

**TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN**

**Lehrstuhl für Ergonomie**

**Entwicklung und Erprobung eines  
kontaktanalogen Head-up-Displays im  
Fahrzeug**

**Dipl.-Ing. (Univ.) Marcus Schneid**

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. W. A. Günthner

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. H. Bubb, i. R.

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr. phil. habil. B. Spanner-  
Ulmer, Technische Universität Chemnitz

Die Dissertation wurde am 01.07.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 21.01.2009 angenommen.

*“iucundi acti labores”*

*Cicero*

# Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am INI.TUM, dem wissenschaftlichen Kompetenzzentrum der Technischen Universität München in Ingolstadt. Die enge Zusammenarbeit mit der Abteilung „Bedienung und Anzeige“ der AUDI AG in Ingolstadt und mit dem Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München gab wesentliche Impulse, die bei der Erreichung der gesteckten Ziele halfen. In diesem Zusammenhang möchte ich mich bei Bernhard Senner (AUDI AG) bedanken. Die Zusammenarbeit mit ihm sowohl bei fachlichen als auch bei organisatorischen Herausforderungen hat einen großen Teil zum erfolgreichen Abschluss der Arbeit beigetragen. Mein Dank gilt auch Dr. Werner Hamberger (AUDI AG) für seine wertvollen Ratschläge bei der Umsetzung des Anzeige-konzeptes. Besonders möchte ich mich bei Herrn Professor Bubb für die stets offenen Anregungen zur Thematik bedanken, die mir seine jahrelange Erfahrung auf dem Gebiet des kontaktanalogen Head-up-Displays offen legten. Ferner möchte ich Frau Professor Spanner-Ulmer für die Übernahme des Koreferats und Herrn Professor Günthner für die Leitung der Prüfungskommission danken. Nicht zuletzt gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen der Abteilung „Bedienung und Anzeige“ der AUDI AG in Ingolstadt und meinen Forscherkollegen am INI.TUM und am Lehrstuhl für Ergonomie, die dazu beitrugen, dass die vergangenen drei Jahre nicht nur fachlich erfolgreich, sondern auch in sozialer Hinsicht bereichernd waren.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	II
Inhaltsverzeichnis .....	III
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis .....	X
1 Einleitung.....	1
1.1 Anzeigeorte im Fahrzeug.....	1
1.2 Zur vorliegenden Arbeit.....	2
2 Head-up-Display-Technologie .....	3
2.1 Technische Grundlagen eines Head-up-Displays .....	3
2.1.1 Physikalisches Prinzip .....	3
2.1.2 Optisches System.....	6
2.1.3 Bilderzeugungseinheit .....	7
2.1.4 Windschutzscheibe.....	12
2.1.5 Optische Abbildungsfehler.....	16
2.2 Aufbau aktueller Head-up-Displays.....	24
2.3 Anzeigehalte aktueller Head-up-Displays.....	27
2.3.1 Geschwindigkeitsanzeigen .....	27
2.3.2 Anzeigen von Geschwindigkeitsregelanlagen (GRA) .....	30
2.3.3 Navigationsanzeigen .....	31
2.3.4 Statusanzeigen und Warnungen .....	32
2.3.5 Weitere Anzeigen .....	33
2.3.6 Bewertung .....	34
2.4 Studie zur Optimierung von Anzeigekonzepten im Head-up-Display .....	36

2.5 Resümee zum momentanen Stand der Head-up-Display-Technologie in Kraftfahrzeugen .....	42
3 Konzeptauswahl für die Umsetzung eines kontaktanalogen Head-up-Displays ....	44
3.1 Begriffsdefinition .....	44
3.2 Technische Realisierungsmöglichkeiten .....	46
3.2.1 Technologien mit virtuellem Bild .....	46
3.2.1.1 Beeinflussung der Wahrnehmung von Tiefenkriterien .....	46
3.2.1.2 Stereoskopische Bilddarstellung .....	49
3.2.1.3 Schräge Displayebene .....	50
3.2.2 Windschutzscheibenprojektion (reales Bild) .....	52
3.3 Bewertung der Realisierungsmöglichkeiten .....	58
4 Technische Umsetzung der Variante der schrägen Displayebene .....	61
4.1 Randbedingungen .....	61
4.2 Auslegung des virtuellen Bildes .....	63
4.3 Optikauslegung .....	69
4.4 Bildquelle .....	72
4.5 Datenbereitstellung und Ansteuerung .....	73
4.6 Einbau in den Versuchsträger .....	75
5 Anzeigekonzept für kontaktanaloge Head-up-Displays .....	78
5.1 Abbildungsfunktion .....	78
5.2 Einflüsse der Fahrdynamik .....	80
5.3 Realisierte Anzeigen .....	84
5.3.1 Distanzanzeige .....	85
5.3.2 Navigationsanzeige .....	88
5.3.3 Geschwindigkeitsanzeige .....	89
5.3.4 Generierung der Darstellung .....	90

5.4 Weitere mögliche Anzeigen .....	92
5.4.1 Überholanzeige .....	92
5.4.2 Hindernismarkierung .....	94
5.4.3 Ausweichmanöver .....	95
6 Validierung der umgesetzten Technologie und des Anzeigekonzeptes.....	98
6.1 Versuchsdesign .....	98
6.2 Ergebnisse und Interpretation .....	102
6.2.1 Kontaktanaloger Charakter des Systems .....	102
6.2.1.1 Erste Eindrücke.....	102
6.2.1.2 Wahrnehmung des virtuellen Bildes.....	103
6.2.1.3 Beurteilung von Umwelt- und Fahreinflüssen .....	105
6.2.1.4 Einflüsse der Bildlage auf das Fahrverhalten.....	107
6.2.2 Beurteilung der Distanzanzeige.....	108
6.2.3 Beurteilung der Navigationsanzeige .....	109
6.2.4 Weitere Ergebnisse .....	110
6.2.4.1 Verwendung des Systems im Stadtverkehr .....	110
6.2.4.2 Eindrücke zur Sicherheit .....	111
6.2.4.3 Verbesserungsvorschläge .....	113
7 Zusammenfassung.....	114
8 Ausblick .....	117
Literaturverzeichnis .....	118
Anhang .....	121
A.1 Quellcode zur Anzeigengenerierung.....	121
A.2 Fragebogen zur abschließenden Validierung .....	134
A.3 Fotodokumentation .....	148

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzip des virtuellen Bildes .....	4
Abbildung 2: Prinzip der Lupe.....	5
Abbildung 3: Prinzip des Hohlspiegels .....	5
Abbildung 4: Funktionsprinzip eines Head-up-Displays.....	7
Abbildung 5: Leuchtdichteverluste im optischen Strahlengang eines Head-up-Displays.....	8
Abbildung 6: Problematik eines niedrigen Kontrasts im virtuellen Bild .....	9
Abbildung 7: Funktionsprinzip der Laser-Projektion .....	10
Abbildung 8: Beispielhafter Aufbau von Flüssigkristalldisplays.....	11
Abbildung 9: Entstehung des Doppelbildes an der Windschutzscheibe .....	14
Abbildung 10: Behebung des Doppelbildes mittels Keilfolie .....	15
Abbildung 11: Monochromatische Abbildungsfehler.....	17
Abbildung 12: Chromatische Abbildungsfehler.....	17
Abbildung 13: Sphärische Aberration .....	18
Abbildung 14: Astigmatismus .....	18
Abbildung 15: Bildfeldwölbung.....	19
Abbildung 16: Koma .....	19
Abbildung 17: Verzeichnung.....	20
Abbildung 18: Chromatische Aberrationen .....	20
Abbildung 19: Versuchsstand zur Thematik Abbildungsfehler im Head-up-Display .	21
Abbildung 20: TV-Verzeichnung.....	22
Abbildung 21: Graphiken zur Bewertung optischer Abbildungsfehler im Head-up-Display.....	23
Abbildung 22: Head-up-Display der BMW 5er- und 6er-Reihe .....	26

Abbildung 23: Anzeigen im Head-up-Display der Corvette von Chevrolet (Modell C6): Modus „Rennbahn 1“, Modus „Rennbahn 2“, Modus „Strasse“ .....	28
Abbildung 24: Anzeigen im Head-up-Display des Cadillac XLR .....	28
Abbildung 25: Anzeigen im Head-up-Display des Cadillac STS .....	28
Abbildung 26: Anzeigen im Head-up-Display des Pontiac Grand-Prix .....	29
Abbildung 27: Anzeigen im Head-up-Display der 5er- und 6er-Reihe von BMW: Standardmodus, M-Modus .....	29
Abbildung 28: Anzeigen im Head-up-Display des Citroën C6.....	30
Abbildung 29: GRA- und ACC-Anzeige im Head-up-Display in der 5er- und 6er-Reihe von BMW .....	31
Abbildung 30: Anzeige des Tankinhaltes im Modus „Rennbahn 2“ beim Head-up-Display im Chevrolet Corvette .....	32
Abbildung 31: Check-Control-Meldungen im Head-up-Display beim BMW der 5er- und 6er-Reihe.....	33
Abbildung 32: Anzeige der Himmelsrichtung und der Außentemperatur im Head-up-Display des Pontiac Grand-Prix GXP .....	34
Abbildung 33: Darstellung der unterschiedlichen Bildgrößen eines Head-up-Displays im Simulatorversuch (Größe 1, Größe 2, Größe 3) .....	37
Abbildung 34: Prozentuale Bewertung der Größen des virtuellen Bildes .....	38
Abbildung 35: Schematische Platzhalter bei der Definition der Anzeigehalte; Definition von Symbolik und Symbolgrößen .....	38
Abbildung 36: Fahrzeugfeste und umweltfeste Darstellung im HUD .....	40
Abbildung 37: Bewertung der beiden HUD-Technologien bezüglich Gefallen und Bevorzugung .....	40
Abbildung 38: Vergleichende Bewertung der beiden HUD-Technologien bezüglich Ablenkung, Intuitivität, Nutzen und Störung .....	41
Abbildung 39: Dreidimensionaler Charakter eines kontaktanalogen Head-up-Displays .....	45
Abbildung 40: Anzeigemöglichkeiten für ein kontaktanaloges Head-up-Display .....	45



Abbildung 41: Monokulare Tiefenkriterien bei Anzeigen im Head-up-Display .....	49
Abbildung 42: Prinzip eines stereoskopischen Head-up-Displays .....	50
Abbildung 43: Prinzip der schrägen Ebene im kontaktanalogen Head-up-Display ...	52
Abbildung 44: Windschutzscheibenprojektion .....	53
Abbildung 45: Schema des Versuchsaufbaus zur Akkommodationszeit .....	54
Abbildung 46: Versuchsaufbau zur Akkommodationszeit.....	55
Abbildung 47: Ablauf des Versuchs zur Akkommodationszeit.....	55
Abbildung 48: Einfluss des Displayabstandes auf die Eingabezeit.....	56
Abbildung 49: Bewertung der empfundenen Anstrengung .....	57
Abbildung 50: Begrenzende Elemente des Head-up-Display-Packages im Fahrzeug .....	62
Abbildung 51: Längsauslegung des virtuellen Bildes – Teil 1 .....	64
Abbildung 52: Strahlengang zur Umsetzung eines gewinkelten virtuellen Bildes.....	65
Abbildung 53: Längsauslegung des virtuellen Bildes – Teil 2.....	65
Abbildung 54: Umgesetzte Längsform des virtuellen Bildes.....	66
Abbildung 55: Grundlage zur Berechnung der maximalen Querabweichung .....	67
Abbildung 56: Umgesetzte Breitenauslegung des virtuellen Bildes .....	68
Abbildung 57: Aufbau zur photogrammetrischen Vermessung der Windschutzscheibe; Ergebnis der Messung.....	70
Abbildung 58: Auswirkungen der Diskrepanz von Windschutzscheibengeometrie und Vorgabefläche für die Optikberechnung .....	70
Abbildung 59: Optische Komponenten im kontaktanalogen Head-up-Display.....	71
Abbildung 60: Strahlenverlauf im kontaktanalogen Head-up-Display .....	71
Abbildung 61: Datenliefernde Komponenten im Technikträger.....	74
Abbildung 62: Details zum Einbau des kontaktanalogen Head-up-Displays in den Technikträger .....	77
Abbildung 63: Ermittlung der Abbildungsfunktion .....	79

Abbildung 64: Näherung der Abbildungsfunktion.....	79
Abbildung 65: Fahrdynamische Größen .....	80
Abbildung 66: Einfluss des Nickens auf die empfundene Entfernung der Anzeige... 82	
Abbildung 67: Zusammenhang der Entfernungsdiskrepanz der kontaktanalogen Anzeige und des Nickwinkels in Abhängigkeit von der Anzeigentfernung .....	83
Abbildung 68: Symbolik des ACC-Systems .....	86
Abbildung 69: Beispiele für eine Anzeige des kontaktanalogen Distanzbalkens .....	87
Abbildung 70: Beispiel für eine Anzeige des kontaktanalogen Navigationspfeils .....	89
Abbildung 71: Beispiele für die Geschwindigkeitsanzeige im kontaktanalogen Head-up-Display.....	90
Abbildung 72: Ablaufdiagramm zur Generierung der Darstellung im Head-up-Display .....	91
Abbildung 73: Beispielhafte Anzeige der Überholsicherheitsdistanz im kontaktanalogen Head-up-Display .....	93
Abbildung 74: Anzeige einer Hindernismarkierung im kontaktanalogen Head-up-Display.....	95
Abbildung 75: Anzeige der Route für ein Ausweichmanöver im kontaktanalogen Head-up-Display .....	96
Abbildung 76: Verlauf der Versuchsstrecke.....	100
Abbildung 77: Empfundener Bereich der kontaktanalogen Darstellung vor dem Fahrzeug während der Versuchsfahrt .....	104

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Größen der virtuellen Bilder für die Probandenstudie .....	36
Tabelle 2: Zuordnung der benötigten Botschaften zu CAN-Bussystemen.....	73
Tabelle 3: Entfernungsdiskrepanz der kontaktanalogen Anzeige beim Nicken .....	83

# 1 Einleitung

## 1.1 Anzeigorte im Fahrzeug

Die zunehmende Anzahl von Fahrerassistenz- und Infotainmentsystemen in Kraftfahrzeugen bedingt eine Notwendigkeit neuartiger Anzeigeelemente im Umfeld des Fahrers. Beschränkten sich in früheren Jahren optische Anzeigen auf das Kombiinstrument, so sind moderne Fahrzeuge mit einer Vielzahl von Anzeigeelementen im Fahrzeuginnenraum bestückt. Basierend auf der Priorisierung bezüglich der Notwendigkeit zur Erfüllung der Fahraufgabe treten Informationen in unterschiedlicher Nähe zum primären Sichtbereich des Fahrers auf. Parallel zur Entwicklung von Navigationssystemen für Fahrzeuge – 1981 von Honda erstmals angeboten (siehe [33]) – ist die Einführung von Anzeigeelementen im Bereich der Mittelkonsole festzustellen. Daten zum gesamten Infotainmentsystem werden in aktuellen Fahrzeugen überwiegend im Mitteldisplay angezeigt, wohingegen das Kombiinstrument hauptsächlich fahrrelevante Daten beinhaltet. Das Head-up-Display (HUD) als weiteres Anzeigeelement stellt eine neuartige Technologie in Kraftfahrzeugen dar und wurde in Deutschland durch den Einsatz in der 5er-Reihe von BMW im Jahr 2003 bekannt. In allen Fahrzeugen, die damit auf dem europäischen Markt erhältlich sind, dient es als Anzeigemedium für redundante Information; ausgewählte Information anderer Anzeigeelemente wird also zusätzlich im Head-up-Display ein zweites Mal dargestellt. Der Nutzen dieser redundanten Information im Head-up-Display liegt im Vorgang des Ablesens begründet. Die Darstellung der Information in einem virtuellen Bild über der Motorhaube führt auf Grund der geringen notwendigen Kopf- und Augenbewegungen und der geringen notwendigen Akkommodation zu einer Verringerung des physischen Aufwandes beim Vorgang des Ablesens und bietet somit Potenzial für die Realisierung von kürzeren Ablesezeiten. Die Technologie des Head-up-Displays ermöglicht jedoch weitaus mehr als eine optimierte Darstellung redundanter Information. Die Charakteristik eines transparenten, virtuellen Bildes im Vorfeld eines Fahrzeuges legt die Anwendung nahe, Informationen der realen Welt durch ortskorrekte Überlagerung virtuell zu markieren. Eine solche kontaktanaloge Anwendung des Head-up-Displays bietet somit die Möglichkeit, nicht nur redundante Information mit verbesserter Ablesecharakteristik darzustellen, sondern Anzeigen mit Augmented-Reality-Charakter umzusetzen und somit die Realität in Abhängigkeit von den Anforderungen der momentanen Fahrsituation virtuell beliebig zu ergänzen. Gerade im Zusammenhang mit neu entwickelten Fahrerassistenzsystemen stellt ein solches kontaktanaloges Head-up-Display ein vielversprechendes Anzeigemedium dar, da

die Möglichkeit einer ortskorrekten Anzeige eine neue Dimension der erreichbaren Intuitivität eröffnet.

## 1.2 Zur vorliegenden Arbeit

Die grundlegende Idee eines kontaktanalogen Head-up-Displays wird bereits von Bubb in [6] beschrieben. Problematisch bei der Umsetzung eines solchen Systems war zur damaligen Zeit die Thematik der Bilderzeugung, da keine Displays erhältlich waren, welche die Anforderungen hinsichtlich Leuchtdichte und Bauraum erfüllt hätten. Des Weiteren stellte die Auslegung der asphärischen Spiegeloberflächen zur Kompensation des optischen Einflusses der Windschutzscheibengeometrie auf die Bildqualität mit der damaligen Technik ein Problem dar. Neuartige Displaytechnologien zur Bilderzeugung im Head-up-Display, 3D-Abtastsysteme zur Aufnahme der Windschutzscheibengeometrie und präzise Fräsmaschinen zur individuellen Gestaltung von optischen Bauteilen bieten gegenwärtig eine gute Grundlage, die Idee des kontaktanalogen Head-up-Displays seriennah in einem Fahrzeug umzusetzen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird im ersten Schritt die Technik eines herkömmlichen Head-up-Displays analysiert und Voraussetzungen für die Realisierung eines kontaktanalogen Systems ermittelt. Verschiedene Möglichkeiten zur Umsetzung eines solchen kontaktanalogen Head-up-Displays werden generiert und bewertet; die Variante mit dem größten Potenzial wird als Prototyp aufgebaut und in einen Versuchsträger integriert. Sowohl die ausgewählte Technik als auch das implementierte Anzeigekonzept werden in einer abschließenden Versuchsreihe validiert. Ziel der Arbeit ist es, ein vollständiges Konzept für die Umsetzung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug zu erstellen und Impulse für die Weiterentwicklung zu geben.

## 2 Head-up-Display-Technologie

Basis für die Entwicklung eines kontaktanalogen Head-up-Displays stellt die Technologie der herkömmlichen Head-up-Displays dar. Technische Grundlagen, der Aufbau aktueller Systeme und umgesetzte Anzeigekonzepte beschreiben im Folgenden die Ausgangslage für die Entwicklung eines kontaktanalogen Systems. Eine Probandenstudie zur Optimierung von Anzeigekonzepten in Head-up-Displays liefert Aussagen über die Notwendigkeit einer kontaktanalogen Anzeige.

### 2.1 Technische Grundlagen eines Head-up-Displays

Die wesentlichen Bauteile eines Head-up-Displays sind das Spiegelsystem, die Bilderzeugungseinheit und die Windschutzscheibe (bzw. der Combiner). Für diese Komponenten werden im Folgenden technische Grundlagen und Anforderungen aufgezeigt. Als Einstieg hierfür soll die Erläuterung des physikalischen Prinzips eines Head-up-Displays dienen. Die Notwendigkeit einer Betrachtung von optischen Abbildungsfehlern im Head-up-Display und die Angabe von Grenzwerten hierfür werden im letzten Teilkapitel beschrieben.

#### 2.1.1 Physikalisches Prinzip

Grundlegende Idee des Head-up-Displays ist die Überlagerung von Information mit der realen Umgebung. Die Information wird in Form eines virtuellen Bildes dargestellt. Die Charakteristik eines solchen virtuellen Bildes ist am Beispiel des Spiegelbildes in Abbildung 1 zu sehen. Vom realen Gegenstand gehen Lichtstrahlen aus, welche an der Spiegeloberfläche reflektiert werden. Lichtstrahlen, die die Spiegeloberfläche im Punkt A treffen, fallen im Beispiel von Abbildung 1 laut Reflexionsgesetz ( $\alpha = \beta$ ) genau ins Auge. Da der Mensch allerdings einen geraden Verlauf der Lichtstrahlen annimmt, erscheint ihm der Gegenstand an der Stelle, an der in Abbildung 1 das virtuelle Bild positioniert ist. Er empfindet also die reflektierten Lichtstrahlen, die vom Gegenstand ausgehen als unreflektierte Lichtstrahlen, die vom virtuellen Bild ausgesandt werden. Somit lässt sich ein virtuelles Bild als Darstellung eines realen Gegenstandes an einem Ort definieren, an dem sich der Gegenstand physikalisch nicht befindet. Verwendet man anstatt des Spiegels eine nur teilverspiegelte Fläche, so kann sowohl das virtuelle Bild, als auch die reale Umgebung jenseits der teilverspiegelten Fläche vom Betrachter erkannt werden. Hiermit ist bereits ein System beschrieben, das mit einfachen Mitteln die

Grundvoraussetzung eines Head-up-Displays erfüllt: die Möglichkeit, der Realität transparente Information zu überlagern.

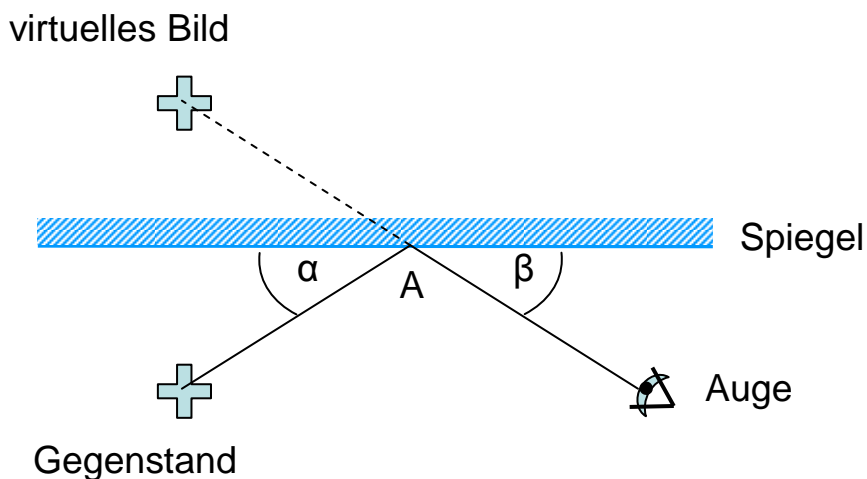


Abbildung 1: Prinzip des virtuellen Bildes

Auf der Strecke zwischen dem Gegenstand und dem Reflexionspunkt A können optische Elemente eingebracht werden, die den Strahlenverlauf des Lichtes ändern, ohne dass die Sicht des Betrachters auf die reale Umgebung des virtuellen Bildes beeinträchtigt wird. Diese Veränderung des Strahlenverlaufs kann entweder über Reflexion mittels verspiegelter Elemente oder über Brechung mittels Prismen und Linsen geschehen. Der Einsatz von ebenen Spiegeln dient einer Faltung des Strahlenganges und bietet Möglichkeiten zu einer flexibleren Positionierung des abzubildenden Gegenstandes. Der Einsatz von Linsen bietet weitere Möglichkeiten bei der Auslegung des virtuellen Bildes. Konvexe Linsen können als bild- und distanzvergrößernde Elemente eingesetzt werden. Physikalischer Hintergrund hierfür ist am Beispiel in Abbildung 2 zu sehen. Gegenstände, die zwischen Linsenoberfläche und deren Brennpunkt liegen, erscheinen beim Blick durch die Linse in Form eines virtuellen Bildes auf der entgegengesetzten Seite des Betrachters (also auf der gleichen Seite des Gegenstandes). Das virtuelle Bild ist vergrößert und wird in einer größeren Entfernung wahrgenommen als der Gegenstand, was die Funktionsweise einer Lupe erklärt. Mit Hilfe der Gesetze geometrischer Optik kann die Größe und die Distanz des virtuellen Bildes wie folgt berechnet werden, wobei  $b$  die Bildweite,  $B$  die Bildgröße,  $g$  die Gegenstandsweite,  $G$  die Gegenstandsgröße und  $f$  die Brennweite der Linse repräsentieren:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{b} - \frac{1}{g} \quad (1)$$

$$\frac{B}{G} = \frac{b}{g} \quad (2)$$

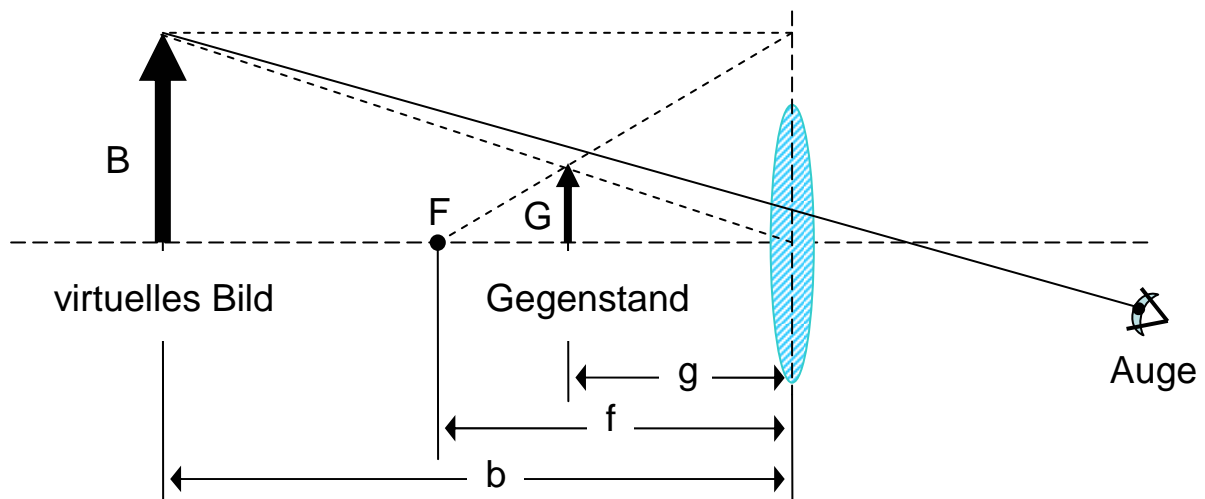


Abbildung 2: Prinzip der Lupe

Die Effekte einer Bildvergrößerung und der Realisierung einer größeren Bildabstand können auch durch den Einsatz von Hohlspiegeln erreicht werden. Der Unterschied zum Einsatz einer Linse ist, dass sich der Gegenstand auf der Seite des Brennpunktes des Hohlspiegels befindet und das virtuelle Bild auf der anderen Seite des Hohlspiegels. In Abbildung 3 ist das Prinzip der Bildvergrößerung mit einem Hohlspiegel dargestellt.

