokumentiert wird. Am Ende einer Versuchsfahrt hat der Proband mit einer Variante mindestens sechs unerwartete sicherheitskritische Situationen erlebt. Danach wird umgehend in einem Variantenfragebogen das subjektive Feedback des Probanden ermittelt. Außerdem werden die objektiven Blick- und Kenndaten gesichert.

Auf gleiche Art und Weise werden die verbleibenden sechs HMI-Varianten getestet, wobei stets eine andere Versuchsstrecke befahren wird. Hierdurch wird gewährleistet, dass die sechs gestellten Situationen für den Probanden immer unerwartet eintreten. Nachdem die Versuchsperson alle sieben HMI-Varianten erprobt hat, füllt sie noch einen finalen Abschlussfragebogen aus, bei dem unter anderem ein finales Ranking der getesteten HMI-Varianten erstellt wird. Die Versuche werden mit dieser standardisierten Vorgehensweise für alle 26 Probanden durchgeführt. Nach dem Abschluss aller Versuche werden die generierten Rohdaten aufbereitet, so dass sie einer statistischen Analyse zugänglich gemacht werden können.

6.2.2.3 Hypothesen

Nachstehend sind die Hypothesen des Realversuches aufgeführt. Die Annahmen über den Einfluss der unterschiedlichen Nachtsichtsysteme sind nach den vier Untersuchungskategorien Effektivität (siehe Tabelle 6-3), Effizienz (siehe Tabelle 6-4), Ablenkung (siehe Tabelle 6-5) und Zufriedenheit (siehe Tabelle 6-6) strukturiert. Die Tabellen beinhalten des Weiteren die zur Hypothesenüberprüfung heranzuziehenden Kennwerte.

Tabelle 6-3: Hypothesen der Untersuchungskategorie "Effektivität"

Hypothesen / Effektivität				Kennwerte
Wahrnehmungszuverlässigkeit der Warnung	A_1	H ₀	Wenn das reale Objekt noch nicht sichtbar ist, hat ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) keinen Einfluss auf die Wahrnehmungszuverlässigkeit einer bevorstehenden sicherheitskritischen Situation.	<ul style="list-style-type: none"> Objektive Erkennungsrate der Objekte im FIR-Videobild (NVF) bzw. der Warnsymbolik (WCF, WCR, HCU, HCR, kHUD)
		H ₁	Wenn das reale Objekt noch nicht sichtbar ist, beeinflusst ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) die Wahrnehmungszuverlässigkeit einer bevorstehenden sicherheitskritischen Situation.	
	A_2	H ₀	Wenn das reale Objekt noch nicht sichtbar ist, hat ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, WCR, HCU, HCR, kHUD) keinen Einfluss auf die Wahrnehmungszuverlässigkeit einer bevorstehenden sicherheitskritischen Situation.	
		H ₁	Wenn das reale Objekt noch nicht sichtbar ist, beeinflusst ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, WCR, HCU, HCR, kHUD) die Wahrnehmungszuverlässigkeit einer bevorstehenden sicherheitskritischen Situation.	
	A_3	H ₀	Bezüglich der aktiv warnenden Nachtsichtsysteme (WCF, WCR, HCU, HCR, kHUD) hat das HUD und das kHUD keinen Einfluss auf die Wahrnehmungszuverlässigkeit der Warnsymbolik.	
		H ₁	Bezüglich der aktiv warnenden Nachtsichtsysteme (WCF, WCR, HCU, HCR, kHUD) beeinflusst das HUD und das kHUD die Wahrnehmungszuverlässigkeit der Warnsymbolik.	
Wahrnehmungszuverlässigkeit sicherheitskritischer Objekte	B_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat keinen Einfluss auf die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	<ul style="list-style-type: none"> Objektive Erkennungsrate der sicherheitskritischen Objekte Subjektive Erkennungszuverlässigkeit der sicherheitskritischen Objekte
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	
	B_2	H ₀	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) hat keinen Einfluss auf die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	
		H ₁	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) beeinflusst die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	
	B_3	H ₀	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) hat keinen Einfluss auf die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	
		H ₁	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) beeinflusst die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	
	B_4	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat keinen Einfluss auf die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	
Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte	C_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	<ul style="list-style-type: none"> Objektive Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte Subjektive Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	
	C_2	H ₀	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) hat keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	
		H ₁	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) beeinflusst die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	
	C_3	H ₀	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) hat keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	
		H ₁	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) beeinflusst die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	

C_4	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.		
	H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.		
Aufmerksamkeit bezüglich realer Objekte	D_1	H ₀	Ein warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) hat im Bereich der visuellen Reichweite keinen Einfluss auf die Aufmerksamkeitshöhe, die der Fahrer den sicherheitskritischen Objekten zukommen lässt.	<ul style="list-style-type: none"> Relative kumulierte Blickdauer auf reale Objekte während einer sicherheitskritischen Situation
		H ₁	Ein warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) beeinflusst im Bereich der visuellen Reichweite die Aufmerksamkeitshöhe, die der Fahrer den sicherheitskritischen Objekten zukommen lässt.	
	D_2	H ₀	Ein Richtungskodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) hat im Bereich der visuellen Reichweite keinen Einfluss auf die Aufmerksamkeitshöhe, die der Fahrer den sicherheitskritischen Objekten zukommen lässt.	
		H ₁	Ein Richtungskodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) beeinflusst im Bereich der visuellen Reichweite die Aufmerksamkeitshöhe, die der Fahrer den sicherheitskritischen Objekten zukommen lässt.	
	D_3	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsysteme (kHUD) hat im Bereich der visuellen Reichweite keinen Einfluss auf die Aufmerksamkeitshöhe, die der Fahrer den sicherheitskritischen Objekten zukommen lässt.	
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst im Bereich der visuellen Reichweite die Aufmerksamkeitshöhe, die der Fahrer den sicherheitskritischen Objekten zukommen lässt.	
Fahrverhaltensänderung	E_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat keinen Einfluss auf das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	<ul style="list-style-type: none"> Objektive Längsdynamikänderung im Zeitfenster A (Erscheinen der Warnung bis kurz vor Objektwahrnehmung) Objektive Längsdynamikänderung im Zeitfenster B (Objektwahrnehmung bis zu dessen Passieren)
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	
	E_2	H ₀	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) hat keinen Einfluss auf das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	
		H ₁	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) beeinflusst das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	
	E_3	H ₀	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) hat keinen Einfluss auf das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	
		H ₁	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) beeinflusst das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	
	E_4	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat keinen Einfluss auf das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	
Sicherheitsempfinden	F_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat keinen Einfluss auf das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	<ul style="list-style-type: none"> Subjektive Bewertung der Gesamtfahrt Subjektive Bewertung der Sicherheit Subjektive Bewertung der Unterstützung
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	
	F_2	H ₀	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) hat keinen Einfluss auf das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	
		H ₁	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) beeinflusst das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	
	F_3	H ₀	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) hat keinen Einfluss auf das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	
		H ₁	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) beeinflusst das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	

	F_4	H ₀	Ein im HUD aktiv warnendes Nachtsichtsystem (HCU, HCR) hat keinen Einfluss auf das Sicherheitsempfinden bei Nacht.
		H ₁	Ein im HUD aktiv warnendes Nachtsichtsystem (HCU, HCR) beeinflusst das Sicherheitsempfinden bei Nacht.
	F_5	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat keinen Einfluss auf das Sicherheitsempfinden bei Nacht.
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst das Sicherheitsempfinden bei Nacht.

Tabelle 6-4: Hypothesen der Untersuchungskategorie "Effizienz"

Hypothesen / Effizienz				Kennwerte
Wahrnehmungsgeschwindigkeit Warnung	G_1	H ₀	Bezüglich der aktiv warnenden Nachtsichtsysteme hat das Head-Up-Display (HCU) keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsgeschwindigkeit der Warnsymbolik.	<ul style="list-style-type: none"> • Objektive Wahrnehmungsgeschwindigkeit
		H ₁	Bezüglich der aktiv warnenden Nachtsichtsysteme beeinflusst das Head-Up-Display (HCU) die Wahrnehmungsgeschwindigkeit der Warnsymbolik.	
	G_2	H ₀	Die redundante richtungscodierte Warnung im CID hat bei der HUD-Variante (CHR) keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsgeschwindigkeit.	
		H ₁	Die redundante richtungscodierte Warnung im CID beeinflusst bei der HUD-Variante (CHR) die Wahrnehmungsgeschwindigkeit.	
	G_3	H ₀	Bezüglich der aktiv warnenden Nachtsichtsysteme hat das kontaktanaloge Head-Up-Display (kHUD) keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsgeschwindigkeit der Warnsymbolik.	
		H ₁	Bezüglich der aktiv warnenden Nachtsichtsysteme beeinflusst das kontaktanaloge Head-Up-Display (kHUD) die Wahrnehmungsgeschwindigkeit der Warnsymbolik.	
Blickverhalten bei der Informationsaufnahme	H_1	H ₀	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) hat keinen Einfluss auf die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	<ul style="list-style-type: none"> • Relative kumulierte Blickanteile auf AOs während einer sicherheitskritischen Situation • Relative kumulierte Blickhäufigkeit auf NiVi-Anzeigen während einer sicherheitskritischen Situation • Mittlere Blickdauer auf NiVi-Anzeigen während einer sicherheitskritischen Situation
		H ₁	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) beeinflusst die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	
	H_2	H ₀	Ein redundant im HUD aktiv warnendes Nachtsichtsystem (HCU) hat keinen Einfluss auf die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	
		H ₁	Ein redundant im HUD aktiv warnendes Nachtsichtsystem (HCU) beeinflusst die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	
	H_3	H ₀	Eine zusätzliche Richtungscodierung im CID (HCR) hat keinen Einfluss auf die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	
		H ₁	Eine zusätzliche Richtungscodierung im CID (HCR) beeinflusst die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	
	H_4	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat keinen Einfluss auf die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	

Tabelle 6-5: :Hypothesen der Untersuchungskategorie "Ablenkung"

Hypothesen / Ablenkung			Kennwerte	
Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt	I_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	<ul style="list-style-type: none"> • Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt • Kombi-Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt • CID-Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt • HUD-Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	
	I_2	H ₀	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) hat keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	
		H ₁	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) beeinflusst die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	
	I_3	H ₀	Eine zusätzliche Richtungs-codierung im CID (WCR) hat keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	
		H ₁	Eine zusätzliche Richtungs-codierung im CID (WCR) beeinflusst die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	
	I_4	H ₀	Eine zusätzliche Warnung im HUD (HCU) hat keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	
		H ₁	Eine zusätzliche Warnung im HUD (HCU) beeinflusst die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	
	I_5	H ₀	Eine zusätzliche Richtungs-codierung im CID hat bei den HUD-Varianten (HCR) keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	
		H ₁	Eine zusätzliche Richtungs-codierung im CID beeinflusst bei den HUD-Varianten (HCR) die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	
	I_6	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	
Subjektive Ablenkung	J_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Ablenkung.	<ul style="list-style-type: none"> • Subjektive Bewertung der Ablenkungswirkung
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst subjektiv die Ablenkung.	
	J_2	H ₀	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Ablenkung.	
		H ₁	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) beeinflusst subjektiv die Ablenkung.	
	J_3	H ₀	Eine zusätzliche Richtungs-codierung im CID (WCR, HCR) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Ablenkung.	
		H ₁	Eine zusätzliche Richtungs-codierung im CID (WCR, HCR) beeinflusst subjektiv die Ablenkung.	
	J_4	H ₀	Eine zusätzliche Warnung im HUD (HCU, HCR) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Ablenkung.	
		H ₁	Eine zusätzliche Warnung im HUD (HCU, HCR) beeinflusst subjektiv die Ablenkung.	
	J_2	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Ablenkung.	
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst subjektiv die Ablenkung.	

Tabelle 6-6: :Hypothesen der Untersuchungskategorie "Zufriedenheit"

Hypothesen / Zufriedenheit				Kennwerte
Systemzuverlässigkeit	K_1	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit in Bezug auf Miss-Alarms.	<ul style="list-style-type: none"> • Subjektive Systembewertung hinsichtlich Miss-Alarm • Subjektive Systembewertung hinsichtlich False-Alarm
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst subjektiv die Systemzuverlässigkeit in Bezug auf Miss-Alarms.	
	K_2	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit in Bezug False-Alarms.	
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst subjektiv die Systemzuverlässigkeit in Bezug False-Alarms.	
Nützen	L_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat subjektiv keinen Einfluss auf das Fahren bei Nacht.	<ul style="list-style-type: none"> • Subjektive Systembewertung hinsichtlich Nützlichkeit
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst subjektiv das Fahren bei Nacht.	
	L_2	H ₀	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) hat subjektiv keinen Einfluss auf das Fahren bei Nacht.	
		H ₁	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) beeinflusst subjektiv das Fahren bei Nacht.	
	L_3	H ₀	Eine zusätzliche Richtungscodierung im CID (WCR) hat subjektiv keinen Einfluss auf das Fahren bei Nacht.	
		H ₁	Eine zusätzliche Richtungscodierung im CID (WCR) beeinflusst subjektiv das Fahren bei Nacht.	
	L_4	H ₀	Eine zusätzliche Warnung im HUD (HCU, HCR) hat subjektiv keinen Einfluss auf das Fahren bei Nacht.	
		H ₁	Eine zusätzliche Warnung im HUD (HCU, HCR) beeinflusst subjektiv das Fahren bei Nacht.	
	L_5	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat subjektiv keinen Einfluss auf das Fahren bei Nacht.	
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst subjektiv auf das Fahren bei Nacht.	

6.2.2.4 Ergebnisse

Die Gruppierung hinsichtlich der vier Untersuchungskategorien „Effektivität“, „Effizienz“, „Ablenkung“ und „Zufriedenheit“ findet sich auch bei der Ergebnisdarstellung wieder, die im Folgenden dargelegt wird.

6.2.2.4.1 Effektivität

Die Effektivität analysiert demnach den Einfluss der unterschiedlichen HMI-Varianten auf das Fahren bei Nacht. Diesbezüglich besteht das primäre Ziel in der Optimierung der Fahrsicherheit, die anhand der Erkennungsrate und der Erkennungsentfernung der sicherheitskritischen Objekte, sowie einer frühzeitigen situativen Fahrverhaltensanpassung quantifiziert werden kann. Je zuverlässiger und früher ein Fahrer eine vorausliegende sicherheitskritische Situation erfassen kann, um so geringer wird die Gefahr einer Kollision.

Diesbezüglich zeigt Abbildung 6-29, wie oft der Fahrer im Vergleich zur nicht assistierten Fahrt mit einem Nachtsichtsystem sicherheitskritische Situationen früher erkennen kann.

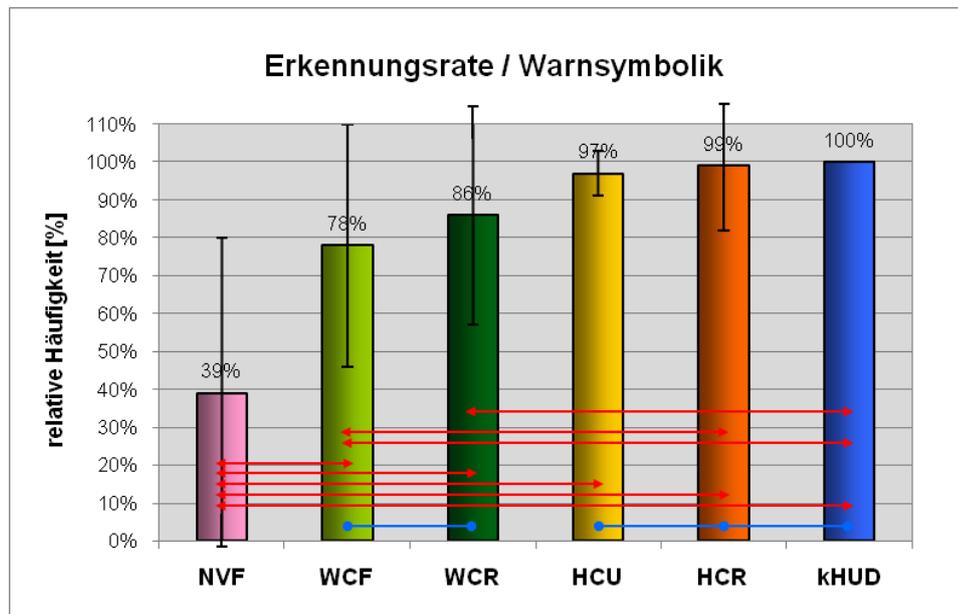


Abbildung 6–23: objektive Effizienz / Erkennungsratesymbolik einer sicherheitskritischen Situation zu einem Zeitpunkt, wenn das reale Objekt noch nicht im Sichtbereich ist

Im Falle der NVF-Variante muss der Fahrer kontinuierlich das FIR-Videobild scannen, um die Wahrscheinlichkeit einer Objektdetektion zu erhöhen. Ein Fußgänger wird nur dann erkannt, wenn er gerade in dem Moment auf das FIR-Videobild im CID blickt, in dem eine sicherheitskritische Situation eintritt. Die Ergebnisse zeigen, dass dies lediglich zu 39 % der Fall ist. Erschwerend kommt hinzu, dass es sich bei allen Probanden um Novizen handelt, die das FIR-Videobild noch verhältnismäßig oft gescannt haben. Es ist zu erwarten, dass die Scann-Rate nach einer gewissen Gewöhnungszeit reduziert wird, was sich wiederum negativ auf die Erkennungsratesymbolik der NVF-Variante auswirken könnte. Mit einer aktiven Warnung im CID (WCF und WCR) kann die Erkennungsratesymbolik auf ca. 82 % erhöht werden. Dennoch wird die Warnung im peripheren Blickfeld mit 18 % noch relativ häufig übersehen. Je näher die Warnung im primären Blickfeld des Fahrers erfolgt, umso geringer wird die Wahrscheinlichkeit des Nichterkennens. Bei den HUD-Varianten HCU, HCR und KHUD ist das Übersehen der Warnsymbolik weitestgehend ausgeschlossen. Auch wenn die Ergebnisse der Varianten HCU und HCR mit denen des KHUDs identisch sind, ist jedoch anhand der Standardabweichung zu erkennen, dass die Warnung im kontaktanalogen Head-Up-Display kein einziges Mal übersehen wird. Im konventionellen Head-Up-Display ist dies jedoch, wenn auch sehr selten, vereinzelt der Fall. Ein Einfluss des KHUD auf die Erkennungszuverlässigkeit der Symbolik kann folglich nicht völlig ausgeschlossen werden.

Im Gegensatz dazu hat die Richtungskodierung im CID weder bei WCR noch HCR einen Einfluss auf die Erkennungsrate der Warnsymbolik.

Des Weiteren zeigt Abbildung 6–24 die objektiven Ergebnisse der Erkennungsrate Objekt sowie die subjektive Erkennungsgüte der sicherheitskritischen Objekte.

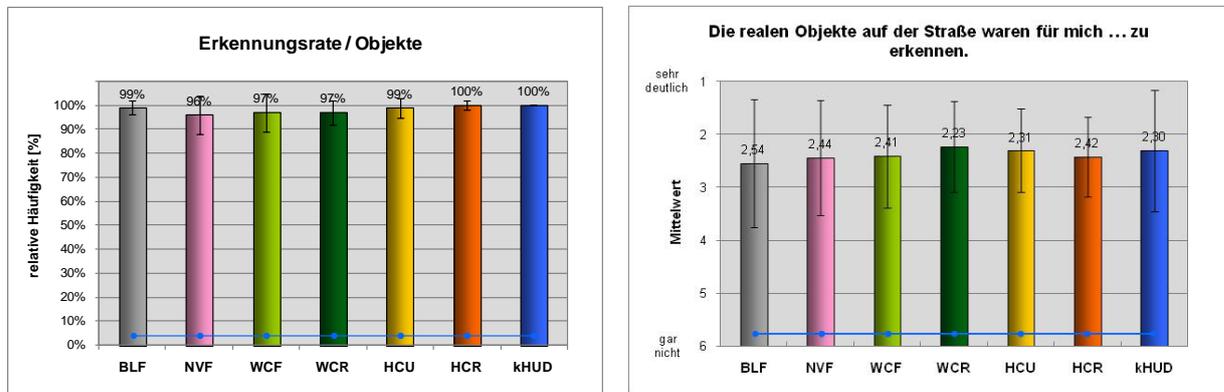


Abbildung 6–24: Effektivität / objektive Erkennungsrate (links) und subjektive Erkennungsgüte (rechts)

Objektiv und subjektiv sind keine Unterschiede feststellbar. Von den Probanden werden sowohl mit als auch ohne ein Nachtsichtsystem annähernd alle Fußgänger während der sechs Situationen erkannt. Subjektiv sind die realen Objekte auf der Straße mit Werten von im Mittel 2,54 bis 2,23 deutlich erkennbar. Die Erklärung für dieses durchwegs gute Ergebnis, selbst bei nicht assistierter Fahrt (BLF), liegt im Versuchsdesign. Demnach wurden die Fußgänger unmittelbar neben der Fahrspur am eigenen Fahrbahnrand oder unmittelbar am Fahrbahnrand der Gegenseite positioniert. Aufgrund dessen wurden sie immer, wenn auch relativ spät, vom Lichtkegel des Abblendlichts erfasst, so dass sie der Fahrer erkennen konnte. Auch wenn statistisch bezüglich der Erkennungsrate keine signifikanten Unterschiede feststellbar sind, ist es dennoch auffällig, dass ausschließlich bei der Variante kHUD mit einer objektiven Erkennungszuverlässigkeit von 100 % keine Standardabweichung auftritt. Folglich werden von den 26 Probanden während der sechs sicherheitskritischen Situationen kumuliert alle 234 Fußgänger erkannt. Im Gegensatz dazu werden bei allen anderen Varianten vereinzelt Fußgänger übersehen. In jedem dieser Fälle handelt es sich um eine Doppelsituation, bei der das Objekt auf der Gegenfahrbahn nicht erkannt wird. In diesem Straßenbereich ist die Ausleuchtung durch das Abblendlicht eher schlecht. Es ist folglich nicht völlig auszuschließen, dass die Variante kHUD einen Einfluss auf die Erkennungsrate hat. Die Varianten WCF, WCR, HCU und HCR warnen den Fahrer lediglich pauschal vor einer sicherheitskritischen Situation. Er wird somit auf eine mögliche Gefahr hingewiesen, kennt jedoch die genaue Objektanzahl, bzw. die genaue Konstellation der Situation nicht. Im Gegensatz dazu weiß der Fahrer im Falle des kHUD die exakte

Objektanzahl, sowie deren genaue Position in der Umwelt, so dass ein Übersehen der Objekte nahezu ausgeschlossen ist.

Ein weiteres Indiz für eine effektive Fahrsicherheitssteigerung bei Nacht ist die in Abbildung 6-24 dargestellte objektive Wahrnehmungsentfernung und subjektive Wahrnehmungszeit.