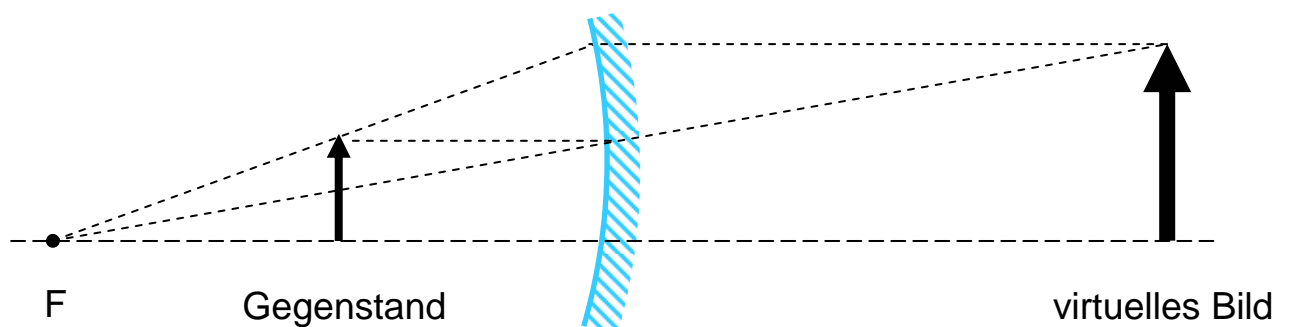


Abbildung 3: Prinzip des Hohlspiegels



Zur Erzeugung virtueller Bilder können also plane Spiegel, Hohlspiegel und Linsen eingesetzt werden. Im Folgenden ist zu klären, welche Anforderungen von diesen optischen Elementen erfüllt werden müssen, damit das Prinzip eines virtuellen Bildes für Head-up-Displays in Fahrzeugen angewendet werden kann.

## 2.1.2 Optisches System

Über das optische System werden wesentliche Parameter eines Head-up-Displays beeinflusst. Plane Spiegel ermöglichen mit ihren ablenkenden Eigenschaften eine Faltung des optischen Strahlenganges und somit – was gerade für Head-up-Displays in Fahrzeugen wichtig ist – mehr Freiheiten bei der Bauraumgestaltung. Linsen beeinflussen auf Grund ihrer abbildenden Eigenschaften die virtuelle Distanz und die Größe des virtuellen Bildes. Asphärische Hohlspiegel vereinen die Eigenschaften von Spiegel und Linse, haben also sowohl ablenkende als auch abbildende Eigenschaften und sind daher für den Einsatz im Head-up-Display sehr gut geeignet. Das gesamte optische System eines Head-up-Displays lenkt die von der Bilderzeugungseinheit (Bildquelle) erzeugten Lichtstrahlen über bzw. durch die einzelnen optischen Elemente bis zum Deckglas des Head-up-Displays. Dort treten die Lichtstrahlen aus dem Head-up-Display heraus und treffen – für die Anwendung im Fahrzeug – die Windschutzscheibe in einem Bereich von welchem aus der reflektierte Lichtstrahl ins Auge des Fahrers fällt. Die Größe der optischen Elemente und der Austrittsöffnung definiert über das größtmögliche Lichtstrahlbündel die Größe der Eyebow, also des Bereiches in der y-z-Ebene, in dem sich die Augen des Fahrers befinden müssen, damit das virtuelle Bild wahrgenommen werden kann. Die Entfernung des virtuellen Bildes vom Auge setzt sich aus der virtuellen Bilddistanz, die sich auf Grund der letzten Linse bzw. des letzten asphärischen Hohlspiegels im Head-up-Display ergibt, der Entfernung dieses optischen Elements von der Windschutzscheibe und der Entfernung der Windschutzscheibe vom Auge des Betrachters zusammen. Der Fahrer nimmt die entstandene Darstellung nicht als Spiegelung in der Windschutzscheibe wahr, sondern empfindet auf Grund der überwiegend transmissiven Eigenschaft der Windschutzscheibe die erzeugte Darstellung der Umgebung vor dem Fahrzeug überlagert. Somit kann das virtuelle Bild eines Head-up-Displays als eine Darstellung beschrieben werden, die an einer vom eigentlichen Ort der Bildentstehung sich unterscheidenden Position wahrgenommen wird. Der eigentliche Ort der Bildentstehung ist die Displayoberfläche im Head-up-Display, wahrgenommen wird die Darstellung allerdings der Umgebung überlagert vor dem Fahrzeug. Abbildung 4 zeigt die Funktionsweise und beispielhaft Bauteile eines Head-up-Displays. Durch eine

bewegliche Lagerung des letzten Spiegels im Strahlengang kann der Reflexionsbereich auf der Windschutzscheibe und somit die Lage der Eyebox variiert werden. Dies kann jedoch nur für herkömmliche Head-up-Displays umgesetzt werden; für das später beschriebene kontaktanaloge System ist eine solche Verstellereinrichtung auf Grund der geforderten Ortskorrektheit des virtuellen Bildes nicht möglich. Eine Kompensation der gekrümmten Geometrie der Windschutzscheibe geschieht durch gezielte Gestaltung der Oberflächen der optischen Elemente im Head-up-Display. Diese Thematik wird in Kapitel 2.1.5 (Optische Abbildungsfehler) genauer behandelt.

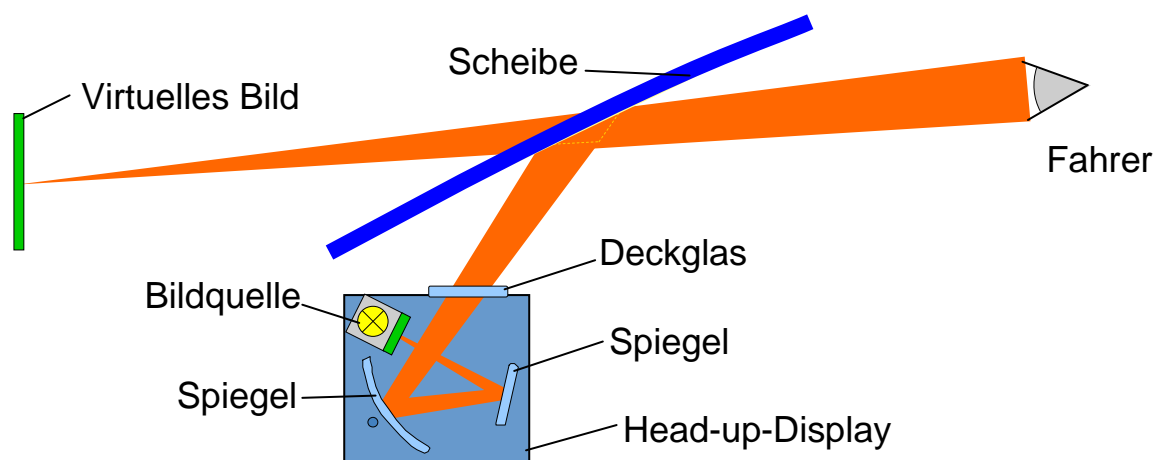


Abbildung 4: Funktionsprinzip eines Head-up-Displays

### 2.1.3 Bilderzeugungseinheit

Die vom Beobachter als virtuelles Bild empfundene Darstellung befindet sich physikalisch gesehen am Anfang des Strahlenganges im Head-up-Display. Die hier verbaute Bilderzeugungseinheit muss bestimmte Anforderungen erfüllen, die eine optimale optische Performance im virtuellen Bild sicherstellen. Im Wesentlichen betreffen diese Vorgaben die Leuchtdichte und den Kontrast; des Weiteren sind allgemeine Anforderungen, die für einen Einsatz in Kraftfahrzeugen gelten, einzuhalten.

#### Leuchtdichte

Um die Ablesbarkeit des virtuellen Bildes auch bei intensiver Sonneneinstrahlung sicherzustellen, hat sich für Head-up-Displays in Kraftfahrzeugen als Forderung für die Leuchtdichte ein Wert von  $5.000\text{cd/m}^2$  nach Reflexion in der Windschutzscheibe

(d.h. empfunden im virtuellen Bild) durchgesetzt. Der Reflexionsgrad der Windschutzscheibe beträgt für polarisiertes Licht ca. 25%, für unpolarisiertes Licht ca. 13%. Für den Reflexionsgrad der optischen Elemente kann ein Wert von ca. 80% angenommen werden. Somit ergibt sich für die geforderte Leuchtdichte des Displays für polarisiertes Licht ein Wert von  $25.000\text{cd/m}^2$ , für unpolarisiertes Licht ein Wert von ca.  $48.000\text{cd/m}^2$ . Abbildung 5 zeigt diese Leuchtdichteverluste im optischen Strahlengang eines Head-up-Displays.

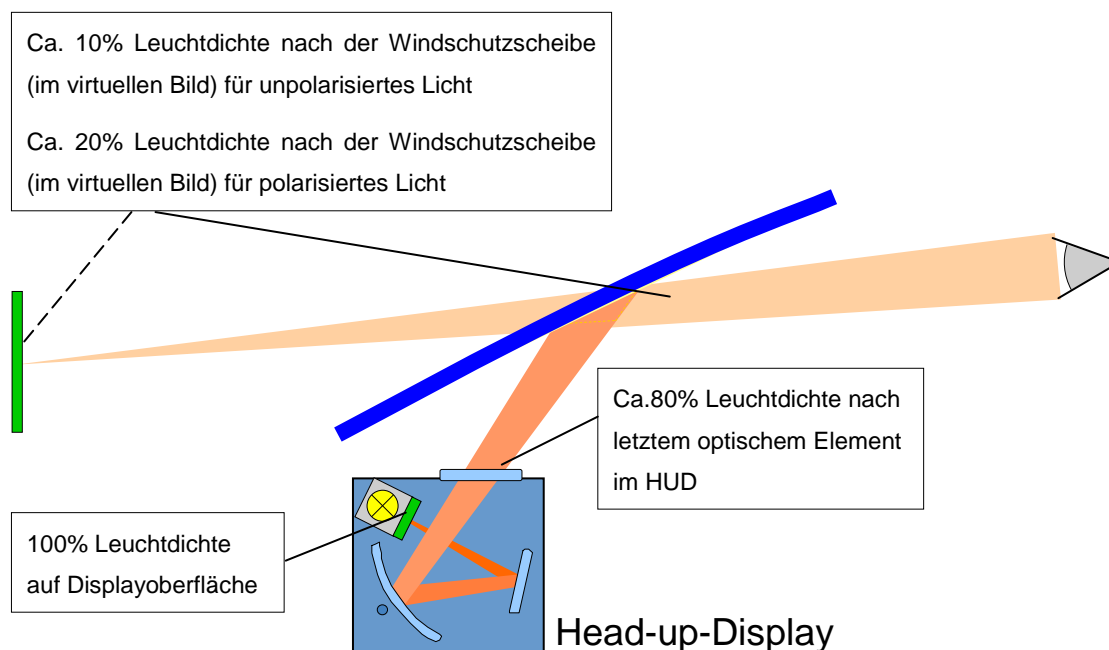


Abbildung 5: Leuchtdichteverluste im optischen Strahlengang eines Head-up-Displays

## Kontrast

Für eine optimale Ablesecharakteristik muss der Helligkeitskontrast im virtuellen Bild für eine Nachtsituation mindestens 50:1 sein; für Tageslichtbedingungen erfüllt ein Kontrastwert von mindestens 10:1 die Anforderungen für eine gute Ablesbarkeit. Für den Kontrast der Bildquelle im Head-up-Display ist ein Erfahrungswert von 500:1 gefordert, der ein Erreichen der geforderten Kontrastwerte für das virtuelle Bild ermöglicht. Diese hohe Anforderung an die Bilderzeugungseinheit hinsichtlich des Kontrasts beruht im Wesentlichen auf dem transparenten Charakter des virtuellen Bildes. Im Optimalfall ist im virtuellen Bild des Head-up-Displays nur die momentan aktuelle Anzeige sichtbar; die restliche Anzeigefläche des virtuellen Bildes ist nicht zu sehen. Ein schlechtes Kontrastverhältnis im virtuellen Bild zeigt Abbildung 6. Hier ist außer den darzustellenden Symbolen zusätzlich der maximale Anzeigebereich des

virtuellen Bildes als orange Fläche sichtbar. Dies ist zwar im gezeigten Beispiel hinsichtlich der damit verbundenen verschlechterten Ablesbarkeit noch nicht als kritisch zu betrachten, jedoch ist die Fläche der Umgebungsüberlagerung deutlich größer. Das virtuelle Bild erscheint somit dominanter und wird unter Umständen als störend empfunden.



*Abbildung 6: Problematik eines niedrigen Kontrasts im virtuellen Bild*

### **Allgemeine Anforderungen an die Bilderzeugungseinheit**

Für einen Serieneinsatz von Head-up-Displays in Kraftfahrzeugen sind weitere grundlegende Voraussetzungen an die Bildquelle gegeben. So dürfen beispielsweise Temperaturen von  $-40^{\circ}\text{C}$  bis  $+85^{\circ}\text{C}$  die Funktionsfähigkeit der Anzeige nicht beeinflussen. Des Weiteren muss die Möglichkeit einer Dimmung der Anzeige auf zumindest 1% der maximalen Helligkeit bestehen. Dies ist besonders bei der Head-up-Display-Technologie von enormer Bedeutung, da eine nicht an die Umgebungsbeleuchtung angepasste Helligkeit der Anzeige – beispielsweise bei Nachtfahrten – zu Blendung im primären Sichtbereich führt und somit ein Sicherheitsrisiko darstellt.

### **Bewertung verschiedener Displaytechnologien**

Betrachtet man die Eigenschaften der verfügbaren Displaytechnologien, wird deutlich, dass die Erfüllung der Leuchtdichteanforderung die größte Einschränkung bei der Auswahl der Bildquelle darstellt. Nicht geeignet für einen Einsatz im Head-up-Display sind aus diesem Grund Plasma-Display-Panels (PDP), Feld-Emissions-Displays (FED) und Organic-Light-Emitting-Diode-Displays (OLED) mit welchen lediglich Leuchtdichten in der Größenordnung von  $1.000\text{cd}/\text{m}^2$  erreichbar sind. Mit Vakuum-Fluoreszenz-Displays (VFD) können Leuchtdichten von bis zu  $50.000\text{cd}/\text{m}^2$  erreicht werden. Auch die Anforderungen hinsichtlich Kontrast und Temperaturbeständigkeit können mit VFDs erfüllt werden. Der segmentierte

Charakter der Anzeigen in einem VFD und die begrenzten Möglichkeiten bei Farbdarstellungen lassen eine VFD-Anzeige jedoch als altmodisch erscheinen. Somit kann die VFD-Technologie zwar als technische Möglichkeit zur Umsetzung in einem Head-up-Display genannt werden, wird jedoch im Vergleich zu den folgenden Displaytechnologien an Relevanz verlieren. Zielführende technische Lösungen für Bildquellen in Head-up-Displays stellen nur folgende zwei Displaytechnologien dar: die Laser-Display-Technologie (LDT) und Thin-Film-Transistor-Displays (TFT).

Bei der Laser-Display-Technologie wird ein Bild generiert, indem drei Laserstrahlen in den Grundfarben Rot, Grün und Blau mittels eines Spiegelsystems überlagert und über Ablenkeinheiten auf eine Oberfläche projiziert werden. Die Bilddaten werden in digitaler Form in einem Bildspeicher zwischengespeichert. Die Farbtransformationseinheit realisiert die notwendige Farbanpassung für die drei Grundfarben. Die Laser-Modulationseinheit überträgt die Bildinformation in optischer Form auf die einzelnen Laserstrahlen. Spiegel bzw. Strahlteiler bündeln die drei einzelnen Strahlen zu einem einzigen kollinearen (quasiparallelen) Strahl. Der Aufbau des Bildes geschieht ähnlich dem Prinzip der Kathodenstrahlröhre: der Strahl schreibt zeilenweise das Bild auf die Projektionsfläche, wobei ein Polygondrehspiegel zur horizontalen und ein Galvanometerspiegel zur vertikalen Ablenkung dienen (siehe auch [27]). Das Funktionsprinzip eines Laser-Displays ist in Abbildung 7 zu sehen.

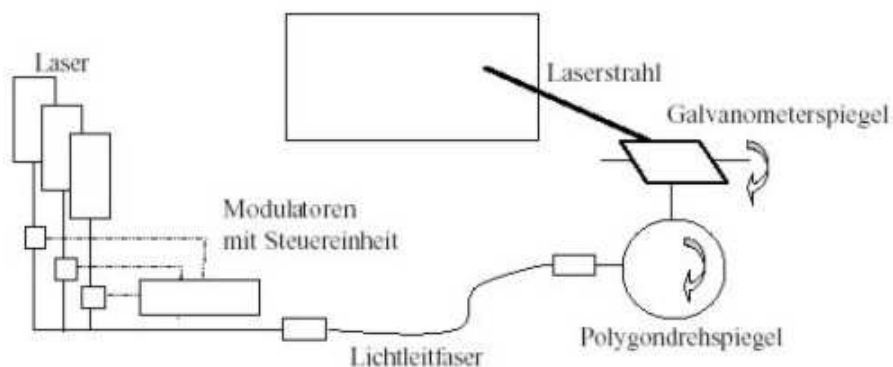


Abbildung 7: Funktionsprinzip der Laser-Projektion (aus [31])

Ein großer Vorteil der Laserprojektion ist die Kollinearität des ausgesendeten Lichtes. Dies begründet, dass die Schärfe des projizierten Bildes nicht von dem Abstand des Projektors zu der Projektionsfläche abhängig ist, wodurch sich eine Fokussierung auf die Projektionsfläche erübrigt. Der maximal erreichbare Kontrast liegt nach [27] bei 2000:1. Die Leistung eines Lasers für diese Anwendung liegt im Bereich weniger Milliwatt. Für die Anwendung im Automotive-Bereich existieren bereits Laser in den

Farben Rot, Grün und Blau, die durch enorm kompakte Bauweise den Anforderungen, die sich aus den Packageproblemen im Bereich der Instrumententafel ergeben, gerecht werden. Auch die erforderliche Leuchtdichte und die Temperaturstabilität kann mit der Laser-Display-Technologie erreicht werden.

Thin-Film-Transistor-Displays hingegen liegt ein gänzlich anderes Funktionsprinzip zu Grunde. Bei dieser Technologie bedient man sich der speziellen Eigenschaften von transparenten Flüssigkristallen (Liquid Crystal), deren Moleküle eine Verdrehung aufweisen, welche die Polarisierung durchstrahlenden Lichtes ändert. Bei Anlegen eines elektrischen Feldes richten sich die Kristalle entsprechend aus, wie in Abbildung 8 zu sehen ist. Diese Eigenschaften der Kristalle werden bei LC-Displays genutzt, um den Lichtdurchlass zu regeln. Das Licht wird beispielsweise bei transmissiven LC-Displays von Lichtquellen (Backlight) auf der Rückseite des Displays erzeugt und durch Polarisationsfilter ausgerichtet. Solange kein elektrisches Feld angelegt wird, erfolgt eine Änderung der Polarisation entlang der gedrehten Moleküle. Anschließend trifft dieses Licht auf einen zweiten Polarisationsfilter, der im rechten Winkel zu dem ersten angeordnet ist. Aufgrund der Drehung durch die Flüssigkeitskristalle kann das Licht diesen passieren. Auf diese Weise wird die Helligkeit geregelt, um die notwendige Anzahl von Graustufen für ein hochwertiges Display zu erhalten. Der Bildschirm ist in Bildelemente (Pixel) unterteilt, aus denen das Gesamtbild zusammengesetzt wird; für die Umsetzung eines Farbdisplays werden pro Bildpunkt drei Pixel verwendet, deren Farbe (Rot, Grün oder Blau) per Farbfilter erzeugt wird. Weitere Informationen sind [27] und [32] zu entnehmen.

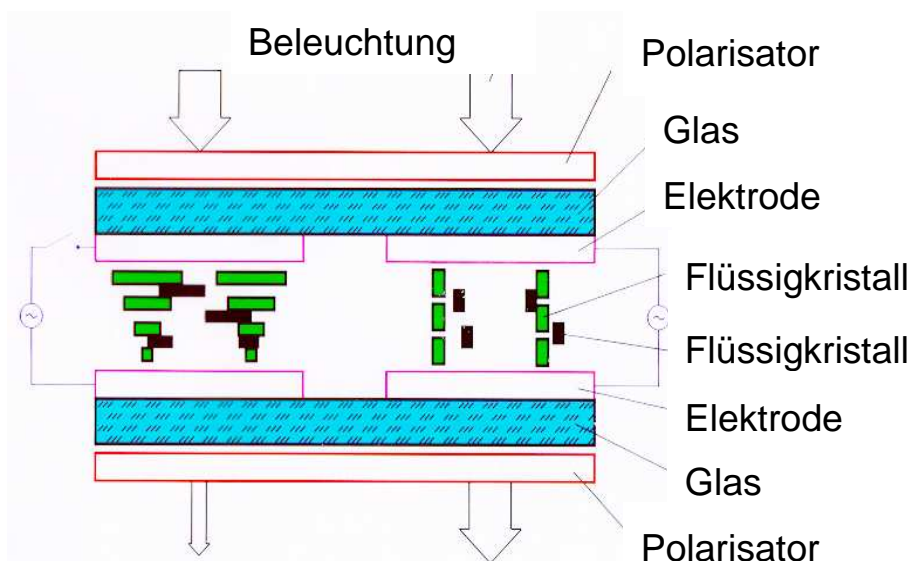


Abbildung 8: Beispielhafter Aufbau von Flüssigkristalldisplays

Bei LC-Displays verspricht die transmissive Technologie ein großes Potenzial für einen Einsatz in Head-up-Displays. Die Verwendung eines LED-Arrays als Backlight ermöglicht beispielsweise Leuchtdichten von bis zu  $700.000\text{cd/m}^2$ . Bei einem typischen Transmissionsgrad von 8% für LC-Displays ergibt sich für die maximale Leuchtdichte auf der Displayoberfläche ein Wert von  $56.000\text{cd/m}^2$ , womit die gestellte Anforderung hinsichtlich der Leuchtdichte erfüllt ist. Bei transmissiver TFT-LCD-Technologie wird der Kontrast durch die planare Struktur und der nahe an der Displayoberfläche stattfindenden Lichtemission verbessert. Somit kann auch die Forderung nach einem Kontrast von mindestens 500:1 mit dieser Technologie erfüllt werden.

Die für den Einsatz im Head-up-Display geeigneten Displaytechnologien grenzen sich somit auf die beiden hier beschriebenen ein: Laser-Display-Technologie und LCD-TFT-Technologie. Auf Grund des größeren Reifegrades fiel die Entscheidung für den Einsatz im Prototypen des kontaktanalogen Head-up-Displays auf die LCD-TFT-Technologie. Des Weiteren ist ein TFT-Display in der erforderlichen Größe für einen Einsatz im Automobil am Markt verfügbar; ein Laser-Display müsste den Anforderungen entsprechend erst individuell angefertigt werden und würde dementsprechende Mehrkosten verursachen. Eine detaillierte Beschreibung der ausgewählten Bildquelle für die Umsetzung des kontaktanalogen Head-up-Displays folgt in Kapitel 4.4.

## 2.1.4 Windschutzscheibe

Die ursprünglich mit einer Windschutzscheibe im Fahrzeug bezweckte Funktion war die Abgrenzung des Fahrzeuginnenraumes von der Umwelt mit den Sekundärfunktionen Transparenz und Design. Dementsprechend waren die maximal zulässigen Form- und Lagetoleranzen für die Oberflächengeometrie einer Windschutzscheibe sehr groß. Beim Einsatz eines Head-up-Displays erfüllt jedoch dieses Bauteil eine weitere Funktion: Physikalisch gesehen ist die Windschutzscheibe der letzte Spiegel im optischen System des Head-up-Displays. Um eine optimale optische Performance im virtuellen Bild zu garantieren, sind somit die Anforderungen an die Windschutzscheibe hinsichtlich der Toleranzen prinzipiell identisch mit denen an die optischen Elemente im Head-up-Display. Diese liegen im Bereich von  $10^{-3}$ - $10^{-4}$ mm und stehen im Gegensatz zu den fertigungsbedingten Formtoleranzen bei der Herstellung von Windschutzscheiben in der Größenordnung von  $\pm 10^{-1}$ mm. Erschwerend kommen die Lagetoleranzen der Windschutzscheibe in x-Richtung von bis zu  $\pm 5$ mm im Reflexionsbereich hinzu. Die großen Formtoleranzen liegen hauptsächlich in dem Herstellungsverfahren der

Windschutzscheiben, dem Gravity-Bending (Schwerkraft-Biegen), begründet. Bei diesem Verfahren werden die Windschutzscheibenrohlinge auf ca. 650°C erhitzt und allein durch Ausnutzung der Schwerkraft in die Biegeform eingebracht. Eine andere Herstellungsart von Windschutzscheiben ist das Press-Bending (Press-Biegen). Hier wird die erhitzte Scheibe in die Biegeform gedrückt, was zu geringeren Toleranzen bezüglich der Form, allerdings zu höheren Toleranzen bezüglich der Oberflächenebenheit führt. Darüber hinaus können bei beiden Verfahren im Abkühlprozess Wellen an der Oberfläche der Windschutzscheibe entstehen, die sich auf die Eigenschaft der Scheibe als optisches Element ebenfalls nachteilig auswirken. Eine Verringerung der Fertigungstoleranzen für Windschutzscheiben ist momentan nicht in dem Maße möglich, dass ohne weiteres Einwirken die Scheibe als optisches Element eingesetzt werden kann. Berücksichtigt man, dass die Hardware des Head-up-Displays nicht für jede einzelne Scheibe individuell angefertigt werden kann und dass der Toleranzbereich der Windschutzscheiben nicht wesentlich verringert werden kann, bleibt als Lösung für ein optimales virtuelles Bild nur eine digitale Anpassung der Darstellung auf die im Gesamtsystem vorhandenen optischen Abbildungsfehler – das Warping. Hierbei wird die Darstellung auf der Bildquelle in der Art schrittweise verändert, dass der Einfluss der toleranzbehafteten optischen Elemente die auf dem Display erzeugten Effekte exakt aufhebt. Eine einmalige Justierung einer Paarung aus Head-up-Display und Windschutzscheibe führt somit auch bei unvermeidbaren Toleranzen der Windschutzscheibe zu einem virtuellen Bild mit akzeptabler optischer Performance.

Beim Einsatz der Windschutzscheibe als Combiner für ein Head-up-Display tritt allerdings ein weiteres Problem auf, welches nicht über Warping behoben werden kann. Der Lichtstrahl wird nicht nur beim Eintritt in die Windschutzscheibe am Übergang Luft-Glas, sondern ebenso bei Austritt aus der Windschutzscheibe am Übergang Glas-Luft reflektiert. Diese zwei reflektierten Lichtstrahlen fallen aus unterschiedlichen Positionen in das Fahrerauge, wodurch zwei um  $\Delta z$  versetzte virtuelle Bilder wahrgenommen werden. Die Entstehung dieses Doppelbildes bei einer herkömmlichen Windschutzscheibe ist in Abbildung 9 dargestellt. Die einfachste Möglichkeit, ein solches Doppelbild zu vermeiden, ist eine Überlagerung der beiden entstehenden Bilder. Hierfür müssen die reflektierten Lichtstrahlen in der Entfernung des virtuellen Bildes zum Schnitt gebracht werden, was durch eine keilförmige Gestaltung der Windschutzscheibe realisiert werden kann. Hierfür wird die zwischen den beiden Glasscheiben einer Windschutzscheibe eingefügte PVB-Folie (Polyvinylbutyral) – wie in Abbildung 10 zu sehen ist – in Keilform ausgeführt.



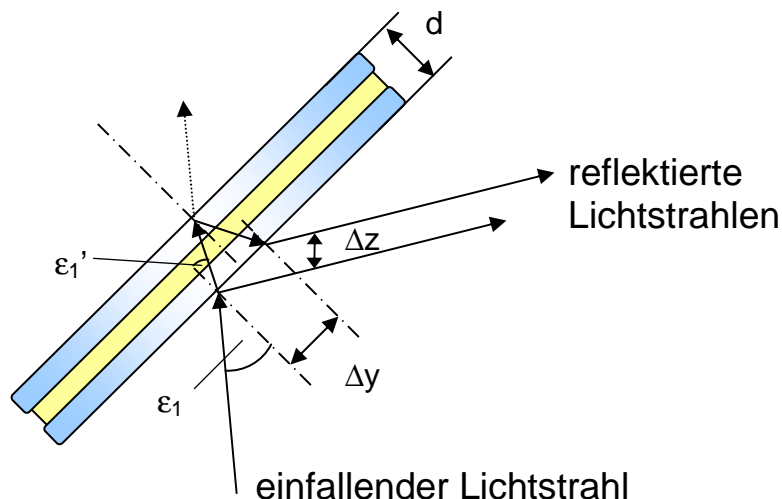


Abbildung 9: Entstehung des Doppelbildes an der Windschutzscheibe

Für eine Berechnung des Keilwinkels seien beispielhaft folgende Daten gegeben:

- Winkel des einfallenden Lichtstrahls auf die Windschutzscheibe:  $\varepsilon_1 = 60^\circ$
- Dicke der Windschutzscheibe:  $d = 8\text{mm}$
- Brechungsindex von Glas:  $n = 1,5$
- Distanz des virtuellen Bildes ab Scheibenoberfläche:  $x = 1500\text{mm}$

Laut Brechungsgesetz gilt:

$$\varepsilon_1' = \arcsin\left(\frac{\sin \varepsilon_1}{n}\right) = 35,26^\circ \quad (3)$$

Die Winkelfunktionen liefern:

$$\Delta y = 2 \cdot d \cdot \tan(\varepsilon_1') = 11,3\text{mm} \quad (4)$$

$$\Delta z = \Delta y \cdot \sin(90^\circ - \varepsilon_1) = 5,65\text{mm} \quad (5)$$

Für eine doppelbildfreie Darstellung im virtuellen Bild ergibt sich somit für den geforderten Winkel  $\delta$  der beiden reflektierten Lichtstrahlen zueinander:

$$\delta = \arcsin\left(\frac{\Delta z}{x}\right) = 0,216^\circ = 13,0' \quad (6)$$

Für die Berechnung des nötigen Keilwinkels  $\gamma$  der Windschutzscheibe wird Abbildung 10 betrachtet. Der prinzipielle Verlauf der Strahlen ist analog zu dem in Abbildung 9, lediglich stehen die beiden Glasscheiben im Keilwinkel  $\gamma$  zueinander, was bei optimaler Auslegung des Keilwinkels nach Formel (6) einen Winkel zwischen den beiden reflektierten Strahlen von  $\delta = 13,0'$  ergibt.

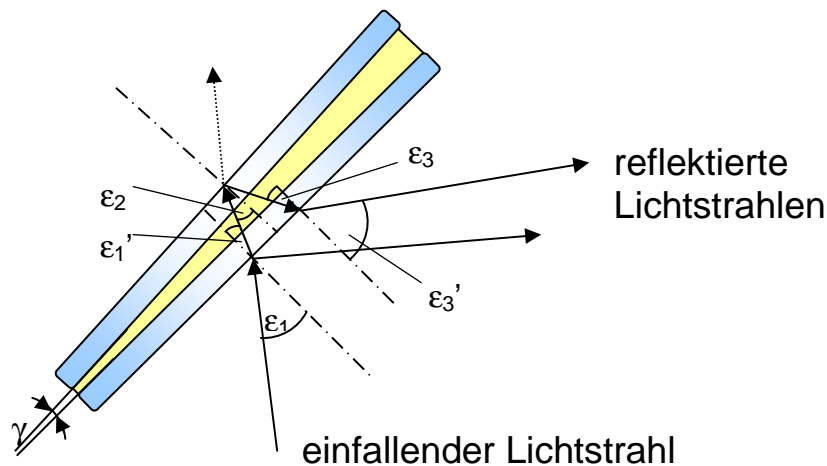


Abbildung 10: Behebung des Doppelbildes mittels Keilfolie

Für die in Abbildung 10 definierten Winkel  $\epsilon_1$  und  $\epsilon_1'$  ist Folgendes festzuhalten:

$$\epsilon_3 = \epsilon_2 + \gamma; \quad \epsilon_2 = \epsilon_1' + \gamma$$

$$\Rightarrow \epsilon_3 = \epsilon_1' + 2 \cdot \gamma \quad (7)$$

Des Weiteren gilt für die reflektierten Strahlen:

$$\epsilon_3' = \epsilon_1 + \delta = 60,216^\circ \quad (8)$$

Laut Brechungsgesetz gilt:

$$\epsilon_3 = \arcsin\left(\frac{\sin \epsilon_3'}{n}\right) = 35,35^\circ \quad (9)$$

Aus Formel (7) folgt somit:

$$\gamma = \frac{\epsilon_3 - \epsilon_1'}{2} = 0,044^\circ = 0,768 \text{ mrad} \quad (10)$$

Somit ergibt sich für das gezeigte Beispiel für einen Keilwinkel von  $\gamma = 0,768\text{mrad}$  eine doppelbildfreie Darstellung im virtuellen Bild des Head-up-Displays, da unter den gegebenen Randbedingungen genau bei diesem Winkel die beiden entstehenden Bilder übereinander liegen. Für jede Auslegung eines Head-up-Displays ist diese Berechnung durchzuführen und die Windschutzscheibe mit dem entsprechenden Winkel in der Keilfolie anzufertigen.

### **2.1.5 Optische Abbildungsfehler**

Die im letzten Kapitel beschriebenen Eigenschaften der Windschutzscheibe führen auf Grund der sich daraus ergebenden Diskrepanz zu den hohen Anforderungen an die optischen Elemente eines Head-up-Displays zu optischen Abbildungsfehlern im virtuellen Bild. Das angesprochene Warming und ein optimiertes Design der Windschutzscheibe mit gleichmäßigen Krümmungen helfen bei einer Verbesserung der optischen Performance im virtuellen Bild. Doch nicht nur die Geometrie der Windschutzscheibe ist Ursache für optische Abbildungsfehler: Für Strahlen, die nicht achsnah sind, treten bei jedem optischen System Abbildungsfehler auf. Für diese komplexe Thematik der Abbildungsfehler soll im Folgenden festgelegt werden, welche Abbildungsfehler auf Grund der charakteristischen Optik in einem Head-up-Display von Bedeutung sind, wie sie gemessen werden können und welche Grenzwerte für die Ausprägung optischer Abbildungsfehler gelten, damit aus Sicht des Betrachters keine qualitativen Mängel im virtuellen Bild sichtbar sind. Diese Grenzwerte dienen später als Zielvorgaben für die Auslegung des kontaktanalogen Head-up-Displays.

#### **Überblick zum Thema optische Abbildungsfehler**

Optische Abbildungsfehler werden in monochromatische und chromatische Abbildungsfehler unterteilt. Monochromatische Abbildungsfehler sind wellenlängenunabhängig und somit unabhängig von der Farbe des Lichtes. Beispiele für monochromatische Abbildungsfehler sind sphärische Aberration, Astigmatismus, Bildfeldwölbung, Koma und Verzeichnung (siehe Abbildung 11). Chromatische Abbildungsfehler sind wellenlängenabhängig, d.h. sie sind abhängig von der Lichtfarbe; charakteristische Beispiele hierfür sind – wie in Abbildung 12 aufgezeigt – der Farblängs- und der Farbquerfehler.

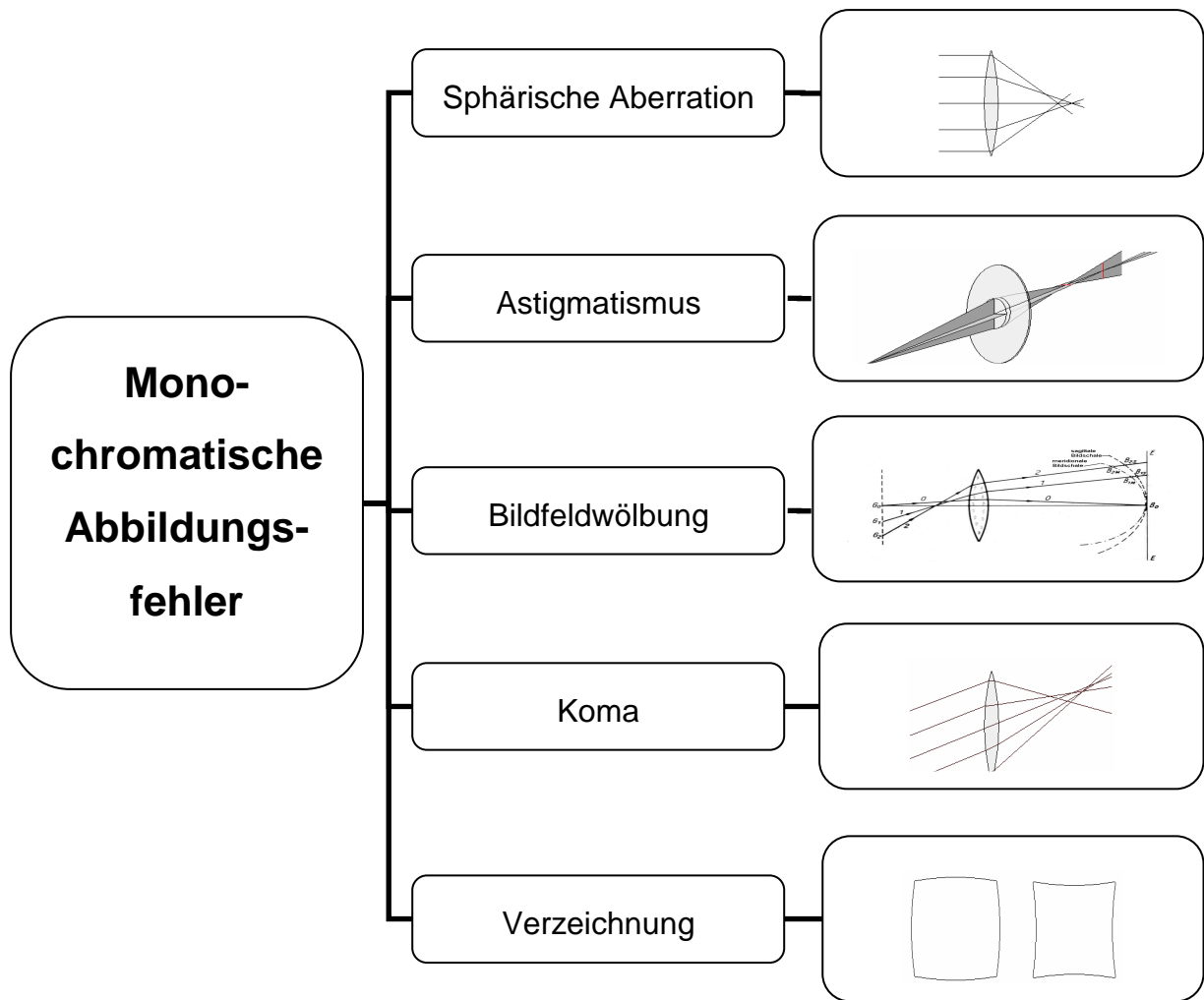


Abbildung 11: Monochromatische Abbildungsfehler

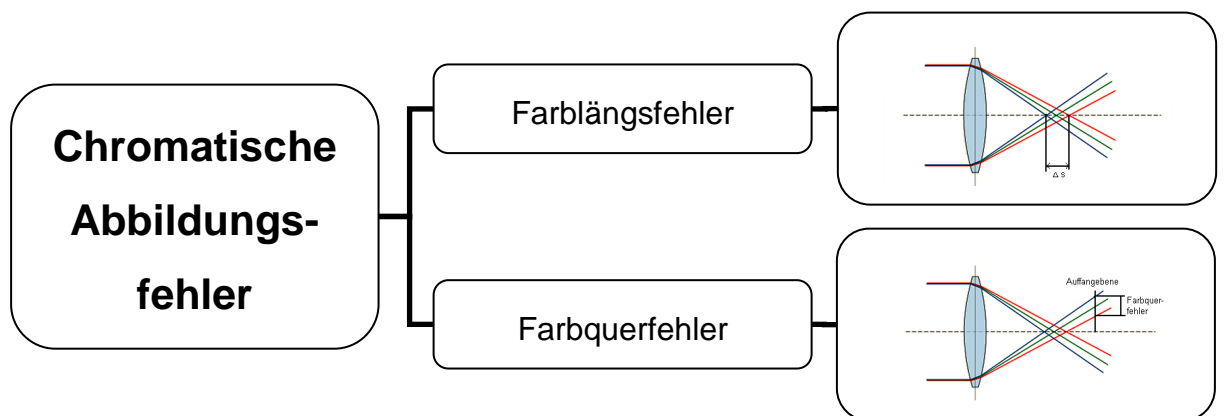


Abbildung 12: Chromatische Abbildungsfehler

Die sphärische Aberration (Öffnungsfehler) beschreibt die Eigenschaft von Strahlen nach Durchlaufen einer Optik, sich nicht in einem Punkt auf der optischen Achse zu treffen. Dieser Versatz vom Brennpunkt ist umso größer, je weiter die einfallenden Strahlen von der optischen Achse entfernt sind (Abbildung 13, links). Die sphärische Aberration wird als rotationssymmetrischer Fehler wahrgenommen; typisches Erscheinungsbild ist ein heller Punkt mit einer Korona, die zu einer Verschlechterung des Kontrastes führt (Abbildung 13, rechts).

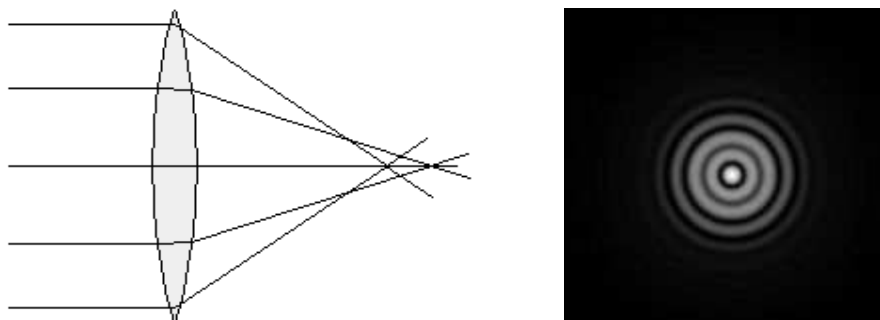


Abbildung 13: Sphärische Aberration (aus [26] (links) und [34] (rechts))

Der Astigmatismus (Punktlosigkeit) tritt prinzipiell bei schräg auf das optische Element einfallenden Strahlen auf. Strahlen in der Meridionalebene schneiden sich in einem anderen Punkt als Strahlen in der Sagittalebene (Abbildung 14, links), was sich in einer unterschiedlichen Brennpunktentfernung von horizontalen und vertikalen Linien auswirkt (Abbildung 14, rechts) und somit als Unschärfe wahrgenommen wird. Der gleiche Effekt tritt ein, wenn das optische Element in horizontaler Richtung eine andere Krümmung aufweist als in vertikaler Richtung, wie es beispielsweise bei der Windschutzscheibe eines Fahrzeugs der Fall ist.

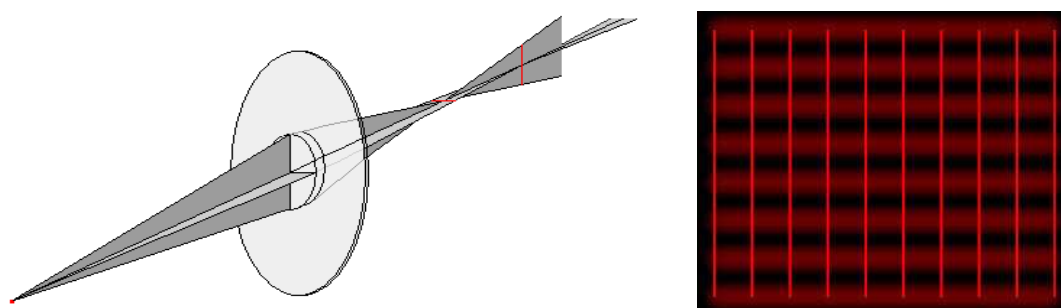


Abbildung 14: Astigmatismus (aus [26])

Die Bildfeldwölbung beschreibt ein optisches Phänomen, bei welchem achsferne Punkte näher an der Hauptebene abgebildet werden als achснаhe (Abbildung 15, links). Somit erscheint die optische Abbildung nicht eben, sondern zum optischen Element hin gekrümmt, was auf Grund des unterschiedlichen Akkommodationsabstandes bedeutet, dass ein Blickwechsel von der Bildmitte zum Randbereich des Bildes einen Akkommodationsvorgang zur Folge hat. Dies hat auf Grund des Brennebenenversatzes zur Folge, dass nie das ganze Bild scharf gesehen werden kann, sondern entweder der Randbereich oder die Mitte. Ein Teil des Bildes wird somit immer unscharf wahrgenommen (Abbildung 15, rechts: Blick fokussiert auf das Bildzentrum). Dieser Abbildungsfehler ist proportional zur Linsenkrümmung und zum Quadrat der Bildhöhe.

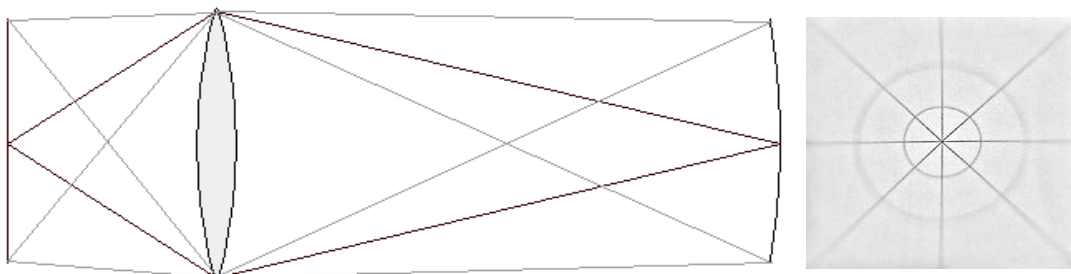


Abbildung 15: Bildfeldwölbung (aus [26] (links) und [31] (rechts))

Die Koma (Asymmetriefehler) tritt bei schrägem Einfall des Strahlenbündels auf das optische Element auf (Abbildung 16, links). Die Entstehung begründet sich ähnlich derer bei der sphärischen Aberration. Die Effekte im Bild sind jedoch auf Grund des schrägen Einfallswinkels stärker und haben eine andere Gestalt. Unterschiedlich auf das optische Element einfallende Lichtstrahlen erzeugen unterschiedliche Bilder (Abbildung 16, rechts). Die außen liegenden Bilder weisen eine ovale Form mit unscharf verlaufender Seite (Kometenform) auf. (nach [28])

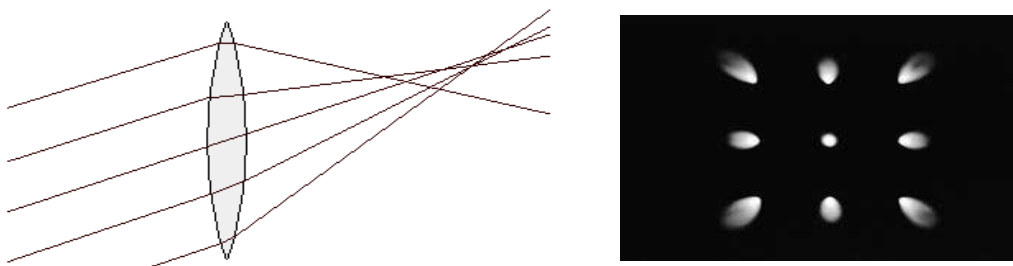


Abbildung 16: Koma (aus [21] (links) und [31] (rechts))

Die Verzeichnung (Distorsion) ist ein Abbildungsfehler, der eine lokale Abweichung des Abbildungsmaßstabes auf Grund einer Veränderung der Vergrößerung in Abhängigkeit des Abstandes von der optischen Achse hervorruft. Sichtbar wird dieser Effekt dadurch, dass gerade Linien am Rand der Abbildung gekrümmt wiedergegeben werden. Sind die Linien nach innen gekrümmt, wird die Verzeichnung als kissenförmig, sind sie nach außen gekrümmt als tonnenförmig bezeichnet (Abbildung 17).

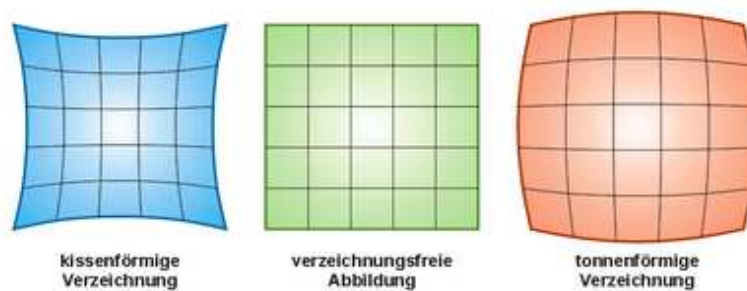


Abbildung 17: Verzeichnung (aus [35])

Chromatische Aberrationen entstehen durch die Eigenschaft, dass Licht unterschiedlicher Wellenlänge an optischen Elementen unterschiedlich stark gebrochen wird. Bei der Betrachtung der Auswirkung dieses Phänomens unterscheidet man zwei Fälle. Der Farblängsfehler (longitudinale chromatische Aberration) beschreibt den Unterschied  $\Delta s$  der Schnittweiten zwischen den minimalen und maximalen Wellenlängen im gewählten Spektrum (Abbildung 18, links). Der Farbquerfehler tritt in der Projektionsebene in vertikaler Richtung auf, was zu Farbänderungen in der Abbildung führt (Abbildung 18, rechts).

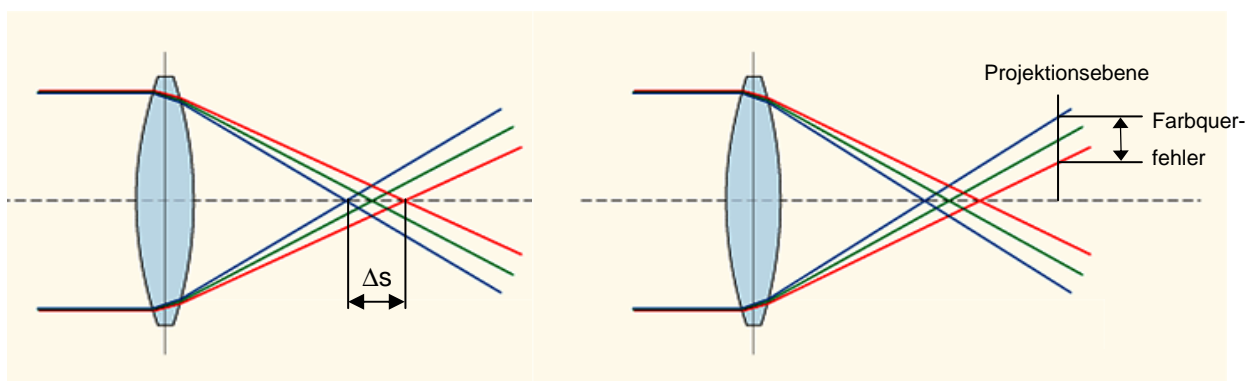


Abbildung 18: Chromatische Aberrationen (nach [17])

### Erzeugung und Messung von Abbildungsfehlern im Versuchsstand

Um Aussagen über maximal tolerierbare Ausprägungen der Abbildungsfehler im Head-up-Display erhalten zu können, bedarf es subjektiver Bewertungen dieser Abbildungsfehler. Hierfür dient ein eigens für diese Untersuchung konzipierter Versuchsstand, der es ermöglicht, Abbildungsfehler in verschiedenen Ausprägungsstufen im virtuellen Bild eines Head-up-Displays reproduzierbar zu erzeugen, zu messen und zu bewerten. Dieser Versuchsstand besteht aus einem Head-up-Display, einer Windschutzscheibe und einem Fahrzeugsitz (Abbildung 19). Die Einzelkomponenten sind zueinander beweglich angebracht, um Anordnungen aus Realfahrzeugen exakt nachbilden zu können. Im ersten Schritt müssen die Voraussetzungen geschaffen werden, dass im Versuchsstand die zu bewertenden Abbildungsfehler in verschiedenen Ausprägungsstufen reproduzierbar sichtbar gemacht werden können.