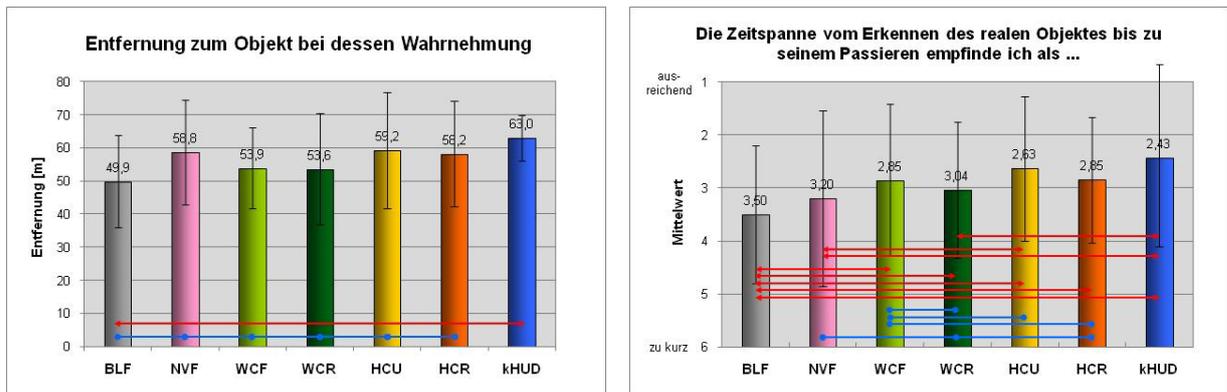


Abbildung 6–25: Effektivität / objektive Wahrnehmungsentfernung (links) und subjektive Wahrnehmungszeit (rechts)

Ohne die Assistenz durch ein Nachtsichtsystem werden die Fußgänger bei der Variante BLF im Mittel in einer Entfernung von 49,9 m erkannt. Mit statistischer Identizität verbessert sich die Wahrnehmungsentfernung eines Fußgängers durch das NVF, WCF, WCR, HCU und HCR Nachtsichtsystem nicht. Die durchschnittliche Erkennungsentfernung liegt somit im Bereich der Abblendlichtreichweite des Xenonlichtes. Objekte werden erst erkannt, wenn diese in den Lichtkegel des Abblendlichts eintauchen. Obwohl keines der untersuchten Nachtsichtsysteme die vom Abblendlicht abhängigen realen Sichtverhältnisse verbessert, ist bei der Variante kHUD dennoch, im Vergleich zur Baselinefahrt (BLF), eine signifikante Steigerung der Wahrnehmungsentfernung auf im Mittel 63 m feststellbar. Durch die kontaktanaloge Markierung des sicherheitskritischen Objektes befindet sich der Blick des Fahrers in der Realität, zu einem Zeitpunkt an dem das reale Objekt noch nicht sichtbar ist, exakt an der Position, an der der Fußgänger in den Lichtkegel eintreten wird. Aufgrund dessen werden Fußgänger im Falle des kHUDs bereits erkannt, wenn lediglich die untere Beinpartie durch das Abblendlicht beleuchtet ist.

Die in Abbildung 6–25 dargestellten subjektiven Ergebnisse der Wahrnehmungszeit bestätigen mit einer signifikanten Vergrößerung der empfundenen Zeitspanne, ab dem Erkennen des realen Objektes bis zu seinem Passieren bei Assistenz durch ein Nachtsichtsystem, die objektiven Ergebnisse. Die Probanden sind subjektiv der Ansicht, Objekte früher zu erkennen, wenn sie aktiv gewarnt werden. Demnach bewerten sie die Varianten WCF, WCR, HCU, HCR und kHUD im Vergleich zur Variante BLF signifikant

besser. Des Weiteren zeichnet sich analog zu den objektiven Ergebnissen der Wahrnehmungsentfernung die Vorrangstellung des kontaktanalogen Head-Up-Displays ab. Dieses wird im Mittel mit 2,43 signifikant besser als die Variante NVF und WCR bewertet.

Neben der Erkennungsrate und der Erkennungsentfernung stellt die „Brems- und Gaspedalaktivität bei Warnungs- und Objekterkennung“ den dritten situationsspezifischen Kennwert der Untersuchungskategorie „Effektivität“ dar. Diesbezüglich zeigt Abbildung 6–26 die Ergebnisse der objektiven Längsdynamikanpassung zum Zeitpunkt der Warnungserkennung.

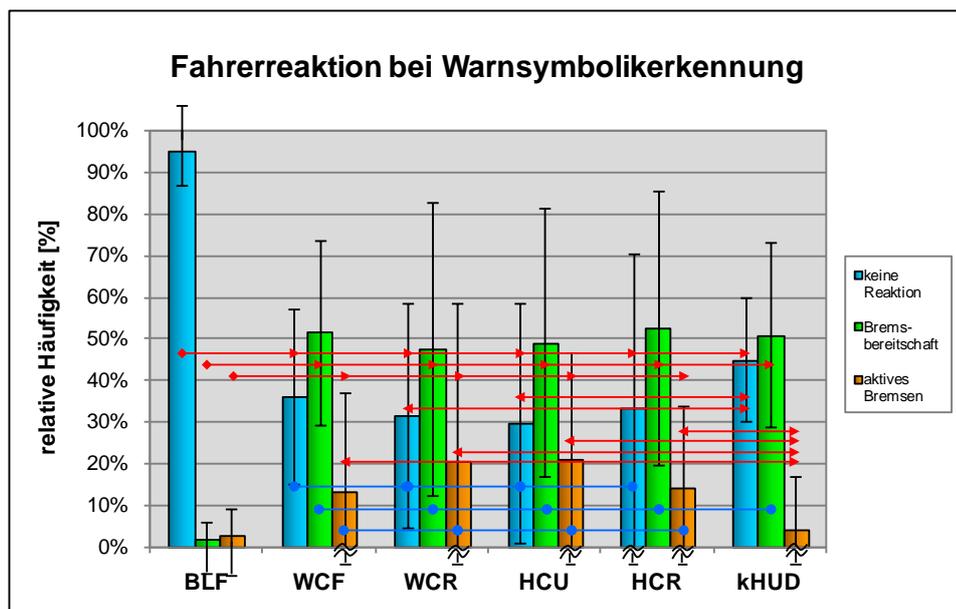


Abbildung 6–26: objektive Effektivität / Längsdynamikanpassung zum Zeitpunkt der Warnungserkennung

Erwartungsgemäß ist bei der Baselinefahrt (BLF) im analysierten Zeitfenster – ab einer Entfernung von 150 m zum sicherheitskritischen Objekt bis kurz vor dessen Wahrnehmung im Abblendlicht – „keine Reaktion“ feststellbar. Die Probanden bewegen sich mit gleichbleibend hoher Geschwindigkeit auf die Gefahrenstelle zu, da ihnen nicht bewusst ist, dass sich jenseits ihrer visuellen Reichweite ein Fußgänger auf der Fahrbahn befindet. Im Gegensatz dazu ist bei einer aktiven Warnung des Fahrers eine signifikante Fahrverhaltensänderung feststellbar. Im Falle der Variante WCF, WCR, HCU und HCR wird von den Fahrern im Mittel zu 50 % „Bremsbereitschaft“ hergestellt, sobald sie die Warnung wahrnehmen. Hierfür reduzieren sie den Gaspedalwinkel auf Null und setzen ihren Fuß auf das Bremspedal um, ohne es jedoch aktiv zu betätigen. Ebenso ist bei diesen vier warnenden HMI-Varianten im Vergleich zur Baselinefahrt ein vermehrtes „aktives Bremsen“ feststellbar. Im Mittel beträgt dieser Anteil 18 %. Auch bei der Variante kHUD ist im Bezug

auf die „Bremsbereitschaft“ eine analoge Fahrverhaltensänderung erkennbar. Im Vergleich zu den anderen vier Nachtsichtsystemen fällt jedoch auf, dass der Anteil des „aktiven Bremsens“ signifikant auf im Mittel 4 % reduziert ist. Des Weiteren ist im Vergleich zur Variante WCR und HCU signifikant häufiger mit „keiner Reaktion“ zu rechnen. Dieser Anteil beträgt bei der Variante kHUD im Mittel 45 %. Auch in diesem Fall ist die Ursache in der vom kontaktanalogen Head-Up-Display zusätzlich vermittelten Information der Objektichtung, -entfernung und -dynamik zu sehen. Der Fahrer erhält im Vergleich zur Variante WCF, WCR, HCU und HCR nicht nur eine aktive Warnung, sondern alle weiteren wesentlichen Objektinformationen, so dass er die gegenwärtige Situation adäquat einschätzen kann. Infolgedessen passt der Fahrer in Abhängigkeit von seiner subjektiven Risikobereitschaft die Längsdynamik an das für ihn nun transparente objektive Risiko an. Das bei den lediglich warnenden Varianten (WCF, WCR, HCU und HCR) vermehrt feststellbare „aktive Bremsen“ ist auf das Informationsdefizit zurückzuführen. Es kann im Gegensatz zum kontaktanalogen HUD keine Abschätzung, bzw. Antizipation der Objektannäherung stattfinden, so dass die Probanden vermehrt „aktiv bremsen“, um die Gefahr einer möglichen Kollision mit einem oder möglicherweise mehreren Objekten, deren exakte Position sie nicht kennen, zu verringern. Welche Auswirkungen diese im Vergleich zur Baselinefahrt frühzeitige Längsdynamikanpassung zu einem späteren Zeitpunkt hat, ist aus Abbildung 6–27 zu entnehmen.

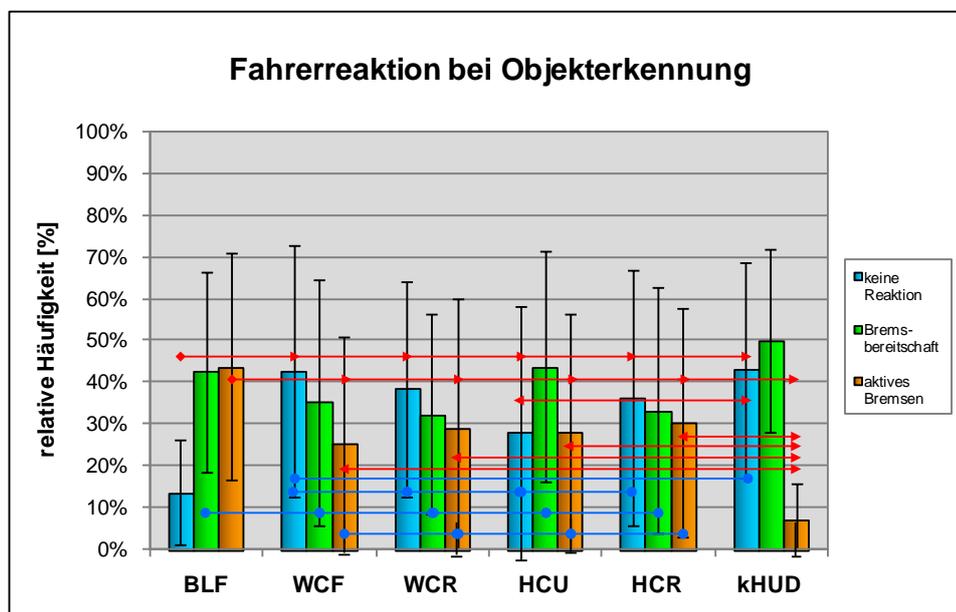


Abbildung 6–27: objektive Effektivität / Längsdynamikanpassung zum Zeitpunkt der Fußgängererkennung

Hierbei ist die Brems- und Gaspedalaktivität innerhalb eines zweiten Analysezeitraums dargestellt, der mit der Erkennung des realen Objektes beginnt und beim Passieren der

Gefahrenstelle endet. Ziel ist die Analyse des Fahrverhaltens zum Zeitpunkt der Fußgängererkennung. Aus Abbildung 6–27 ist zu entnehmen, dass bei der Baselinefahrt (BLF) erst zum jetzigen Zeitpunkt, mit dem Erkennen des Fußgängers, eine Reaktion des Fahrers stattfindet. Demnach wird im Mittel zu 42 % „Bremsbereitschaft“ hergestellt und zu 43 % „aktiv gebremst“. Da dem Fahrer erst zu diesem späten Zeitpunkt die sicherheitskritische Situation bewusst wird, sind diese vermehrt „aktiven Eingriffe“ in die Längsdynamik notwendig, um eine Kollision zu vermeiden. Im Vergleich dazu ist bei den warnenden Nachtsichtsystemen WCF, WCR, HCU und HCR diese Geschwindigkeitsanpassung durch „aktives Bremsen“ bereits in der Phase der Warnungserkennung erfolgt. Aufgrund dessen ist bei diesen HMI-Varianten ein geringeres „aktives Bremsen“ von im Mittel 28 % feststellbar.

Ebenso zeigen die Ergebnisse, dass die Fahrer mit einem aktiv warnenden Nachtsichtsystem zum Zeitpunkt der Objekterkennung, im Vergleich zur Baselinefahrt, signifikant häufiger „keine Reaktion“ einleiten. Dies ist bereits zu einem viel früheren Zeitpunkt, nämlich nach dem Wahrnehmen der Warnung, erfolgt. Die tendenziell gleichen Ergebnisse sind beim kontaktanalog markierenden Head-Up-Display (kHUD) feststellbar, wengleich der Eingriff in die Längsdynamik durch „aktives Bremsen“ nochmals signifikant reduziert ist. Mit einem Anteil von im Mittel 8 % wird mit der Variante kHUD im Vergleich zu den lediglich warnenden Nachtsichtsystemen (WCF, WCR, HCU und HCR) dreimal weniger oft „aktiv gebremst“, sobald das reale Objekt in den Sichtbereich des Fahrers eintritt. Durch die kontaktanaloge Markierung kennt der Fahrer bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt die exakte Position des sicherheitskritischen Objekts. Diese visuelle Information fließt kontinuierlich in den Regelkreis der Längsdynamik ein, so dass zum Zeitpunkt der realen Objektdetektion keine weiteren aktiven Eingriffe zur Geschwindigkeitsreduktion vorgenommen werden müssen.

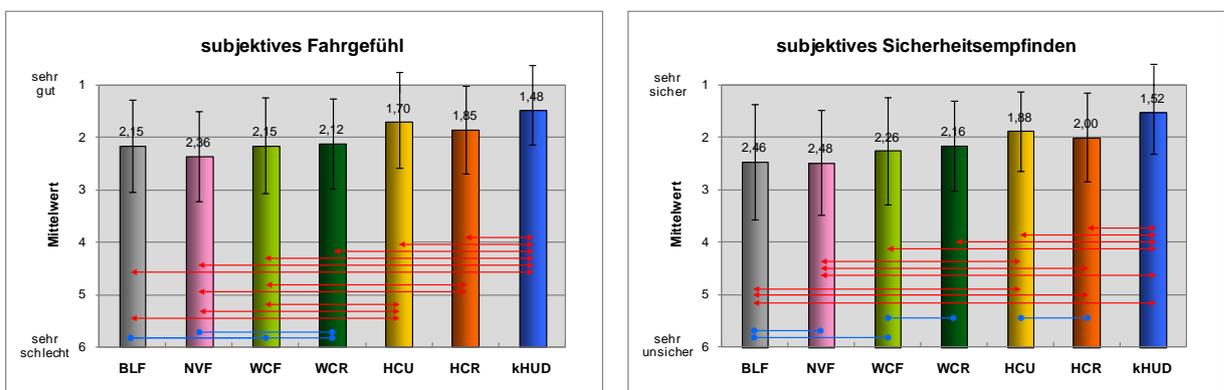


Abbildung 6–28: subjektive Effektivität / subjektives Fahrgefühl (links) und subjektives Sicherheitsempfinden (rechts)

Diese insbesondere durch ein kontaktanalog markierendes Head-Up-Display (kHUD) hervorgerufene objektive wie subjektive Sicherheitssteigerung des nächtlichen Fahrens spiegelt sich auch bei den in Abbildung 6–28 dargestellten subjektiven Ergebnissen wider. Demnach vermittelt ein kontaktanaloges Head-Up-Display (kHUD) im Vergleich zur Baselinefahrt (BLF) sowie allen anderen alternativen Nachtsichtsystemen (NVF, WCF, WCR, HCU und HCR) ein signifikant besseres Fahrgefühl. Analog bewerten die Probanden mit im Mittel 1,52 das „subjektive Sicherheitsempfinden“ bei der Fahrt mit dem kHUD am besten. Im Vergleich zur Baselinefahrt (BLF) stellt ein Nachtsichtsystem ausschließlich in Kombination mit einem Head-Up-Display eine Bereicherung dar. Demnach werden die Varianten HCU und HCR bezüglich des „subjektiven Fahrgefühls“ und des „subjektiven Sicherheitsempfindens“ signifikant besser beurteilt, als die Baselinefahrt. Die bei der HMI-Variante WCR und HCR realisierte Richtungskodierung hat subjektiv im Vergleich zu den Varianten WCF und HCU keinen Einfluss. In Bezug auf das „subjektive Sicherheitsempfinden“ werden die WCF und WCR sowie HCU und HCR identisch bewertet. Das lediglich bildgebende Nachtsichtsystem (NVF) kann keine subjektive Sicherheitssteigerung bezwecken. Es wird im Vergleich zur Baselinefahrt (BLF) identisch bewertet.

Ein sehr deutliches subjektives Urteil der Probanden im Hinblick auf die Untersuchungskategorie „Effektivität“ zeigt die in Abbildung 6–29 dargestellte „subjektive Unterstützung durch ein Nachtsichtsystem“.

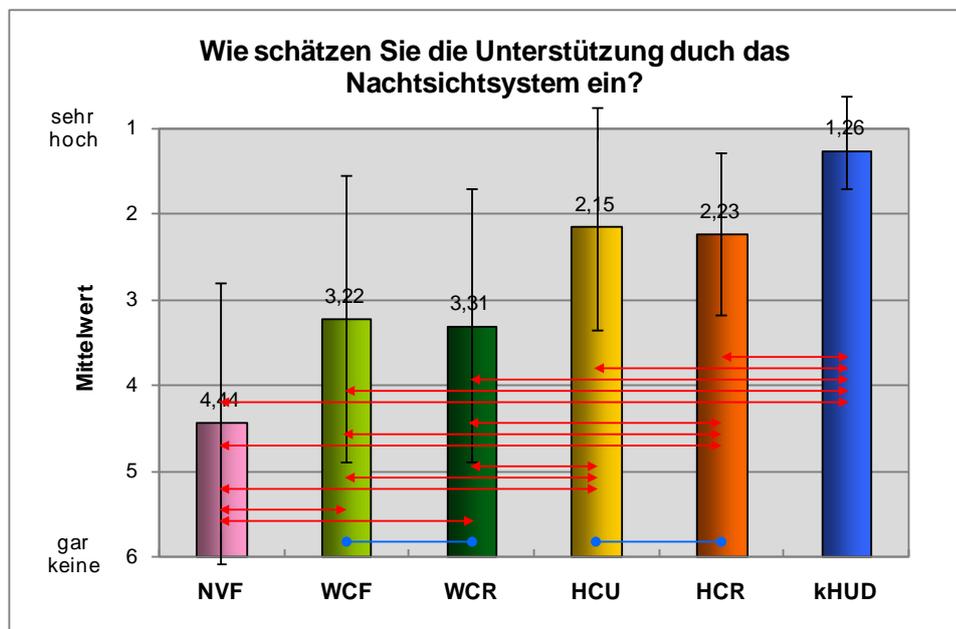


Abbildung 6–29: subjektive Effektivität / Unterstützung durch ein Nachtsichtsystem

Diesbezüglich ist eine mit der systemergonomischen Analyse übereinstimmende Gruppierung der HMI-Varianten erkennbar. Das im CID präsentierte FIR-Videobild ohne

aktive Warnung (NVF) stellt aus Sicht der Probanden keine Unterstützung dar. Zu selten werden vom Fahrer sicherheitskritische Objekte selbstständig erkannt. Die aktive Warnung im CID bewirkt, unabhängig von der Richtungskodierung, eine signifikante Verbesserung des Unterstützungsgrades, wobei die Probanden erst eine aktive Warnung im Head-Up-Display als wirklich unterstützend empfinden. Auch hier hat die im CID präsentierte Richtungskodierung im Falle der HCR-Variante keinen Einfluss auf das Ergebnis, da primär der Anzeigort für die positive Bewertung ausschlaggebend ist. Folglich stellt die informationsreduzierte Warnsymbolik im Head-Up-Display im Vergleich zum hochinformativen FIR-Videobild im CID subjektiv eine viel bessere Lösung dar. Wird der Fahrer an einem effizienten Anzeigort wie dem Head-Up-Display nicht nur gewarnt, sondern noch zusätzlich intuitiv und hocheffizient bezüglich Objektrichtung, -entfernung und -dynamik informiert, ist subjektiv eine erneute Unterstützungssteigerung feststellbar. Das kontaktanalog markierende Head-Up-Display (kHUD) wird im Mittel mit 1,26 als sehr unterstützend bewertet und stellt deshalb subjektiv die ultimative Assistenzform zur Unterstützung der visuellen Wahrnehmung des Fahrers bei Nacht dar.

Zusammenfassend kann in Bezug auf die Untersuchungskategorie „Effektivität“ durch ein Nachtsichtsystem kein Einfluss auf die „Wahrnehmungszuverlässigkeit“ sicherheitskritischer Objekte bestätigt werden. Die Fußgänger wurden ausnahmslos sehr zuverlässig erkannt. Dennoch kann bei schlechteren Sichtverhältnissen ein positiver Einfluss des kHUDs nicht völlig ausgeschlossen werden. Bezüglich des zweiten Kennwertes, der „Wahrnehmungsentfernung“, kann ein nachweislich positiver Einfluss des kHUD identifiziert werden. Im Vergleich zur Baselinefahrt können Fußgänger ca. 10 m früher erkannt werden, da der Fahrerblick bereits exakt an der Stelle ist, an der das reale Objekt in den Lichtkegel eintreten wird. Auch auf das Fahrverhalten hat ein kontaktanaloges Nachtsichtsystem einen positiven Einfluss. Bereits beim Erscheinen der Warnung erfolgt eine sanfte Anpassung der Längsdynamik, so dass die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt der Objekterkennung situationsadäquat angepasst ist. Subjektiv hat insbesondere der Anzeigort der Warnung einen massiven Einfluss auf das Sicherheitsempfinden. Demnach bezweckt das konventionelle Head-Up-Display eine signifikante Steigerung der Unterstützung, wengleich einzig und allein das kontaktanalog markierende Head-Up-Display annähernd den Maximalwert erreicht. Infolgedessen kann im Bezug auf die Untersuchungskategorie „Effektivität“ eine signifikante Fahrsicherheitssteigerung durch ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem bestätigt werden.

6.2.2.4.2 Effizienz

Die Untersuchungskategorie der „Effizienz“ analysiert, wie zuverlässig und schnell der Fahrer in dem nur sehr begrenzten Zeitfenster objektrelevante Informationen aus den unterschiedlichen HMI-Varianten aufnehmen kann.

Im Folgenden wird für alle sieben unabhängigen Variablen das Blickverhalten der Probanden während der sechs sicherheitskritischen Situationen, in denen ein Fußgänger im FIR-Videobild, bzw. die Warnsymbolik im CID, HUD oder kHUD erkannt wurde, analysiert. Der Betrachtungszeitraum beginnt 150 m vor der sicherheitskritischen Stelle und endet mit dem Passieren der Gefahrenstelle. Abbildung 6–30 zeigt diesbezüglich die Ergebnisse der Wahrnehmungsgeschwindigkeit. Sie ist definiert als die verstrichene Zeit ab dem Zeitpunkt der Warnsymbolikeinblendung bis zur Fixierung durch den Probanden.