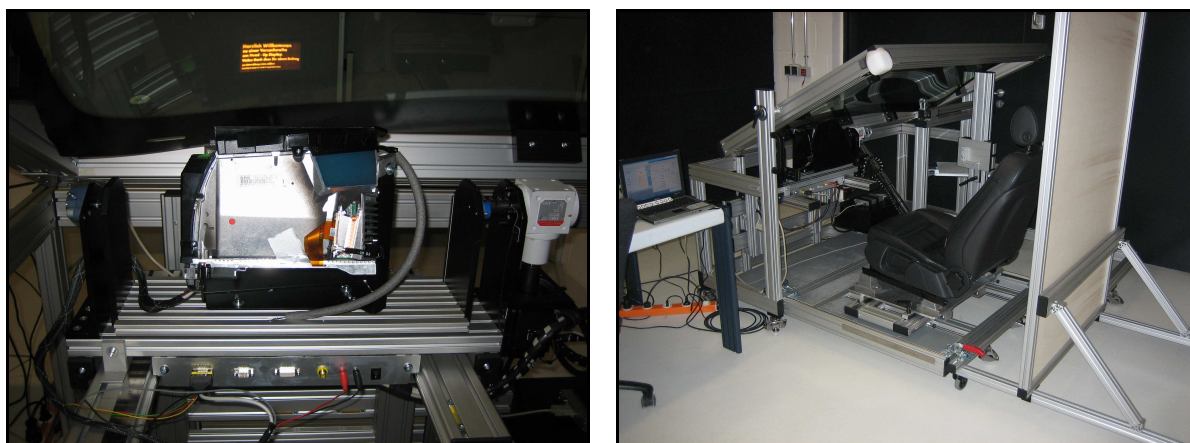
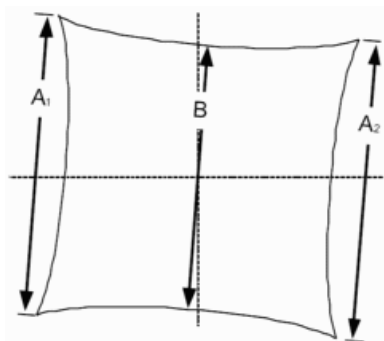


Abbildung 19: Versuchsstand zur Thematik Abbildungsfehler im Head-up-Display

Erfahrungen aus der Serienentwicklung und erste Versuche im Versuchsstand zeigten, dass die wesentlichen Abbildungsfehler bei Head-up-Displays Doppelbild, Verzeichnung und Astigmatismus sind. Da die Darstellung des virtuellen Bildes im Versuchstand doppelbildfrei ist und durch eine Positionsänderung der Scheibe in Relation zum Head-up-Display keine reine Doppelbilderzeugung möglich ist, wird auf der Bilderzeugungseinheit eine Darstellung implementiert, die bereits ein Doppelbild aufweist. Die Ausprägung dieses Doppelbildes ist somit variabel wählbar und über den jeweiligen Pixelversatz messbar. Auch die zu bewertende Verzeichnung wird direkt auf dem Display erzeugt und als TV-Verzeichnung gemessen (siehe Abbildung 20).





$$\text{TV - Verzeichnung} = \frac{A - B}{B} \cdot 100 [\%]$$

$$\text{mit } A = \frac{A_1 + A_2}{2}$$

Abbildung 20: TV-Verzeichnung (nach [30])

Um verschiedene Ausprägungen des Astigmatismus im Head-up-Display darstellen zu können, bedarf es einer Änderung der Oberflächengeometrien der optischen Elemente, da der Astigmatismus im Head-up-Display durch die unterschiedlichen Krümmungen der Scheibenoberfläche um die vertikale und die horizontale Achse entsteht. Somit müsste für jede zu untersuchende Ausprägungsstufe dieses Abbildungsfehlers ein neuer asphärischer Spiegel oder eine variierte Windschutzscheibe angefertigt werden. Da dies zu kosten- und zeitintensiv ist, wurde nach einer praktikableren Methode der reproduzierbaren Astigmatismuserzeugung gesucht. Eine sinnvolle Methode hierfür ist die Veränderung der relativen Lage von Head-up-Display und Windschutzscheibe. Diese Veränderung wird durch eine rotatorische Bewegung des Head-up-Displays um die y-Achse im Fahrzeugkoordinatensystem realisiert, was zur Folge hat, dass sich der relevante Bereich der Reflexion auf der Windschutzscheibe verschiebt und somit auf Grund der ungleichmäßigen Oberflächenkrümmung der Windschutzscheibe verschiedene Ausprägungen des Astigmatismus auftreten. Die Messung des jeweiligen Astigmatismus geschieht mit einer Spiegelreflexkamera von Minolta, die über einen Schnittbildindikator zum manuellen Fokussieren und einer detaillierten Skala zum Ablesen der Entfernung der eingestellten Fokusebene verfügt. Zur Bestimmung des Astigmatismus im virtuellen Bild werden die Entfernungen der Fokusebenen von horizontalen und vertikalen Linien im virtuellen Bild bestimmt. Die Differenz dieser Fokusebenen, also der Brennebenenversatz zwischen horizontalen und vertikalen Linien ist ein Maß für den Astigmatismus im virtuellen Bild und soll ihn im Folgenden beschreiben.

**Versuchsreihe zur Ermittlung ergonomischer Grenzwerte von Abbildungsfehlern im Head-up-Display**

Basierend auf der Möglichkeit, reproduzierbare Abbildungsfehler im Head-up-Display zu erzeugen und zu messen, werden nun im Probandentest Aussagen zur Qualität von virtuellen Bildern mit verschiedenen Ausprägungen von Abbildungsfehlern gemacht. Ziel ist die Formulierung von ergonomischen Grenzwerten für optische Abbildungsfehler im Head-up-Display, deren Einhaltung ein beeinträchtigungsfreies Ablesen der Information im virtuellen Bild garantiert. Hierfür werden 40 Probanden virtuelle Bilder mit unterschiedlichen Ausprägungen des Doppelbildes, der Verzeichnung und des Astigmatismus zur Beurteilung im Versuchsstand gezeigt. Aufgabe der Probanden ist es, eine Aussage zur empfundenen Qualität der Darstellung zu machen. Die Beurteilungsskala ist vierstufig: 1 = sehr gut, 2 = gut, 3 = mäßig, 4 = schlecht. Die zu bewertenden Darstellungen sind in Abbildung 21 zu sehen. Zur Beurteilung des Doppelbildes werden die Darstellungen 2, 4, 6, 7 und 8 mit jeweils unterschiedlichen Ausprägungen des Doppelbildes verwendet; die Beurteilung der Verzeichnung geschieht an Hand der Graphiken 3, 4, 5, 6, 7 und 8; die Ausprägung des Astigmatismus wird in Graphik 1 variiert.

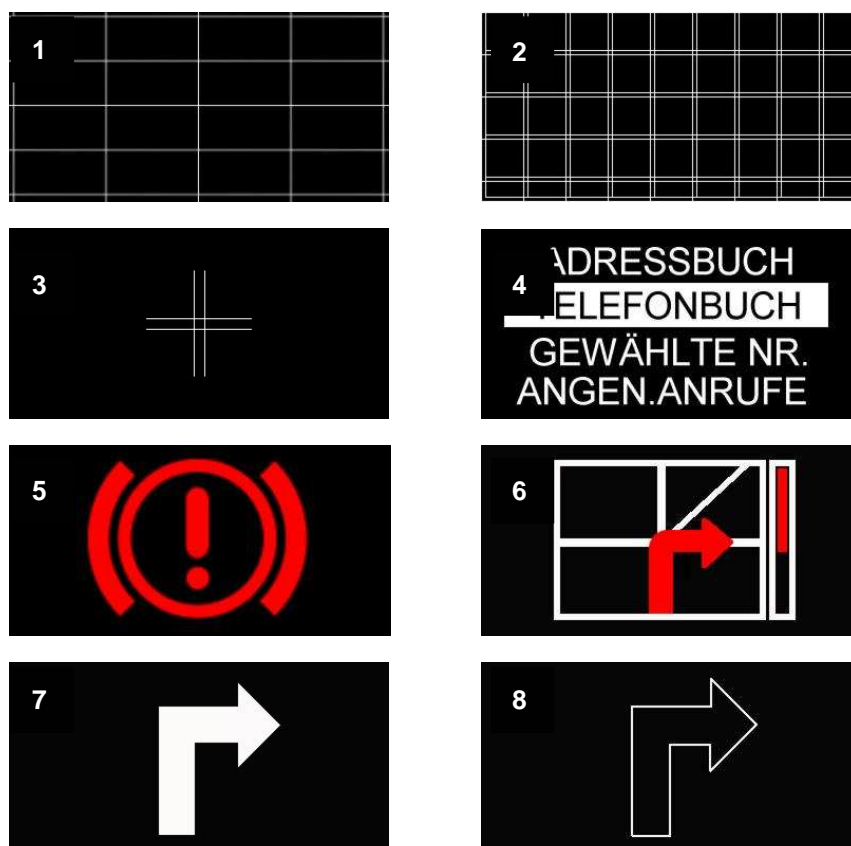


Abbildung 21: Graphiken zur Bewertung optischer Abbildungsfehler im Head-up-Display

Die Auswertung ergab für das Doppelbild ein differenziertes Ergebnis. Für Graphiken mit einer Linienbreite von 1 Pixel ist ein Doppelbild im Abstand von 0,8' bereits als kritisch anzusehen; für Graphiken mit größeren Strichstärken kann von einem Grenzwert von 1,6' ausgegangen werden. Alle größeren Abstände von Doppelbildern werden vom Fahrer als zwei getrennte Darstellungen wahrgenommen und somit abgelehnt. Das Ergebnis für die Graphiken mit geringer Strichstärke deckt sich auch mit dem Wert des Auflösungsvermögens eines menschlichen Auges, der in etwa zwischen 0,5' und 1' liegt. Für den Astigmatismus wird ein Brennebenenversatz ab 150mm als störend empfunden. Für Werte darunter werden der Brennebenenversatz und die damit verbundene Unschärfe vom Fahrer nicht erkannt oder nicht als störend empfunden. Die Grenzwerte für die TV-Verzeichnung (vgl. Abbildung 20, Seite 22) liegen für rechtwinklige Graphiken bei 1%. Für andere, nicht rechtwinklige Geometrien (z.B. Text) wird eine Verzeichnung weniger intensiv wahrgenommen; der Grenzwert liegt hier bei 2%. Die Einhaltung dieser Grenzwerte stellt eine optimale Ablesbarkeit und optische Performance im virtuellen Bild sicher. Für die Auslegung des kontaktanalogen Head-up-Displays werden die hier ermittelten Werte als Grundlage verwendet.

## 2.2 Aufbau aktueller Head-up-Displays

In der aktuellen Produktpalette der Automobilhersteller findet sich lediglich eine geringe Anzahl an Fahrzeugmodellen, für die ein Head-up-Display angeboten wird. Aufbau und technische Daten dieser momentan existierenden Head-up-Displays in Kraftfahrzeugen geben im Folgenden – ausgehend von der Luftfahrt – einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik.

### Luftfahrt

Der Anfang der Head-up-Display-Technologie liegt in der militärischen Luftfahrt. Hier wurde in den späten 1950er Jahren erstmals ein Head-up-Display als Visiereinrichtung für Bordwaffen (auch Reflexvisier genannt) eingesetzt. Die Information in Form eines Cursors wurde bei diesen ersten Head-up-Displays mittels Kathodenstrahlröhren erzeugt. In den frühen 1960er Jahren ergänzte man diese Anzeigen um Flugdaten. Diese Erweiterung der Informationen im Head-up-Display brachte beispielsweise bei Landeanflügen deutliche Vorteile, da alle wesentlichen Flugdaten vom Piloten ohne Blickabwendung wahrgenommen werden konnten. In den frühen 1980ern begann man Head-up-Displays in der zivilen Luftfahrt einzusetzen. Erstmals wurden hier Head-up-Displays in den Flugzeugen vom Typ

MD-80 verbaut; die angezeigte Information war redundant zur Anzeige auf den herkömmlichen Displays. Als Unterschied zu Head-up-Displays in Kraftfahrzeugen ist zu erwähnen, dass die in der Luftfahrt eingesetzten Systeme plane Combiner verwenden.

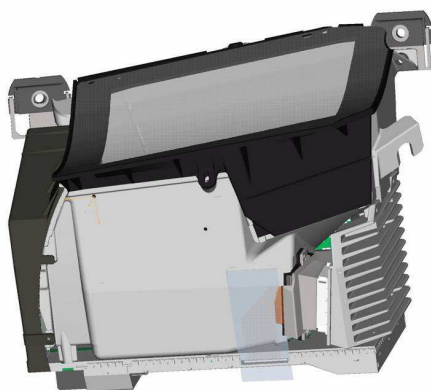
### **GM Konzern**

In Kraftfahrzeugen begann der Einsatz von Head-up-Displays in den 1980er Jahren. Für den europäischen Markt war ein Head-up-Display erstmals im Jahr 2000 im Modell Corvette C5 von Chevrolet auf dem Markt erhältlich. Als Bildquelle wird hier ein segmentiertes grünes Vakuum-Fluoreszenz-Display eingesetzt. Die 2-Spiegel-Optik erzeugt eine Eyebox mit den Maßen 90mm Breite und 50mm Höhe – bei Berücksichtigung der Möglichkeit zur Spiegelverstellung ergeben sich 280mm Höhe. Die Helligkeitsregelung erfolgt bei diesem System nicht automatisch entsprechend der Umgebungshelligkeit, sondern muss von Fahrer auf die jeweilige Umgebungssituation angepasst werden. Das Nachfolge-Modell (Corvette C6) hat ein ähnliches System verbaut. Die Eyebox bemaßt sich hier jedoch 200mm in der Breite und 50mm in der Höhe (mit Spiegelverstellung 250mm Höhe). Des Weiteren bietet die Marke Cadillac im Modell STS ein vollfarbiges Head-up-Display an. Dieses 1-Spiegel-System enthält als Bildquelle ein LCD-TFT mit einer Auflösung von 230 x 263 Pixel<sup>2</sup>. Die Eyebox besitzt eine Breite von 130mm und eine Höhe von 40mm (mit Spiegelverstellung 125mm Höhe). Das virtuelle Bild befindet sich in 2290mm Entfernung vom Augpunkt und hat eine Breite von 116mm und eine Höhe von 82mm. Der Cadillac XLR ist serienmäßig mit einem monochromen Head-up-Display ausgestattet; es ist technisch ähnlich zu dem System im Modell Grand-Prix GXP von Pontiac. Genauere Daten zu diesen monochromen Systemen liegen nicht vor, da diese Fahrzeuge nicht für eine Vermessung zur Verfügung standen.

### **BMW**

Seit 2003 ist ein TFT-basiertes Head-up-Display in der 5er- und 6er-Reihe von BMW erhältlich (Abbildung 22). Die bilderzeugende Einheit in diesem System ist ein transmissives TFT-Farb-LC-Display mit 360 x 180 Bildpunkten und einer 1,6-Zoll-Bilddiagonalen. Die Beleuchtung besteht aus einem LED-Array mit 128 LEDs und erzielt eine maximale Leuchtdichte von 500.000 bis 700.000cd/m<sup>2</sup>. Die maximale Leuchtdichte der Darstellung im virtuellen Bild liegt bei 5.000 bis 7.000cd/m<sup>2</sup>, d.h. in etwa 1% der Leuchtdichte des LED-Arrays ist im virtuellen Bild noch sichtbar (vgl. Abbildung 5, Seite 8). Die Helligkeitssteuerung des Displays

erfolgt automatisch über den Lichtsensor; es kann im i-Drive-System zusätzlich eine fahrerspezifische Grundhelligkeit der Anzeige eingestellt werden, um individuellen Helligkeitsempfindungen gerecht zu werden. Das Spiegelsystem besteht aus vier Spiegeln (drei asphärische und ein planer Spiegel), die virtuelle Bilddistanz beträgt in etwa 2,2m; das virtuelle Bild hat eine Breite von 180mm und eine Höhe von 90mm. Die Eyebbox ist nicht einstellbar, d.h. der letzte Spiegel im Strahlengang ist nicht beweglich gelagert. Das Bauvolumen des Head-up-Displays beträgt in etwa 4,2 Liter. Seit 2007 bietet BMW auch im Modell X5 ein Head-up-Display an; genauere Daten zu diesem System liegen nicht vor.



*Abbildung 22: Head-up-Display der BMW 5er- und 6er-Reihe*

### **Citroën**

Citroën bietet für die beiden oberen Ausstattungsvarianten des Modells C6 (Pallas und Exclusive) ein Head-up-Display als Serienausstattung an. Als Bildquelle kommt ein grünes segmentiertes Vakuum-Fluoreszenz-Display zum Einsatz. Das 1-Spiegel-System erzeugt eine Eyebbox mit den Ausmaßen 130mm Breite und 60mm Höhe (mit Spiegelverstellung 205mm Höhe).

Die überschaubare Auflistung zeigt, dass das Angebot an Fahrzeugen mit Head-up-Display auf dem europäischen Markt sehr gering ist. Die verschiedenen Eyebbox-Größen und -Positionen erklären sich mit den unterschiedlichen anthropometrischen Bedingungen in den einzelnen Fahrzeugen. Des Weiteren weisen die angebotenen Systeme deutlich unterschiedliche Größen des virtuellen Bildes auf, was jedoch immer in Zusammenhang mit den implementierten Anzeigen zu sehen ist. Hierzu gibt das folgende Kapitel einen Einblick in die Anzeigehalte aktueller Head-up-Displays.

## 2.3 Anzeigehalte aktueller Head-up-Displays

Die momentan auf dem Markt erhältlichen Head-up-Displays unterscheiden sich neben der technischen Umsetzung auch im implementierten Anzeigekonzept. Die unterschiedlichen Technologien bieten ein unterschiedliches Maß an Freiheiten bei der Auslegung des Anzeigekonzeptes, beispielsweise hinsichtlich der Detailliertheit oder Farbgestaltung der Darstellungen. Im Folgenden werden Anzeigen in Head-up-Displays vorgestellt – aufgegliedert nach den umgesetzten Anzeigehalten.

### 2.3.1 Geschwindigkeitsanzeigen

Alle Geschwindigkeitsanzeigen in aktuellen Head-up-Displays besitzen digitale Form. Im Modell Corvette von Chevrolet existieren drei Modi („Rennbahn 1“, „Rennbahn 2“, „Strasse“), wobei die Darstellung des Digitaltachos innerhalb dieser Modi variiert. Die Größe der Darstellung und die Anzeige der Maßeinheit (Abbildung 23) ist in den Modi „Rennbahn 1“ und „Rennbahn 2“ abhängig von den zusätzlich zugeschalteten Anzeigen im Head-up-Display. Bei ausgeschalteter Querschleunigungsanzeige ist die Darstellung größer und die Maßeinheit mit der Maßzahl unten bündig; bei zugeschalteter Querschleunigungsanzeige verkleinert sich die Anzeige des Digitaltachos und die Maßeinheit ist mit der Maßzahl oben bündig. Im Modus „Strasse“ ist die digitale Geschwindigkeitsanzeige im oberen rechten Bereich des virtuellen Bildes, wobei die Maßeinheit mit dem unteren Ende der Maßzahl bündig ist. Erfolgt durch Betätigung der Sendersuche am Radiogerät eine Anzeige der aktuellen Frequenz, verkleinert sich der Digitaltacho und nimmt nur noch den oberen rechten Bereich des virtuellen Bildes ein. Eine Systematik in der relativen Lage zu anderen Anzeigen im Head-up-Display kann nicht erkannt werden. Die Geschwindigkeitsanzeige im Cadillac XLR ist mittig positioniert; die Maßeinheit ist unten mit der Maßzahl bündig. Bei Einblendung eines weiteren Inhaltes im Head-up-Display verkleinert sich die Geschwindigkeitsanzeige schrittweise nach oben links (Abbildung 24). Ansonsten existieren keine Variationen der Geschwindigkeitsanzeige. Beim Cadillac STS befindet sich die Anzeige des Digitaltachos ebenso mittig im virtuellen Bild; auch hier ist die Maßeinheit unten mit der Maßzahl bündig (Abbildung 25, links). Bei zusätzlicher Navigationsanzeige verkleinert sich die Geschwindigkeitsanzeige und wird mittig am rechten Rand des virtuellen Bildes angezeigt (Abbildung 25, rechts). Die Anzeige des Digitaltachos im Head-up-Display des Pontiac Grand-Prix erfolgt mittig am oberen Rand des virtuellen Bildes, wobei auch hier die Maßeinheit unten mit der Maßzahl bündig angezeigt wird (Abbildung 26, links). Bei gleichzeitiger Anzeige anderer Informationen verkleinert sich der Digitaltacho (Abbildung 26, rechts).



Abbildung 23: Anzeigen im Head-up-Display der Corvette von Chevrolet (Modell C6): Modus „Rennbahn 1“ (oben), Modus „Rennbahn 2“ (mittig), Modus „Strasse“ (unten)



Abbildung 24: Anzeigen im Head-up-Display des Cadillac XLR



Abbildung 25: Anzeigen im Head-up-Display des Cadillac STS



Abbildung 26: Anzeigen im Head-up-Display des Pontiac Grand-Prix

Die Geschwindigkeitsanzeige im Head-up-Display der Standardmodelle der 5er- und 6er-Reihe von BMW befindet sich in der linken Hälfte des virtuellen Bildes am unteren Rand (Abbildung 27, links). Es gibt in den Standardmodellen der 5er- und 6er-Reihe von BMW keine unterschiedlichen Modi, d.h. es existieren keine Varianten bezüglich Lage und Darstellungsart der Geschwindigkeitsanzeige, sie kann jedoch über ein Setup-Menü im i-Drive-System dauerhaft ausgeblendet werden. Bei den Modellen M5 und M6, für die ein Head-up-Display serienmäßig angeboten wird, kann der Fahrer den Standardmodus oder den M-Modus wählen. Im M-Modus (Abbildung 27, rechts) befindet sich die Geschwindigkeitsanzeige am rechten unteren Rand des virtuellen Bildes. Im Vergleich zu den Geschwindigkeitsanzeigen in den Systemen von GM variiert die Größe der Anzeige nicht; der Anzeigort ist – innerhalb eines Modus – immer identisch.



Abbildung 27: Anzeigen im Head-up-Display der 5er- und 6er-Reihe von BMW: Standardmodus (links), M-Modus (rechts)

Die Geschwindigkeitsanzeige im Head-up-Display des Citroën C6 befindet sich mittig im virtuellen Bild (Abbildung 28) und nimmt einen Großteil des virtuellen Bildes ein. Es stehen keine unterschiedlichen Anzeigemodi zur Verfügung; somit ist Anzeigort und -größe nicht variabel. Die Maßeinheit der Geschwindigkeitsanzeige wird nicht dargestellt.





Abbildung 28: Anzeigen im Head-up-Display des Citroën C6

### 2.3.2 Anzeigen von Geschwindigkeitsregelanlagen (GRA)

Im GM-Konzern sind Anzeigen von Geschwindigkeitsregelanlagen beim Cadillac XLR und STS und beim Pontiac Grand-Prix GXP vorhanden. Beim Cadillac STS sind die Anzeigen für das ACC-System im unteren und oberen Bereich des virtuellen Bildes angebracht (Abbildung 25, links). Hierbei ist die Darstellung des eigenen und des vorausfahrenden Fahrzeugs horizontal am unteren Rand des virtuellen Bildes umgesetzt und somit inkompatibel zur realen Situation. Die Sollgeschwindigkeit und die Warnanzeige bei Unterschreiten des kritischen Abstandes sind oben mittig angebracht. Beim Cadillac XLR und beim Pontiac Grand-Prix GXP sind die Informationen bezüglich ACC bzw. der herkömmlichen Geschwindigkeitsregelanlage am unteren Rand des virtuellen Bildes angebracht (Abbildung 26, rechts). Der Cadillac XLR verfügt zusätzlich über eine Anzeige zur Übernahmeaufforderung durch den Fahrer bei Überschreitung einer bestimmten Kritikalität bezüglich des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug (rotes Symbol, ähnlich Cadillac STS). Die Anzeige der gewählten Sollgeschwindigkeit der Geschwindigkeitsregelanlage ist beim Pontiac Grand-Prix GXP in der unteren Zeile des virtuellen Bildes dargestellt (Abbildung 26, rechts).

Bei der 5er- und 6er-Reihe von BMW werden – je nach Verbauzustand – Informationen zur Geschwindigkeitsregelanlage oder zum ACC im Head-up-Display angezeigt. Positioniert ist diese Anzeige rechts neben der digitalen Geschwindigkeitsanzeige (Abbildung 29). Die GRA-Anzeige (Abbildung 29, links) besteht lediglich aus der Setzgeschwindigkeit; für den Systemzustand „Standby“, d.h. die Geschwindigkeit ist über die Resume-Funktion anwählbar, ist die Darstellungsfarbe Orange; für den Systemzustand „GRA aktiv“ ist die Darstellungsfarbe Grün. Die ACC-Anzeige (Abbildung 29, rechts) besteht aus zwei Symbolen. Eine perspektivische Anzeige mit der Information zum Status der Erkennung eines vorausfahrenden Fahrzeugs ist für den Fall einer freien Fahrt als orange Fahrzeugsilhouette, für den Fall der Folgefahrt als ausgefüllte orange

Fahrzeuggraphik dargestellt. Die Anzahl der dargestellten perspektivischen Balken unter dem Fahrzeugsymbol zeigt die gewählte Zeitlücke des ACC an. Im Falle einer Übernahmeaufforderung wechselt die Darstellungsfarbe auf Rot. Zweiter Teil der Anzeige ist die gewählte Setzgeschwindigkeit, welche sich rechts neben der beschriebenen Anzeige befindet. Sie ist – analog zur Anzeige der GRA – orange für den Zustand „Standby“ und grün für den Zustand „ACC aktiv“. Im M-Modus des Head-up-Displays erfolgt keine Anzeige der Geschwindigkeitsregelanlage; ACC ist für die Modelle M5 und M6 nicht erhältlich.



Abbildung 29: GRA- und ACC-Anzeige im Head-up-Display in der 5er- und 6er-Reihe von BMW

Im Citroën C6 ist am linken Rand des virtuellen Bildes eine perspektivische Anzeige für ein ACC-System vorgehalten (Abbildung 28); momentan wird jedoch im Citroën C6 nur eine herkömmliche Geschwindigkeitsregelanlage angeboten, d.h. die Anzeige ist bei aktuellen Fahrzeugen nicht in Betrieb.

### 2.3.3 Navigationsanzeigen

Die Navigationsanzeigen in aktuellen Head-up-Displays unterscheiden sich inhaltlich nur gering. Beim Chevrolet Corvette und bei den Modellen XLR und STS von Cadillac wird ein Navigationspfeil, der Straßename und die Entfernung bis zur nächsten Aktion (Balken und Distanzangabe) angezeigt (Abbildung 25, rechts), wobei eine farbliche Darstellung nur für den Cadillac STS umgesetzt ist. Auf Höhe der Anzeige des Digitaltachos wird im linken Teil des virtuellen Bildes die Pfeilsymbolik dargestellt. Für den Straßennamen werden zwei Zeilen unmittelbar unter dieser Anzeige über die gesamte Breite des virtuellen Bildes verwendet; die Distanzangabe und die Balkensymbolik sind in der untersten Zeile positioniert; die Balkensymbolik wird quer zur Fahrtrichtung abgebildet, was nicht den Vorgaben der Kompatibilität entspricht. Beim Cadillac STS werden Pfeilsymbolik, Distanzangabe und Balkensymbolik in gelb, der Straßename in blau dargestellt. Für das

Head-up-Display im Pontiac Grand-Prix GXP ist keine Navigationsanzeige vorgesehen.

Die Navigationsanzeige in der 5er- und 6er-Reihe von BMW setzt sich aus der Pfeildarstellung, dem Straßennamen und der Entfernung bis zur nächsten Aktion (Balken und Distanzangabe) zusammen. Positioniert sind diese Anzeigen im oberen Teil des virtuellen Bildes (Abbildung 29). Links befindet sich die Pfeildarstellung, die bei nahe aufeinander folgenden Abzweigungen eine Vorausschau auf die der nächsten Aktion folgenden zeigt. Mittig positioniert ist der Balken zur Visualisierung der Entfernung bis zur nächsten Aktion, woran sich unten rechts die digitale Distanzangabe anschließt. Der Straßename ist darüber angeordnet und kann im Bedarfsfall zwei Zeilen einnehmen. Sämtliche Navigationsanzeigen in diesem Head-up-Display besitzen die Darstellungsfarbe orange. Für den Fall einer Off-road-Navigation wird lediglich ein Pfeil, der die Richtung des Navigationszieles anzeigt, dargestellt. Im M-Modus des Head-up-Displays ist keine Navigationsanzeige vorgesehen.

Im Citroën C6 befindet sich die Navigationsanzeige am rechten Rand des virtuellen Bildes. Es wird lediglich der Richtungspfeil für die nächste Aktion angezeigt; der Ort der nächsten Aktion wird als Kreis, die Strecke dorthin als segmentiertes Trapez dargestellt (Abbildung 28). Es können 13 verschiedene Richtungen ausgehend vom Ort der nächsten Aktion angezeigt werden; eine Anzeige des Straßennamens erfolgt nicht.

### 2.3.4 Statusanzeigen und Warnungen

Im den Modi „Rennbahn 1“ und „Rennbahn 2“ des Head-up-Displays im Chevrolet Corvette kann eine der Anzeigen Öltemperatur, Tankinhalt und Kühlmittelstand dazugeschaltet werden. Die jeweilig ausgewählte Anzeige befindet sich am rechten Rand des virtuellen Bildes (Abbildung 30).



*Abbildung 30: Anzeige des Tankinhaltes im Modus „Rennbahn 2“ beim Head-up-Display im Chevrolet Corvette*

Im Head-up-Display des Pontiac Grand-Prix GXP befinden sich im oberen Bereich des virtuellen Bildes die Kontrollleuchten für den Fahrtrichtungsanzeiger und für das Fernlicht, wobei die Positionierung der Fernlichtkontrollleuchte von der Darstellungsgröße der digitalen Geschwindigkeitsanzeige anhängig ist (Abbildung 26). Des Weiteren werden im unteren Bereich des virtuellen Bildes die Position des Getriebewählhebels und das Einsetzen der Traktionskontrolle angezeigt.

BMW zeigt im Head-up-Display der 5er- und 6er-Reihe in der oberen Hälfte des virtuellen Bildes Check-Control-Meldungen, wie beispielsweise die Glatteiswarnung, die Gurtwarnung oder den Hinweis auf fälligen Service oder auf eine geöffnete Türe an. Das zur Warnung gehörende gelbe oder rote Symbol befindet sich auf der linken Seite, der erklärende orange Text liegt rechts daneben (Abbildung 31). Die Warnungen verdrängen die Navigationsanzeigen, sind jedoch temporär beschränkt.

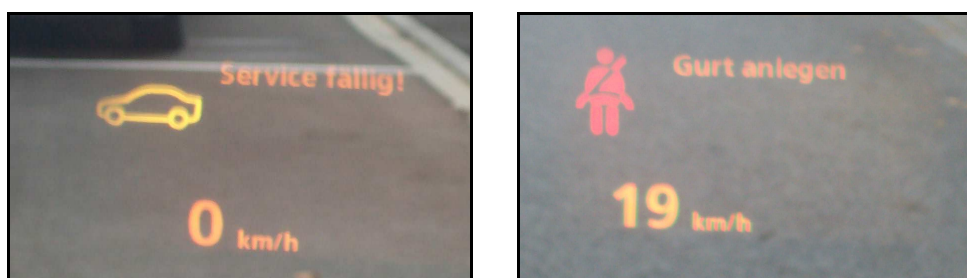


Abbildung 31: Check-Control-Meldungen im Head-up-Display beim BMW der 5er- und 6er-Reihe

Im Head-up-Display des Citroën C6 erscheint die Kontrollleuchte für aktiviertes Fernlicht am unteren Rand des virtuellen Bildes; rechts daneben erscheint im Falle einer fälligen Service-Inspektion der Schriftzug „SERVICE“. Über der Geschwindigkeitsanzeige befinden sich links die Tankwarnung und rechts die ESP-Kontrollleuchte. Zwischen diesen beiden Anzeigen wird der Fahrer mittels der Information „STOP“ auf eine sicherheitskritische Störung am Fahrzeug hingewiesen (Abbildung 28).

### 2.3.5 Weitere Anzeigen

In den Modi „Rennbahn 1“ und „Rennbahn 2“ im Head-up-Display des Chevrolets Corvette nimmt die Anzeige eines Drehzahlmessers den größten Teil des virtuellen Bildes ein. Dieser hat im erstgenannten Modus die Form eines herkömmlichen Rundinstruments; im Modus „Rennbahn 2“ geht die Skala für Drehzahlen ab

3000 1/min in eine lineare Form über. Zusätzlich kann die Anzeige der momentan wirkenden Querbewegung im unteren Bereich des virtuellen Bildes zugeschaltet werden (Abbildung 23, oben rechts, mittig rechts). Während der Einstellung der Eyebow erscheinen an den Grenzen des virtuellen Bildes Marker, die dem Fahrer eine Justierung ermöglichen, die eine optimale Lage und Sichtbarkeit des gesamten virtuellen Bildes garantieren (Abbildung 23, mittig links, unten links).

In den Head-up-Displays von Cadillac besteht die Möglichkeit, Informationen über die momentan aktive Audioquelle, wie beispielsweise Band, Frequenz und Speicherplatz in den unteren beiden Zeilen des virtuellen Bildes anzuzeigen (Abbildung 24). Alternativ zu diesen Audioinformationen kann im Pontiac Grand-Prix GXP im unteren linken Bereich des virtuellen Bildes die Himmelsrichtung und im unteren rechten Bereich die Außentemperatur eingeblendet werden (Abbildung 32).



*Abbildung 32: Anzeige der Himmelsrichtung und der Außentemperatur im Head-up-Display des Pontiac Grand-Prix GXP*

Die Head-up-Displays der M-Modelle von BMW beinhalten im M-Modus als zentrales Element eine Schaltanzeige (Abbildung 27, rechts). Diese stellt die momentane Motordrehzahl auf einer Skala mit der Standard-Farbcodierung dar. Zusätzlich wird mittig der momentan eingelegte Gang angezeigt. Außer der digitalen Geschwindigkeitsanzeige ist im M-Modus keine weitere Anzeige möglich.

### **2.3.6 Bewertung**

Im Folgenden werden die Anzeigekonzepte der verschiedenen Head-up-Displays bewertet. Dies dient einer ersten Abschätzung im Sinne eines Expertenurteils. In der in Kapitel 2.4 beschriebenen Studie zur Optimierung von Anzeigekonzepten in Head-up-Displays werden in Form einer Probandenstudie priorisierte Anzeigehalte, Darstellungsgrößen und Designs detailliert ermittelt.

Die hier beschriebenen Anzeigekonzepte für Head-up-Displays weisen zumeist nur ansatzweise eine Systematik bei der Anordnung der Anzeigen zueinander auf. Bei den verschiedenen Anzeigemodi des Head-up-Displays im Chevrolet Corvette herrscht keine Konsistenz bezüglich der Positionierung der einzelnen Anzeigen. Die variierende Größe und die unterschiedlichen Platzierungen der digitalen Geschwindigkeitsanzeige verbunden mit den verschiedenen, unübersichtlichen Designs des Drehzahlmessers und den zuschaltbaren Anzeigen für die Zustände der Betriebsflüssigkeiten erschweren es dem Fahrer, sich im virtuellen Bild zu orientieren. Eine Auslegung des Anzeigekonzepts für ein herkömmliches Head-up-Display mit gleich bleibenden Anzeigeorten für die einzelnen Anzeigen im virtuellen Bild, wie es beispielsweise im Citroën C6 umgesetzt ist, wird als deutlich besser eingeschätzt; für ein kontaktanaloges System und dessen ortskorrekte Information ist dies natürlich – wie in Kapitel 5 beschrieben – anders zu bewerten. Generell wird die Anzeige eines Drehzahlmessers als kritisch betrachtet, da er für den normalen Fahrzustand – unter Berücksichtigung der komfortoptimierenden Eigenschaft des Head-up-Displays – keine relevante Information liefert. Auch eine Anzeige der Betriebsflüssigkeitszustände im virtuellen Bild wird nicht als sinnvoll betrachtet, da diese Anzeigen dem Fahrer keine dynamische oder situativ relevante Information liefern, womit eine Anzeige im priorisierten Anzeigebereich eines Head-up-Displays nicht gerechtfertigt ist. Bei Anzeigen zur Navigation sollten sich sowohl die Pfeildarstellung, als auch die Darstellung der Entfernung bis zur nächsten Aktion an den Regeln der Kompatibilität orientieren. Dies ist beim Head-up-Display von BMW geschehen: beide Anzeigen sind kompatibel zur realen Umgebung. Ungünstig ist die Anzeige der Entfernung bis zur nächsten Aktion bei den Modellen des GM-Konzerns: der dynamische Balken wird in horizontaler Richtung dargestellt und entspricht somit nicht der Forderung nach Kompatibilität. Auch die ACC-Symbolik sollte in der Darstellung und Anordnung der Anzeigen die räumliche bzw. zeitliche Situation in der Realität widerspiegeln. Die perspektivische Anzeige bei BMW ist ein gutes Beispiel für eine kompatible Anzeige. Die Positionierung der Setzgeschwindigkeit sollte jedoch nicht neben dem eigentlichen ACC-Symbol, sondern darunter platziert sein, um die zeitliche und räumliche Situation realitätsgetreu abzubilden. Die Darstellung der ACC-Symbolik im Cadillac STS ist auf Grund der horizontalen Anordnung und der räumlichen Trennung durch die Anzeige der aktuellen Geschwindigkeit als sehr ungünstig zu bewerten. Die Anzeige von sicherheitsrelevanten Warnungen im Head-up-Display für ein begrenztes Zeitintervall erfüllt die Maßgabe einer situationsrelevanten Anzeige. Eine Darstellung der Außentemperatur, der Himmelsrichtung, der Wählhebelposition oder der Tankwarnmeldung im Head-up-Display hingegen ist auf Grund der geringen Relevanz für die eigentliche Fahraufgabe nicht sinnvoll. Generell ist nur beim

Head-up-Display von BMW eine Berücksichtigung der Charakteristik einer der Realität überlagerten Information in der Gestaltung der Anzeigen festzustellen: Die ACC-Anzeige ist hier perspektivisch dargestellt. Für die Navigationsanzeigen hingegen wurde eine nicht-perspektivische Anzeige gewählt, obwohl auch diese Information prädestiniert für eine perspektivische Darstellung wäre. Bei allen anderen Herstellern – mit Ausnahme der nicht aktiven Anzeige des ACC-Systems beim Citroën C6 – wird keine perspektivische Anzeige im Head-up-Display umgesetzt. Auf Grund des beschriebenen Optimierungspotenzials bei Anzeigen im virtuellen Bild soll die folgende Studie Vorgaben liefern, die ein optimales Anzeigekonzept für ein Head-up-Display beschreiben.

## 2.4 Studie zur Optimierung von Anzeigekonzepten im Head-up-Display

Für die Auslegung eines optimalen Anzeigekonzepts für ein Head-up-Display werden verschiedene Eigenschaften eines Head-up-Displays in unterschiedlichen Ausprägungen im Fahrsimulatorversuch bewertet. Es werden dabei Aussagen über die Größe des virtuellen Bildes, den Umfang und die Positionierung von Anzeigeeinheiten, einer passenden Symbolik und dem dynamischen Verhalten der Anzeigen während der Fahrt gewonnen. Die Versuchsreihe wird mit 40 Versuchspersonen im statischen Fahrsimulator der AUDI AG durchgeführt.

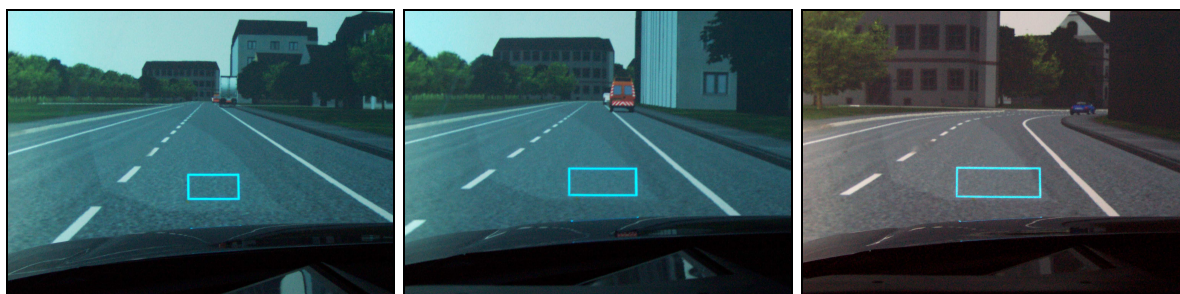
### Größe des virtuellen Bildes

Im ersten Teil der Studie wird die Größe des virtuellen Bildes eines Head-up-Displays variiert und von den Probanden bewertet. Hierfür werden die drei in Tabelle 1 beschriebenen Größen für die konstante virtuelle Distanz von 3,4m vorgegeben.

	Größe des virtuellen Bildes	
	Breite x Höhe [mm]	Breite x Höhe [°Blickwinkel]
Größe 1	290 x 146	4,9 x 2,5
Größe 2	385 x 162	6,5 x 2,7
Größe 3	480 x 179	8,1 x 3,0

*Tabelle 1: Größen der virtuellen Bilder für die Probandenstudie*

Die Versuchsperson sieht während der Simulatorfahrt abwechselnd immer ein virtuelles Bild der Größen 1 bis 3 in Form eines Rahmens (Abbildung 33). Nach Beendigung der Simulatorfahrt gibt die Versuchsperson eine Präferenz bezüglich der Bildgröße an und begründet die Entscheidung.



*Abbildung 33: Darstellung der unterschiedlichen Bildgrößen eines Head-up-Displays im Simulatorversuch (links: Größe 1, mittig: Größe 2, rechts: Größe 3)*

Als Präferenz gaben 50% der Probanden das HUD mit einem virtuellen Bild der Größe 2 an. 34% bevorzugten Größe 3 und 16% Größe 1. Die häufigsten Bedenken bei dem größten virtuellen Bild (Größe 3) bezogen sich auf das Potenzial einer Verdeckung der realen Welt und dem daraus folgenden Sicherheitsrisiko (26%), wohingegen das kleinste virtuelle Bild (Größe 1) von 32% der Probanden als potenziell unübersichtlich eingestuft wurde. Die Ergebnisse der einzelnen Befragung der Probanden zu jeder der drei Bildgrößen zeigt Abbildung 34. Hierbei beurteilte jeder Proband jede der drei Bildgrößen mit einer der Eigenschaften „viel zu groß“, „zu groß“, „in Ordnung“, „zu klein“, „viel zu klein“. Bei dieser Bewertung äußerten sich 66% der Probanden zu dem virtuellen Bild der Größe 2 mit „in Ordnung“; 37% bewerteten die Größe 3, 24% die Größe 1 mit „in Ordnung“. Die am besten bewertete Größe des virtuellen Bildes im Head-up-Display liegt somit bei einer Breite von  $6,5^\circ$  Blickwinkel und einer Höhe von  $2,7^\circ$  Blickwinkel. Die Aussagen der Versuchspersonen legen den Schluss nahe, dass eine Vergrößerung des virtuellen Bildes ohne zusätzlich hinzugefügte Information nicht abgelehnt werden wird, da sich die Bedenken der Versuchspersonen bei dem virtuellen Bild der Größe 3 hauptsächlich darauf bezogen, dass ein größeres virtuelles Bild gleichsam eine Zunahme an Information bedeutet. Für die Umsetzung eines virtuellen Bildes, das größer als das der Größe 2 in der Probandenstudie ist, bedarf es somit einer Abfrage der Akzeptanz des geplanten Anzeigebereiches.



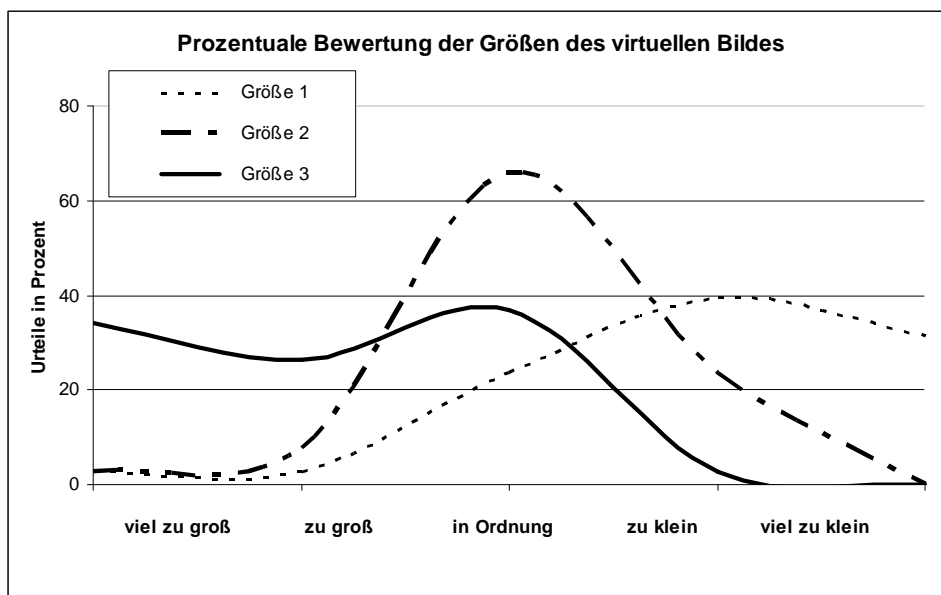


Abbildung 34: Prozentuale Bewertung der Größen des virtuellen Bildes

### Anzeigehalte und Symbolik

Der zweite Teil der Studie dient dazu, von den Probanden den gewünschten Anzeigehalt des virtuellen Bildes und die Symbolik abzufragen. Hierfür hat jeder Proband die Möglichkeit, den Inhalt des virtuellen Bildes selbst zu definieren. Dies geschieht im ersten Schritt über schematische Platzhalter (Abbildung 35, links); als mögliche Anzeigen stehen Navigation, Geschwindigkeit, ACC, Daten (Bordcomputer, etc.), Warnungen, Verkehrszeichen und Listen zur Verfügung. Dies hat den Vorteil, dass der Proband bereits bei der Auswahl der Inhalte die zur Verfügung stehenden Platzverhältnisse berücksichtigen muss. Im zweiten Schritt wählt der Proband zu jedem von ihm gewählten Platzhalter ein Symbol aus verschiedenen Vorgaben aus und definiert die Symbolgröße (Abbildung 35, rechts). Nach einer Testfahrt im Simulator kann der Proband sowohl Inhalte und Symbolik, wie auch Symbolgröße nochmals variieren. Der sich daraus ergebende Anzeigehalt im virtuellen Bild ist die für den jeweiligen Probanden als bevorzugt angenommene Variante.

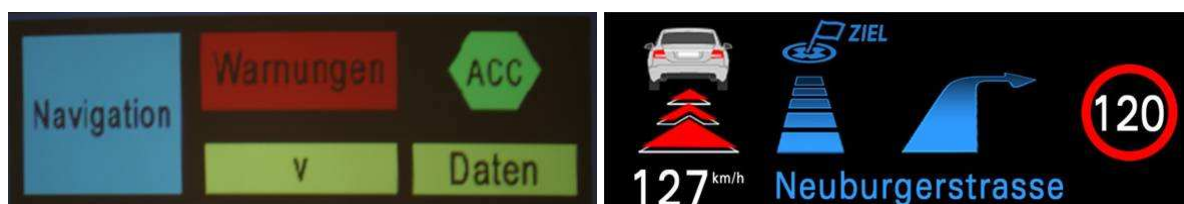


Abbildung 35: links: Schematische Platzhalter bei der Definition der Anzeigehalte, rechts: Definition von Symbolik und Symbolgrößen

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die Anzeigen Navigation (97%), Geschwindigkeit (90%), Verkehrszeichenanzeige (78%), Night-Vision (73%), Warnungen (68%) und ACC (59%) am häufigsten gewählt wurden. Die Positionierung der Navigationsinformation geschah bei 64% der Probanden in der Mitte des virtuellen Bildes; die Darstellung der Navigationsinformation soll ein auf die Fahrbahnebene perspektivisch geklappter Pfeil (2,5-D) sein (63%); ein orthogonaler Pfeil (2-D) wird nur von 37% der Probanden gewählt. Die Anzeige der Geschwindigkeit wurde von 44% der Probanden im mittleren, von 31% im linken Bereich des virtuellen Bildes angeordnet; es setzte sich einheitlich eine digitale Anzeige mit einer deutlich verkleinerten Schriftgröße für die Einheit „km/h“ durch. Die Anordnung des ACC-Symbols geschah uneinheitlich: 38% wählten das linke Drittel, 34% den mittleren Bereich und 28% das rechte Drittel des virtuellen Bildes. 65% der Probanden wählten für die ACC-Information eine 2,5-D-Darstellung mit Dreiecken als Abstandsanzeiger (Abbildung 35, rechts). Eine Verkehrszeichenanzeige positionierten 58% der Probanden im rechten und 36% im linken Bereich des virtuellen Bildes. Die Anzeige von Verkehrszeichen wird von der überwiegenden Mehrheit in konventioneller 2-D-Darstellung bevorzugt (Abbildung 35, rechts). Schließlich entschieden sich 80% der Probanden für eine Positionierung der Warnanzeigen mittels aus dem Kombiinstrument bekannter Symbolik im unteren Bereich des virtuellen Bildes.

### **Dynamisches Verhalten der Anzeige**

Im weiterführenden dritten Teil der Untersuchung im Fahrsimulator soll nun gezeigt werden, ob für die beispielhafte Anwendung einer Navigationsanzeige eine fahrzeug- oder umweltfeste Dynamik der Anzeige im virtuellen Bild (Abbildung 36) ein größeres Potenzial bietet. Hierzu wird im Simulator eine innerstädtische Strecke befahren. Aufgabe der Probanden ist es, den dargestellten Navigationsanzeigen zu folgen und jedes der beiden Systeme hinsichtlich Gefallen, Ablenkung, Intuitivität, Nützlichkeit und Störung zu bewerten. Die fahrzeugfeste Dynamik der Anzeige im virtuellen Bild entspricht der herkömmlichen Head-up-Display-Technologie, wie sie beispielsweise bei BMW bereits Serienstand ist. Hier bewegt sich die Anzeige im virtuellen Bild mit den Fahrzeugbewegungen mit; eine gezielt einem bestimmten Teil der Realität überlagerte Information kann somit nicht umgesetzt werden. Die umweltfeste Dynamik dagegen bleibt unabhängig von Fahrzeugbewegungen bei Bedarf genau einem Teil der realen Umgebung überlagert. Im Fahrsimulator wird diese Variante durch eine Einbindung der Grafiken in die Umgebungssimulation umgesetzt.



Abbildung 36: Fahrzeugfeste (links) und umweltfeste (rechts) Darstellung im HUD

Wie in Abbildung 37 zu sehen ist, wurde das fahrzeugfeste System von 61% der Probanden positiv bezüglich des Aspektes „Gefallen“ bewertet (21% „sehr stark“, 40% „stark“); das umweltfeste System erhielt hierfür von 84% der Probanden eine positive Bewertung (55% „sehr stark“, 29% „stark“). Die gleiche Tendenz ist bei der Frage nach dem Vorzug festzustellen: 18% der Probanden bevorzugen das fahrzeugfeste, 82% das umweltfeste System.