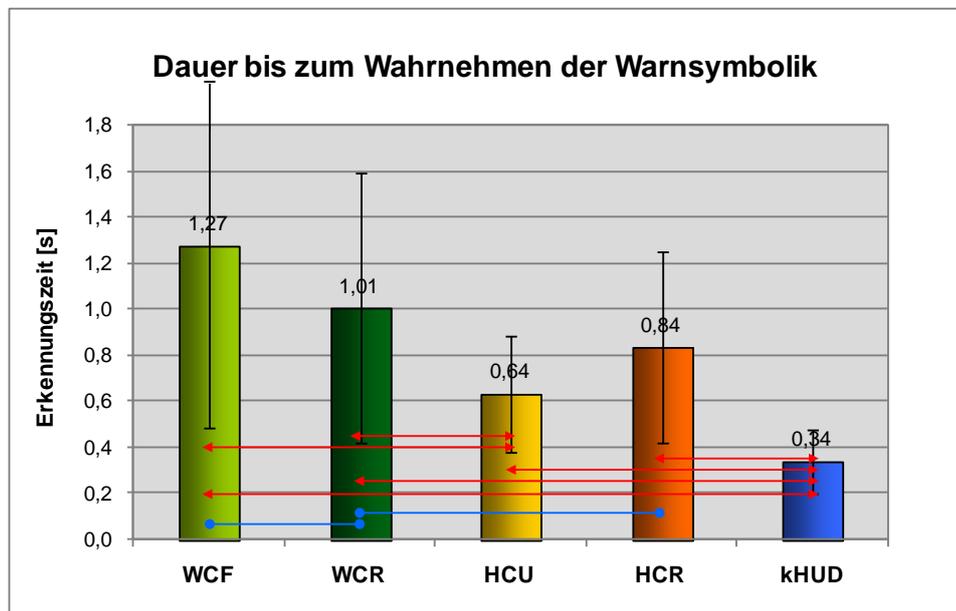


Abbildung 6–30: objektive Effizienz / Wahrnehmungsgeschwindigkeit der Warnung ab dem Zeitpunkt der Erscheinung

Bei den Varianten WCF und WCR benötigen die Probanden zur Wahrnehmung der Warnsymbolik im CID mit 1,27 s, bzw. 1,01 s im Vergleich zu fast allen anderen warnenden Nachtsichtsystemen, am signifikant längsten. Die Richtungskodierung hat in diesem Fall bei der Variante WCR keinen Einfluss. WCF und WCR sind statistisch gesehen identisch. Im Gegensatz dazu wird die Warnung im Head-Up-Display bei der Variante HCU im Vergleich zu den beiden CID-Varianten mit einer Erkennungszeit von im Mittel 0,64 s signifikant schneller wahrgenommen. Dieser positive Effekt, der annähernd doppelt so schnellen Informationsaufnahme, geht bei der zweiten HUD-Variante, HCR, durch die zusätzliche Richtungskodierung im CID verloren. Im Mittel benötigen die Probanden zur Wahrnehmung der Warnsymbolik mit 0,84 s signifikant länger. Der Grund könnte eine vermehrte

Informationsaufnahme im CID sein, die durch den viel größeren Blickabwendungswinkel mehr Zeit in Anspruch nehmen würde. Am signifikant schnellsten wird die Warnung im kHUD wahrgenommen. Die mittlere Wahrnehmungszeit beträgt 0,34 s. Somit ist sie im Vergleich zu allen anderen warnenden Nachsichtsystemen, bezüglich der Wahrnehmungsgeschwindigkeit, die mit Abstand effizienteste Variante.

Im Hinblick auf eine situative Blickdatenanalyse ist die in Abbildung 6–31 dargestellte relative kumulierte Blickhäufigkeit von Interesse. Während einer sicherheitskritischen Situation schaut der Fahrer bei der Variante NVF im Mittel 1,2 mal auf das FIR-Videobild. Eine ähnlich geringe Blickhäufigkeit ist bei der kontaktanalogen Variante kHUD feststellbar. Im Mittel wird der kontaktanaloge rote Rahmen 1,1 mal pro sicherheitskritischer Situation fixiert. Signifikant häufiger werden die Anzeigen der WCR, HCU und HCR Variante mit im Mittel 1,6 bis 1,8 Fixationen pro Situation in Anspruch genommen. Bei den HUD-Varianten HCU und HCR können die HMI-Gesamtfixationen noch zusätzlich auf die beiden Anzeigeeorte CID und HUD aufgeteilt werden. Demnach ist die Fixationshäufigkeit des Head-Up-Displays für beide Varianten identisch. Unterschiede treten hingegen bei der Blickhäufigkeit des CIDs auf. Das CID der Variante HCR wird aufgrund der Richtungskodierung signifikant häufiger fixiert, als das CID der Variante HCU. Dies bestätigt die zuvor getroffene Annahme hinsichtlich der Wahrnehmungsgeschwindigkeit. Der Fahrer nimmt im Falle der Variante HCR aufgrund der zusätzlichen Richtungskodierung die Warnsymbolik vermehrt im CID auf, so dass die in Abbildung 6–30 dargestellte Wahrnehmungszeit ansteigt. Im Vergleich zu den warnenden CID-Varianten, WCF und WCR, ist die Fixationshäufigkeit des CIDs jedoch um annähernd die Hälfte geringer.

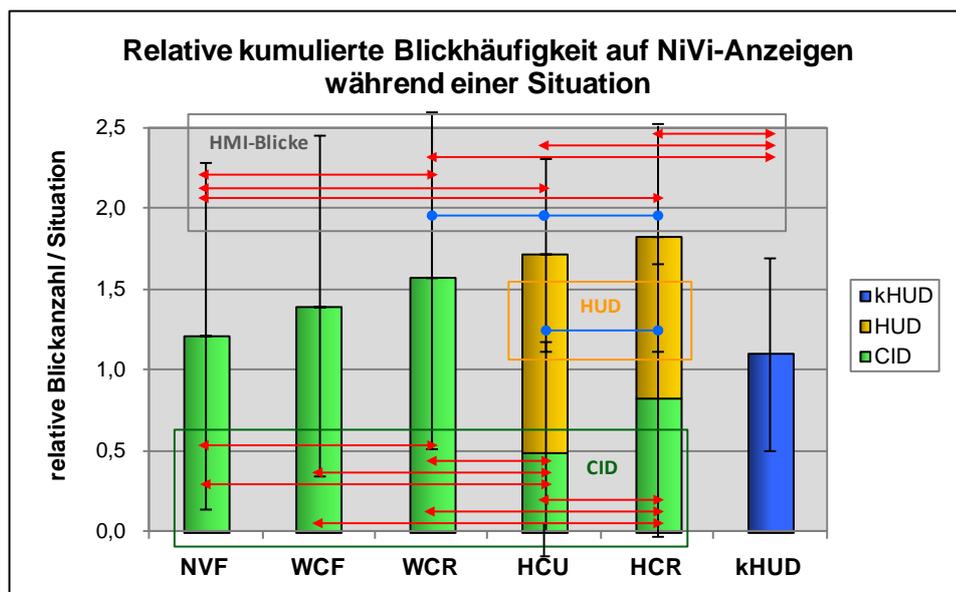


Abbildung 6–31: objektive Effizienz / relative kumulierte Blickhäufigkeit auf NiVi-Anzeigen während einer sicherheitskritischen Situation

Die mittlere Fixationsdauer dieser Blickzuwendungen ist aus Abbildung 6–32 zu entnehmen. Für die Variante NVF beträgt sie zum Scannen des FIR-Videobildes im Mittel 0,9 s. Durch eine zusätzliche aktive Warnung reduziert sich die mittlere Fixationsdauer des CIDs bei allen vier warnenden Nachtsichtsystemen WCF, WCR, HCU und HCR auf ca. 0,63 s. Die Richtungskodierung im CID hat sowohl bei der Variante WCR, als auch HCR keinen Einfluss auf die durchschnittliche CID-Blickdauer. Noch effizienter gestaltet sich die Informationsaufnahme im konventionellen Head-Up-Display. Im Mittel benötigen die Probanden für die Informationsaufnahme des einfachen Warnicons 0,39 s. Die signifikant längste Blickdauer ist bei der Variante kHUD feststellbar. Demnach wird die kontaktanaloge Markierung im Mittel 1,7 s fokussiert.

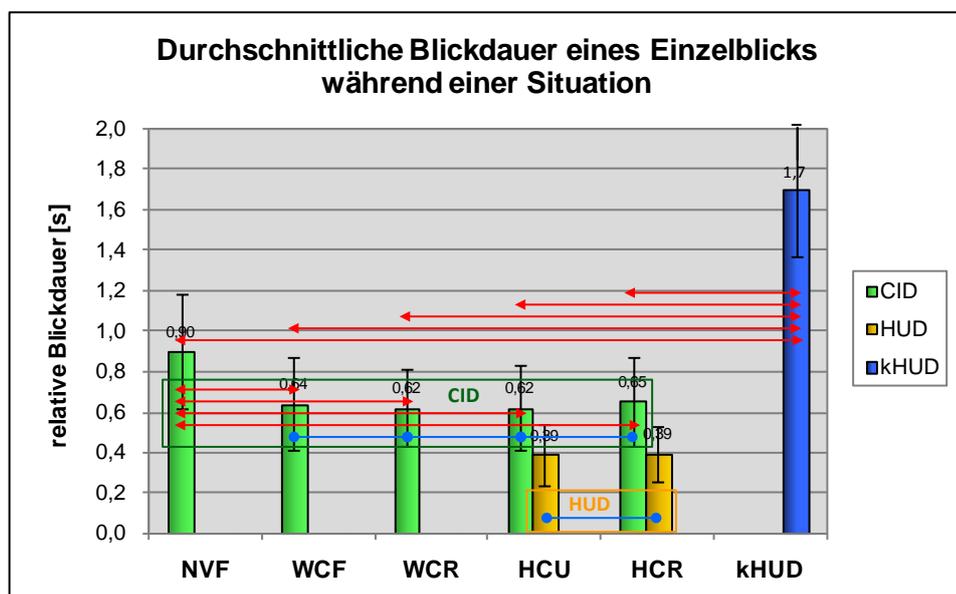


Abbildung 6–32: objektive Effizienz / mittlere Blickdauer auf NiVi-Anzeigen während einer sicherheitskritischen Situation

Zusätzlich zu den Ergebnissen der Wahrnehmungsgeschwindigkeit, relativen Blickhäufigkeit und mittleren Blickdauer müssen im Hinblick auf eine konsistente Blickdatenanalyse des Weiteren die relativen kumulierten Blickanteile betrachtet werden (siehe Abbildung 6–33). Die in diesem Fall berücksichtigten AOIs sind das CID, HUD, kHUD, Objekt und die Umgebung. Die relativen kumulierten Blickanteile der Umgebung sind in Abbildung 6–33 nicht explizit dargestellt, nehmen aber jeweils den restlichen prozentualen Anteil ein.

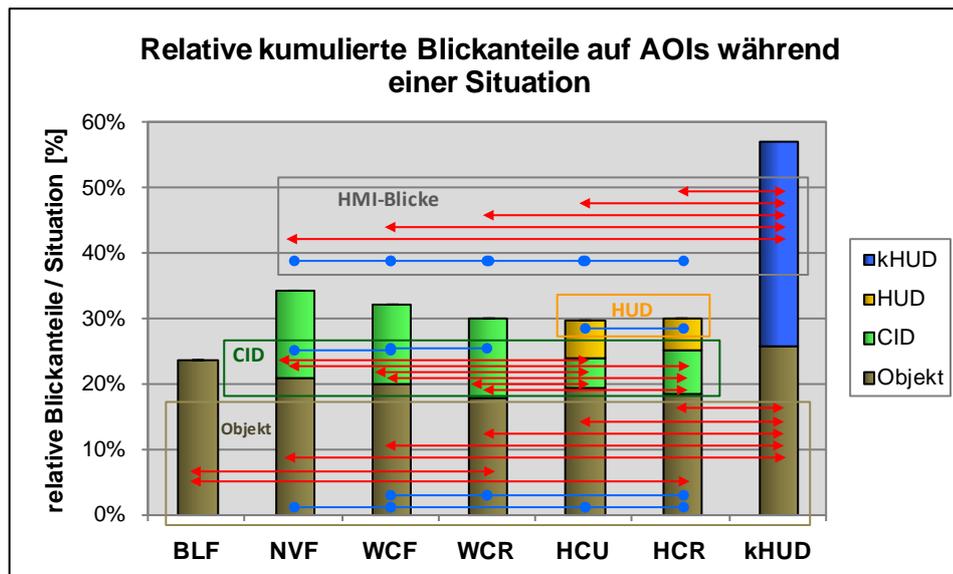


Abbildung 6–33: objektive Effizienz / relative kumulierte Blickanteile auf AOs während einer sicherheitskritischen Situation

Innerhalb des betrachteten Analysezeitraums wendet der Fahrer im Falle der Baselinefahrt (BLF) einen Zeitanteil von 23 % auf, um den im Sichtbereich befindlichen Fußgänger zu beobachten. Dieser Zeitanteil reduziert sich bei den richtungskodierten Varianten WCR und HCR signifikant auf im Mittel 18 %. Im Gegensatz dazu steigt er mit dem kontaktanalogen Head-Up-Display (kHUD) im Vergleich zu den alternativen Night-Vision-Varianten signifikant auf im Mittel 16 % an. Der relative Zeitanteil der HMI-Blicke, den der Fahrer zur Informationsaufnahme im CID, HUD oder kHUD aufbringt, ist bei den Varianten NVF, WCF, WCR, HCU und HCR mit ca. 13 % identisch. Im Falle des kHUDs steigt auch er signifikant auf 32 % an. Die Zeitanteile der beiden HUD-Varianten, HCU und HCR, können des Weiteren hinsichtlich des Anzeigeortes, CID und HUD, spezifiziert werden. Bezüglich des HUDs ist der relative kumulierte Blickanteil mit ca. 7 % für beide Varianten identisch. Keine Aussage kann jedoch in Bezug auf die CID-Anteile getroffen werden, außer dass sie im Vergleich zu den Varianten NVF, WCF und WCR signifikant geringer sind.

Basierend auf den Ergebnissen der Wahrnehmungsgeschwindigkeit (Abbildung 6–30), der relativen kumulierten Blickhäufigkeit (Abbildung 6–31), der mittleren Blickdauer (Abbildung 6–32) und der relativen kumulierten Blickanteile (Abbildung 6–33) kann im Folgenden eine zuverlässige Rekonstruktion der visuellen Informationsaufnahmeprozesse während einer sicherheitskritischen Situation erfolgen. Demnach gestaltet sich der chronologische Ablauf im Falle der Baselinefahrt (BLF) folgendermaßen:

Zu Beginn der Messung, in einer Entfernung von 150 m zum sicherheitskritischen Objekt, bis kurz vor dessen Wahrnehmung, scannt der Fahrer kontinuierlich die Umgebung. Sobald er den Fußgänger im Abblendlicht erkennt, fixiert er ihn und lässt bis zu einer Entfernung von

ca. 15 m nicht mehr von ihm ab. Erst wenn der Fußgänger aus Sicht des Fahrers keine Gefahr mehr darstellt, konzentriert er sich wieder auf das Scannen des frontalen Verkehrsraums.

Auch im Falle der NVF-Variante scannt der Fahrer zu Beginn des Betrachtungszeitraums die Umgebung. In lediglich 39 % aller Fälle richtet der Fahrer zufällig in dem Moment seinen Blick auf das FIR-Videobild, in dem sich ein Fußgänger noch nicht im Sichtbereich befindet. Diese einmalige Blickzuwendung dauert mit 0,9 s relativ lange, da das hochinformativere FIR-Videobild aktiv gescannt werden muss, um eine potenzielle Gefahrenquelle identifizieren zu können. Im Mittel nimmt dieser Dekodieraufwand 13 % der relativen kumulierten Blickanteile in Anspruch. Anschließend richtet der Fahrer seinen Blick wieder auf das frontale Verkehrsgeschehen. Unmittelbar danach wird der Fußgänger im Abblendlicht sichtbar. Analog zur Baselinefahrt fokussiert der Fahrer diesen umgehend und beobachtet ihn so lange mit maximaler Aufmerksamkeit, bis die Gefahr gebannt ist. Während dieser Phase blickt der Fahrer in der Regel kein zweites Mal auf das CID.

Das Blickverhalten der beiden warnenden CID-Varianten, WCF und WCR, ist weitestgehend identisch. Auch hier hat der Fahrer zu Beginn des Betrachtungszeitraums seinen Blick auf das frontale Verkehrsgeschehen gerichtet. Sobald die Sensorik einen Fußgänger detektiert hat, erscheint die Warnsymbolik im CID. Diese wird unabhängig von der Richtungskodierung in 82 % aller Fälle nach einem Zeitversatz von im Mittel 1,14 s wahrgenommen. Mit einer durchschnittlichen Blickdauer von 0,63 s wird die Information im CID signifikant schneller wahrgenommen, als bei der lediglich bildgebenden NVF-Variante. Der Fahrer muss nicht mehr selbständig das hochinformativere FIR-Videobild analysieren, um eine Gefahrenquelle zu identifizieren, sondern wird aktiv durch die Warnsymbolik im CID gewarnt. Infolgedessen reduziert sich die mittlere Blickdauer um ca. 0,3 s. Nach dieser Informationsaufnahme geht der Blick des Fahrers wieder in die Umgebung, um nach der nicht weiter spezifizierten Gefahr Ausschau zu halten. In machen Fällen schaut der Fahrer ein zweites Mal auf das CID, in der Absicht, detailliertere Informationen aus dem FIR-Videobild herausfiltern zu können, was jedoch aufgrund der nur sehr kurzen Zeit nicht möglich ist. Dies ist bei der richtungskodierten Variante WCR im Vergleich zur Variante NVF mit einer relativen Blickanzahl von im Mittel 1,6 mal pro Situation signifikant häufiger der Fall. Diese erneute Fixation des CIDs wird in diesem Fall primär durch die Richtungskodierung hervorgerufen und findet vermehrt zu einem Zeitpunkt statt, zu dem das reale Objekt gerade in den Sichtbereich eintritt, oder bereits sichtbar ist. Infolgedessen reduzieren sich im Vergleich zur Baselinefahrt (BLF) die relativen Blickanteile auf das Objekt von 24 % auf lediglich 18 %. Dieses Ergebnis stellt ein merkliches Sicherheitsdefizit der Variante WCR dar. Um nämlich plötzliche Positions- und Dynamikänderungen des Fußgängers umgehend erkennen zu können, ist eine kontinuierliche Fixierung unbedingt notwendig. Nur so kann eine mögliche

Kollision weitestgehend ausgeschlossen werden. Erschwerend kommt noch hinzu, dass die Richtungskodierung in der vorliegenden Ausführungsform keinen Mehrwert für den Fahrer liefert. Die Information der Objekttrichtung weist zu viele systemergonomische Defizite auf, so dass der Dekodieraufwand vom Fahrer in der nur sehr kurzen Zeit nicht bewältigt werden kann. Das Hauptproblem besteht in der sekundären Inkompatibilität der Richtungskodierung. Befindet sich ein Fußgänger nämlich mittig oder links auf der Fahrbahn, erfolgt die Warnung nicht kompatibel zur Blickrichtung des Fahrers, da sie stets rechts von ihm im CID präsentiert wird. Der Fahrer muss folglich die Richtungskodierung relativ zum Display dekodieren und auf die Realität übertragen. Bei einer ergonomisch richtigen Ausführungsform würde die Warnung rechts vom Fahrer erscheinen, wenn sich ein Fußgänger rechts zum Fahrzeug befindet, links von ihm, wenn sich ein Fußgänger am linken Fahrbahnrand befindet, und zentral, wenn sich ein Fußgänger direkt vor ihm befindet. Das richtungscodierte LED-Array berücksichtigt diese ergonomische Grundregel und stellt folglich eine sehr intuitive und hocheffiziente richtungscodierte HMI-Lösung dar (siehe Kapitel 4.2.2).

Der chronologische Ablauf der sicherheitskritischen Situation gestaltet sich im Falle der beiden HUD-Varianten, CHU und CHR, zu Beginn analog zu den CID-Varianten. Anfangs befindet sich der Blick der Fahrers in der Umgebung. Sobald die Sensorik ein sicherheitskritisches Objekt auf der Fahrbahn detektiert hat, erscheint zeitlich synchronisiert im HUD und CID eine Warnsymbolik. Mit einer Erkennungsrate von annähernd 100 % wird diese aufgrund des Head-Up-Displays bei beiden Varianten nahezu kein einziges Mal übersehen. Im Falle der Variante HCU vergehen lediglich 0,64 s bis der Fahrer die Warnung erkennt. Dies ist im Vergleich zu einer CID-Variante annähernd doppelt so schnell. Dieser positive Effekt verschwindet jedoch bei der Variante HCR. In diesem Fall benötigt der Fahrer im Mittel 0,84 s bis er die Warnung erkennt. Der Grund für diese langsamere Erkennungszeit ist auf die Richtungskodierung des CIDs zurückzuführen, die den Fahrer dazu verleitet, die Warnung nicht mehr, wie im Falle der HCF-Variante, primär im HUD wahrzunehmen, sondern vermehrt im CID. Da die benötigte Blickzuwendungszeit im CID vergleichsweise lang ist, wirkt sich dies auf die Gesamtwahrnehmungszeit der Warnsymbolik aus. Sowohl bei der Variante HCU als auch bei der Variante HCR erfolgt während einer Situation im Durchschnitt mindestens ein Blick auf das HUD, wobei die mittlere Blickdauer bei 0,39 s liegt. Im Falle der HCU-Variante wird zusätzlich noch 0,5 mal auf das CID geblickt. Die relative Blickdauer dieser Fixation ist analog zur Variante WCF, WCR und HCR im Mittel 0,63 s. Diese zusätzliche CID-Fixation findet hingegen bei der HCR-Variante im Mittel 0,8 mal pro Situation statt und somit signifikant häufiger als ohne Richtungskodierung. Analog zu der Variante WCR findet diese zusätzliche Fixation der im CID präsentierten Richtungskodierung vermehrt in jener Phase statt, wenn sich das reale Objekt bereits in der

visuellen Reichweite des Fahrers befindet. Infolgedessen weist die relative kumulierte Blickdauer auf das Objekt mit einem Anteil von 18 % pro Situation, im Vergleich zur Baselinefahrt, einen signifikant geringeren Wert auf und ist somit als sicherheitskritisch zu bewerten.