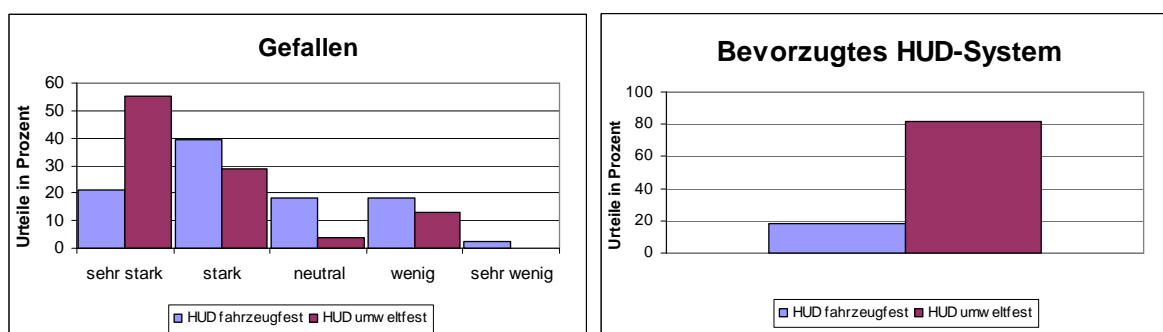


Abbildung 37: Bewertung der beiden HUD-Technologien bezüglich Gefallen und Bevorzugung

Die Kriterien Ablenkung, Intuitivität, Nützlichkeit und Störung wurden hinsichtlich der beiden Systeme vergleichend bewertet. Die Bewertungen lassen bei allen Kriterien für das umweltfeste System ein größeres Potenzial erkennen (Abbildung 38). So wird das fahrzeugfeste System von 50% der Probanden als ablenkender empfunden; 29% empfanden bezüglich Ablenkung keinen Unterschied zwischen den beiden Systemen. Ein noch deutlicheres Ergebnis ist bei der Frage nach der Intuitivität festzustellen: 61% der Probanden beurteilen das fahrzeugfeste System als weniger intuitiv; 21% stellten keinen Unterschied hinsichtlich der Intuitivität der beiden Systeme fest. 45% der Probanden sehen im umweltfesten System einen größeren Nutzen; 37% bewerten den Nutzen beider Systeme gleich. Auch beim Kriterium

„Störung“ bewertete knapp die Hälfte der Probanden (42%) das fahrzeugfeste System schlechter; 29% verhielten sich in ihrer Aussage neutral.

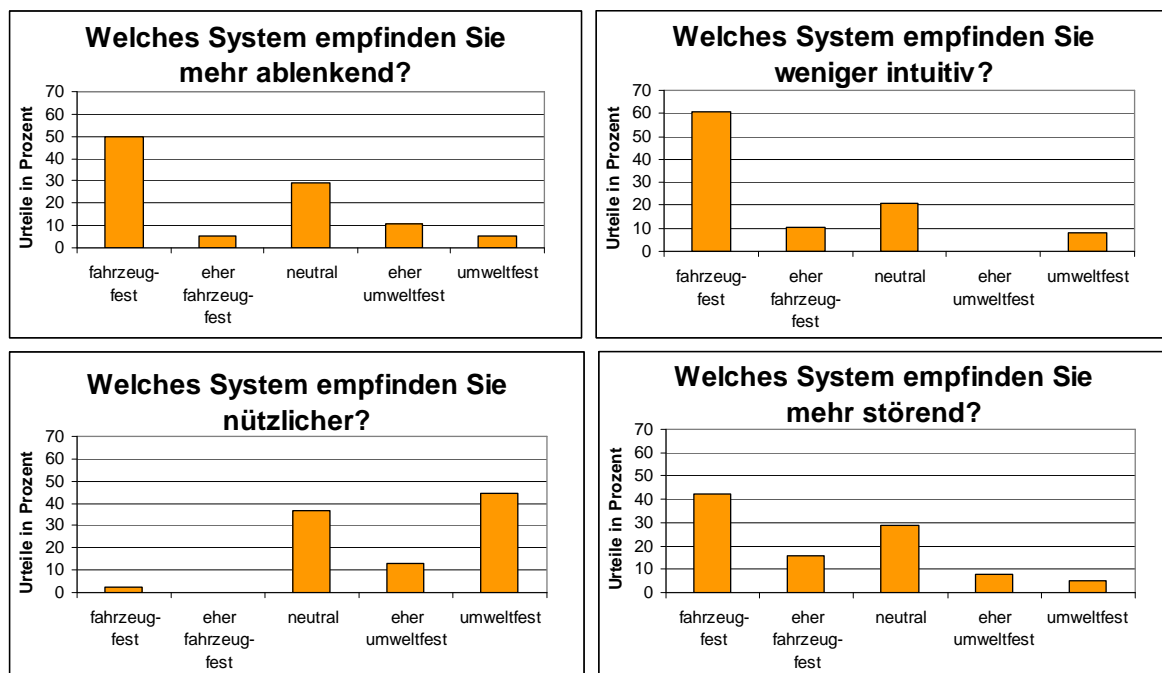


Abbildung 38: Vergleichende Bewertung der beiden HUD-Technologien bezüglich Ablenkung, Intuitivität, Nutzen und Störung

Insgesamt ist zu diesem dritten Teil der Studie zu sagen, dass nicht nur in den oben angeführten Bewertungen, sondern auch in den Gesprächen mit den Probanden eine klare Tendenz zu dem umweltfesten Head-up-Display festzustellen ist. Ein Großteil der Probanden hob den Vorteil „Intuitivität“ des umweltfesten Systems besonders hervor, da ihnen in komplexen Fahrsituationen die – im Beispiel der Studie – Navigationsanzeige in eindeutiger Weise angezeigt wird. Die geringe erforderliche Transferaufgabe des Fahrers, die zur Umsetzung der Information nötig ist, erhöht die mentalen Ressourcen des Fahrers, die für sicherheitsrelevante Aspekte verwendet werden können.

### Zusammenfassung

Die Ergebnisse dieser Studie zur Optimierung von Anzeigekonzepten in Head-up-Displays zeigen eine Priorisierung seitens der Probanden von umweltfesten, der Realität entsprechenden Anzeigen. Die umweltfeste Dynamik der Anzeige im Head-up-Display wird in allen abgefragten Kriterien deutlich besser gegenüber einer herkömmlichen, fahrzeugfesten Anzeige bewertet. Auch die

Untersuchung der bevorzugten Symbolik im virtuellen Bild zeigt eine Tendenz zu solchen Anzeigen: Sowohl die Pfeildarstellung der Navigationsinformation, als auch die Symbolik der ACC-Information wurde von über 60% der Probanden in einer 2,5-D-Darstellung, d.h. einer realitätsnahen, perspektivische Darstellungsform, bevorzugt. Die bevorzugte Größe des virtuellen Bildes von  $6,5^\circ \times 2,7^\circ$  schränkt allerdings die Umsetzungsmöglichkeit für ein neuartiges Anzeigekonzept im virtuellen Bild ein. Die Aussagen der Probanden lassen jedoch die Vermutung zu, dass sich die Bedenken bei einem größeren virtuellen Bild wohl mehr auf einen damit in Verbindung gebrachten vermehrten Anzeigeeinhalt im primären Sichtfeld beziehen, als auf die Möglichkeit in einem größeren Bereich vor dem Fahrer etwas anzuzeigen. Somit bleibt zu klären, in wie weit die Aussagen zur Bildgröße für variable virtuelle Entfernungen mit konstant bleibendem Informationsinhalt bestehen bleiben. Hierzu ist eine Studie zu einem Anzeigekonzept mit erheblich größerem virtuellem Bild, aber nur geringen Anzeigeeinhalten in Kapitel 6 beschrieben.

## **2.5 Resümee zum momentanen Stand der Head-up-Display-Technologie in Kraftfahrzeugen**

Die Head-up-Displays in Kraftfahrzeugen, die momentan auf dem Markt erhältlich sind, verfügen alle über ein vertikal stehendes virtuelles Bild mit virtuellen Entfernungen im Bereich zwischen zwei und drei Metern. Die Anzeigeeinhalte erstrecken sich in der Regel von Navigationsanzeigen und Anzeigen von Geschwindigkeitsregelanlagen, einer digitalen Geschwindigkeitsanzeige bis hin zu Warnmeldungen und Informationen aus dem Bereich Infotainment. Vorteilhaft an dieser Art eines Displays ist die – auf Grund geringer erforderlicher Augbewegungen und des geringen Akkommodationsaufwandes – kurze Ablesezeit und die Transparenz der Anzeige, was es ermöglicht, an prominentester Stelle Informationen anzuzeigen, ohne Teile der Realität zu verdecken. Ein weiterer potenzieller Vorteil dieser Technologie, der bisher nicht genutzt wird, ist die Möglichkeit einer ortskorrekten Anzeige vor dem Fahrzeug. Die Überlagerung von virtuellem Bild und Realität kann dazu verwendet werden, reale Objekte vor dem Fahrzeug virtuell zu markieren. Eine solche virtuelle Ergänzung der Realität kann Objekte, die mittels Sensortechnologie vom Fahrzeug bereits erkannt wurden, dem Fahrer an der Stelle sichtbar machen, an der sich das Objekt tatsächlich befindet. Eine solche Anzeige im Head-up-Display wird als kontaktanalog bezeichnet. Die Ergebnisse der Studie zur Optimierung von Anzeigekonzepten im Head-up-Display zeigen, dass eine solche kontaktanaloge Anzeige (in der Studie als „umweltfest“ bezeichnet) von den Probanden durchwegs positiv beurteilt wird. Dies gilt sowohl für die perspektivische

Ansicht der Symbole, als auch für die umweltfeste Dynamik. Dies soll den Anreiz geben, im Folgenden ein technisches Konzept zu erarbeiten, mit Hilfe dessen ein kontaktanalogen Head-up-Display in einem Versuchsfahrzeug aufgebaut werden kann. Um erste Aussagen zur Akzeptanz solcher Anzeigen im Realversuch geben zu können, werden verschiedene Möglichkeiten einer kontaktanalogen Informationsanzeige erarbeitet und im Probandenversuch validiert.

## 3 Konzeptauswahl für die Umsetzung eines kontaktanalogen Head-up-Displays

Die prinzipielle Funktionsweise eines kontaktanalogen Head-up-Displays ist von der eines herkömmlichen Head-up-Displays nur wenig verschieden. Die Anforderungen an das optische Konzept sind jedoch deutlich unterschiedlich. Im Folgenden werden die wesentlichen Unterschiede beschrieben und verschiedene mögliche technische Realisierungsansätze eines kontaktanalogen Head-up-Displays aufgeführt und bewertet. Ziel dieser Analyse und Bewertung ist ein fundierter Entscheid zur Umsetzung einer bestimmten technischen Variante.

### 3.1 Begriffsdefinition

Der Begriff „kontaktanalog“ bezeichnet eine Anzeige, die – ähnlich der erweiterten Realität (engl.: „augmented reality“) – die Realität virtuell ergänzt. Für eine Anwendung im Head-up-Display bedeutet dies, dass die Umgebung vor dem Fahrzeug im primären Sichtfeld des Fahrers um virtuelle Information ergänzt wird. Der Nutzen einer solchen Anzeige besteht im Darstellen oder Verdeutlichen von nicht oder nur schlecht sichtbarer Information der Realität. Die virtuelle Information muss für den Fahrer in allen drei Raumrichtungen den Anspruch der Ortskorrektheit erfüllen. Hierin ist der wesentliche technische Unterschied zu einem herkömmlichen Head-up-Display zu sehen: die Distanz des virtuellen Bildes kann nicht fix in einer Entfernung von zwei bis drei Metern liegen. Die Herausforderung ist, virtuelle Information für den Fahrer so darzustellen, dass er sie in unterschiedlichen virtuellen Distanzen wahrnimmt. Abbildung 39 zeigt diesen wesentlichen Unterschied zwischen einem herkömmlichen und einem kontaktanalogen Head-up-Display. In der linken Darstellung ist die Charakteristik eines herkömmlichen Head-up-Displays, ein virtuelles Bild in der y-z-Ebene des Fahrzeugkoordinatensystems, zu sehen. Die rechte Darstellung zeigt schematisch die Charakteristik eines kontaktanalogen Head-up-Displays, die sich von der des herkömmlichen in der zusätzlichen Dimension (x-Koordinate) unterscheidet. In wie weit der volle dreidimensionale Raum als Anzeigefläche zur Verfügung stehen muss, wird im Folgenden noch geklärt (siehe Kapitel 4.2). Die Ergänzung der virtuellen Anzeige um die dritte Dimension bleibt jedoch zunächst das wesentliche Kriterium zur Umsetzung eines kontaktanalogen Head-up-Displays.

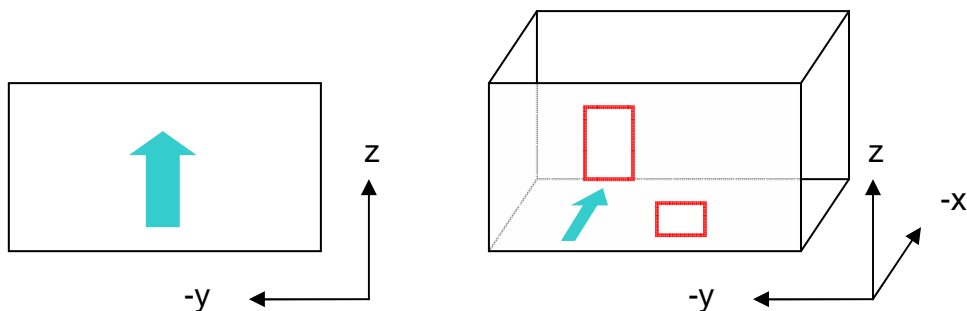


Abbildung 39: Dreidimensionaler Charakter eines kontaktanalogen Head-up-Displays

Ein kontaktanalogen Head-up-Display mit einer Anzeigemöglichkeit in allen drei Raumrichtungen ermöglicht beispielsweise die Darstellung eines Fahrschlauches oder eines auf der Fahrbahn liegenden Navigationspfeils. Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind die Anzeige von ACC-Informationen im Zwischenraum zum vorausfahrenden Fahrzeug oder die Markierung von Gefahrenstellen auf der Fahrbahn, wie beispielsweise eines Fußgängers, der über ein Night-Vision-System vom Fahrzeug bereits erkannt wurde, sich aber noch außerhalb des Lichtkegels der Scheinwerfer befindet. In diesem Zusammenhang kann auch eine optimale Ausweichroute um ein Hindernis im Head-up-Display angezeigt werden; letzten Endes ist eine Anzeige jeglicher Information als Überlagerung der Realität mit einem solchen System denkbar. In Abbildung 40 sind einige der angesprochenen Anzeigemöglichkeiten beispielhaft dargestellt.

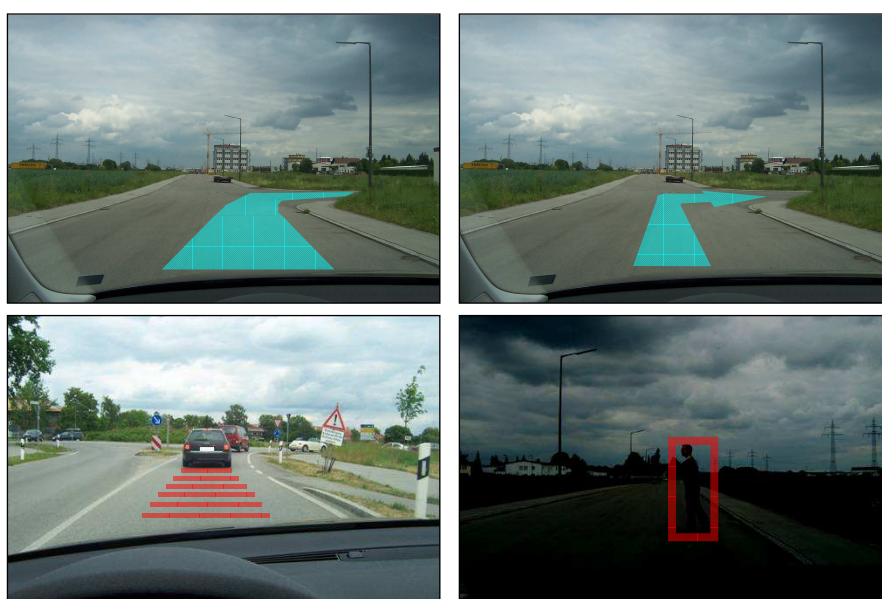


Abbildung 40: Anzeigemöglichkeiten für ein kontaktanalogen Head-up-Display



Die für die Umsetzung eines solchen neuartigen Anzeigemediums nötigen technischen Randbedingungen werden in verschiedenen Ansätzen im folgenden Kapitel beschrieben und bewertet.

## **3.2 Technische Realisierungsmöglichkeiten**

Als wesentliches Kriterium für die Beurteilung der Eignung der jeweiligen Konzepte steht – neben den in Kapitel 3.1 beschriebenen Grundvoraussetzungen für eine kontaktanaloge Anzeige – die Möglichkeit eines seriennahen Einbaus der Technik in ein Versuchsfahrzeug. Ziel ist die Realisierung einer kontaktanalogen Anzeige in einem Versuchsfahrzeug ohne Einschränkungen der Alltagstauglichkeit des Fahrzeuges. Im Kapitel 3.2.1 werden drei Möglichkeiten zur Umsetzung eines kontaktanalogen Head-up-Displays mittels virtuellem Bild beschrieben; die Potenziale einer Windschutzscheibenprojektion als Alternative zu einer Darstellung mittels virtuellem Bild werden in Kapitel 3.2.2 behandelt. Die abschließende Bewertung der Alternativen fokussiert die weitere Arbeit auf eine konkrete Umsetzungsvariante.

### **3.2.1 Technologien mit virtuellem Bild**

Für die Realisierung einer kontaktanalogen Anzeige im Versuchsfahrzeug werden zunächst Technologien mit virtuellem Bild betrachtet. Drei solcher Technologien bieten Potenzial, ein dreidimensional empfundenes virtuelles Bild darzustellen. Neben der Beeinflussung der Wahrnehmung von Tiefenkriterien und einer stereoskopischen Bilddarstellung wird die Variante „Schräge Displayebene“ näher betrachtet.

#### **3.2.1.1 Beeinflussung der Wahrnehmung von Tiefenkriterien**

Die einfachste Möglichkeit für die Umsetzung einer kontaktanalogen Anzeige im Head-up-Display ist die Beibehaltung einer fixen, stehenden virtuellen Bildebene. Allerdings kann so der in Kapitel 3.1 beschriebene dreidimensionale Raum zur Darstellung von Anzeigen in verschiedenen Entfernungen nicht physikalisch korrekt abgebildet werden. Für eine empfundene Anzeige in der gewünschten Entfernung bedarf es daher einer Beeinflussung der visuellen Wahrnehmung des Fahrers; es muss die Wahrnehmung der Tiefenkriterien beeinflusst werden. Bei der Eigenschaft des räumlichen Sehens wird zwischen zwei Kriterien unterschieden: binokulare und monokulare Tiefenkriterien. Binokulare Tiefenkriterien werden bei der Betrachtung

von Objekten mit beiden Augen wahrgenommen. Die binokulare Disparität (Querdisparation) beruht auf der horizontalen Distanz der Augmittelpunkte (ca. 65mm). Auf Grund dieser Distanz entstehen bei beidäugiger Betrachtung eines Gegenstandes zwei verschiedene Netzhautbilder, aus deren Unterschied das Gehirn die Entfernung der betrachteten Gegenstände vom Auge abschätzen kann. Die monokularen Tiefenkriterien dagegen beruhen nicht auf einem rein physikalischen Prinzip; ihnen liegen Erfahrungen des Menschen zu Grunde. Die Wahrnehmung von monokularen Tiefenkriterien geschieht bei ein- und beidäugiger Betrachtung eines Gegenstandes. Folgende monokulare Tiefenkriterien sind geläufig (vgl. [29]):

- Prinzip der Verdeckung: Wird ein Objekt von einem anderen verdeckt, so wird das verdeckte Objekt in einer größeren Distanz wahrgenommen.
- Prinzip der vertrauten Größe: Über die Kenntnis der realen Größe eines Objektes kann aus der wahrgenommenen Größe auf die Entfernung des Objektes geschlossen werden.
- Prinzip der relativen Größe: Über die Kenntnis des Größenverhältnisses zweier Objekte kann aus den wahrgenommenen Größen der Objekte auf die Entfernungen der Objekte geschlossen werden.
- Prinzip der relativen Höhe: Über die relative Lage von Objekten zum Horizont kann auf die Entfernungen der Objekte geschlossen werden; Objekte, die näher am Horizont liegen, werden als weiter entfernt wahrgenommen.
- Texturgradient: Über die Dichte von Texturelementen kann auf die Entfernung von Objekten geschlossen werden; eine größere Dichte wird mit einer größeren Entfernung in Verbindung gebracht.
- Linearen Perspektive: Über den Grad der Konvergenz von Linien kann auf die Entfernung geschlossen werden; parallele Linien konvergieren mit zunehmender Distanz.
- Atmosphärische Perspektive: Über die Unschärfe von Objekten kann auf die Entfernung geschlossen werden; weit entfernte Objekte werden auf Grund von Partikeln in der Luft unschärfer wahrgenommen.

Für die Umsetzung eines einfachen kontaktanalogen Head-up-Displays muss die Wahrnehmung dieser Tiefenkriterien manipuliert werden, um die physikalisch nicht richtige virtuelle Distanz für den Fahrer korrekt erscheinen zu lassen. Eine Manipulation der Querdisparation ist jedoch nicht ohne Einsatz weiterführender Technologie (siehe Kapitel 3.2.1.2) möglich, da diese durch die Distanz der Augen physikalisch festgelegt ist; der Einfluss der Querdisparation kann jedoch – wie im

Folgenden beschrieben – minimiert werden. Die Wahrnehmung monokularer Tiefenkriterien kann mittels geeignet gewählter Anzeigekonzepte manipuliert werden. Somit sind für den einfachsten Fall eine Minimierung der binokularen Tiefenkriterien (Querdisparation) und eine geschickte Manipulation der monokularen Tiefenkriterien erforderlich, um ein kontaktanaloges Head-up-Display mit einer fixen, stehenden virtuellen Bildebene umzusetzen. Für die Minimierung der Querdisparation gibt es zwei Möglichkeiten. Rückt man das virtuelle Bild in eine genügend große Entfernung, so verlaufen die beiden Sichtstrahlen der Augen nahezu parallel auf das virtuelle Bild. Die Ausprägung der Querdisparation ist dann nur noch minimal; der Tiefeneindruck kann rein über monokulare Tiefenkriterien beeinflusst werden. Nach [3] liegt die Entfernung für eine Vernachlässigung der Querdisparation bei ca. 6m. Somit kann für ein Head-up-Display mit einer virtuellen Bilddistanz größer 6m die vom Fahrer empfundene virtuelle Distanz über die Manipulation der monokularen Tiefenkriterien beeinflusst werden. Eine Möglichkeit zur gänzlichen Ausschaltung der binokularen Tiefenkriterien ist die Auslegung der Eyebox des Head-up-Displays auf nur ein Auge. Bei dieser monokularen Ausführung eines Head-up-Displays wird der Tiefeneffekt ausschließlich über monokulare Tiefenkriterien wahrgenommen; eine Beeinflussung der empfundenen virtuellen Distanz ist somit möglich.

Es bleibt zu klären, wie man über monokulare Tiefenkriterien die empfundene virtuelle Distanz beeinflussen kann. Hierzu sollen die Beispiele in Abbildung 41 dienen. Am Beispiel des Navigationspfeils im linken Bild wird das Prinzip der linearen Perspektive deutlich. Die umrandenden Linien der Darstellung sind im virtuellen Bild nach oben hin konvergent. Dies wird als dreidimensionale Darstellung interpretiert; der Pfeil scheint parallel zur Fahrbahn zu liegen. Die Darstellung der ACC-Information im mittleren Bild weist ebenfalls einen dreidimensionalen Charakter auf. Dieser Effekt entsteht hier durch die Manipulation mehrerer monokularer Tiefenkriterien an den übereinander angeordneten Dreiecken: das Prinzip der Verdeckung, das Prinzip der relativen Größe, das Prinzip der relativen Höhe und die lineare Perspektive. Dadurch erscheinen die Dreiecke wie ein Teppich zwischen dem eigenen und dem vorausfahrenden Fahrzeug, welches nicht als höher stehend, sondern als weiter entfernt wahrgenommen wird. Anhand der Anzeige einer Objekterkennung im rechten Night-Vision-Bild ist der Einfluss des Prinzips der relativen Größe zu erkennen. Die Markierung des weiter entfernten Fahrzeugs ist – analog zu der Größe der Fahrzeuge auf dem Videobild – kleiner als die des nahen Fahrzeugs. Dadurch entsteht der dreidimensionale Eindruck nicht nur für das Videobild, sondern auch für die überlagerte Information in Form der roten Umrandungen. Die Anzeige scheint der Realität kontaktanalog überlagert.



Abbildung 41: Monokulare Tiefenkriterien bei Anzeigen im Head-up-Display

Unter den beschriebenen Bedingungen gibt es also zwei Möglichkeiten, mit herkömmlicher Head-up-Display-Technologie Anzeigen zu erreichen, welche kontaktanalog erscheinen: Vergrößerung der Distanz des virtuellen Bildes ( $> 6\text{m}$ ) und Beschränkung der Eyebox auf ein Auge. Bei beiden Varianten ist es erforderlich, über die Manipulation der Wahrnehmung monokularer Tiefenkriterien die Anzeige perspektivisch erscheinen zu lassen. Allerdings sind für die Umsetzung eines solchen Systems Daten eines Blickerfassungssystems nötig, die es erst ermöglichen, die Darstellungen im Head-up-Display den Kopfbewegungen des Fahrers korrekt nachzuführen und somit eine kontaktanaloge Anzeige umzusetzen. Alternativ hierzu kann auch die Eyebox sehr klein ausgelegt werden, um die Auswirkungen der Kopfbewegungen auf den kontaktanalogen Charakter der Anzeige so klein zu halten, dass keine Kompensation und somit kein Blickerfassungssystem nötig ist. Jedoch zwingt man den Fahrer hierdurch in eine vorgegebene Haltung, die er während der Fahrt nur in geringem Maße ändern kann.

### 3.2.1.2 Stereoskopische Bilddarstellung

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, ist eine Manipulation der Querdisparation über einfache Mittel der Anzeigengestaltung nicht möglich. Für die Umsetzung eines kontaktanalogen Head-up-Displays kann hierfür jedoch die Technologie der Stereoskopie verwendet werden (siehe [20]). Bei dieser Methode wird für jedes Auge ein eigenes Bild erzeugt; der Abstand der beiden realen Bilder zueinander definiert die empfundene virtuelle Entfernung (Abbildung 42). Der prinzipielle Aufbau eines solchen Head-up-Displays ist ähnlich zu dem eines herkömmlichen; das virtuelle Bild befindet sich in der  $y$ - $z$ -Ebene des Fahrzeugkoordinatensystems. Als Bildquelle dienen zwei Displays, auf die der Fahrer durch zwei getrennte optische Systeme blickt. Der Reflexionsbereich an der Windschutzscheibe ist für beide Optiken verschieden; es entstehen zwei getrennte Eyeboxen. Die Größe und Positionierung der Eyeboxen muss so ausgelegt sein, dass es möglich ist, mit jedem Auge durch genau eine Eyebox zu blicken, wobei hier der mittlere Augenabstand von ca.  $65\text{mm}$

maßgeblich ist. Dem Fahrer wird also für jedes Auge ein eigenes Bild zur Verfügung gestellt. Soll nun beispielsweise einem Fahrer mit einem Augenabstand  $y_a$  über diese Anzeigeeinheit ein Navigationspfeil in der empfundenen Entfernung  $x_e$  eingeblendet werden, so berechnet sich der Abstand  $y_v$  der virtuellen Bilder zueinander in der virtuellen Distanz  $x_v$  vor der Eyebox nach Formel (11):

$$y_v = \frac{y_a \cdot (x_e - x_v)}{x_e} \quad (11)$$

Für eine Darstellung in der Entfernung der tatsächlichen virtuellen Ebene ( $x_e = x_v$ ) müssen sich die selektiven Informationen der beiden Augen in dieser Ebene überlagern ( $y_v = 0$ ); eine Darstellung im Unendlichen ( $x_e = \infty$ ) ist über die Bedingung  $y_v = y_a$  zu erreichen, d.h. die Informationen müssen in der tatsächlichen virtuellen Distanz einen Abstand gleich des Abstandes der Augen zueinander aufweisen.