Bei der Variante kHUD gestaltet sich der chronologische Ablauf folgendermaßen: Zu Beginn scannt der Fahrer die Umgebung. Sobald die Sensorik einen Fußgänger erkannt hat, wird dieser kontaktanalog mit einem roten Rahmen markiert. Ein Übersehen der Symbolik ist in diesem Fall zu 100 % auszuschließen. Der Fahrer benötigt im Mittel 0,34 s, um die kontaktanaloge Markierung wahrzunehmen und ist somit doppelt so schnell, wie mit einem konventionellen Head-Up-Display. Im Vergleich zu allen anderen Nachtsichtsystemen erhält der Fahrer nicht nur eine Warnung hinsichtlich einer sicherheitskritischen Situation, sondern viel mehr die exakte Objektanzahl sowie deren Richtung, Entfernung und Dynamik. Das kontaktanalog markierende Head-Up-Display vermittelt somit in kürzester Zeit alle relevanten Objektinformationen, so dass der Fahrer schon sehr frühzeitig die Situation adäquat einzuschätzen kann. Durch die umgehende Anpassung der Längs- und Querdynamik kann ein Unfall weitestgehend ausgeschlossen werden. Während einer sicherheitskritischen Situation wird die kontaktanaloge Markierung im Mittel 1,1 mal fixiert und dies mit einer relativen Blickdauer von ca. 1,7 s. Dies lässt den Rückschluss zu, dass der virtuelle rote Rahmen vom Fahrer umgehend nach Erscheinen fixiert wird und er ihn so lange im Auge behält, bis der Rahmen wieder völlig verblasst ist. Dieser Informationsaufnahmeprozess bewirkt eine kumulierte Blickdauer von 32 % pro Situation und ist folglich im Vergleich zu allen anderen HMI-Varianten um ein Vielfaches länger. Dennoch muss hierbei berücksichtigt werden, dass der Fahrer seinen Blick im Falle des kontaktanalogen Head-Up-Displays nicht von der realen Fahrszenarie abwenden muss. Im Gegensatz zu allen anderen Varianten stellt somit dieser relativ große Blickanteil keine Ablenkung dar, sondern ganz im Gegenteil ein risikopriorisiertes natürliches Blickverhalten, vergleichbar mit einer Fahrt bei idealen Sichtverhältnissen. Auch in diesem Fall würde der Fahrer einem sicherheitskritischen Objekt vollste Aufmerksamkeit schenken und es so lange fixieren, bis die sicherheitskritische Situation gebannt ist. Anstelle der kontaktanalogen Markierung tritt allmählich mit stetiger Annäherung an die Gefahrenstelle das reale Objekt in die visuelle Reichweite des Fahrers und wird somit im Vergleich zur Baselinefahrt annähernd 10 m früher erkannt. Der Fußgänger wird so lange fixiert bis er keine Gefahr mehr darstellt. Die relative kumulierte Blickdauer auf das Objekt ist im Falle der kontaktanalogen Variante mit einem Anteil von 26 % signifikant größer als bei allen anderen Nachtsichtsystemen. In Anbetracht dieser Ergebnisse stellt das kontaktanalog markierende Head-Up-Display mit Abstand die effizienteste Night-Vision-Variante dar.

6.2.2.4.3 Ablenkung

Bei jeglicher Art von Fahrerassistenz besteht eine wesentliche Gefahr in der Kompensation des Sicherheitsgewinns durch eine vermehrte Ablenkung von der primären Fahraufgabe. Die zur Quantifizierung des Ablenkungspotenzials der unterschiedlichen HMI-Varianten herangezogenen gesamtfahrtspezifischen Kennwerte umfassen die in Form einer Blickhäufigkeitsverteilung dargestellten Verkehrsblindzeiten während der Gesamtfahrt, sowie das an Hand der Fragebögen ermittelte subjektive Ablenkungspotenzial. Letzteres ist in Abbildung 6–34 dargestellt.

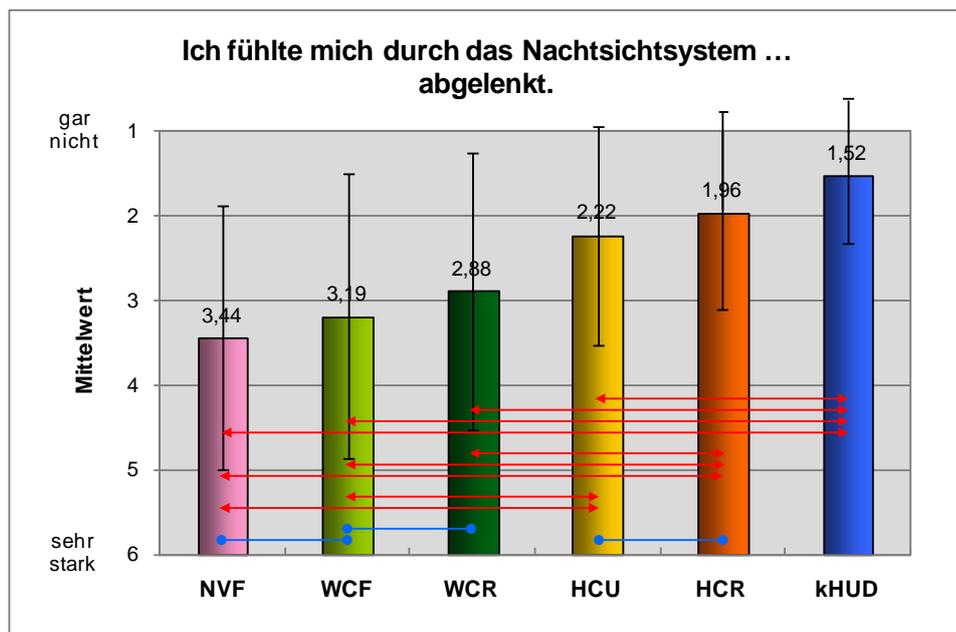


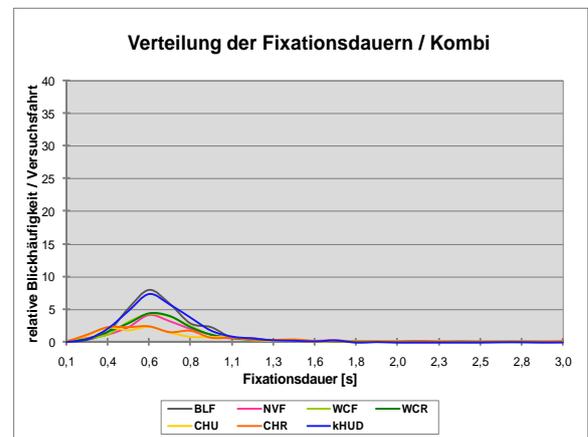
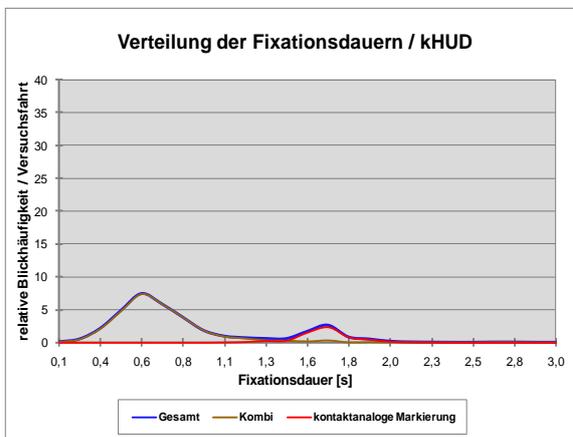
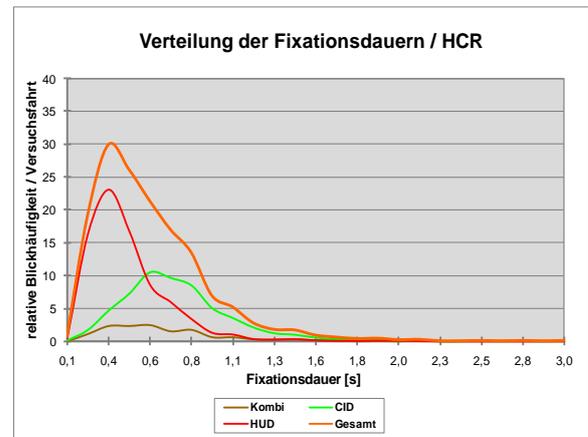
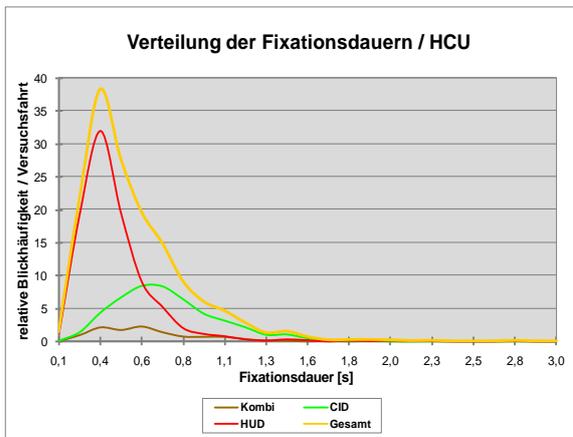
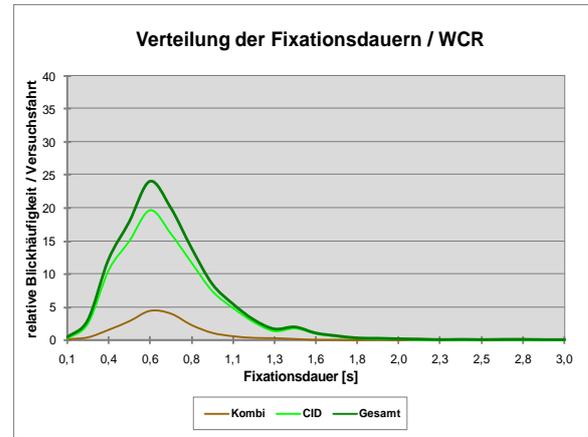
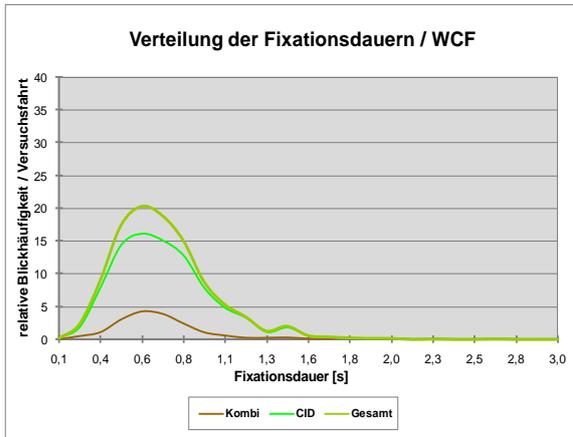
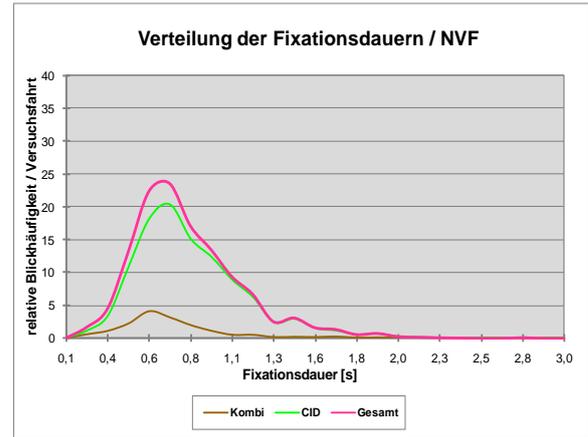
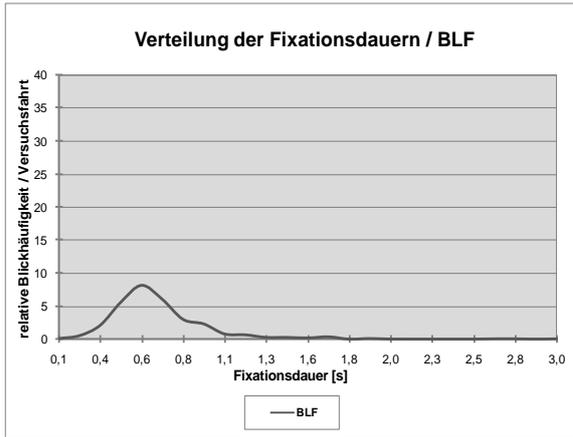
Abbildung 6–34: subjektive Ablenkung / Ablenkungspotenzial der HMI-Varianten

Gemäß der hypothetischen Annahmen bewerten die Probanden das Ablenkungspotenzial umso geringer, je besser die objektrelevanten Informationen aufbereitet sind und je schneller diese aufgenommen werden können. Das FIR-Videobild im CID wird bei der Variante NVF mit einem Wert von 3,4 weder positiv noch negativ bewertet. Dennoch fühlt sich ein gewisser Anteil der Probanden subjektiv abgelenkt. Eine aktive Warnung im CID kann bei den Varianten WCF und WCR keine merkliche Verbesserung bewirken. Auch die Richtungskodierung im CID verhält sich bezüglich des subjektiven Ablenkungspotenzials neutral. Folglich wird das FIR-Videobild, die Warnung und die Richtungskodierung im CID von den Probanden weder als ablenkend, noch als unterstützend bewertet. Erst durch die Verbesserung des Anzeigeortes wird von den Probanden im Mittel keine Ablenkung mehr attestiert. Beide HUD-Varianten werden signifikant besser als die bildgebende Variante NVF, sowie die im CID warnenden Nachtsichtsysteme WCF und WCR bewertet. Eine erneute Optimierung des Anzeigeortes sowie der Informationsaufbereitung können das

Ablenkungspotenzial weiter reduzieren. Mit dem kHUD wird ein Nachtsichtsystem signifikant als nicht ablenkend bewertet. Es ist mit einem Wert von im Mittel 1,5 signifikant besser als die alternativen Nachtsichtsysteme NVF, WCF, WCR und HCU. In Anbetracht dieser Ergebnisse hat folglich primär eine Verbesserung des Anzeigeortes bei dem konventionellen und kontaktanalogen HUD eine subjektive Reduktion des Ablenkungspotenzials zur Folge. Auch wirkt sich die erhöhte Informationsdichte sowie intuitive Informationsvermittlung der Variante kHUD positiv auf das Ergebnis aus.

Trotz dieser subjektiv zu neigenden Ablenkung ist es dennoch nicht auszuschließen, dass die unterschiedlichen HMI-Varianten ein gewisses objektives Ablenkungspotenzial besitzen. Ein Proband fühlt sich nämlich subjektiv erst dann abgelenkt, wenn ihm dies in Form einer kritischen Situation – gerade noch abgewendeter Unfall – bewusst geworden ist. Dies war jedoch während der Versuche zu keinem Zeitpunkt der Fall. In Anbetracht dessen werden im Folgenden die Blickdaten analysiert, um ein gegebenenfalls objektives Ablenkungspotenzial quantifizieren zu können. Für die Ablenkung eines Systems ist in erster Linie die Blickdauer maßgeblich. Nach Schweigert (2003) sollte diese einen Wert von 2 s nicht überschreiten. Andernfalls ist die Variante als sicherheitskritisch einzustufen. Aber auch die Blickhäufigkeit darf bei dieser Betrachtung nicht außer Acht gelassen werden. Je seltener der Blick zur Aufnahme objektirelevanter Informationen vom eigentlichen Verkehrsgeschehen abgewendet werden muss, um so geringer ist auch die Gefahr, dass der Fahrer, just in diesem Moment, unaufmerksam ist, in dem plötzlich eine unvorhersehbare Situation eintritt. In Anbetracht dessen zeigt Abbildung 6–35 die objektive Verteilung der Verkehrsblindzeit in Abhängigkeit von diesen beiden Größen, Blickdauer und Blickhäufigkeit. Für jede der sieben unabhängigen Variablen ist die Häufigkeitsverteilung der Blickdauer in Abhängigkeit ihrer Anzeigeorte aufgeführt. Eine ablenkungsminimierte Blickhäufigkeitsverteilung ist durch eine sehr niedrige und linksorientierte Kurve charakterisiert.

In Abbildung 6–35 ist zu erkennen, dass die relativ geringe Verkehrsblindzeit der Baselinefahrt (BLF) auf das Kombi zurückzuführen ist. Demnach schauen die Probanden während der 25minütigen Testfahrt im Mittel 1,2 mal pro Minute auf das Kombi, um die aktuell gefahrene Geschwindigkeit abzulesen. Ein solcher Blick dauert im Mittel 0,69 s. Für diese Informationsaufnahme verwendet der Fahrer 1,4 % der Gesamtfahrzeit. Dieser Wert steigt bei der Variante NVF signifikant auf 7,4 % an. Dies ist mit der Zusatzinformation des hochinformativen FIR-Videobildes im CID zu begründen. Im Mittel schaut ein Fahrer pro Minute 4,9 mal auf das Kombi, wobei die Blickdauer im Mittel 0,74 s beträgt. Der restliche Anteil der Verkehrsblindzeit wird durch das Kombi verursacht. Hierbei reduziert sich im Vergleich zur Baselinefahrt die Blickhäufigkeit auf 0,8 Blicke pro Minute.



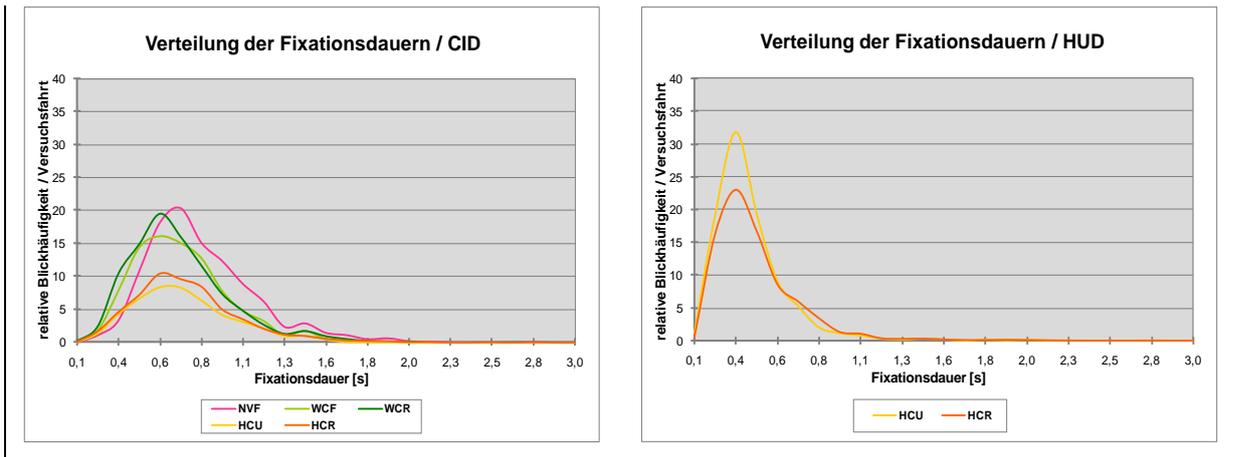


Abbildung 6–35: objektive Ablenkung / Verkehrsblindzeit der Untersuchungsvarianten in Abhängigkeit vom Anzeigeort

Bei den warnenden CID-Varianten, WCF und WCR, reduziert sich im Vergleich zur lediglich bildgebenden Variante NVF die Verkehrsblindzeit auf im Mittel 6 %. Dies ist auf die zusätzliche Warnung im CID zurückzuführen, so dass im Falle der WCF-Variante mit 3,9 Blicken pro Minute seltener und mit einer durchschnittlichen Fixationsdauer von 0,65 s kürzer auf das CID geblickt wird. Im Falle der zusätzlichen Richtungskodierung ist in Bezug auf das CID lediglich eine Reduktion der mittleren Fixationsdauer, nicht aber der mittleren Fixationshäufigkeit festzustellen, die bei der Variante WCR im Mittel bei 4,6 Blicken pro Minute liegt. Die Kombiblicke der beiden warnenden CID-Varianten, WCF und WCR, verhalten sich analog zur Variante NVF.

Bei den Varianten HCU und HCR macht sich bezüglich der gesamten Blickhäufigkeitsverteilung deutlich das konventionelle Head-Up-Display bemerkbar. Bei der Variante HCU wird das Head-Up-Display im Mittel 4,4 mal pro Minute mit einer mittleren Fixationsdauer von 0,42 s in Anspruch genommen. Bei diesen Daten ist zu berücksichtigen, dass im konventionellen Head-Up-Display nicht nur eine ereignisbasierte Warnsymbolik, sondern zusätzlich während der gesamten Versuchsfahrt die digitale Geschwindigkeitsanzeige präsentiert wird. Dies hat zur Folge, dass die Kombiblicke nur noch 0,5 mal pro Minute erfolgen und somit signifikant geringer sind als bei allen anderen Varianten. Die restlichen Blicke der HCU Verkehrsblindzeit gehen zu Lasten des CIDs. Hierbei ist im Vergleich zu den Varianten NVF, WCF und WCR eine deutliche Reduktion der Fixationshäufigkeit von im Mittel 2,4 Blicken pro Minute feststellbar. Annähernd analog verhalten sich die Blickverteilungen der Variante HCR bezüglich der Fixationsdauern. Ein Unterschied im Vergleich zur Variante HCU besteht jedoch in der Fixationshäufigkeit des Head-Up-Displays und des CIDs. Demnach wird das Head-Up-Display mit 3,1 Blicken pro Minute signifikant

seltener und das CID mit im Mittel 2,8 Blicken pro Minute signifikant häufiger als bei der Variante HCU in Anspruch genommen.

Im Falle der kontaktanalogen Variante kHUD reduziert sich die Verkehrsblindzeit auf einen Anteil von im Mittel 1,8 % der Gesamtfahrzeit. Hierbei ist die durch das Kombi hervorgerufene Blickabwendung mit im Mittel 1,3 Fixationen pro Minute und einer mittleren Blickdauer von 0,68 s identisch zur Baselinefahrt. Die vermehrten Fixationsdauern im Bereich zwischen 1,5 und 1,9 s sind auf die kontaktanaloge Markierung zurückzuführen. Demnach wird der kontaktanaloge rote Rahmen 0,26 mal pro Minute im Mittel 1,7 s lang fixiert. In diesem Fall muss der Fahrer jedoch seinen Blick nicht vom frontalen Verkehrsgeschehen abwenden. Diese Blickanteile dürfen folglich nicht als Verkehrsblindzeit gewertet werden.