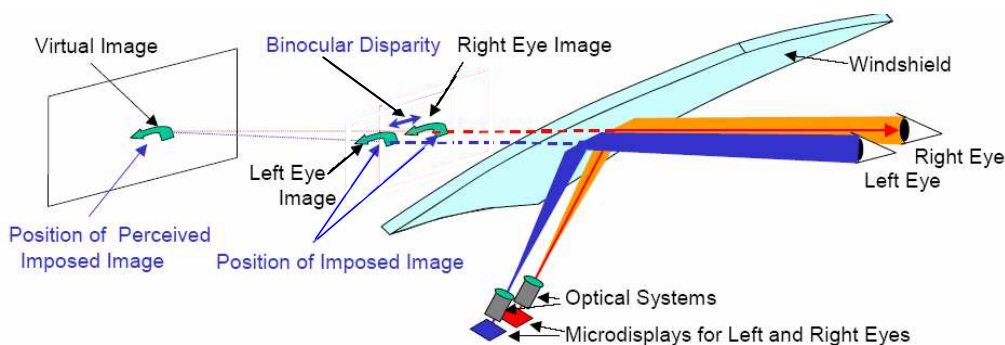


Abbildung 42: Prinzip eines stereoskopischen Head-up-Displays (nach [20])

Die Stereoskopie bietet somit eine Möglichkeit, mit gewissem technischem Aufwand ein Head-up-Display mit einer kontaktanalogen Anzeigemöglichkeit umzusetzen. Wesentlich hierbei ist die strikte Trennung der beiden Eyeboxen voneinander und die richtige Positionierung der beiden Bilder zueinander entsprechend der gewünschten Anzeigeentfernung.

### 3.2.1.3 Schräge Displayebene

Um variable virtuelle Distanzen in einem Head-up-Display ohne Manipulation der Wahrnehmung von Tiefenkriterien anzeigen zu können, bietet sich an, die Lage des virtuellen Bildes zu überdenken. Für die Fahraufgabe wesentliche Objekte in der Umgebung befinden sich in einem Bereich von ca. 5m bis 400m vor dem Fahrzeug. Solche Objekte sind beispielsweise Fahrzeuge, Fußgänger, Hindernisse oder auch

der Straßenverlauf. Diese relevanten Objekte befinden sich immer auf der Fahrbahnoberfläche. Daher wäre die Einschränkung der Möglichkeit einer kontaktanalogen Darstellung auf Objekte, die sich auf der Fahrbahn befinden, für ein Head-up-Display-System im Fahrzeug akzeptabel. Dies kann mit einer auf der Fahrbahn vor dem Fahrzeug liegenden (in der x-y-Ebene im Fahrzeugkoordinatensystem) virtuellen Ebene realisiert werden. Hierfür muss die Ebene der Bildquelle im Head-up-Display, also die Displayebene, schräg im Strahlengang angebracht werden. Dieses Prinzip ist in [6] für die Anzeige eines Lichtbalkens in unterschiedlichen Entfernungen vor dem Fahrzeug beschrieben; die Bildquelle ist in diesem Fall eine Soffittenlampe (Q), die sich hinter einer Blende befindet, wodurch ein Lichtspalt SP entsteht. Das Abbild des Lichtspaltes SP erscheint als heller Balken SP' auf der Fahrbahn vor dem Fahrzeug. Wird die Blende und somit der Lichtspalt in der besagten schrägen Ebene verschoben, so ändert sich die virtuelle Distanz des Lichtbalkens auf der Fahrbahn. In Abbildung 43 ist dieses Prinzip der schrägen Ebene dargestellt. Zur Konstruktion der Lage der schrägen Ebene wird im ersten Schritt der zur Fahrbahnoberfläche parallele Sichtstrahl ST des Fahrers im Durchstoßpunkt durch die Windschutzscheibe gespiegelt; die entstehende Gerade A beschreibt die optische Achse einer Linse L. Wird hinter der Linse dargestellte Information (z.B. der Lichtspalt SP) zum Brennpunkt der Linse verschoben, bewegt sich das virtuelle Bild vor dem Fahrzeug weiter weg. Um eine Lage des virtuellen Bildes direkt auf der Fahrbahnoberfläche zu erreichen, wird konstruktiv im Abstand des horizontalen Sichtstrahls von der Fahrbahnebene die Linsenebene geschnitten. Die entstehende Schnittgerade und der Brennpunkt der Linse spannen die Ebene auf, die im virtuellen Bild auf der Fahrbahn liegend abgebildet wird. Die virtuelle Entfernung  $x_v$  kann somit in Abhängigkeit der Brennweite  $f$  der Linse und der Entfernung  $e_G$  der Information von der Linsenebene angegeben werden. Umgekehrt gilt:

$$e_G = \frac{f \cdot x_v}{f + x_v} \quad (12)$$

In Abbildung 43 ist dieser Zusammenhang beispielhaft für zwei virtuelle Distanzen ( $x_v = x_{B1}$  bzw.  $x_v = x_{B2}$ ) dargestellt. Man kann nun anstelle der Soffittenlampe und der Blendentechnik ein Display als Bildquelle einsetzen. Somit hat man für Anzeigen im virtuellen Bild alle gestalterischen Freiheiten und ist nicht auf die geometrische Formgebung der Blenden beschränkt. Die Displayoberfläche muss sich in der oben beschriebenen schrägen Ebene befinden; Darstellungen auf der Displayoberfläche befinden sich dann im virtuellen Bild liegend auf der Fahrbahnoberfläche – analog zum Bild des Lichtspaltes im Beispiel von Abbildung 43. Informationen, die sich

näher am Brennpunkt der Linse befinden, werden in größerer Entfernung wahrgenommen als Informationen, die weiter vom Brennpunkt entfernt liegen. Somit kann durch die Bewegung eines Objektes auf der Displayoberfläche das virtuelle Bild dieses Objekts auf der Fahrbahnoberfläche vor- und zurückbewegt werden. Mit dieser Methode der schrägen Displayebene ist somit die Möglichkeit gegeben, die Fahrbahn vor dem Fahrzeug mittels eines liegenden virtuellen Bildes als Anzeigefläche zu verwenden. Eine physikalisch korrekte kontaktanaloge Markierung von Objekten über der Fahrbahnoberfläche ist mit dieser Methode in der oben beschriebenen Ausführung nicht möglich, allerdings für eine Darstellung fahrrelevanter Informationen auch nicht nötig. Wie dennoch eine kontaktanalog empfundene Anzeige im Bereich über der Fahrbahn realisiert werden kann, wird in Kapitel 4.2 beschrieben.

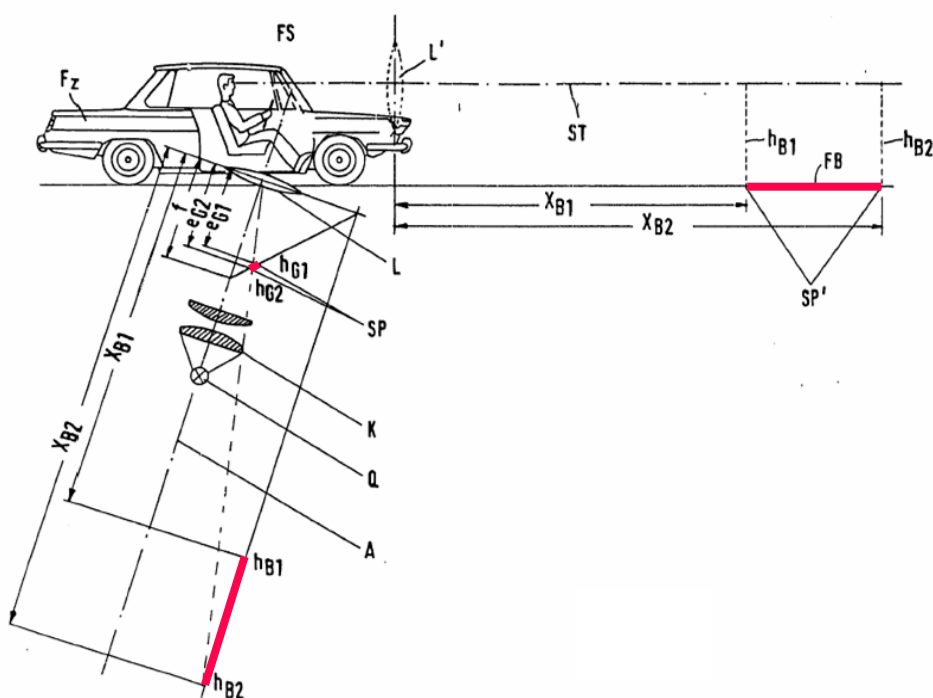


Abbildung 43: Prinzip der schrägen Ebene im kontaktanalogen Head-up-Display (nach [6])

### 3.2.2 Windschutzscheibenprojektion (reales Bild)

Der Technologie mit einem virtuellen Bild steht die Projektion eines realen Bildes auf die Windschutzscheibe gegenüber. Hiermit ist keine variable Distanz der Anzeige in einem virtuellen Bild möglich; die dargestellten Objekte befinden sich immer auf der Windschutzscheibe. Mit Hilfe eines Eyetracking-Systems kann man die

Positionierung von Objekten auf der Windschutzscheibe so steuern, dass sich das angezeigte Objekt am Schnittpunkt der Windschutzscheibengeometrie mit dem Sichtstrahl, der auf ein reales Objekt vor dem Fahrzeug gerichtet ist, befindet. Somit ist eine richtungsanaloge Darstellung möglich. Ein derartiges System zur Nutzung der Windschutzscheibe als Anzeigefläche zeigt Abbildung 44 (verbaut in einen VW Phaeton). Im mittleren Bereich der Instrumententafel befindet sich ein UV-Laser-Projektor mit einer Wellenlänge von 405nm und einer optischen Leistung von 15mW. Die dargestellten Objekte sind programmierbare Graphiken; der Laser baut das Bild zeilenweise auf, was bei großflächigen Anzeigen eine längere Dauer des Bildaufbaus zur Folge hat. Die Koordinaten der einzelnen Begrenzungspunkte liegen in einer Textdatei vor; ein entsprechendes Programm bindet diese Daten in die Steuerung des UV-Laser-Projektors ein. Die Windschutzscheibe ist auf der Innenseite mit einer fluoreszierenden Folie überklebt, die prinzipiell transparenten Charakter aufweist. Bei Anregung durch den UV-Laser emittiert die Folie an der angeregten Stelle sichtbares Licht (ca. 0,6mW).



Abbildung 44: Windschutzscheibenprojektion

In Zusammenhang mit dieser Technologie wird in einer Versuchsreihe der Einfluss der Bilddistanz auf die Dauer des Ablesevorganges untersucht. Hintergrund hierfür ist die – im Vergleich zu einem Head-up-Display mit virtuellem Bild – geringe Distanz der Darstellung auf der Windschutzscheibe zum Auge und der damit verbundene erhöhte Akkommodationsaufwand. In der Probandenstudie soll eine Aussage darüber getroffen werden, welcher Einfluss der Bilddistanz auf die Zeit der Informationsaufnahme festzustellen ist. Hierzu dient ein Versuchsaufbau mit Anzeigeelementen in vier verschiedenen Abständen zum Fahrer (Abbildung 45). Diese Displays liegen mit ihrem Mittelpunkt auf dem 7°-Sichtstrahl nach unten in den Entfernungen 0,8m, 1,5m, 2,1m und 4,0m vom Fahrerraum entfernt. Es handelt sich um TFT-Displays; lediglich die Anzeige in 2,1m Entfernung ist ein virtuelles Bild. Für eine Darstellung im Unendlichen dient als Näherung ein Monitor in 14m Entfernung, dessen Mitte auf dem 0°-Sichtstrahl liegt. Der Proband befindet sich während der



Versuchsreihe in einem Fahrzeugaufbau (Abbildung 46); die Augenposition bleibt an der in Abbildung 45 beschriebenen Position. Aufgabe des Probanden ist es, mittels eines Eingabegerätes (Kreuzwippe) die Öffnung des jeweils angezeigten Landoltrings einer der Auswahlmöglichkeiten „oben“, „unten“, „links“ oder „rechts“ korrekt zuzuordnen. Die protokollierte Zeitdifferenz zwischen dem Erscheinen des jeweiligen Landoltringes und der Eingabe durch die Kreuzwippe wird als Größe „Eingabezeit“ bestimmt. An der Versuchsreihe nehmen 40 Probanden teil; die Umgebungsbedingungen sind für alle Probanden gleich. Um eine Ablenkung der Versuchsperson zu vermeiden, befinden sich im Versuchslabor während der Untersuchung außer dem Versuchsleiter und dem Probanden keine anderen Personen. Die Versuchsperson hat während der einzelnen Teilversuche keinen Blickkontakt zum Versuchsleiter.

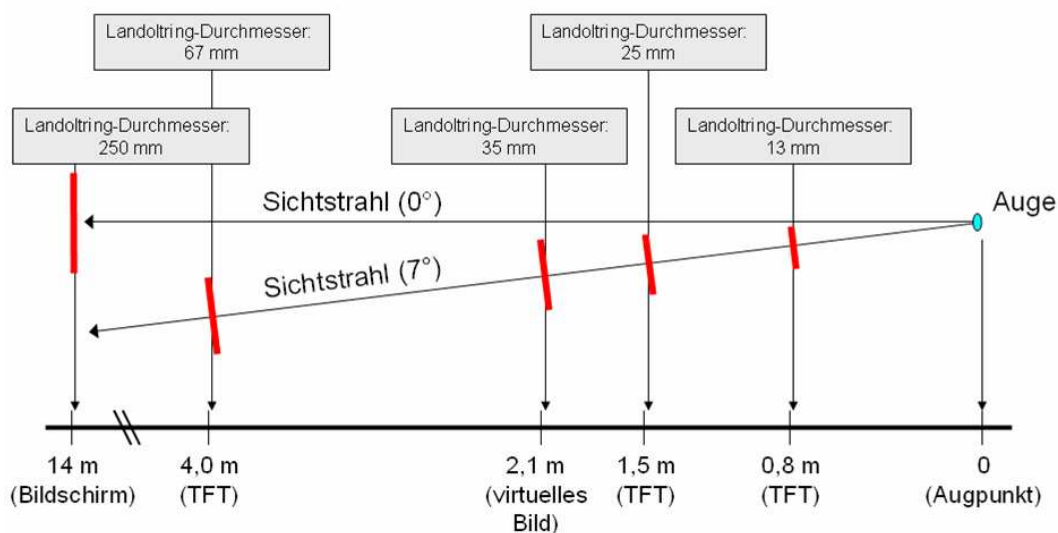


Abbildung 45: Schema des Versuchsaufbaus zur Akkommodationszeit

Im ersten Teilversuch wird ein Maß für die Reaktionszeit des Probanden ermittelt. Hierfür sieht der Proband Landoltringe auf dem Display in 0,8m Entfernung. Mittels der Kreuzwippe erfolgt die Eingabe der Öffnungsrichtung des jeweiligen Ringes. Dies wird pro Versuchsperson 29-mal wiederholt. Die hier erhobenen Daten dienen bei der Auswertung der folgenden Versuche als Baseline für die protokollierten Eingabezeiten. Zur Erhebung der Eingabezeiten mit zusätzlicher Akkommodationsleistung des Auges werden im zweiten Teilversuch eines der vier Anzeigeelemente und der Bildschirm in der Distanz von 14m verwendet. Die Vorgehensweise ist analog zu der im ersten Teilversuch, nur wird die Information nun abwechselnd in der Entfernung 14m und einer der vier Distanzen gezeigt. Die Größe

des Landoltringes ist jeweils auf die Distanz angepasst; die Versuchsperson sieht den Ring immer in 1° Blickwinkel. Der Versuchsablauf ist in Abbildung 47 schematisch dargestellt. Die Reihenfolge, in der die unterschiedlichen Distanzen durchlaufen werden, variiert zwischen den einzelnen Probanden. Die Aufgabe des Probanden besteht darin, Information abwechselnd in kleiner und großer Distanz aufzunehmen; er muss also für jeden Ablesevorgang akkommodieren. Die Dauer des Akkommodationsvorganges wirkt sich auf die Eingabezeit aus, wodurch aus der Protokollierung der Eingabezeiten Aussagen über die Dauer der Akkommodation gemacht werden können. Zusätzlich zu diesen objektiven Daten werden subjektive Daten über eine Befragung der Probanden nach jedem Teilversuch dokumentiert. Hierbei wird abgefragt, wie anstrengend die Aufgabe empfunden wurde; eine Bewertung dieser Anstrengung erfolgt auf einer Skala von „++“ (sehr anstrengend) bis „--“ (gar nicht anstrengend) in fünf Bewertungsstufen.

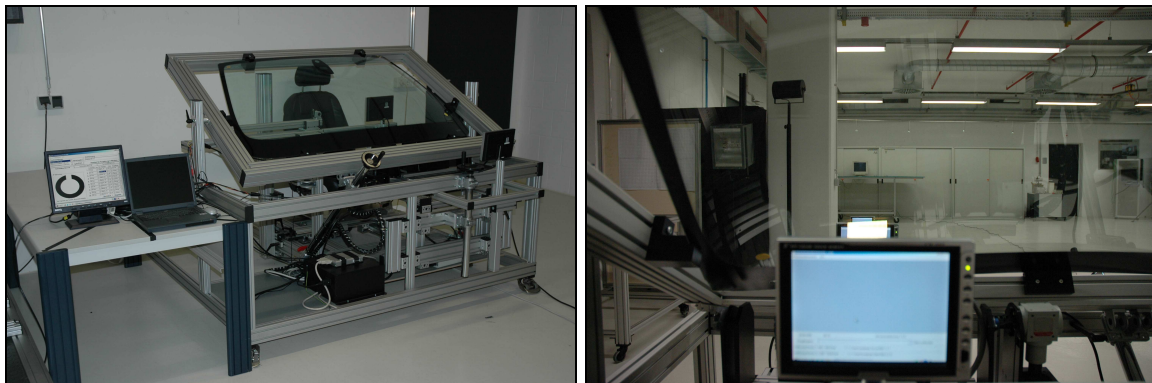


Abbildung 46: Versuchsaufbau zur Akkommodationszeit

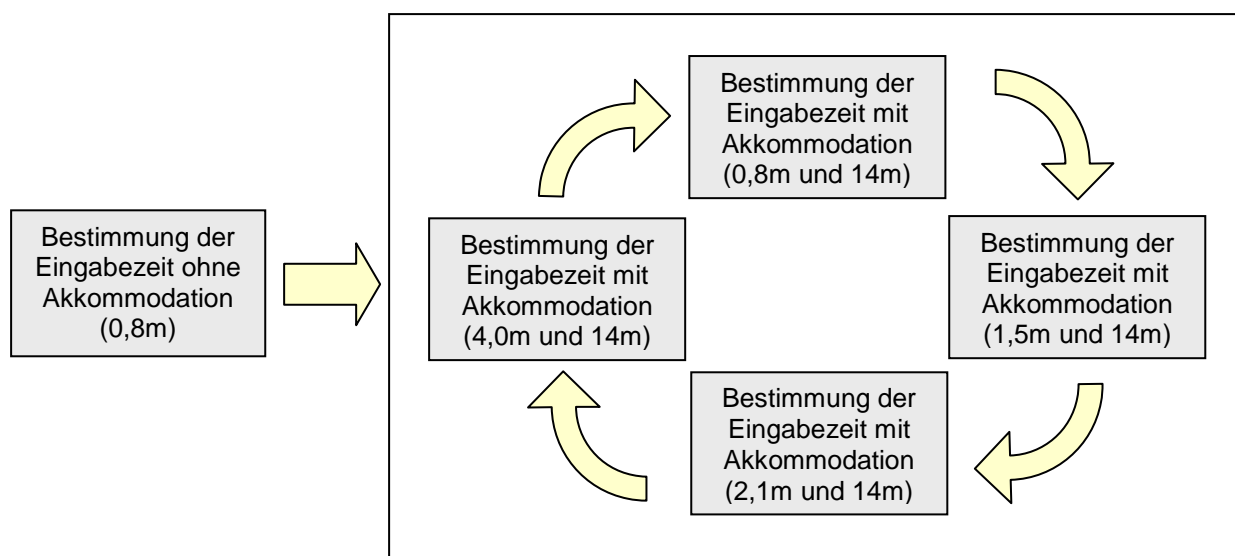


Abbildung 47: Ablauf des Versuchs zur Akkommodationszeit

Die Auswertung der Eingabezeiten zeigt, dass die reinen Reaktionszeiten vom ersten Teilversuch bei durchschnittlich 0,515s liegen (Standardabweichung 0,093s). Für die Distanz 0,8m liegt der Durchschnitt der Eingabezeit bei 0,633s (Standardabweichung 0,149s), für die Distanz 1,5m wird 0,602s (Standardabweichung 0,136s), für die Distanz 2,1m 0,596s (Standardabweichung 0,119s) und für die Distanz 4,0m 0,575s (Standardabweichung 0,112s) ermittelt (Abbildung 48).

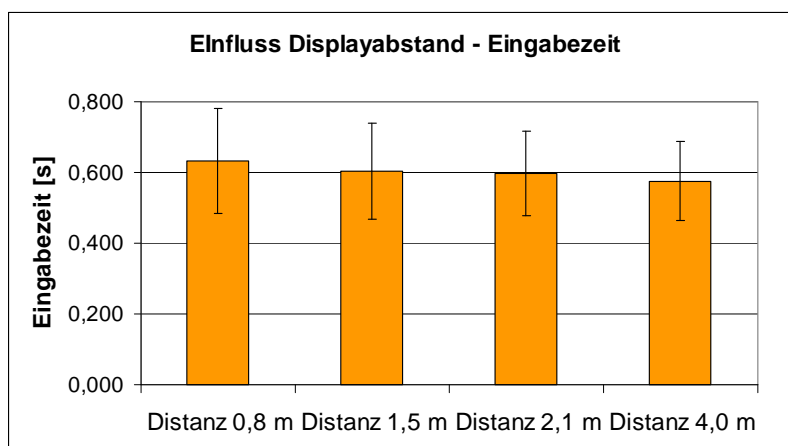


Abbildung 48: Einfluss des Displayabstandes auf die Eingabezeit

Auf Grund der Ergebnisse eines t-Tests kann die Aussage getroffen werden, dass ein signifikanter Unterschied ( $\alpha = 5\%$ ) der Eingabezeiten für unterschiedliche Displaydistanzen festzustellen ist. Der Unterschied der mittleren Eingabezeiten ist absolut betrachtet allerdings sehr gering; zwischen einer Displayposition in Distanz 1 und Distanz 4 beträgt der Unterschied 0,06s. Die Differenz zwischen der reinen Reaktionszeit (ohne Akkommodation) und der Eingabezeit für die Distanz 4 beträgt ebenso 0,06s. Somit hat die Distanzvergrößerung einer Anzeige von 0,8m auf 4,0m hinsichtlich der gemessenen Eingabezeit den gleichen Effekt wie eine Vergrößerung der Distanz von 4,0m auf „unendlich“ (d.h. Ableseaufgabe ohne Akkommodationsvorgang). Betrachtet man die subjektive Bewertung der empfundenen Anstrengung während der einzelnen Teilversuche (Abbildung 49), ist eine deutliche Verringerung der empfundenen Anstrengung mit wachsender Bild дистанz feststellbar. Besonders für die Bild дистанz von 0,8m wird die Durchführung der gestellten Aufgabe als deutlich anstrengender empfunden als bei den größeren Distanzen.

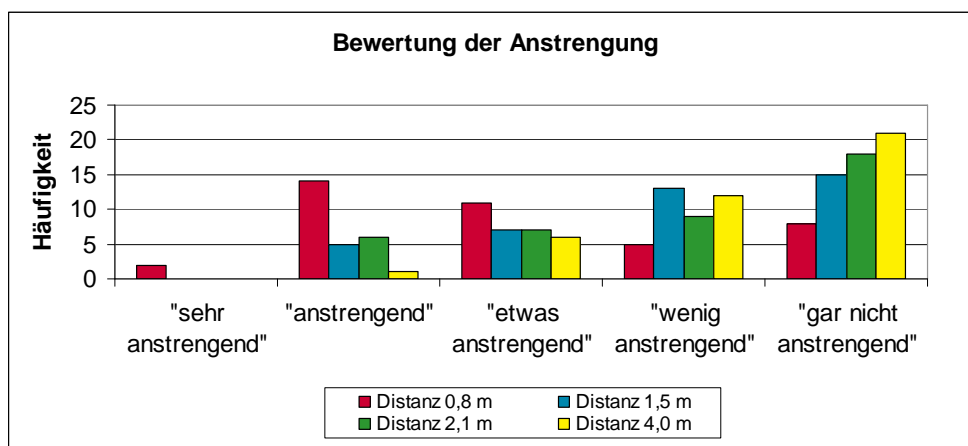


Abbildung 49: Bewertung der empfundenen Anstrengung

Auf Grund der Daten für die mittleren Eingabezeiten für die gestellte Aufgabe und der subjektiven Bewertung der Anstrengung lässt sich feststellen, dass eine Anzeige in einer Distanz von 0,8m vor dem Fahrerauge aus den untersuchten Varianten die am schlechtesten geeignete ist. Vor allem die hohe Bewertung der empfundenen Anstrengung zeigt das große Potenzial eines Head-up-Displays mit virtuellem Bild, bei dem der geringere Akkommodationsaufwand für den Fahrer deutlich in Form einer geringeren empfundenen Anstrengung spürbar ist. Die untersuchte Distanz von 0,8m entspricht in etwa dem Abstand der Windschutzscheibe von den Augen des Fahrers. Die Aussagen für diese Distanz sind somit auf eine Windschutzscheibenprojektion übertragbar; im Vergleich zu den anderen untersuchten Displaydistanzen (die beispielsweise bei Head-up-Displays angewendet werden können), ist für eine Windschutzscheibenprojektion somit eine Verschlechterung der Ablesecharakteristik anzunehmen. Technisch gesehen kann allerdings eine richtungsanaloge Anzeige mit einer Windschutzscheibenprojektion umgesetzt werden, wobei die Augenposition des Fahrers mittels eines Eyetracking-Systems erfasst werden muss. Auf Grund der geringen Distanz der Windschutzscheibe zum Fahrerauge ist eine Beeinflussung der Wahrnehmung der Tiefenkriterien nicht möglich; die Dominanz der Querdissipation kann durch Einflüsse auf die Wahrnehmung monokularer Tiefenkriterien nicht aufgehoben werden. Somit wird die Anzeige vom Fahrer immer in ihrer Eigenschaft als auf die Scheibe projizierte Darstellung wahrgenommen werden.