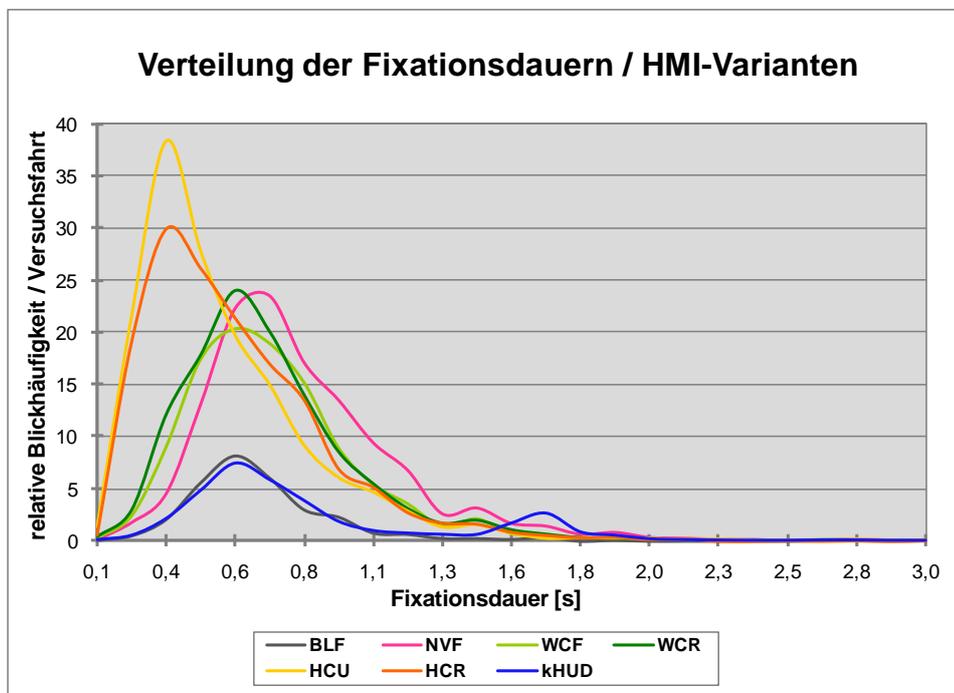


Abbildung 6–36: objektive Ablenkung / Verkehrsblindzeit der Untersuchungsvarianten

Abbildung 6–36 zeigt zum besseren Vergleich die Gesamtblickhäufigkeitsverteilungen aller HMI-Varianten in einem einzigen Diagramm. Auch wenn keines der untersuchten Nachsichtsysteme sicherheitskritische Fixationsdauern von mehr als 2 s hervorrufen, weisen dennoch alle, mit Ausnahme des kontaktanalogen Head-Up-Displays (kHUD), im Vergleich zur Baselinefahrt (BLF) stark erhöhte Blickhäufigkeitswerte auf. Bei der nicht warnenden NVF-Variante scannt ein Fahrer sehr häufig das FIR-Videobild im CID. Die Fixationsdauern sind im Vergleich zu den warnenden CID-Varianten signifikant länger, da die Informationen nicht aufbereitet sind und folglich der Dekodieraufwand zur Identifikation sicherheitskritischer

Objekte erhöht ist. Des Weiteren wirkt sich die Zusatzinformation im CID negativ auf die Kombiblicke aus. Im Vergleich zur Baselinefahrt wird bei einem zusätzlichen hochinformativen FIR-Videobild im CID weniger oft die eigene Geschwindigkeit im Kombi kontrolliert. Bei den Varianten WCU und WCR reduziert sich im Vergleich zu Variante NVF die Fixationsdauer durch die zusätzliche Warnung im CID signifikant. Im Falle der richtungskodierten CID-Variante WCR bleiben jedoch die Blickhäufigkeiten konstant. Da die Richtungskodierung bezüglich Effektivität und Effizienz keinen Mehrwert liefert, ist dieser Effekt als negativ zu bewerten. Nur ohne Richtungskodierung ist im Falle der Variante WCF eine zusätzliche Reduktion der Blickhäufigkeiten feststellbar. Durch ein zusätzliches Head-Up-Display kann im Falle der Variante HCU und HCR eine weitere signifikante Reduktion der relativen Blickhäufigkeiten im CID bewirkt werden. Sie reduzieren sich um mehr als die Hälfte. Auch in diesem Fall ist im Vergleich zur Variante HCU durch die zusätzliche Richtungskodierung der HCR-Variante eine signifikante Steigerung der Fixationshäufigkeiten feststellbar. Trotz dieser merklichen Reduktion der CID-Blicke weist jedoch sowohl die HCU- als auch die HCR-Kurve, insbesondere in einem Fixationsdauerbereich von 0,4 s, auffällig viele Fixationshäufigkeiten auf. Diese sind auf das Head-Up-Display zurückzuführen, wenngleich bei der Variante HCR aufgrund der Richtungskodierung im CID signifikant seltener die Information der Warnung im HUD wahrgenommen wird. Somit ist auch in diesem Fall die richtungskodierte Warnung im CID als negativ zu bewerten, da die im Hinblick auf die Fixationsdauer hoch effizienten HUD-Blicke reduziert werden.

Auch wenn die im Vergleich zur Baselinefahrt (BLF) überdurchschnittlich hohen Fixationshäufigkeiten teilweise darauf zurückzuführen sind, dass sowohl das HUD, als auch das FIR-Videobild im CID für alle Probanden neu war, ist es dennoch auffällig, dass ausschließlich das kontaktanalog markierende Head-Up-Display (kHUD) im Hinblick auf ein ablenkungsminimiertes Nachtsichtsystem das Optimum darstellt. Durch die ereignisbasierte Visualisierung eines kontaktanalog markierenden roten Rahmens, wird allein schon aufgrund des geringen relativen Zeitanteils im Vergleich zur Gesamtfahrt die Ablenkung auf ein Minimum reduziert. Des Weiteren ist für die Applikation Night-Vision der Negativeffekt des „Attention Capture“ irrelevant, da es sich bei der kontaktanalogen Markierung um eine Information handelt, der unter allen Umständen vollste Aufmerksamkeit zukommen muss. Sie kennzeichnet nämlich den Bereich in der Realität, von dem Gefahr ausgeht. Folglich wäre im Falle eines kontaktanalog markierten sicherheitskritischen Objektes eine erhöhte Aufmerksamkeitsbindung eher wünschenswert. Zudem ist eine Ablenkung vom realen Objekt dadurch auszuschließen, dass die virtuelle Markierung und der Fußgänger für den Fahrer aufgrund der HMI-Auslegung nur in einem sehr kurzen Zeitbereich gleichzeitig sichtbar sind.

6.2.2.4.4 Zufriedenheit

Die Untersuchungskategorie „Zufriedenheit“ analysiert den subjektiven Gesamteindruck der Probanden. Hierbei spielt die subjektive Akzeptanz hinsichtlich der Miss- und False-Alarms eine wesentliche Rolle. Obwohl die objektive False-Alarm-Quote mit 0,73 False-Alarm/Versuchsfahrt und subjektive Miss-Alarm-Quote mit 0,35 Miss-Alarm/Versuchsfahrt aufgrund der identischen Sensorik bei allen HMI-Varianten gleich niedrig ist, kann bezüglich der subjektiven Ergebnisse dennoch ein signifikanter Akzeptanzeinfluss festgestellt werden.

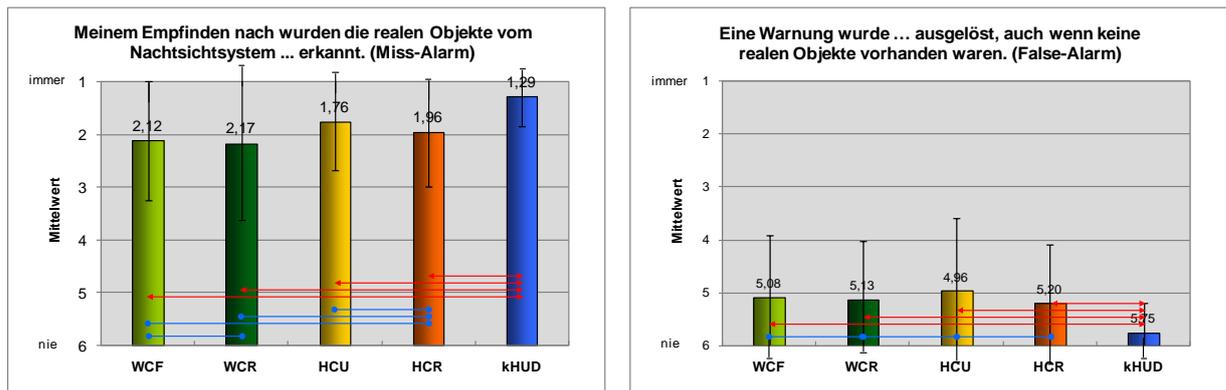


Abbildung 6–37: subjektive Zufriedenheit / Systemzuverlässigkeit bezüglich Miss-Alarm (links) und False-Alarm (rechts)

Nach Abbildung 6–37 sind die Probanden der Ansicht, dass während der gesamten Versuchsfahrt mit der Variante kHUD im Vergleich zu allen anderen warnenden Varianten signifikant weniger Miss-Alarms aufgetreten sind. Mit einem Wert von im Mittel 1,29 wurden die realen Objekte vom kontaktanalogen Nachsichtsystem subjektiv annähernd immer erkannt. Im Falle der Alternativvarianten WCF, WCR, HCU und HCR reduziert sich dieser Wert signifikant. Auch im Falle der False-Alarms ist ein ähnliches Ergebnis feststellbar. Die Probanden sind subjektiv der Meinung, dass mit dem kontaktanalog markierenden HUD (kHUD) signifikant weniger False-Alarms aufgetreten sind, als mit den alternativen HMI-Varianten, die konventionelle Anzeigen verwenden.

Der Grund für dieses gute Abschneiden des kontaktanalogen Head-Up-Displays hinsichtlich der beiden Kategorien kann damit begründet werden, dass durch das kHUD in einer Doppelsituation beide sicherheitskritischen Objekte markiert werden. Im Gegensatz dazu erfolgt bei den Varianten WCF, WCR, HCU und HCR lediglich eine pauschale Warnung vor einer sicherheitskritischen Situation. Der Proband weiß folglich nicht, wie viele Fußgänger sich im frontalen nichteinsehbaren Verkehrsraum befinden. Auch könnte dieses Ergebnis auch durch die sehr hohe Wahrnehmungszuverlässigkeit der kontaktanalogen Markierung beeinflusst worden sein. Ein objektives Versagen des Fahrers durch das Übersehen der

Warnsymbolik könnte vom Fahrer selbst als Versagen des Nachtsichtsystems wahrgenommen worden sein.

Auch im Falle der False-Alarms könnte die Ursache in der unspezifischen Warnung der Varianten WCF, WCR, HCU und HCR zu sehen sein. Wird ein Objekt, wie beispielsweise ein Telegrafmast, fälschlicherweise als sicherheitskritischer Fußgänger erkannt, so merkt der Fahrer diesen Fehler im Falle des kHUDs umgehend, sobald das mit dem roten Rahmen kontaktnalog markierte Objekt in das Abblendlicht eintritt. Bei allen anderen Varianten wird die Warnsymbolik beim Passieren des falschdetektierten Objektes wieder erlöschen, so dass der Fahrer nicht weiß, wieso das System eine Warnung ausgelöst hat. Dies könnte sich negativ auf die Akzeptanz auswirken und folglich die Ursache für das Ergebnis der subjektiven Systemzuverlässigkeit sein.

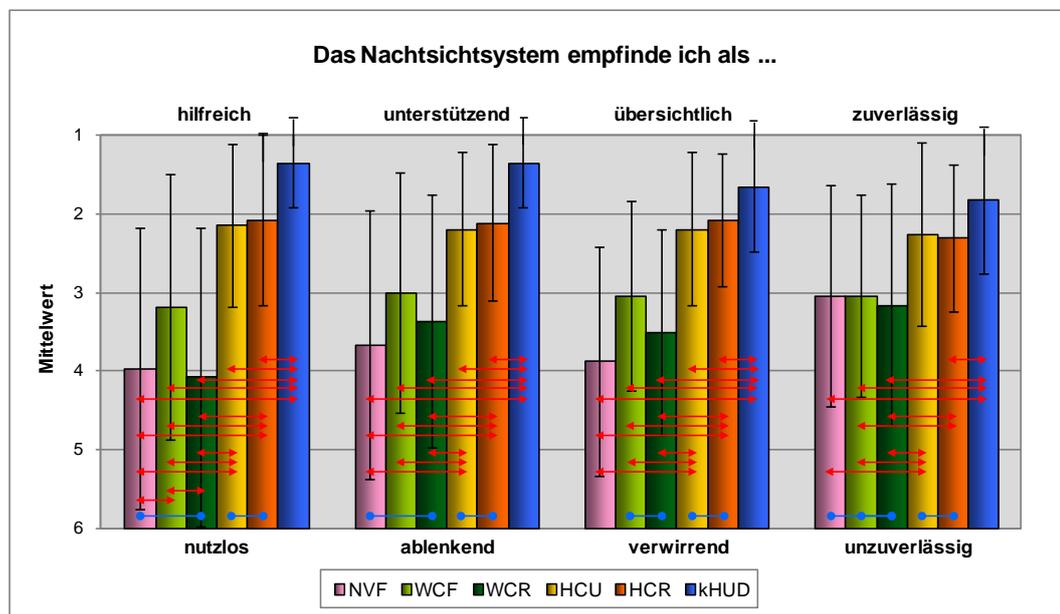


Abbildung 6–38: Zufriedenheit / semantisches Differential bezüglich der Gesamtsystemzufriedenheit

Die Gesamtsystemzufriedenheit ist anhand des semantischen Differentials in Abbildung 6–38 dargestellt. Auf den ersten Blick ist klar ersichtlich, dass sich eine zu den Ergebnissen der Effektivität, Effizienz und Ablenkung äquivalente Abstufung des kontaktnalogen Head-Up-Displays (kHUD), der warnenden Head-Up-Display Varianten (HCU, HCR), der warnenden CID-Varianten (WCF, WCR) und des bildgebenden Nachtsichtsystems (NVF) herausbildet. Die Variante NVF schneidet auch subjektiv am schlechtesten ab. Die Probanden bewerten sie als eher nutzlos, ablenkend und verwirrend. Eine zusätzliche Warnung im CID wird von den Probanden als signifikant hilfreicher bewertet. Ebenso wird die Variante WCF auch eher unterstützend und eher übersichtlich beurteilt. Die Richtungskodierung verschlechtert im Falle der WCR-Variante dieses Ergebnis.

Im Mittel empfinden die Probanden die Richtungscodierung als eher nutzlos. Erst eine redundante Warnung im Head-Up-Display bewirkt eine deutliche Verbesserung der Gesamtsystemzufriedenheit. Demnach werden die Varianten HCU und HCR unabhängig von der Richtungscodierung im Mittel als hilfreich, unterstützend, übersichtlich und zuverlässig bewertet. Die Probanden sehen keinen Mehrwert im hochinformativen FIR-Videobild, sowie der redundanten Warnung im CID. Ausschließlich das Head-Up-Display mit seiner hocheffizienten und ablenkungsminimierten Informationsaufnahme ist für dieses Ergebnis ausschlaggebend. Eine erneute Steigerung der Gesamtsystemzufriedenheit ist beim kontaktanalogen Head-Up-Display (kHUD) feststellbar. Die Probanden bewerten es im Vergleich zu allen anderen Untersuchungsvarianten signifikant hilfreicher, unterstützender, übersichtlicher und zuverlässiger.

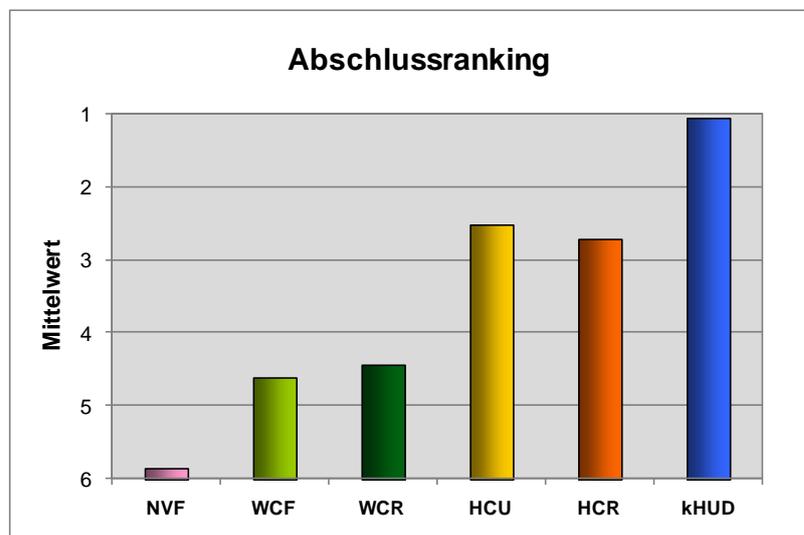


Abbildung 6–39: Zufriedenheit / Abschlussranking

Dieses Ergebnis spiegelt sich im finalen Abschlussranking wieder (siehe Abbildung 6–39). In Anbetracht dessen kann es als bewiesen erachtet werden, dass mit dem kontaktanalog markierenden HUD sowohl objektiv, als auch subjektiv, die effektivste, effizienteste, ablenkungsminimierteste und attraktivste Fahrerassistenz bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion zu realisieren ist.

6.2.2.5 Hypothesenüberprüfung

Die konsistenten Ergebnisse des Realversuches ermöglichen eine zuverlässige Überprüfung der in Kapitel 6.2.2.3 erhobenen Hypothesen. Die falsifizierten bzw. verifizierten Annahmen über den Einfluss der unterschiedlichen Nachtsichtsysteme sind im Folgenden strukturiert nach den vier Untersuchungskategorien Effektivität (Tabelle 6-7), Effizienz (Tabelle 6-8), Ablenkung (Tabelle 6-9) und Zufriedenheit (Tabelle 6-10) dargestellt.

Tabelle 6-7: Hypothesenüberprüfung der Untersuchungskategorie "Effektivität"

Hypothesenüberprüfung / Effektivität				
Wahrnehmungszuverlässigkeit der Warnung	A_1	H ₀	Wenn das reale Objekt noch nicht sichtbar ist, hat ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) keinen Einfluss auf die Wahrnehmungszuverlässigkeit einer bevorstehenden sicherheitskritischen Situation.	✗
		H ₁	Wenn das reale Objekt noch nicht sichtbar ist, beeinflusst ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) die Wahrnehmungszuverlässigkeit einer bevorstehenden sicherheitskritischen Situation.	✓
	A_2	H ₀	Wenn das reale Objekt noch nicht sichtbar ist, hat ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, WCR, HCU, HCR, kHUD) keinen Einfluss auf die Wahrnehmungszuverlässigkeit einer bevorstehenden sicherheitskritischen Situation.	✗
		H ₁	Wenn das reale Objekt noch nicht sichtbar ist, beeinflusst ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, WCR, HCU, HCR, kHUD) die Wahrnehmungszuverlässigkeit einer bevorstehenden sicherheitskritischen Situation.	✓
	A_3	H ₀	Bezüglich der aktiv warnenden Nachtsichtsysteme (WCF, WCR, HCU, HCR, kHUD) hat das HUD und das kHUD keinen Einfluss auf ihre Wahrnehmungszuverlässigkeit der Warnsymbolik.	✗
		H ₁	Bezüglich der aktiv warnenden Nachtsichtsysteme (WCF, WCR, HCU, HCR, kHUD) beeinflusst das HUD und das kHUD die Wahrnehmungszuverlässigkeit der Warnsymbolik.	✓
Wahrnehmungszuverlässigkeit sicherheitskritischer Objekte	B_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat keinen Einfluss auf die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	✓
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	✗
	B_2	H ₀	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) hat keinen Einfluss auf die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	✓
		H ₁	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) beeinflusst die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	✗
	B_3	H ₀	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) hat keinen Einfluss auf die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	✓
		H ₁	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) beeinflusst die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	✗
	B_4	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat keinen Einfluss auf die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	✓
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst die zuverlässige Wahrnehmung sicherheitskritischer Objekte.	✗
Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte	C_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	✓
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	✗
	C_2	H ₀	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) hat keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	✓
		H ₁	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) beeinflusst die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	✗
	C_3	H ₀	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) hat keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	✓
		H ₁	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) beeinflusst die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	✗
	C_4	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	✗
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst die Wahrnehmungsentfernung sicherheitskritischer Objekte.	✓

Aufmerksamkeit bezüglich realer Objekte	D_1	H ₀	Ein warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) hat im Bereich der visuellen Reichweite keinen Einfluss auf die Aufmerksamkeitshöhe, die der Fahrer den sicherheitskritischen Objekten zukommen lässt.	✓
		H ₁	Ein warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) beeinflusst im Bereich der visuellen Reichweite die Aufmerksamkeitshöhe, die der Fahrer den sicherheitskritischen Objekten zukommen lässt.	✗
	D_2	H ₀	Ein richtungskodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) hat im Bereich der visuellen Reichweite keinen Einfluss auf die Aufmerksamkeitshöhe, die der Fahrer den sicherheitskritischen Objekten zukommen lässt.	✗
		H ₁	Ein richtungskodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) beeinflusst im Bereich der visuellen Reichweite die Aufmerksamkeitshöhe, die der Fahrer den sicherheitskritischen Objekten zukommen lässt.	✓
	D_3	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat im Bereich der visuellen Reichweite keinen Einfluss auf die Aufmerksamkeitshöhe, die der Fahrer den sicherheitskritischen Objekten zukommen lässt.	✗
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst im Bereich der visuellen Reichweite die Aufmerksamkeitshöhe, die der Fahrer den sicherheitskritischen Objekten zukommen lässt.	✓
Fahrverhaltensänderung	E_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat keinen Einfluss auf das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	✓
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	✗
	E_2	H ₀	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) hat keinen Einfluss auf das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	✗
		H ₁	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF, HCU) beeinflusst das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	✓
	E_3	H ₀	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) hat keinen Einfluss auf das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	✓
		H ₁	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) beeinflusst das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	✗
	E_4	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat keinen Einfluss auf das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	✗
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst das Fahrverhalten in einer sicherheitskritischen Situation.	✓
Sicherheitsempfinden	F_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat keinen Einfluss auf das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	✓
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	✗
	F_2	H ₀	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) hat keinen Einfluss auf das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	✓
		H ₁	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) beeinflusst das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	✗
	F_3	H ₀	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) hat keinen Einfluss auf das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	✓
		H ₁	Ein richtungscodiertes Nachtsichtsystem (WCR, HCR) beeinflusst das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	✗
	F_4	H ₀	Ein im HUD aktiv warnendes Nachtsichtsystem (HCU, HCR) hat keinen Einfluss auf das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	✗
		H ₁	Ein im HUD aktiv warnendes Nachtsichtsystem (HCU, HCR) beeinflusst das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	✓
	F_5	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat keinen Einfluss auf das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	✗
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst das Sicherheitsempfinden bei Nacht.	✓

Tabelle 6-8: Hypothesenüberprüfung der Untersuchungskategorie "Effizienz"

Hypothesenüberprüfung / Effizienz				
Wahrnehmungsgeschwindigkeit Warnung	G_1	H ₀	Bezüglich der aktiv warnenden Nachtsichtsysteme hat das Head-Up-Display (HCU) keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsgeschwindigkeit der Warnsymbolik.	✗
		H ₁	Bezüglich der aktiv warnenden Nachtsichtsysteme beeinflusst das Head-Up-Display (HCU) die Wahrnehmungsgeschwindigkeit der Warnsymbolik.	✓
	G_2	H ₀	Die redundante richtungscodierte Warnung im CID hat bei der HUD-Variante (CHR) keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsgeschwindigkeit.	✗
		H ₁	Die redundante richtungscodierte Warnung im CID beeinflusst bei der HUD-Variante (CHR) die Wahrnehmungsgeschwindigkeit.	✓
	G_3	H ₀	Bezüglich der aktiv warnenden Nachtsichtsysteme hat das kontaktanaloge HUD (KHU) keinen Einfluss auf die Wahrnehmungsgeschwindigkeit der Warnsymbolik.	✗
		H ₁	Bezüglich der aktiv warnenden Nachtsichtsysteme beeinflusst das kontaktanaloge HUD (KHU) die Wahrnehmungsgeschwindigkeit der Warnsymbolik.	✓
Blickverhalten bei der Informationsaufnahme	H_1	H ₀	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) hat keinen Einfluss auf die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	✗
		H ₁	Ein aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) beeinflusst die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	✓
	H_2	H ₀	Ein redundant im HUD aktiv warnendes Nachtsichtsystem (HCU) hat keinen Einfluss auf die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	✗
		H ₁	Ein redundant im HUD aktiv warnendes Nachtsichtsystem (HCU) beeinflusst die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	✓
	H_3	H ₀	Eine zusätzliche Richtungscodierung im CID (HCR) hat keinen Einfluss auf die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	✗
		H ₁	Eine zusätzliche Richtungscodierung im CID (HCR) beeinflusst die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	✓
	H_4	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (KHU) hat keinen Einfluss auf die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	✗
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (KHU) beeinflusst die Blickstrategie bei der Informationsaufnahme.	✓

Tabelle 6-9: Hypothesenüberprüfung der Untersuchungskategorie "Ablenkung"

Hypothesenüberprüfung / Ablenkung				
Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt	I_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	✗
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	✓
	I_2	H ₀	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) hat keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	✗
		H ₁	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) beeinflusst die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	✓
	I_3	H ₀	Eine zusätzliche Richtungs-codierung im CID (WCR) hat keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	✗
		H ₁	Eine zusätzliche Richtungs-codierung im CID (WCR) beeinflusst die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	✓
	I_4	H ₀	Eine zusätzliche Warnung im HUD (HCU) hat keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	✗
		H ₁	Eine zusätzliche Warnung im HUD (HCU) beeinflusst die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	✓
	I_5	H ₀	Eine zusätzliche Richtungs-codierung im CID hat bei den HUD-Varianten (HCR) keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	✗
		H ₁	Eine zusätzliche Richtungs-codierung im CID beeinflusst bei den HUD-Varianten (HCR) die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	✓
	I_6	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat keinen Einfluss auf die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	✗
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst die Blickhäufigkeitsverteilung der Gesamtfahrt.	✓
Subjektive Ablenkung	J_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Ablenkung.	✓
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst subjektiv die Ablenkung.	✗
	J_2	H ₀	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Ablenkung.	✓
		H ₁	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) beeinflusst subjektiv die Ablenkung.	✗
	J_3	H ₀	Eine zusätzliche Richtungs-codierung im CID (WCR, HCR) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Ablenkung.	✓
		H ₁	Eine zusätzliche Richtungs-codierung im CID (WCR, HCR) beeinflusst subjektiv die Ablenkung.	✗
	J_4	H ₀	Eine zusätzliche Warnung im HUD (HCU, HCR) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Ablenkung.	✗
		H ₁	Eine zusätzliche Warnung im HUD (HCU, HCR) beeinflusst subjektiv die Ablenkung.	✓
	J_2	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Ablenkung.	✗
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst subjektiv die Ablenkung.	✓

Tabelle 6-10: Hypothesenüberprüfung der Untersuchungskategorie "Zufriedenheit"

Hypothesenüberprüfung / Zufriedenheit				
Systemzuverlässigkeit	K_1	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit in Bezug auf Miss-Alarms.	✗
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst subjektiv die Systemzuverlässigkeit in Bezug auf Miss-Alarms.	✓
	K_2	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat subjektiv keinen Einfluss auf die Systemzuverlässigkeit in Bezug False-Alarms.	✗
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst subjektiv die Systemzuverlässigkeit in Bezug False-Alarms.	✓
Nützen	L_1	H ₀	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) hat subjektiv keinen Einfluss auf das Fahren bei Nacht.	✓
		H ₁	Ein bildgebendes FIR-Nachtsichtsystem (NVF) beeinflusst subjektiv das Fahren bei Nacht.	✗
	L_2	H ₀	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) hat subjektiv keinen Einfluss auf das Fahren bei Nacht.	✗
		H ₁	Ein im CID aktiv warnendes Nachtsichtsystem (WCF) beeinflusst subjektiv das Fahren bei Nacht.	✓
	L_3	H ₀	Eine zusätzliche Richtungscodierung im CID (WCR) hat subjektiv keinen Einfluss auf das Fahren bei Nacht.	✓
		H ₁	Eine zusätzliche Richtungscodierung im CID (WCR) beeinflusst subjektiv das Fahren bei Nacht.	✗
	L_4	H ₀	Eine zusätzliche Warnung im HUD (HCU, HCR) hat subjektiv keinen Einfluss auf das Fahren bei Nacht.	✗
		H ₁	Eine zusätzliche Warnung im HUD (HCU, HCR) beeinflusst subjektiv das Fahren bei Nacht.	✓
	L_5	H ₀	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) hat subjektiv keinen Einfluss auf das Fahren bei Nacht.	✗
		H ₁	Ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem (kHUD) beeinflusst subjektiv auf das Fahren bei Nacht.	✓

7 Diskussion der Ergebnisse und Ableitung eines Assistenzkonzeptes

Die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe zeigen, dass die abstrakte Darstellung der Bird-View-Anzeige richtig interpretiert wird und dadurch sowohl subjektiv als auch objektiv einen eindeutigen Einfluss auf die zuverlässige und fehlerfreie Antizipation des vorausliegenden Streckenverlaufs hat. Des Weiteren wirkt die Anzeige durch den vergrößerten Antizipationsbereich subjektiv orientierungsunterstützend und vermittelt somit ein sichereres Fahrgefühl. Durch die BVA ist weder subjektiv noch objektiv eine vermehrte Ablenkung von der primären Fahraufgabe feststellbar. Mit einer maximalen Blickabwendungsdauer, deutlich unterhalb der 2s-Grenze, kann ein negatives „Attention Capture“ negiert werden. Im Hinblick auf das subjektive Gefallen schneidet die Bird-View-Anzeige sehr gut ab. Die wohl interessantesten Ergebnisse sind bei der Analyse des Kuppenverhaltens feststellbar. Demnach wird ohne Assistenz vor einer Kuppe in annähernd allen Fällen die Geschwindigkeit reduziert. Dem Fahrer ist das abgeschätzte Risiko zu groß, dass sich hinter der Kuppe eine Gefahrenquelle, beispielsweise eine Kurve, befindet. Infolgedessen kann er nur mit einem guten Gefühl über die Kuppe fahren, wenn er seine Geschwindigkeit deutlich reduziert. Im Gegensatz dazu macht die Bird-View-Anzeige dem Fahrer das aus dem Streckenverlauf resultierende objektive Risiko transparent. Er weiß nun, ob sich hinter der Kuppe eine Kurve befindet, oder ob er mit einem weiterhin geraden Straßenverlauf rechnen kann. Aufgrund dieser Zusatzinformation reduzieren die Probanden fast ausnahmslos im Falle einer Kurve ihre Geschwindigkeit, bzw. erhöhen sie oder halten sie auf einem konstanten Niveau, wenn sie aus der BVA einen weiterhin geraden Straßenverlauf entnehmen können.

In Anbetracht dieser Ergebnisse kann die unterstützende Wirkung der BVA in Bezug auf die Assistenzbedarfskategorie „Straßenverlauf“ als bestätigt angesehen werden. Der Fahrer nimmt Informationen des Straßenverlaufs, die sich außerhalb seiner visuellen Reichweite befinden, in der BVA auf und lässt diese kontinuierlich in den Regelkreis der primären Fahraufgabe einfließen. Die Regelung der Längs- und Querführung basiert somit nicht mehr ausschließlich auf dem vom Fahrer visuell abgeschätzten Straßenverlauf, sondern zusätzlich auf dem von der Bird-View-Anzeige präsentierten objektiven Straßenverlauf. Das Unfallrisiko, das aus dem für gewöhnlich vom Fahrer durchzuführenden Abschätzungsprozess resultiert, kann somit insbesondere bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion stark reduziert werden. Als problematisch erweist sich jedoch die Tatsache, dass die BVA lediglich das objektive Risiko bezüglich des Straßenverlaufs transparent macht, nicht jedoch das von den Objekten ausgehende Unfallrisiko. Befindet sich folglich hinter der

Kuppe ein sicherheitskritisches Objekt auf der Fahrbahn, erhöht sich die Unfallgefahr, da ein Fahrer durch die Unterstützung der BVA bei geradem Straßenverlauf nach der Kuppe mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit keine Geschwindigkeitsanpassung vornimmt. Eine einzig und allein auf der BVA basierende Unterstützung des Fahrers ist somit als kritisch zu bewerten und folglich durch ein zusätzliches Assistenzsystem zu ergänzen, das dem Fahrer neben dem Straßenverlauf auch die von sicherheitskritischen Objekten ausgehende Gefahr transparent macht.

Die Ergebnisse des kontaktanalog markierenden Head-Up-Displays (kHUD) zeigen, dass Fußgänger im Vergleich zur Baselinefahrt ca. 10 m früher erkannt werden. Auch subjektiv haben die Probanden das Gefühl, Fußgänger früher wahrnehmen zu können als ohne Assistenz. Grund hierfür ist die sehr effektive und effiziente Informationsaufnahme. Mit einer Erkennungsrate von 100 % ist ein Übersehen der virtuellen Markierung weitgehend auszuschließen. Ferner läuft der Informationsaufnahmeprozess mit im Mittel 0,34 s doppelt so schnell als mit einem konventionellen Head-Up-Display. Im Gegensatz zu alternativen Nachtsichtsystemen muss der Fahrer seinen Blick zur Informationsaufnahme nicht von der realen Fahrszenarie abwenden. Ein weiterer positiver Einfluss des kontaktanalog markierenden Nachtsichtsystems ist im Bezug auf das Fahrverhalten feststellbar. Bereits beim Erscheinen der Warnung passt der Fahrer die Längsdynamik vorausschauend an. Durch die kontaktanaloge Markierung erhält der Fahrer sehr schnell und intuitiv alle wesentlichen Objektinformationen, so dass er die gegenwärtige Situation, obwohl sich das reale Objekt noch nicht im Sichtbereich befindet, umgehend adäquat einschätzen kann. Diese visuellen Informationen fließen kontinuierlich in den Regelkreis der Längsdynamik ein, so dass der Fahrer zum Zeitpunkt der realen Objektdetektion weitgehend keine zusätzlichen aktiven Eingriffe zur Geschwindigkeitsreduktion vornehmen muss. Das kontaktanalog markierende Head-Up-Display wird von den Probanden signifikant hilfreicher, unterstützender, übersichtlicher und zuverlässiger bewertet als die untersuchten Alternativvarianten. Letzteres macht sich unter anderem in Bezug auf die Akzeptanz von False- und Miss-Alarms bemerkbar. Obwohl alle Varianten eine identische Sensorik verwenden, sind die Probanden der Ansicht, dass während der gesamten Versuchsfahrt mit der Variante kHUD signifikant weniger Miss-Alarms aufgetreten sind. Eine Erklärung für dieses Ergebnis könnte darin zu sehen sein, dass im Falle einer Doppelsituation jedes einzelne Objekt vom kontaktanalogen Head-Up-Display mit einer separaten Warnsymbolik markiert wird. Der Fahrer weiß somit unter anderem die exakte Objektanzahl. Im Gegensatz dazu präsentieren die Vergleichsvarianten lediglich eine einzelne Warnung, die den Fahrer pauschal vor einer sicherheitskritischen Situation warnt. Es könnte sein, dass die Probanden bei den alternativen Nachtsichtsystemen mit einer zweiten Warnsymbolik rechnen und sie das

Nichterscheinen folglich als Miss-Alarm interpretieren. Möglicherweise könnte aber auch die sehr hohe Wahrnehmungszuverlässigkeit des kHUDs die Ursache dieses Ergebnisses sein. Im Falle der alternativen Nachtsichtsysteme wird die Warnsymbolik vereinzelt übersehen. Aus subjektiver Sicht könnte dieses Ausbleiben der Warnung als Sensorfehler wahrgenommen worden sein, so dass die Probanden einen Miss-Alarm zählten.

Auch im Falle der False-Alarms sind die Probanden subjektiv der Meinung, dass mit dem kontaktanalog markierenden Head-Up-Display signifikant weniger False-Alarms aufgetreten sind. Wird ein Objekt fälschlicherweise von der Sensorik als Fußgänger erkannt, so merkt der Fahrer diesen Systemfehler im Falle des kHUDs umgehend, sobald das mit dem roten Rahmen kontaktanalog markierte Objekt in das Abblendlicht eintritt. Bei einem lediglich warnenden Nachtsichtsystem erlischt die Falschwarnung, so dass der Fahrer nicht den exakten Grund für die Warnung erkennen kann. Hieraus resultiert eine Unsicherheit des Fahrers, ob die sicherheitskritische Situation noch bevor steht, oder schon passiert wurde. Diese Unwissenheit wirkt sich negativ auf die Akzeptanz aus. Aufgrund dessen wird das kontaktanalog markierende Head-Up-Display bezüglich der Systemzuverlässigkeit signifikant besser bewertet.

Basierend auf dem ermittelten Stand der Technik, sowie den neuen Erkenntnissen der beiden experimentellen Untersuchungen, wird im Folgenden ein konsistentes Assistenzkonzept zur idealen Unterstützung der visuellen Wahrnehmung des Fahrers bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion abgeleitet, das die individuellen Vorteile lichtbasierter Fahrerassistenzsysteme sowie infrarotbasierter Nachtsichtsysteme sinnvoll kombiniert, um das nächtliche Unfallrisiko zu reduzieren. Diesbezüglich werden explizit die drei Szenarien

- „Stadtfahrt bei nachtbedingter Sichtreduktion“,
- „Landstraßenfahrt bei nachtbedingter Sichtreduktion“ sowie
- „Landstraßenfahrt bei witterungsbedingter Sichtreduktion“

erörtert. Das innovative Assistenzkonzept adaptiert sich hierbei automatisch in Abhängigkeit der aktuellen Geschwindigkeit an die entsprechenden Umweltbedingungen.

Im Falle einer nächtlichen Stadtfahrt liegen für den Fahrer mit dem Stadtabblendlicht (siehe Abbildung 4–3), das bis 50 km/h aktiviert ist, dem Abbiegelicht (siehe Abbildung 4–2), das zusätzlich in Abhängigkeit des Lenkradwinkels und der Blinkerbetätigung bis zu einer Geschwindigkeit von 70 km/h aktiviert ist, sowie dem allzeit aktiven adaptiven Kurvenlicht (siehe Abbildung 4–1), sehr gute Sichtverhältnisse vor. Um dem Übersehen eines Fußgängers insbesondere aufgrund eines innerorts vorliegenden erhöhten Workloads entgegenzuwirken, müssen diese konventionellen Lichtsysteme mit dem „richtungskodierten

LED-Array“ kombiniert werden (siehe Abbildung 4–7), das analog zum Abbiegelicht bis zu einer Geschwindigkeit von 70 km/h aktiv sein muss. Mit Hilfe dieses Nachtsichtsystems kann der Fahrer in einem sehr großen Winkelbereich aktiv vor potenziellen Gefahren gewarnt werden. Innerorts muss der Fahrer aufgrund der relativ niedrigen Geschwindigkeiten frühestens in mittleren Entfernungen gewarnt werden, so dass sich das sicherheitskritische Objekt zum Zeitpunkt der Warnung durch das LED-Array in der Regel bereits in der Reichweite des Stadtabblendlichts oder des Abbiegelichts befindet. Es wird somit umgehend vom Fahrer erkannt. Aufgrund dieser intuitiven Aufmerksamkeitslenkung und der problemlosen Realisierung großer Anzeigebereiche, bis über die gesamte Windschutzscheibe des Fahrzeugs, eignet sich das LED-Array in Kombination mit den lichtbasierten Fahrerassistenzsystemen „Stadtlicht“, „Abbiegelicht“ und „adaptives Kurvenlicht“ hervorragend, um den Fahrer innerorts adäquat zu unterstützen und somit die Verkehrssicherheit bei Nacht zu erhöhen. Eine kontaktanaloge Markierung sicherheitskritischer Objekte ist nicht zwangsläufig notwendig, da sich die sicherheitskritischen Objekte bereits im Lichtkegel des Fahrzeugs befinden und folglich dem Fahrer die exakte Position bekannt ist. Das LED-Array schließt somit die vorhandene Assistenzlücke ausreichend gut. Des Weiteren spricht innerorts der sehr große Winkelbereich für das richtungskodierte LED-Array, der in diesem Fall technisch weitaus einfacher zu realisieren ist als bei einem kontaktanalogem Panorama Head-Up-Display, das ein immenses Bauvolumen in Anspruch nehmen würde.

Bei höheren Geschwindigkeiten, wie im Falle des zweiten Szenarios, stößt das LED-Array jedoch an seine Grenzen. Das Hauptproblem einer nächtlichen Landstraßenfahrt besteht nämlich nicht darin, dass der Fahrer sicherheitskritische Objekte übersieht, sondern sie erst viel zu spät wahrnimmt. Infolgedessen sind primär Informationen in sehr großen Entfernungen, aber dafür in einem weitaus kleineren Winkelbereich relevant. Auf diese großen Distanzen ist das richtungskodierte LED-Array nicht mehr in der Lage, dem Fahrer die Objektrichtung mit ausreichend guter Genauigkeit zu vermitteln. Grund hierfür ist die geringe Winkelauflösung des LED-Arrays sowie die massiven Parallaxefehler durch bereits minimale Kopfbewegungen des Fahrers. Erschwerend kommt noch hinzu, dass diese nicht, wie im Falle der Stadtfahrt, durch einen Abgleich mit dem realen Objekt kompensiert werden können, da sich das sicherheitskritische Objekt zum Zeitpunkt der Warnung außerhalb der visuellen Reichweite des Fahrers befindet. Ein weiteres Defizit des LED-Arrays besteht darin, dass die Objektinformationen der Entfernung und Dynamik nicht vermittelt werden können. Diese Informationen sind jedoch für den Fahrer unerlässlich, um eine Gefahrensituation adäquat einschätzen zu können und die Annäherung an die sicherheitskritische Stelle zu antizipieren.

Aufgrund dessen wird beim vorliegenden Assistenzkonzept das LED-Array ab einer Geschwindigkeit von mehr als 70 km/h automatisch deaktiviert und durch das kontaktanalog markierende Head-Up-Display ersetzt (siehe Abbildung 5–3). Des Weiteren tritt an die Stelle des Stadtlichts das „kontinuierliche Fernlicht“ (siehe Abbildung 4–4). Der Fahrer erhält somit durch die lichtbasierten Fahrerassistenzsysteme, ausgewiesen als „adaptives Kurvenlicht“ und „kontinuierliches Fernlicht“, eine stark erweiterte reale Straßenvoraussicht sowie durch das kontaktanalog markierende Head-Up-Display alle relevanten Objektinformationen. Nach Voraussagen von Experten könnten bessere Beleuchtungsverhältnisse durchaus auch zu höheren Fahrgeschwindigkeiten führen und damit das Unfallrisiko wiederum erhöhen. Entgegen solcher Vermutungen haben jedoch Untersuchungen gezeigt, dass Beleuchtungsverbesserungen, außer im unteren Geschwindigkeitsbereich, keine spürbare Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit und damit auch keine Kompensation des durch bessere Beleuchtung erwiesenen geringeren Verkehrsrisikos ergeben.

Im Falle der nächtlichen Landstraßenfahrt wird dazu beim vorliegenden Assistenzkonzept das aus dem Stand der Technik entnommene lichtbasierte Fahrerassistenzkonzept des „kontinuierlichen Fernlichts“ geringfügig modifiziert. Bislang sollten auf Landstraßen lediglich motorisierte Verkehrsteilnehmer ausgeblendet werden, um eine Blendung des Gegenverkehrs zu vermeiden. Fußgänger, Radfahrer und Wild sollten folglich vom Fernlicht voll angestrahlt werden. Dies ist jedoch, analog zu den motorisierten Verkehrsteilnehmern, aus Gesichtspunkten der Verkehrssicherheit unter allen Umständen zu vermeiden. Des Weiteren beweisen zahlreiche Untersuchungen, dass trotz idealer Ausleuchtung des frontalen Verkehrsraums die Erkennbarkeitsentfernung von kontrastschwachen Objekten weit unterhalb der maximalen Scheinwerferreichweite liegt. Folglich ist es nicht auszuschließen, dass trotz kontinuierlichem Fernlicht eine dunkel gekleidete kontrast-schwache Person zu spät erkannt und vom Fahrzeug erfasst wird.

Infolgedessen werden beim vorliegenden Assistenzkonzept, entgegen dem Stand der Technik, auf Landstraßen auch nichtmotorisierte Verkehrsteilnehmer, sowie Wild, vom kontinuierlichen Fernlicht ausgeblendet und mit dem kontaktanalog markierenden Nachtsichtsystem kenntlich gemacht. Analog zu den bisherigen Ausführungen wird auch hier die virtuelle Objektmarkierung ab einer Entfernung von 50 m vor dem Fahrzeug ausfaden, um die Gefahr ablenkender Maskierungseffekte zu minimieren. Auf Landstraßen stellen somit die beiden lichtbasierten Fahrerassistenzsysteme, „kontinuierliches Fernlicht“ und „adaptives Kurvenlicht“, in Kombination mit dem kontaktanalog markierenden Head-Up-Display, die ideale Assistenzform bei nachtbedingter Sichtreduktion dar.



Abbildung 7–1: witterungsbedingte Sichtreduktion ohne Assistenz

Das dritte Szenario, die Landstraßenfahrt bei witterungsbedingter Sichtreduktion, erfordert eine erneute Assistenzadaption, da die bislang hervorragend unterstützenden lichtbasierten Fahrerassistenzsysteme an ihre physikalischen Grenzen stoßen (siehe Abbildung 7–1). Beim vorliegenden Assistenzkonzept hat der Fahrer bis zu einer Geschwindigkeit von maximal 110 km/h die Möglichkeit, manuell das „Schlechtwetterlicht“ zu aktivieren (siehe Abbildung 4–3). Zusätzlich verfügt das sichtverbessernde Assistenzsystem über eine im Head-Up-Display manuell zuschaltbare kontaktanaloge Nachführung des Straßenverlaufs (siehe Abbildung 7–2). Hierfür muss der reale Straßenverlauf zunächst zuverlässig detektiert werden. Jedoch stellen die schlechten Witterungsverhältnisse auch für die Sensorik ein Problem dar. Bislang eignen sich zur Erkennung des Straßenverlaufs ausschließlich NIR-Kamerasensoren, die allerdings bei Nebel, Regen oder Schnee analog zu lichtbasierten Fahrerassistenzsystemen eine stark reduzierte Reichweite aufweisen. FIR-Kamerasensoren eignen sich nur bedingt, da die Fahrbahn ausschließlich bei merklichen Temperaturunterschieden im Vergleich zur Umgebung detektiert werden kann. Somit ist bislang eine sensorische Erfassung der Straße jenseits der menschlichen Sichtweite nur unzureichend möglich. Abhilfe werden in naher Zukunft immer genauere GPS-Systeme und Straßendatenbanken schaffen, so dass im Rahmen einer Sensorfusion durch den zusätzlichen Abgleich mit diesen prädiktiven Streckendaten eine Detektion des vorausliegenden Straßenverlaufs bei schlechten Witterungsverhältnissen möglich sein wird. Der sensorisch erfasste reale Straßenverlauf kann dann in einem kontaktanalogen Head-Up-Display virtuell abgebildet werden, so dass der Fahrer selbst bei stark reduzierter Voraussicht zuverlässig die Information des vorausliegenden Straßenverlaufs erhält. Entsprechend zu den Ergebnissen der Bird-View-Untersuchung wird sich auch in diesem Fall

für den Fahrer das notwendige Abschätzen von wahrgenommenen und dynamischen Größen stark reduzieren, so dass durch die visuell wahrnehmbaren Informationen Schätzfehler bezüglich des Straßenverlaufs weitgehend auszuschließen sind. Die Untersuchung der Bird-View-Ansicht zeigt auch, dass insbesondere bei topologischer Sichtreduktion eine Anpassung der virtuellen Straßenvoraussicht erfolgen muss. Somit darf für den Fahrer beispielsweise im Falle einer Kuppe der weitere Straßenverlauf nicht einsehbar sein, da er ansonsten mit überhöhter Geschwindigkeit über die Anhöhe fahren wird. Infolgedessen wird im vorliegenden Assistenzkonzept die kontaktanaloge Nachführung des Straßenverlaufs bei topologischen Sichtbarrieren an die reale Voraussicht angepasst.

Des Weiteren ist bei witterungsbedingter Sichtreduktion durch die zusätzliche Assistenz mit einer solchen kontaktanalogen Nachführung des realen Straßenverlaufs mit höheren Geschwindigkeiten zu rechnen als bei nicht assistierter Fahrt. Dies ist jedoch nicht zwangsläufig als sicherheitskritisch zu bewerten. Natürlich wird das Fahren bei Nebel mit einem konventionellen Fahrzeug sicherer, wenn der Fahrer seine Geschwindigkeit an die Sichtverhältnisse anpasst. Zugleich kann es jedoch nicht zielführend sein, die Voraussicht absichtlich zu reduzieren, um den Fahrer zu einem langsameren Fahren zu zwingen. Wie die systemergonomische Analyse des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises zeigt, bestimmt nicht alleine die Geschwindigkeit den Grad der Sicherheit, sondern noch eine Vielzahl anderer Faktoren. Somit könnte ein schnelleres Fahren bei Nebel vertretbar sein, wenn zugleich durch die Änderung eines anderen Faktors das objektive Risiko auf einem geringen Niveau gehalten werden könnte. Die Rede ist auch in diesem Fall von der kontaktanalogen Markierung sicherheitskritischer Objekte auf der Fahrbahn, die ein objektives Risiko darstellen, aber ohne Assistenzsystem bei Nebel zu spät erkannt werden. Folglich markiert das vorliegende Assistenzkonzept auch bei witterungsbedingter Sichtreduktion sicherheitskritische Objekte kontaktanalog. Darüber hinaus wird es bei schlechter Witterung notwendig sein, auch Fahrzeuge kontaktanalog zu markieren, da deren Lichter im Nebel relativ schlecht zu erkennen sind (siehe Abbildung 7–2). Die sensorische Erfassung der Fahrzeuge kann hierbei über eine FIR-Kamera und „Car-2-Car communication“ erfolgen. Letzteres birgt wiederum das Risiko in sich, dass ältere Fahrzeuge, ohne eine derartige Technologie, nicht erkannt werden. Dieses Risiko könnte jedoch durch die Kombination mehrerer Sensoren sowie deren Informationsfusion reduziert werden.

Durch ein derartiges Assistenzkonzept wäre für den Fahrer im Falle einer zuverlässigen Objekt- und Straßenerkennung das objektive Risiko hinreichend transparent, so dass auch objektiv bei schlechter Witterung ein schnelleres Fahren zu vertreten wäre. Dennoch wird es nicht sinnvoll sein, den virtuellen Spurverlauf bis zur maximal technisch realisierbaren Reichweite anzuzeigen, so dass einem assistierten Fahrer ermöglicht werden würde, bei Nebel gleichermaßen schnell zu fahren wie bei strahlend blauem Himmel. Vielmehr ist es

notwendig, einen Kompromiss zwischen der idealen Straßenvoraussicht und der daraus resultierenden Geschwindigkeitserhöhung zu finden. Diese Erkenntnisse können letztendlich nur im Rahmen weiterer Fahrversuche generiert werden.



Abbildung 7–2: Assistenzkonzept bei witterungsbedingter Sichtreduktion

Das „Schlechtwetterlicht“ und das den Straßenverlauf sowie alle Verkehrsteilnehmer kontaktnalog markierende Head-Up-Display stellen zusammenfassend die ideale Unterstützung für einen Fahrer bei schlechter Witterung dar. Das in Abbildung 7–2 dargestellte Ausführungsbeispiel zeigt lediglich einen gestalterischen Vorschlag für die Visualisierung der kontaktnalogen Informationen. Aufschluss über die genaue Spezifizierung können jedoch letztendlich nur weitere Probandenversuche liefern.

Ein aus diesen drei Szenarien hergeleitetes innovatives Assistenzkonzept zur Unterstützung der visuellen Wahrnehmung des Fahrer bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion umfasst folglich die lichtbasierten Fahrerassistenzsysteme Stadtlicht, Abbiegelicht, adaptives Kurvenlicht, kontinuierliches Fernlicht und Schlechtwetterlicht, sowie die Nachtsichtsysteme des kontaktnalog markierenden Head-Up-Displays, der kontaktnalogen Straßenvoraussicht und des warnenden LED-Arrays, wobei alle diese Assistenzsysteme gemäß den vorangegangenen Erklärungen in idealer Weise an die gegenwärtigen Umweltbedingungen adaptiert werden.

8 Zusammenfassung

Der Mehrwert aktueller Nachtsichtsysteme ist in ihrer jetzigen Ausprägung stark umstritten. Der Grund hierfür sind in erster Linie massive ergonomische Defizite, die eine zuverlässige und umfangreiche Informationsaufnahme in dem bei hohen Geschwindigkeiten nur begrenzt zur Verfügung stehenden Zeitfenster nicht gewährleisten. Ein weiteres Problem stellt die strikte Trennung der beiden Entwicklungsfelder, lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme und Nachtsichtsysteme, dar. Aus dieser teilweise konkurrierenden Betrachtungsweise resultieren zwangsläufig technische Insellösungen, die das vorhandene Optimierungspotenzial nur unzureichend ausschöpfen. Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht darin, die Vorteile beider Technologien in einem systemübergreifenden Assistenzkonzept zu vereinen, um die visuelle Wahrnehmung des Fahrers bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion in idealer Weise zu unterstützen.

Zu diesem Zweck wird der Assistenzbedarf des Fahrers beim Führen eines Fahrzeugs bei nacht- oder witterungsbedingter Sichtreduktion objektiviert und ein abstraktes Lösungskonzept abgeleitet. Hierfür werden zunächst durch eine systemergonomische Analyse des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises menschliche Defizite der visuellen Informationsaufnahme, sowie der multimodalen Informationsverarbeitung, identifiziert. Diese Mängel sind die schlechte visuelle Schätzqualität von Objektentfernungen und Relativgeschwindigkeiten, insbesondere in mittleren bis großen Entfernungen, das ungenügende Dämmerungssehvermögen, dessen Ursache auf die Nachtblindheit, die Nachtmyopie, das reduzierte Farbsehen, sowie die Blendempfindlichkeit des menschlichen Auges, zurückzuführen ist, das Abschätzen wahrgenommener und dynamischer Größen, sowie des tatsächlich vorhandenen objektiven Risikos. Die hypothetischen Auswirkungen dieser menschlichen Defizite werden anhand einer Unfalldatenanalyse des nächtlichen Fahrens überprüft. Die objektiven Hauptunfallursachen stellen hierbei die „reduzierte Sichtweite“, „nicht angepasste Geschwindigkeit“ und „Alkohol“ dar. Alle diese drei nächtlichen Hauptunfallursachen verbindet die Tatsache, dass sie den analytischen Zusammenhang zwischen Voraussicht und Anhalteweg negativ beeinflussen. In Anbetracht dessen können aus der Unfalldatenanalyse zwei objektive Hauptunfallszenarien bei nacht- oder witterungsbedingter Sichtreduktion abgeleitet werden, die auf menschliche Defizite zurückzuführen sind. Demnach ist vermehrt mit Unfällen zu rechnen, bei denen unbeleuchtete Verkehrsteilnehmer, insbesondere Fußgänger, involviert sind, sowie Fahrzeuge aufgrund von nicht angepasster Geschwindigkeit, insbesondere auf kurvigen Landstraßen, von der Straße abkommen.

Basierend auf diesen objektivierten Hauptunfallszenarien wird in Form eines abstrakten Lösungskonzeptes der objektive Assistenzbedarf ermittelt, der folglich alle relevanten Fahrzeugumweltinformationen beinhaltet, die dem Fahrer mittels eines konsistenten Fahrerassistenzkonzeptes zur idealen Unterstützung bei Nacht oder schlechter Witterung vermittelt werden müssen. Diese sind, gemäß der definierten Kategorien „Straße“ und „sicherheitskritische Objekte“, der Spurverlauf, die Spurbreite, der Kurvenradius, die Kurvenentfernung sowie die Richtung, Entfernung und Dynamik sicherheitskritischer Objekte. Eine Analyse des „Stands der Technik“ zeigt, dass weder aktuelle lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme noch aktuelle Nachtsichtsysteme in der Lage sind, dem Fahrer diese Informationen zuverlässig und schnell genug zu vermitteln.

Zur Kompensation dieser Assistenzlücke werden, unter der Berücksichtigung des technisch Machbaren, mit der Bird-View-Anzeige (BVA) und dem kontaktanalog markierenden Head-Up-Display (kHUD), zwei neue innovative HMI-Lösungskonzepte entwickelt, die jeweils im Rahmen eines Feldexperiments im Vergleich zu alternativen Lösungskonzepten des Stands der Technik im Realfahrzeug evaluiert werden.

Die BVA ist eine auf ausschließlich prädiktiven Streckendaten basierende, stark vereinfachte, virtuelle Darstellung des vorausliegenden Straßenverlaufs, die dem Fahrer in einem konventionellen HUD präsentiert wird. Sie liefert dem Fahrer sowohl bei topologisch-, als auch bei witterungsgeprägter Sichtreduktion, Informationen des vorausliegenden Straßenverlaufs, die sich außerhalb seiner visuellen Reichweite befinden. Die Ergebnisse zeigen, dass der Fahrer diese Informationen kontinuierlich in den Regelkreis der primären Fahraufgabe einfließen lässt, so dass die Gefahr, aufgrund eines Schätzfehlers von der Straße abzukommen, stark reduziert wird.

Zur technischen Realisierung des kontaktanalogen Head-Up-Displays wird eine innovative Visualisierungsmethode entwickelt, die berührungslos und ohne Verwendung eines Head-Tracking-Systems, dem Fahrer virtuelle Fahrerassistenzinformationen in mittlerer bis sehr großer Entfernung vor dem Fahrzeug kontaktanalog suggerieren kann. Eine grundlegende Voraussetzung dieser Visualisierungsmethode besteht in der Vergrößerung der Bildweite auf mindestens 50 m. Das kHUD detektiert mit einer FIR-Sensorik sicherheitskritische Objekte im Frontbereich des Fahrzeugs und markiert diese im direkten Blickfeld des Fahrers mit einer virtuellen Warnsymbolik, die der Fahrer in der Realität exakt an der Position wahrnimmt, an der sich das noch nicht sichtbare reale Objekt befindet. Die Ergebnisse des Realversuches zeigen, dass bei höheren Geschwindigkeiten einzig und allein das kHUD aufgrund der hocheffektiven und -effizienten Informationsdarbietung in der Lage ist, dem Fahrer alle relevanten Objektinformationen schnell genug zu vermitteln, so dass er die gegenwärtige Situation, wenngleich sich das reale Objekt noch nicht im Sichtbereich

befindet, umgehend adäquat einschätzen kann. Eine Kollision wird somit weitgehend ausgeschlossen.

Basierend auf den neuen Erkenntnissen der experimentellen Untersuchungen, wird durch die Kombination mit erfolgsversprechenden Assistenzsystemen des „Standes der Technik“ ein konsistentes Fahrerassistenzkonzept zur idealen Unterstützung der visuellen Wahrnehmung des Fahrers bei nacht- und witterungsbedingter Sichtreduktion abgeleitet. Dieses kombiniert in idealer Weise die lichtbasierten Fahrerassistenzsysteme, Stadtlicht, Abbiegelicht, adaptives Kurvenlicht, kontinuierliches Fernlicht und Schlechtwetterlicht, mit den Nachtsichtsystemen des kontaktanalog markierenden Head-Up-Displays, des kontaktanalog nachführenden Spurverlaufs, sowie des warnenden LED-Arrays. Ein mit diesen Assistenzsystemen ausgestattetes Fahrzeug würde gemäß der in Kapitel 7 erläuterten situativen HMI-Adaptionen eine sehr gute Unterstützung des Fahrers darstellen und folglich einen erheblichen Beitrag zur Reduktion der Verkehrstoten bei Nacht und schlechter Witterung leisten. Aufschluss über die genaue Spezifizierung insbesondere der kontaktanalogen Straßenvoraussicht können jedoch letztendlich nur weitere Probandenversuche liefern.

9 Literaturverzeichnis

- Aschenbrenner, K., Biehl, B. und Wurm, G. W. 1992.** Mehr Verkehrssicherheit durch bessere Technik? Felduntersuchungen zur Risikokompensation am Beispiel des Antiblockiersystems (ABS). *Bericht zum Forschungsprojekt 8323 der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 1992.
- Assmann, E. 1985.** Untersuchung über den Einfluss einer Bremsweganzeige auf das Fahrerverhalten. *Dissertation an der Technischen Universität München*. 1985.
- Aulhorn, E. und Harms, H. 1970.** *Über die Untersuchung der Nachtfahreignung von Probanden mit dem Mesopometer*. s.l.: Klin. Monatsbl. Augenheilkd., 1970. 157:843-73.
- autolook. 2008.** autolook. [Online] 2008. [Zitat vom: 16. August 2008.] <http://www.autolook.de>.
- Automotive Lighting. 2008.** Automotive Lighting. [Online] 2008. [Zitat vom: 14. August 2008.] <http://www.al-lighting.de>.
- Bartmann, A., et al. 1993.** *Sichtabstand bei Fahrten in der Dunkelheit*. Bergisch Gladbach: Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M102, 1993.
- Behr. 2005.** Behr. *PHYSIO-CONTROL® schafft gutes Klima in der neuen Mercedes-Benz S-Klasse*. [Online] 14. September 2005. [Zitat vom: 10. Juni 2008.] <http://www.behr.de>.
- Bergmeier, U. 2008.** Methode zur kontaktanalogen Visualisierung von Fahrerassistenzinformationen unter automotive-tauglichen Gesichtspunkten. *Jahresdokumentation 2008. Bericht zum 54. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 9.-11. April 2008 in München*. 2008, Dortmund, GFA-Press.
- Bergmeier, U. und Bubb, H. 2008.** Augmented Reality In Vehicle - Technical realisation of a contact analogue head-up-display under automotive capable aspects; usefulness exemplified through night vision systems. *FISITA 2008 World Automotive Congress*. 2008.
- Bergmeier, U. 2006.** Night Vision im Automobil. *Technik in Bayern / Schwerpunkt Optik*. Verlag Neuer Merkur GmbH, 2006, 10.
- Bergmeier, U. und Lange, C. 2008.** Acceptance of augmented reality for driver assistance information. *AHFE International 2008*. International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, 2008, 2.
- Bernotat, R. 1970.** Operation Funktion in Vehicle Control, Anthropotechnik in der Fahrzeugführung. *Ergonomics*. 1970, Vol. 13.

- Bertozi, M., et al. 2004.** Pedestrian detection for driver assistance using multi-resolution infrared vision. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2004, 53.
- Bertozi, M., et al. 2003.** Pedestrian detection in infrared images. *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. 2003.
- Biedermann, I., Mezzanotte, R. J. und Rabinowitz, J. C. 1982.** Scene Perception: Detecting and Judging Objects Undergoing Relational Violations. *Cognitive Psychology*. 1982, Bde. S. 143-177, 14.
- Birbaumer, N. und Schmidt, R. F. 2002.** *Biologische Psychologie*. Berlin : Springer, Auflage: 5. A., 2002. ISBN-10: 3540434801.
- Bischoff, S. und Haug, K. 2006.** Automotive NIR Night Vision Systems. *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. 2006, VDI-Bericht Nr. 1944.
- BMW AG. 2007.** BMW Group PressClub. [Online] August 2007. [Zitat vom: 15. August 2008.] <http://www.press.bmwgroup.com>.
- Böhm, M. und Locher, J. 2007.** Lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme: Gestaltung und Bewertung im Hinblick auf Akzeptanz und Kundennutzen. 16. *Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik*. 2007.
- Bortz, J. 2005.** *Statistik für Sozialwissenschaftler*. 6. vollständig überarbeitete Auflage, Berlin : Springer Verlag, 2005.
- Brickner, M. S. 1989.** Apparent limitations of head-up displays and thermal imaging systems. [Buchverf.] R. S. Jensen. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Aviation Psychology*. Columbus : Ohio State University, 1989.
- Briggs, G. E. 1968.** Driving as a Skilled Performance. *National Technical Information Service "Driver-Behaviour-Cause and Effect"*, S. 123. 1968.
- Bruce, Vicki, Green, Patrick R. und Georgeson, Mark A. 2003.** *Visual Perception: physiology, psychology and ecology*. s.l. : Psychology Pr, 4. Auflage, 2003. ISBN: 1841692379.
- Bubb, H. und Bolte, U. 1991.** *Head-Up-Display im Kraftfahrzeug - Literaturrecherche*. s.l. : Katholische Universität Eichstätt, 1991.
- Bubb, H. 1975.** *Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug*. Dissertation an der Technischen Universität München : s.n., 1975.
- Bubb, H. 1977.** Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften*. 1977, Bde. 31.Jhg. ; S. 103-112.
- Bubb, H. 2003.** *Fahrerassistenz - primär ein Beitrag zum Komfort oder für die Sicherheit?* Düsseldorf : VDI-Bericht Nr. 1768: Der Fahrer im 21. Jahrhundert, 2003.
- Bubb, H. 1993.** Informationswandel durch das System. [Buchverf.] Heinz Schmidtke. *Ergonomie*. München Wien : Carl Hanser Verlag, 1993.

- Bubb, H. 1993.** Reliability of the driver. A method of driver modelling for evaluation of driver failure. *Kuratorium für Verkehrssicherheit*. Salzburg : Safety evaluation of traffic conflicts and other measures; S. 165-178, 1993.
- Bubb, H. 1993.** Systemergonomische Gestaltung. Kap. 5.3. [Buchverf.] Heinz Schmidtke. *Ergonomie*. München-Wien : Carl Hanser-Verlag, 1993.
- Bubb, H. 2002.** Umsetzung psychologischer Forschungsergebnisse in die ergonomische Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 48. s.l. : S. 8-15, 2002.
- Bubb, H. und Bolte, U. 1990.** *Head-Up-Display im Kraftfahrzeug - Literaturrecherche*. Professur für Arbeitswissenschaft, Katholische Universität Eichstätt : s.n., 1990.
- Bubb, H. 1975.** *Untersuchung über die Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug*. s.l. : Dissertation an der Technischen Universität München, 1975.
- Burkhardt, F. 1965.** Fahrbahn, Fahrzeug und Fahrverhalten. [Buchverf.] C. Graf. *Psychologie des Straßenverkehrs*. Bern, Stuttgart : s.n., 1965.
- Chatziastros, A., Wallis, G. M. und Bülthoff, H. H. 1999.** The effect of view and surface texture on driver steering performance. [Buchverf.] A. G. Gale. *Vision in Vehicles VII*. Amsterdam, S. 83-91 : Elsevier Science Publisher B.V., 1999.
- Chatziastros, A., Wallis, G. M. und Bülthoff, H. H. 1999.** *The Use of optical flow and splay angle in steering a central path*. Tübingen : Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik, 1999.
- CIECA. 1999.** *Vermindertes Sehvermögen und Unfallrisiken*. Brüssel : Commission Internationale des Examens de la Conduite Automobile, 1999.
- Cieler, S. 2003.** Auswirkungen eines dynamischen Halogen-Kurvenlichts auf das Fahrverhalten und die Fahrsicherheit. *IIR Fachkonferenz "Lichttechnik im Automobil"*. 2003.
- Cohen, A. S. 1994.** Sensorik und ihre alterabhängige Variation. [Buchverf.] U. Tränkle. *Autofahren im Alter*. s.l. : TÜV Rheinland GmbH, Bonn; Mensch-Fahrzeug-Umwelt, Band 30, 1994.
- Cohen, A. und Hirsig, R. 1990.** Zur Bedeutung des fovealen Sehens für die Informationsaufnahme bei hoher Beanspruchung. [Buchverf.] H. Derkum. *Sicht und Sicherheit im Straßenverkehr*. Köln : TÜV Rheinland, 1990.
- Cohen, A. 1993.** Visuelle Informationsaufnahme des motorisierten Verkehrsteilnehmers. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*. 1993, Heft 7/8, S. 209-214.
- Collewyn, H., Erkelens, C. J. und Steinman, R. M. 1988.** Binocular coordination of human horizontal saccadic eye movements. *Journal of Physiology*. 1988, 404, S. 157-182.
- Cordon, D. A. und Mast, T. M. 1970.** Drivers' judgement in overtaking and passing. *Human Factors*. 1970, Vol. 12, No 3, S. 341.

- Crossman, E. R. F. W. und Szostak, H. 1969.** Man-Machine-Models for Car-Steering. *Fourth Annual NASA - University Conference on Manual Control. National Aeronautics and Space Administration.* Washington : s.n., 1969.
- Daimler. 2008.** Nachtsicht-Assistent: Mit Infrarot-Scheinwerfern besser und weiter sehen. [Online] Daimler AG, 2008. [Zitat vom: 4. Juni 2008.] <http://www.daimler.com>.
- Donges, E. 1978.** Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit.* 1978, 24, S. 98-112.
- Donges, E. 1978.** Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit.* 1978, 24, S. 98-112.
- Dornhöfer, S. und Pannasch, S. 2000.** *Risky Business: Der Gefahr ins Auge geblickt!* s.l. : Preisträgerbroschüre des zweiten Deutschen Studienpreises der Körber-Stiftung, 2000.
- Dorsch, F. 2003.** *Psychologisches Wörterbuch.* Bern : Huber, 2003. ISBN-10: 3456839669.
- Eckstein, P., et al. 1995.** Fahren auf Sicht. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik.* 1995, Bde. Heft 1, S. 2-4.
- EN ISO 15007-1. 2002.** *Straßenfahrzeuge - Messung des Blickverhaltens von Fahrern bei Fahrzeugen mit Fahrerinformations- und Fahrerassistenzsystemen - Teil 1: Begriffe und Parameter (ISO 15007-1:2002) Europäisches Komitee für Normung.* 2002.
- Enders, M. 2003.** Intelligent Light Concepts. *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik.* 2003, VDI Berichte Nr. 1731, S. 109-115.
- Enders, M. 2001.** Pixellight. *Progress in automotive lighting - PAL 2001-Konferenz.* 2001.
- Ergoneers GmbH. 2008.** Ergoneers. [Online] 2008. [Zitat vom: 25. September 2008.] <http://www.ergoneers.com>.
- Fastenmeier, W., et al. 2001.** Analyse von Spurwechselvorgängen im Verkehr. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften.* 2001, 2001/1; S. 15-23.
- Fenton, R. E. 1967.** Asymptotic Stability Studies in Simulated Car Following. *Third Annual NASA - University Conference of Manual Control. National Aeronautics and Space Administration,* S. 399-413. 1967.
- Fiala, E. 1966.** Lenken von Fahrzeugen als kybernetische Aufgabe. *ATZ 68/5,* S. 156-162. 1966.
- Florissen, G., Amsel, C. und Könning, T. 2007.** Light has to Go Where it is Needed: Future Light Based Driver Assistance Systems. 16. *Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik.* Aachen : s.n., 2007.

- Frank, H. 2008.** Elektromagnetisches Spektrum. [Online] 17. März 2008. [Zitat vom: 22. Juni 2008.] <http://upload.wikimedia.org>.
- Franz, W. 2004.** Car-to-Car Communication for Active Safety and Other Applications. *ATA EL Conference*. 2004.
- Fu, X. 2007.** *Entwicklung und Konstruktion eines modularen kontaktanalogen Head-Up-Displays für ein Realfahrzeug*. München : Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2007.
- Funk, G. 2008.** Digital Media for Artists. [Online] Kunst Universität Linz, 12. Mai 2008. [Zitat vom: 23. Juni 2008.] <http://www.dma.ufg.ac.at>.
- Gegenfurtner, K. R. 2003.** *Gehirn & Wahrnehmung*. Frankfurt : Fischer (Tb.); Auflage: 4, 2003. ISBN-10: 3596155649.
- Geiser, G. 1985.** Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. *ATZ*. 1985, 87; S. 74-77.
- Gengenbach, R. 1997.** Fahrerverhalten im Pkw mit Head-up-Display - Gewöhnung und visuelle Aufmerksamkeit. *VDI Fortschrittsberichte Reihe 12: Verkehrstechnik / Fahrzeugtechnik*. 1997, Nr. 330.
- Gibson, J. J. 1979.** The ecological approach to visual perception. *Wahrnehmung und Umwelt*. München: Urban und Schwarzenberg, 1979.
- Gibson, J. J. und Crooks, L. E. 1938.** A theoretical field-analysis of automobil driving. *American Journal of Psychology*. 1938, 51, S. 453-471.
- Gish, K. W., Staplin, L. und Perel, M. 1999.** Human factors issues related to use of vision enhancement systems. *Transportation Research Record*. 1999, 1694.
- Goldstein, E. 1997.** *Wahrnehmungspsychologie*. Oxford : 1. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 1997.
- Goldstein, E. 2001.** *Blackwell Handbook of Perception*. Oxford : Blackwell Publishers Ltd., 2001.
- Gordon, D. A. 1966.** Perceptual Basis of vehicular guidance. *Public Roads*. 1966, Bde. Vol. 34, No. 3, S. 53-68.
- Götz, M., Kauschke, R. und Härmens, E. 2004.** *Scannender Scheinwerfer*. s.l. : Poster DGaO 2004, 2004.
- Gramberg-Danielsen, B. 1967.** *Sehen im Verkehr*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer Verlag, 1967.
- Gregory, Richard L. 2001.** *Auge und Gehirn*. Reinbeck : Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, 2001.
- Häkkinen, S. 1974.** Large scale field experiment on driver behavior. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*. 1974, Bd. Jg. 20, 2, S. 75-92.

- Hamm, M. 2008.** Lichttechnik im Automobil - Eine Zeitreise von der Geschichte in die Zukunft. *Licht2008*. 2008, Bd. 18. Gemeinschaftstagung.
- Hamm, M. 2006.** Infrarotstrahler im Scheinwerfer: Erfahrungsbericht und Perspektiven. *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. 2006, VDI-Berichte Nr. 1944.
- Haslbeck, A. und Perterer, M. 2007.** *Entwicklung und Evaluation warnender Night Vision Systeme im Realfahrzeug*. München: Teamdiplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2007.
- Hauske, G. 1994.** *Systemtheorie der visuellen Wahrnehmung*. Stuttgart: Teubner Verlag, 1994.
- Helander, M. G. 1988.** *Handbook of Human-Computer Interaction*. North-Holland, Amsterdam: s.n., 1988.
- Herrin, G. D. und Neuhardt, J. B. 1974.** An Empirical Model for Automobile Driver Horizontal Curve Negotiation. *Human Factors*. Vol 16, 1974, Bd. No 2.
- Hofbeck, F. und Sampl, T. 2007.** *Validierung einer automotive-tauglichen Methodik zur kontaktanalogen Visualisierung von Fahrerassistenzinformationen*. München: Teamsemesterarbeit an der Technischen Universität München, 2007.
- Hoffman, D. D. 2001.** *Visuelle Intelligenz: Wie die Welt im Kopf entsteht*. s.l.: Klett-Cotta; Auflage: 2, 2001. ISBN-10: 3608942211.
- Höhnscheid, K. J. und Straube, M. 2003.** *Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland 2001. Wissenschaftliche Informationen der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Bergisch Gladbach: s.n., 2003.
- Holst, E. 1957.** *Aktive Leistungen der menschlichen Gesichtswahrnehmung*. s.l.: Studium Generale, 10, 4, 232, 1957.
- Honda. 2004.** [Online] September 2004. [Zitat vom: 25. August 2008.] <http://www.world.honda.com>.
- Host, v. E. 1957.** *Aktive Leistungen der menschlichen Gesichtswahrnehmung*. s.l.: Studium Generale, 1957.
- Hoyos, C. G. 1980.** *Psychologische Unfall- und Sicherheitsforschung*. Stuttgart: Kohlhammer, 1980.
- Hyos, C. G. 1974.** Kompatibilität. [Buchverf.] H. Schmidtke. *Ergonomie* 2. München: s.n., 1974.
- ISO/TS 15007-2. 2001.** *Road vehicles - Measurement of driver visual behaviour with respect to transport information and control systems - Part 2: Equipment and procedures*. 2001.
- Israel, B. 2006.** *Konzeptentwicklung für ein modulares kontaktanalogen Head-Up-Display im Realfahrzeug*. München: Semesterarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2006.

- Janssen, W. 1994.** Seat-belt wearing and driving behavior: an instrumented-vehicle study. *Accident Analysis & Prevention*. 1994, 26, 249-261.
- Johannsen, G. 1976.** Preview of Man-Vehicle Control Session. [Buchverf.] T.B. Sheridan und G. Johannsen. *Monitoring Behaviour and Supervisory Control*. New York, London : s.n., 1976.
- Johannson, G. und Rumar, K. 1971.** Driver's break reaction time. *Human Factors*. 1971, Vol 13, No 1.
- Johannson, G. und Rumar, K. 1968.** Visible distance and safe approach speed for night driving. *Ergonomics*. 1968, Vol 12, No 3, S. 341.
- Kaiser, P. K. und Boynton, R. M. 1996.** *Human Color Vision*. s.l. : Optical Society of America; 2nd/2 Volume edition, 1996. ISBN-10: 1557524610; ISBN-13: 978-1557524614.
- ka-news. 2007.** ka-news. [Online] 13. November 2007. [Zitat vom: 29. Mai 2008.] www.ka-news.de.
- Kauschke, R. 2004.** Adaptive Scheinwerfer - ein Technologieüberblick. *Licht 2004-Konferenz*. 2004.
- Kauschke, R. 2005.** *Systematik zur lichttechnischen Dimensionierung von aktiven Scheinwerfern*. Dissertation, HNI, Universität Paderborn : s.n., 2005.
- Kauschke, R., Eichhorn, K. und Wallaschek, J. 2004.** Aktive Scheinwerfer zur subtraktiven Lichtverteilungserzeugung. *DGaO-Proceedings*. 2004.
- Kelley, C.R. 1968.** *Manual and Automotive Control*. New York, Wiley : s.n., 1968.
- Kerkau, F. 2005.** *Biosignale zur Steuerung intelligenter User Interfaces*. Berlin : Dissertation an der Freien Universität Berlin, 2005.
- Kessler, W., Könnig, T. und Amsel, C. 2006.** Auf dem Weg vom kamerabasierten Nachtsichtsystem zur lichttechnischen Fahrerassistenz. *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. 2006, VDI-Bericht Nr. 1944.
- Kiefer, C. und Hepperger, D. 2007.** *Konstruktion eines Mock-Ups für ein integratives kontaktanaloges Head-Up-Display*. München : Teamsemesterarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2007.
- Kiefer, R. J. 1995.** Human factors issues surrounding an automotive vision enhancement system. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 39th Annual Meeting*. 1995.
- Kirchner, S. 2006.** *Planung, Durchführung und Auswertung von Fahrsimulatorversuchen zur Evaluierung von Night Vision Systemen mit Objektdetektion* . München : Diplomarbeit an der Technischen Universität München, 2006.
- Klein, M. 2006.** Kurvenlicht mit vorausschauender Kurvenerkennung. *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik*. 2006, VDI Bericht Nr. 1944.

- Koji, N., Hiroshi, A. und Nobuaki, K. 2006.** Windshield display for active safety. *FISITA 2006*. 2006, F2006D105.
- Kokoschka, S. 2003.** *Grundlagen der Lichttechnik*. Karlsruhe : Lichttechnisches Institut der Universität Karlsruhe, 2003.
- Krüger, H. P., et al. 1996.** *Soziales Umfeld, Alkohol und junge Fahrer*. Bergisch Gladbach : Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M 88, 1996.
- Krüger, H. P., Kazenwadel, J. und Vollrath, M. 1995.** Das Unfallrisiko unter Alkohol mit besonderer Berücksichtigung risikoe erhöhender Faktoren. [Buchverf.] H. P. Krüger. *Das Unfallrisiko unter Alkohol*. Stuttgart, Jena, New York : s.n., 1995.
- Kühnen, M. A., et al. 1995.** *Unfallgeschehen auf Autobahnen-Strukturuntersuchung*. Bergisch Gladbach : Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M 51, 1995.
- Lachenmayer, B, et al. 1996.** *Sehstörungen als Unfallursache*. s.l. : Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M65, 1996.
- Lange, C. 2008.** Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades. *Dissertation an der Technischen Universität München*. 2008.
- Langwieder, K. und Bäuml, H. 1997.** Charakteristik von Nachtunfällen. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Progress in Automobile Lighting*. Utz, S. 326-338, 1997.
- Leibowitz, H. W. und Owens, D. A. 1977.** Nighttime accident and selective visual degradation. *Science*. 1977, 197.
- Leibowitz, H. W. und Owens, D. A. 1986.** We drive by night. *Psychology Today*. 1986, 20.
- Lerner, M., Albrecht, M. und Evers, C. 2005.** *Das Unfallgeschehen bei Nacht*. Bremerhaven : Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2005.
- Lerner, N. D. 1996.** *Preliminary Human Factors Guidelines for Crash Avoidance Warning Devices*. Silver Spring : NHTSA Project, 1996. DTNH22-91-C-07004.
- Lindsay, P. H. und Norman, D. A. 1972.** *Human Information Processing. An Introduction to Psychology*. New York, London : s.n., 1972.
- Locher, J. und Völker, S. 2004.** The Influence of Vehicle Beam Patterns on Safety and Acceptance. [Buchverf.] SAE International. *Light SAE Congress 2004*. Warrendale : (SP-1875), S. 227-231, 2004.
- Lübke, A. 2004.** Car-to-Car Communication - Technologische Herausforderungen. *Fachtagungsbericht GMM, VDE-Verlag, VDE-Kongress 2004*. 2004.
- Mahlke, S., et al. 2007.** Evaluation of Six Night Vision Enhancement Systems: Qualitative and Quantitative Support for Intelligent Image Processing. *Human Factors*. 2007, Vol. 49, No. 3, pp. 5118-531. DOI 10.1518/001872007X200148.

- Mallot, H. A. 1998.** *Sehen und die Verarbeitung visueller Information.* Braunschweig : Vieweg Verlag, 1998. ISBN: 3-528-05659-2.
- Mayer, Hans-W. 2008.** Nachsichtssysteme bieten eine trügerische Sicherheit. *Welt am Sonntag.* 2008, Bd. 19.
- Mc Ruer, D. und Weir, D. H. 1969.** Theory of Manual Vehicular Control. *Ergonomics.* 1969, Bd. Vol 12, No 4.
- Menn, M., Studer, N. und Cohen, A. 2005.** Eye movement behaviour when driving through the Gotthard tunnel: A pilot study. *European Conference on Eye Movements.* 2005, ECEM13 Bern 2005.
- Mercedes-Benz. 2008.** Mercedes-Benz. [Online] 2008. [Zitat vom: 26. März 2008.] <http://www.mercedes-benz.de>.
- Michon, J. A. 1985.** A critical view of driver behavior models: what do we know, what should we do? [Buchverf.] L. Evans und R. C. Schwing. *Human behavior and traffic safety.* New York : Plenum Press, 1985.
- Miller, G. A. 1956.** The magic number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *psychological review.* 1956, 63; S.81-97.
- Miller, R.E. und Tredici, T.J. 1992.** *Night vision manual for the fight surgeon.* Armstrong lab : Brooks AFB, 1992. AL-SR-1992-0002.
- Mourant, R. R. und Rockwell, T. H. 1972.** Strategies of visual search by novice and experienced drivers. *Human Factors.* 1972, 14.
- Müller-Limmroth, W. 1993.** Sinnesorgane. [Buchverf.] Heinz Schmidtke. *Ergonomie.* München Wien : Carl Hanser Verlag, 1993.
- Nagata, S. 1991.** How to Reinforce Perception of Depth in Single Two-dimensional Pictures. *Pictorial Communication in Virtual and Real.* Bristol, PA, USA : Taylor & Francis, ISBN: 0-74840-008-7, 1991.
- Neubauer, M. 2007.** *Konstruktion einer modularen Optikeinheit für ein kontaktanaloges Head-Up-Display im Realfahrzeug.* München : Semesterarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2007.
- Nilgens, V. 2007.** Rechtsanwalt Dr. Volker Nilgens. [Online] 2007. [Zitat vom: 28. Juni 2007.] <http://www.nilgens.com>.
- Nilsson, L. und Alm, A. 1996.** Effect of a vision enhancement system on driver's ability to drive safer in Fog. [Buchverf.] A. G. Gale und et al. *Vision in Vehicles.* Amsterdam : Elsevier Science Publishers, 1996.
- O'Neil, B. 1977.** A decision-theory model of danger compensation. *Accident Analysis and Prevention.* 1977, Vol.9.
- Padmos, P. und van Erp, J. B. F. 1996.** Driving with camera view. [Buchverf.] A. Gale, et al. *Vision in vehicles.* Amsterdam : Elsevier Science, 1996.

- Palmer, S. 1999.** *Vision Science*. Cambridge : Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- Pfleger, E., Berger, W. und Pichler, C. 1994.** Unfallursachenvorschung bei Unfallhäufungsstellen - Fallbeispiele für Informationsdefizite. [Buchverf.] E. Marx. *Informationsaufnahme des Verkehrsteilnehmers, 3. Fachtagung Verkehrssicherheit*. Wien : s.n., 1994.
- Pflug, Enno. 2005.** Continental. [Online] 1. Juli 2005. [Zitat vom: 4. August 2008.] <http://www.vdo.de>.
- Piccione, D., et al. 1997.** *Concept experiment program test of AN/VAS-5 driver's vision enhancer*. s.l. : Fort McClellan, AL: U.S. Army Military Police School, 1997. TRADOC 97-CEP-466.
- Poulton, E. C. 1966.** Tracking. [Buchverf.] E. A. Bilodeau. *Acquisition of Skill*. New York : s.n., 1966.
- Prinzel, L. J. und Risser, M. 2004.** *Head-Up Display and Attention Capture*. Virginia : Langley Research Center and Old Dominion University, 2004. NASA/TM-2004-213000.
- Probst, T. 1986.** Thresholds for detection of changes in headway are elevated during car ride. [Buchverf.] A. G. Gale. *Vision in Vehicles*. Amsterdam : Elsevier Science Publisher B. V., 1986.
- Rasmussen, J. 1983.** Skills, rules and knowledge; signals, signs and symbols and other distructions in human performance models. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*. 1983, Bde. Vd. SMC - 13, S. 257-266.
- Rasmussen, J. 1987.** The definition of human error and a taxonomy for technical system design. [Buchverf.] J. Rasmussen, K. Duncan und J. Leplat. *New technology and human error*. New York : Wiley & Sons Ltd, 1987.
- Rindle, M. und Fendt, B. 2006.** *Evaluation einer im Head-up-Display visualisierten Bird-View-Ansicht des vorausliegenden Streckenverlaufs*. München : Teamsemesterarbeit an der Technischen Universität München, 2006.
- Robinson, G. H. 1972.** Visual search by automobil drivers. *Human Factors*. 1972, Vol 14, No 4, S. 315.
- Rock, I. 1998.** *Wahrnehmung*. 1. Auflage. Berlin : Spektrum Akademischer Verlag, 1998.
- Rockwell, T. H. 1971.** Eye movement analysis of visual information acquisition in driving: an overview. Paper presented at the North Carolina State University, Raleigh, 1971.
- Rockwell, T. H. und Snider, J. N. 1965.** An Investigation of Variability in Driving Performance on the Highway. *Accident Prevention Grants Division. U.S. Public Health Service. Grant No AC 00-2802*. 1965.

- RPONLINE. 2006.** Scheinwerfer-Entwicklung. [Online] 30. März 2006. [Zitat vom: 30. Mai 2008.] <http://www.rp-online.de/public/article/auto/verkehr/323222/Tagfahrlicht-wirft-seine-Schatten-voraus.html>.
- Rumar, K. 2003.** Night vision enhancement systems (NVES) - Research and requirements. [Buchverf.] Schmidt-Clausen. *Progress in automobile lighting - 5th International Symposium*. Munich, Germany : Herbert Utz Verlag, 2003.
- Rumar, K. 2002.** *Night vision enhancement systems: What should they do and what more do we need to know?* s.l. : University of Michigan Transportation Research Institute, 2002. UMTRI-2002-12.
- Ruß, A. 2008.** ONLINE FOCUS AUTO. [Online] 12. Juni 2008. [Zitat vom: 22. August 2008.] <http://www.focus.de>.
- Rüth, A. 1988.** *Maßnahmen zur Verminderung von außerörtlichen Nachtunfällen*. Bergisch Gladbach : Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung, Nr. 175, 1988.
- Sachse, H. 1971.** *Einführung in die Kybernetik*. Braunschweig : Uni-Text, 1971.
- Sachsse, H. 1971.** Einführung in die Kybernetik. *Uni-Text*. Braunschweig : s.n., 1971.
- SAE J-2396. 1999.** *Definition and experimental measures related to the specification of driver visual behaviour using video based techniques*. 1999. ISO/TC 22/SC 13/WG 8.
- Saito, S. 1992.** Does fatigue exist in a quantitative measurement of eye movements? *Ergonomics*. 1992, 35, S. 607-615.
- Schäbe, H. und Schierge, F. 2006.** Untersuchung über den Einfluss der Beleuchtung an Fahrzeugen auf das nächtliche Unfallgeschehen in Deutschland. *TÜVRheinland*. [Online] 2006. [Zitat vom: 18. März 2008.] <http://www.tuv.com>.
- Scharpf, J. 2005.** *Study on the effect of monocular depth perception factors in a head-up-display for the realisation of a contact analogous visualisation of night vision warning symbols*. München : Semesterarbeit an der Technischen Universität München, 2005.
- Schlesinger, L. E. 1964.** Quantitative measurement of driving skills. *National Safety Council Transactions*. 1964, 23, S. 72-81.
- Schlesinger, L. E. und Safren, L. E. 1963.** Perceptual analysis of driving task. *Driver behaviour research project*. George Washington University Paper, read at annual meetings of highway research board, 1963.
- Schmidt, N. M. 2006.** *Akzeptanz kontaktanaloger Fahrerassistenzinformationen im Head-up-Display*. München : Diplomarbeit an der Technischen Universität München, 2006.

- Schmidt-Clausen, H. J. und Freiding, A. 2004.** *Sehvermögen von Kraftfahrern und Lichtbedingungen im nächtlichen Straßenverkehr.* Bergisch Gladbach : Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M 158, 2004.
- Schmidtke, H. 1993.** Der Leistungsbegriff in der Ergonomie. *Ergonomie.* Passau : Carl Hanser Verlag München Wien; ISBN 3-446-16440-5, 1993.
- Schmidtke, H. und Bubb, H. 1993.** Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. [Buchverf.] Heinz Schmidtke. *Ergonomie.* Passau : Carl Hanser Verlag München Wien, ISBN 3-446-16440-5, 1993.
- Schneid, M. 2008.** *Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Kraftfahrzeug.* München : Dissertation an der Technischen Universität München, 2008.
- Schober, H. 1960.** *Das Sehen.* Leipzig : VEB Fachbuchverlag, 1960.
- Schober, H. 2004.** *Die Nachtmyopie und ihre Ursachen.* Berlin / Heidelberg : Springer, 2004. ISSN: 0721-832X (Print) 1435-702X (Online).
- Schultze, L. 1866.** *Monographie der Echinodermen des Eifker Kalkes.* Wien : Denckschr. kais. Akad. wiss., math.- nat. Classe , 1866.
- Schweigert, M. 2003.** *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben.* s.l. : Dissertation an der Technischen Universität München, 2003.
- Scott, P. P. 1980.** *The relationship between road lighting quality and accident frequency.* Crowthorne : Berk. : Transport and Road Research Laboratory, 1980.
- Shinar, D. und Schieber, F. 1991.** Visual requirements for safety and mobility of older drivers. *Human Factors.* 1991, 33.
- Sprenger, A. 2001.** *Müdigkeit und Müdigkeitsmessung bei Lkw-Fahrerinnen und -Fahrern: Ein Überblick zum Stand der Forschung.* s.l. : ILS-Schriften, 176, S. 36-40, 2001.
- Stanton, N. A. und Pinto, M. 2000.** Behavioural compensation by drivers of a simulator when using a vision enhancement system. *Ergonomics.* 2000, 43; S. 1359-1370.
- Steward, J. D. 1971.** Human Perception of angular acceleration and implications in motion simulator. 1971, Bd. Vol. 8.
- Summala, H., Nieminen, T. und Punto, M. 1996.** Maintaining lane position with peripheral vision during in-vehicle tasks. *Human Factors.* 1996, 38.
- Teichmann, P. 2007.** Night Vision 2 - Erstes Nachtsichtsystem mit Fußgänger- und Radfahrererkennung. *ATZ.* 2007, Nr.: 2007-10.
- Timpe, K. P. 1990.** Informationsdarstellungen in Mensch-Maschine-Systemen. [Buchverf.] C. Hoyos und B. Zimolong. *Ingenieurpsychologie.* Göttingen : s.n., 1990.
- Tomaske, W. und Fortmüller, T. 2001.** Der Einfluss von Wahrnehmungsschwellen auf die Auslegung von Bewegungssystemen in der Fahrsimulation. [Buchverf.] K. P.

- Gärtner und M. Grant. *Human Factors bei der Entwicklung von Fahrzeugen. Anhang 1 zum DGLR-Bericht 2001-06.* 2001.
- Tsimhoni, O., et al. 2004.** *Pedestrian detection with near and far infrared night vision enhancement.* s.l. : University of Michigan Transportation Research Institute, 2004. UMTRI-2004-38.
- Tsimhoni, O. und Green, P. 2002.** *Night Vision Enhancement Systems for Ground Vehicles: The Human Factors Literature (UMTRI-2002-05).* Michigan : University of Michigan Transportation Research Institute, 2002.
- Vilimek, R. 2007.** *Gestaltungsaspekte multimodaler Interaktion im Fahrzeug - Ein Beitrag aus ingenieurpsychologischer Perspektive.* s.l. : Doktorarbeit an der Philosophischen Fakultät II der Universität Regensburg, 2007.
- Wallaschek, J., Kauschke, R. und Eichhorn, K. 2003.** Aktive Lichtsysteme für das Kraftfahrzeug. *VDI Mechatronik-Tagung.* 2003, 5.
- Weir, D. H. und Mc Ruer, D. T. 1973.** Measurement and Interpretation of Driver/Vehicle System Dynamic Response. *Human Factors.* 1973, Bd. Vol 15, No 4, S. 367 ff.
- Weir, D. H. und Mc Ruer, D. T. 1968.** Models of Steering Control of Motor Vehicles. *Fourth Annual NASA.* 1968, University Conference on Manual Control, National Aeronautics and Space Administration.
- Wewetzer, C., et al. 2007.** Experimental Evaluation of UMTS and Wireless LAN for Inter-Vehicle Communication. *7. International Conference on IST Telecommunications.* 2007.
- Wilde, G. J. S. 1982.** The theory of risk homeostasis: implications for safety and health. *Risk Analysis.* 1982.
- Wilde, G. 1974.** Wirkung und Nutzen von Verkehrssicherheitskampagnen. Ergebnisse und Forderungen - ein Überblick. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit.* 1974, 20.
- Wisselmann, D. 2006.** ConnectedDrive - Ein methodischer Ansatz für die Entwicklung zukünftiger Fahrerassistenzsysteme. *BMW Group Forschung und Technik.* 2006.
- Zomotor, A. 1987.** *Fahrwerkstechnik: Fahrverhalten.* Würzburg : Vogel-Verlag, 1987.