### 3.3 Bewertung der Realisierungsmöglichkeiten

Für die Umsetzung eines Head-up-Displays mit kontaktanaloger Darstellung in einem Technikträger soll aus den in Kapitel 3.2 beschriebenen Möglichkeiten die am besten geeignete herausgefunden werden. Hierfür dient die folgende Einschätzung des jeweiligen Potenzials.

#### **Beeinflussung der Wahrnehmung von Tiefenkriterien**

Für die Umsetzung einer kontaktanalogen Darstellung mittels einer Beeinflussung der Wahrnehmung von Tiefenkriterien müssen zwei Sachverhalte beachtet werden: Unterdrückung binokularer Tiefenkriterien und geeignete Anpassung der Darstellung hinsichtlich der Wahrnehmung monokularer Tiefenkriterien. Die Problematik liegt bei der Unterdrückung der binokularen Tiefenkriterien. Die beschriebene Reduzierung der Eyebbox auf ein Auge zieht deutliche Nachteile mit sich. Es muss sichergestellt sein, dass sich immer dasselbe Auge im Bereich der Eyebbox befindet; ein Wechsel zwischen einer Informationsaufnahme mit dem linken und rechten Auge darf nicht stattfinden. Die gewünschte Vermeidung von stereoskopischen Effekten verbietet ebenso, dass sich der Fahrer mit beiden Augen im Bereich der Eyebbox befindet. Der Auslegungsspielraum für die Eyebbox ist daher enorm eingeschränkt; somit kann für eine Veränderung der Augposition des Fahrers nur in geringem Maße die Sichtbarkeit des virtuellen Bildes sichergestellt werden. Als Lösung für diese Problematik kann ein Eyetracking-System dienen. Hiermit wäre eine Nachführung der Eyebbox entsprechend der momentanen Augposition möglich. Dies erfordert jedoch enorme Ansprüche an die technische Ausführung des Head-up-Displays, da eine Nachführung der Eyebbox simultan zu den Kopfbewegungen erfolgen muss, um sicherzustellen, dass die Lage der Eyebbox in jedem Moment der Augpunktlage entspricht. Alternativ dazu kann nach Bergmeier (vgl. [2]) ein kontaktanaloger Charakter im Head-up-Display durch eine alleinig perspektivische Darstellung der Information ab einer virtuellen Distanz von ca. 50m bei binokularer Eyebbox umgesetzt werden. Schwierigkeiten können bei Fahrzeugbewegungen auftreten, da die Darstellungen auf Grund der großen Entfernung zum Fahrzeug empfindlich auf Nickbewegungen des Fahrzeugs reagieren, wodurch als Folge ein unruhiges Bild entstehen würde. Dennoch wäre eine solche Vergrößerung der virtuellen Distanz in Verbindung mit einem geeigneten Anzeigekonzept (perspektivische Darstellung) eine Möglichkeit, im Head-up-Display eines Fahrzeugs eine Anzeige zu implementieren, die vom Fahrer als kontaktanalog wahrgenommen wird. Hierfür ist jedoch dennoch ein Blickerfassungssystem nötig, um den Ort der Anzeigen in Abhängigkeit von der jeweiligen Augposition des Fahrers so anzupassen, dass diese als kontaktanalog

empfunden werden. Physikalisch gesehen ist jedoch hier das virtuelle Bild bezüglich der x-Koordinate im Fahrzeugkoordinatensystem nicht in der Entfernung des zu markierenden Objekts. Es handelt sich also nicht um eine ortskorrekte Darstellung im eigentlichen Sinn.

### **Stereoskopische Bilddarstellung**

Die beschriebene stereoskopische Bilddarstellung zur Umsetzung einer kontaktanalogen Anzeige bietet ebenso nicht die Möglichkeit einer tatsächlich ortskorrekten Darstellung. Die virtuelle Ebene bleibt in fixer Entfernung vom Auge; das zu markierende Objekt liegt weiter entfernt. Die Differenz der Entfernungen des virtuellen Bildes in der fixen Ebene und des zu markierenden Objektes führt zu Parallaxeneffekten. Daher ist für diese Anwendung ein Eyetracking-System nötig, um die Position der Anzeige (in der y-z-Ebene des Fahrzeugkoordinatensystems) der Augenposition anzupassen. Dies bedeutet einen enormen technischen Aufwand und ist für eine Serienlösung im Fahrzeug nicht denkbar. Außerdem sind durch die Forderung nach je einer Eyebox pro Auge die gleichen Schwierigkeiten bezüglich einer Trennung der beiden Eyeboxen zu erwarten, wie bei der beschriebenen Variante des monokularen Head-up-Displays.

### **Schräge Displayebene**

Die Variante der schrägen Displayebene ist die einzige der beschriebenen Möglichkeiten, eine im physikalischen Sinne korrekte kontaktanaloge Darstellung im Head-up-Display zu realisieren, da die virtuelle Markierung eines realen Objektes in der physikalisch korrekten Distanz erfolgen kann. Es ist kein Eyetracking-System nötig, da die Augenposition innerhalb der Eyebox für die Positionierung der Anzeige nicht relevant ist. Dies liegt darin begründet, dass durch die Überlagerung von virtueller Markierung und realem Objekt keine Parallaxeneffekte auftreten. Die Eyebox kann herkömmlich – also binokular – ausgeführt werden, wobei die Größe den anthropometrischen Gegebenheiten im Fahrzeug angepasst werden muss. Eine bewegliche Ausführung der Eyebox ist nicht erforderlich. Schwierigkeiten bei der technischen Umsetzung hinsichtlich komplexer Technik sind nicht zu erwarten.

### **Windschutzscheibenprojektion**

Die Windschutzscheibenprojektion weist Vorteile bezüglich der Positionierung der Bauteile im Fahrzeug auf. Es ist kein exakt positioniertes optisches System wie bei einem Head-up-Display mit virtuellem Bild nötig; beispielsweise ist eine

Positionierung des UV-Lasers im mittleren Bereich der Instrumententafel möglich. Es treten jedoch die Probleme hinsichtlich Parallaxeneffekte in gesteigertem Maße auf, da die Distanz zwischen der Markierung und dem Auge sehr klein ist. Ein Eyetracking-System ist daher unabdinglich, um eine zumindest richtungsanaloge Darstellung zu verwirklichen; eine kontaktanaloge Darstellung ist mit diesem System nicht möglich. Wie die Probandenstudie in Kapitel 3.2.2 zeigt, ist für eine Darstellung auf der Windschutzscheibe eine Erhöhung der Ablesezeit und der subjektiv empfundenen Anstrengung beim Ablesevorgang zu erwarten.

### **Folgerung**

Auf Grund der beschriebenen Konsequenzen für eine Umsetzung der Technologien im Fahrzeug ist die Variante der schrägen Displayebene die erfolgversprechendste. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass es die einzige realisierbare Möglichkeit ist, eine korrekte kontaktanaloge Darstellung umzusetzen und somit keine Parallaxeneffekte auftreten. Dies hat wiederum zur Folge, dass eine Kenntnis der Augenposition nicht nötig ist und somit auf ein Eyetracking-System verzichtet werden kann. In Kapitel 4 werden nun technische Details eines solchen Head-up-Displays mit schräger Displayebene und somit liegendem virtuellem Bild beschrieben.

## 4 Technische Umsetzung der Variante der schrägen Displayebene

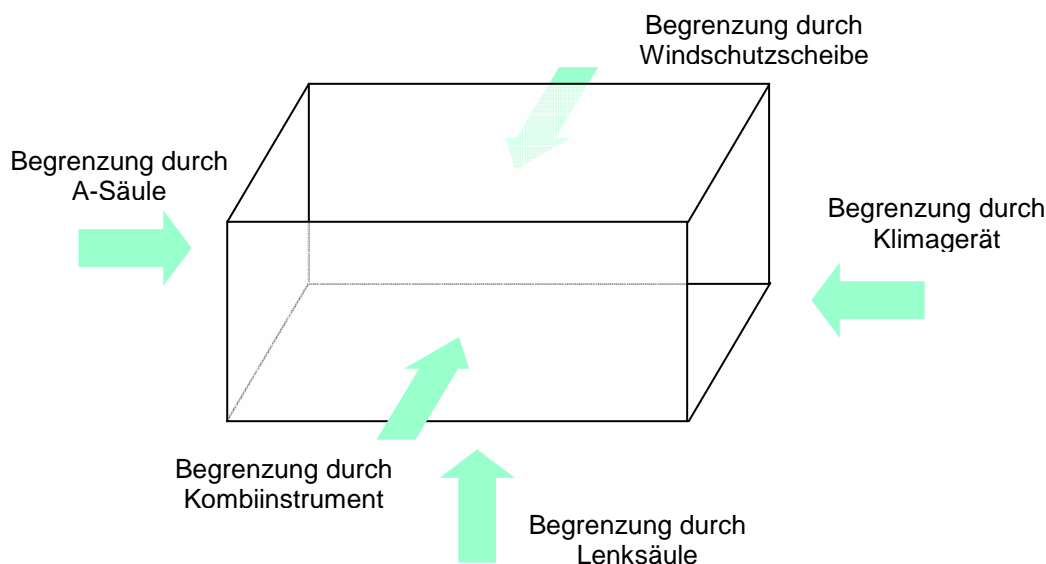
Für die technische Umsetzung der Variante der schrägen Displayebene bedarf es zuerst einer Definition der Randbedingungen für den Aufbau eines Versuchsträgers (Kapitel 4.1). Die Vorgaben für die Auslegung des virtuellen Bildes aus Kapitel 4.2 definieren schließlich das optische System des Head-up-Displays (Kapitel 4.3). Technische Daten der Bildquelle und die Ansteuerung sind in den Kapiteln 4.4 und 4.5 beschrieben. Die Dokumentation des Systemeinbaus in einen Versuchsträger und die dabei entstandenen Probleme soll die Beschreibung der technischen Umsetzung mit Kapitel 4.6 abschließen.

### 4.1 Randbedingungen

Um sicherzustellen, dass der Einbau und der Betrieb des kontaktanalogen Head-up-Displays im Versuchsfahrzeug möglich sind, werden bereits vor der Konstruktion des Systems die Randbedingungen für einen späteren Einsatz im Technikträger definiert. Als Technikträger dient ein Audi A8 4.2 quattro; die geplante Umsetzung des Anzeigekonzepts erfordert für die Datenbereitstellung ein Navigationssystem und ein ACC-System; beide Systeme sind im Versuchsfahrzeug vorhanden. Die serienmäßige Windschutzscheibe wird zur Behebung des Doppelbildes durch eine Windschutzscheibe mit Keilfolie ersetzt. Diese Windschutzscheibe hat einen Keilwinkel von  $\gamma = 0,42\text{mrad}$ . Die Forderung nach einer seriennahen Umsetzung eines kontaktanalogen Head-up-Displays erfordert eine Verbausituation im Technikträger, die eine normale Nutzung des Fahrzeugs zulässt; im optimalen Fall ist außer der Öffnung in der Instrumententafel zwischen Kombiinstrument und Windschutzscheibe für den Fahrer keine Veränderung am Versuchsfahrzeug zu erkennen. Dadurch soll sichergestellt sein, dass eine Umsetzung des Konzepts für die Serienentwicklung neuer Fahrzeuge nicht an grundlegenden Packageproblemen scheitert. Bauraum für den Einbau des Head-up-Displays ist bei dem verwendeten Versuchsträger nicht gegeben, da für den Audi A8 kein Head-up-Display angeboten wird und somit der Bauraum anderweitig belegt ist. Um den Einbau des Head-up-Displays in den Versuchsträger zu ermöglichen, ist eine Modifikation des Schalttafelquerträgers, der Scheibenwischermechanik, der Spritzwand, der Scheibenbelüftung und des Kombiinstrumentes technisch möglich; die fahrerseitige A-Säule, Position und Form des Klimagerätes, die Position der Windschutzscheibe und die der Lenksäule können



nicht mit absehbarem Aufwand verändert werden. Somit ergibt sich ein maximal möglicher Bauraum, der für einen prototypischen Einbau eines kontaktanalogen Head-up-Displays in den beschriebenen Versuchsträger zur Verfügung steht. In Abbildung 50 sind die den Bauraum des Head-up-Displays begrenzenden Elemente im Fahrzeug dargestellt.



*Abbildung 50: Begrenzende Elemente des Head-up-Display-Packages im Fahrzeug*

Die Herausforderung bei der Umsetzung des beschriebenen Konzeptes ist es nun, unter den gegebenen bauräumlichen Beschränkungen die Hardware des kontaktanalogen Head-up-Displays so auszulegen, dass keine Packagekonflikte mit anderen Bauteilen auftreten. Die genauen Konturen der begrenzenden Bauteile liegen in Form von CAD-Daten vor. Bei der Auslegung des virtuellen Bildes sind stets die Auswirkungen auf den benötigten Bauraum zu berücksichtigen. Ein ständiger Abgleich der benötigten Optik mit den vorhandenen Freiräumen im Fahrzeug ist nötig. Als Größenordnung soll eine Breite von 320mm (y-Richtung), eine Höhe von 250mm (z-Richtung) und eine Tiefe von 300mm (x-Richtung) nicht überschritten werden. Da die begrenzenden Konturen keine ebene Form aufweisen, kann im Einzelfall geprüft werden, ob eine partielle Überschreitung der angegebenen maximalen Maße für Einzelbauteile am Head-up-Display zulässig ist.

## 4.2 Auslegung des virtuellen Bildes

Die in Kapitel 3.2.1.3 beschriebene Form des virtuellen Bildes soll hier detailliert werden. Für die geforderte maximale virtuelle Distanz ist die Entfernung ausschlaggebend, die abhängig von der Geschwindigkeit die Zeitlücke beschreibt, die der Fahrer vor einer Gefahrenstelle gewarnt werden muss, um einen Ausweich- oder Bremsvorgang einzuleiten. Für eine Auslegung bezogen auf den benötigten Anhalteweg  $x_A$ , der sich aus der Summe von Reaktionsweg  $x_R$  und Bremsweg  $x_B$  errechnet, wird für die Reaktionszeit das Standardmaß von  $t_R = 1\text{s}$  angenommen; als maximale anzunehmende Geschwindigkeit  $v_{MAX}$  gilt die Abregelgeschwindigkeit von  $250\text{km/h}$ ; als maximale Verzögerung  $a_{MAX}$  soll der Wert von  $8\text{m/s}^2$  angenommen werden. Der Anhalteweg  $x_A$  errechnet sich somit nach Formel (13):

$$x_A = x_R + x_B = v_{MAX} \cdot t_R + \frac{v_{MAX}^2}{2a_{MAX}} = 371\text{m} \quad (13)$$

Dieser Auslegung folgend, ist es also erforderlich, eine virtuelle Distanz von mindestens  $371\text{m}$  darstellen zu können. Für eine Auslegung des kontaktanalogen Head-up-Displays als Anzeigemedium für das ACC-System ist eine Darstellung der größtmöglichen Distanz bei Folgefahrt erforderlich. Diese errechnet sich mit der größten wählbaren Zeitlücke (Distanzstufe 4) im Audi A8 von  $t_4 = 2,3\text{s}$  und einer maximalen Setzgeschwindigkeit für das ACC-System von  $v_{ACC} = 200\text{km/h}$  nach Formel (14):

$$x_{ACC} = v_{ACC} \cdot t_4 = 128\text{m} \quad (14)$$

Für eine Anwendung des kontaktanalogen Head-up-Displays als Anzeigemedium für das ACC-System reicht somit eine maximale virtuelle Distanz von  $128\text{m}$  aus; für die Realisierung sicherheitsrelevanter Anzeigen über den gesamten Geschwindigkeitsbereich bleibt der Wert von  $371\text{m}$  das bestimmende Maß (Abbildung 51, oben). Anhand der ersten Schritte der Optikauslegung mit dem PC-Tool ZEMAX ist allerdings zu erkennen, dass für den vorhandenen Bauraum ein liegendes virtuelles Bild von maximal  $40\text{m}$  Länge umgesetzt werden kann (Abbildung 51, mittig). Die bauraumbedingt begrenzte Anzahl optischer Elemente und eine maximal zulässige Lateralvergrößerung schränken die maximale Länge des liegenden virtuellen Bildes ein. Die realisierbare Länge von  $40\text{m}$  reicht jedoch nicht aus, um eine sinnvolle kontaktanaloge Darstellung im Head-up-Display umzusetzen, da sicherheitsrelevante Anzeigen nach Formel (13) nur für Geschwindigkeiten bis ca.  $67\text{km/h}$  möglich wären. Somit ginge eine Anwendung des Systems nicht über eine Nutzung innerhalb geschlossener Ortschaften hinaus. Eine Änderung der

Geometrie des virtuellen Bildes bietet jedoch Potenzial, eine als kontaktanalog empfundene Anzeige auch für größere Objektdistanzen zu realisieren. Grundlage dieser Änderung ist eine Anhebung der virtuellen Ebene von der Fahrbahn in größeren Distanzen, was in einfachster Ausführung durch Anwinkeln umzusetzen ist (Abbildung 51, unten).

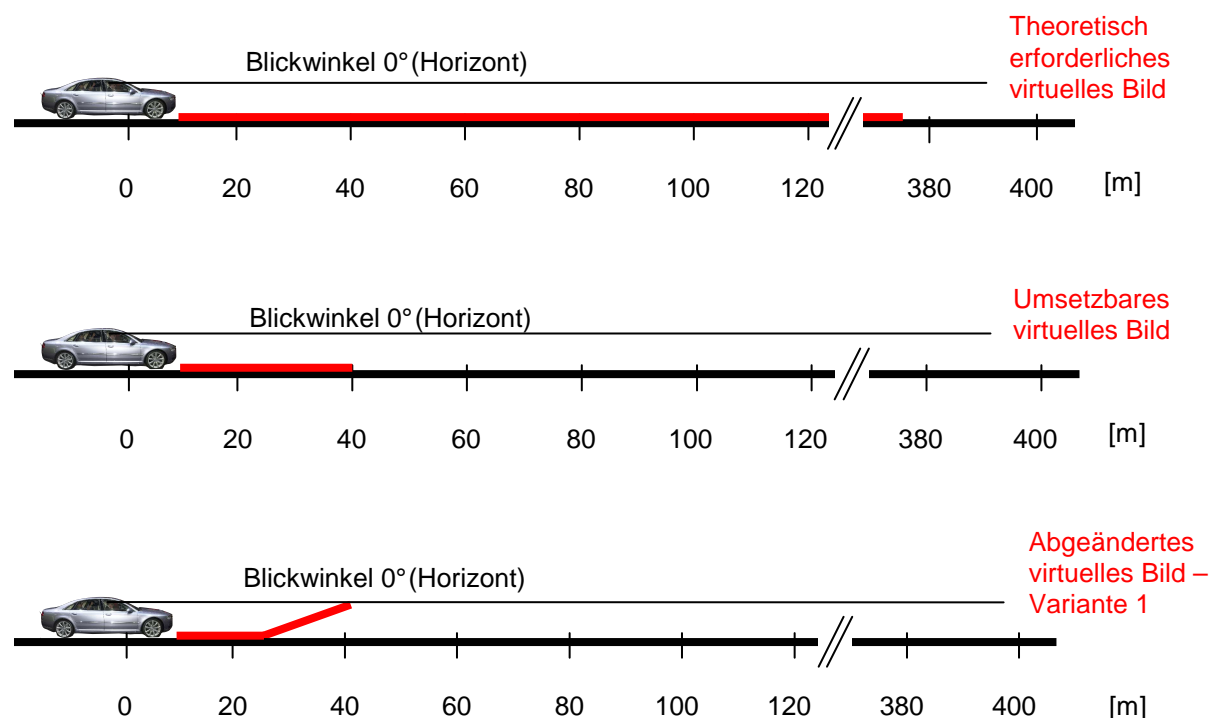


Abbildung 51: Längsauslegung des virtuellen Bildes – Teil 1

Bei dieser Möglichkeit einer Erhöhung der maximalen Anzeigedistanz liegt die virtuelle Ebene bis zum Scheitelpunkt auf der Fahrbahn; danach steigt sie – im Optimalfall bis zum Erreichen des Horizonts – an. Der liegende Teil der virtuellen Ebene ermöglicht eine korrekte kontaktanaloge Darstellung. Befindet sich der ansteigende Teil der Anzeigefläche in einer Entfernung von über 6m vom Augpunkt entfernt (vgl. [3]), sind die Einflüsse der Querdissipation so gering, dass über eine gezielte Einflussnahme auf die monokularen Tiefenkriterien ein Tiefeneindruck von größeren Distanzen erzeugt werden kann. Die technische Realisierung eines solchen virtuellen Bildes hätte nach der Prinzipdefinition von Abbildung 43 die Verwendung eines geknickten Displays zur Folge; eine Verwendung von zwei gekoppelten Displays, die im Winkel zueinander angeordnet sind, ist ebenso möglich. In Abbildung 52 ist ausgehend von der gewünschten Form des virtuellen Bildes ( $B_1, B_2, B_3$ ) die geometrische Anordnung des/der Displays ( $G_1, G_2, G_3$ ) rückgeführt.

Die Darstellung einer als kontaktanalog empfundenen Information ist für diese un stetige Auslegung des virtuellen Bildes im Übergangsbereich des liegenden zum ansteigenden Bildteil jedoch unvorteilhaft. Bei der Bewegung einer Anzeige über diesen Bereich ist im virtuellen Bild kein stetiger Verlauf der Darstellung möglich.

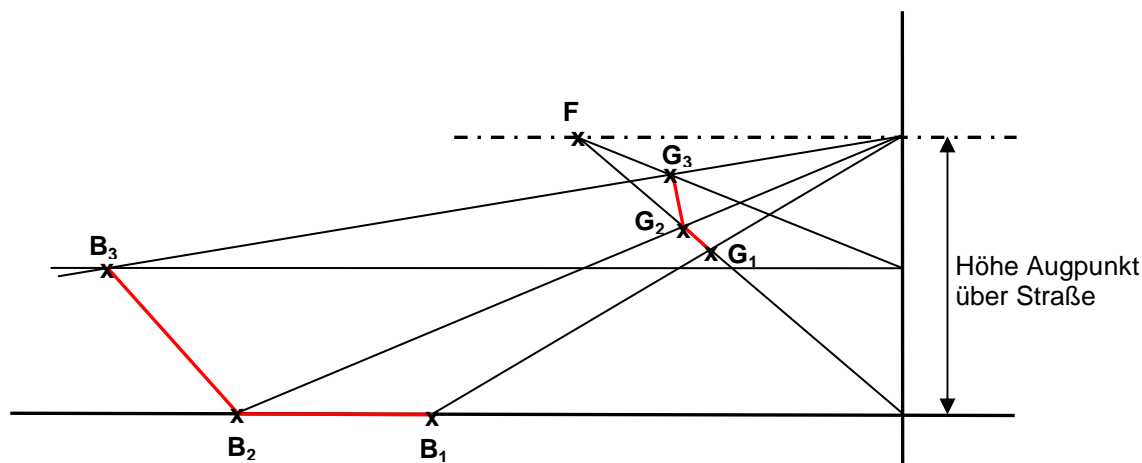


Abbildung 52: Strahlengang zur Umsetzung eines gewinkelten virtuellen Bildes

Der un stetige Übergang der beiden Neigungen im virtuellen Bild kann vermieden werden. Hierfür ist beispielsweise eine Auslegung des virtuellen Bildes in Form einer Zylindermantelfläche möglich; in Abbildung 53 ist dies beispielhaft dargestellt. Der Strahlengang zur Konstruktion der Displayoberfläche ist analog zu dem in Abbildung 52; lediglich ist der Bildbereich zwischen B<sub>1</sub> und B<sub>3</sub> in unendlich viele Punkte entlang eines Kreissegments aufgeteilt. Somit kann jeder Bildpunkt B<sub>n</sub> auf einen Gegenstandspunkt G<sub>n</sub> zurückgeführt werden.

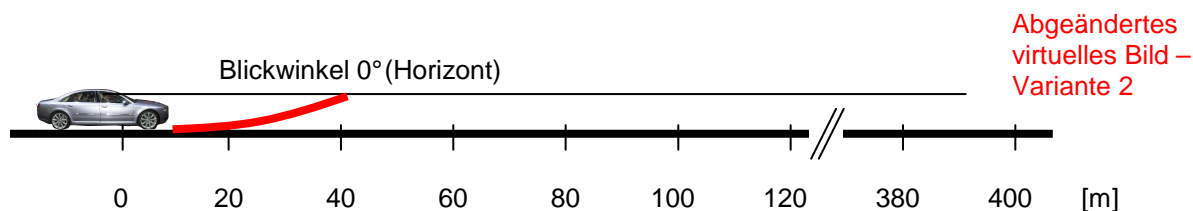


Abbildung 53: Längsauslegung des virtuellen Bildes – Teil 2

Dieser Effekt eines virtuellen Bildes in der Form einer Zylindermantelfläche muss nicht zwingend über die Krümmung der Displayebene erfolgen. Der Einsatz von asphärischen Spiegeln im Strahlengang ermöglicht die Umsetzung eines virtuellen

Bildes in der beschriebenen Form mit einem ebenen Display als Bildquelle. Die Verfügbarkeit von ebenen Displays für diese Anwendung ist gegeben (vgl. Kapitel 4.4); die Herstellbarkeit von gekrümmten Displays mit den erforderlichen Eigenschaften für eine Anwendung im Head-up-Display ist fraglich und würde enorme Kosten mit sich ziehen. Allerdings treten bei der Verwendung von asphärischen Spiegeln bei Kopfbewegungen Verzerrungen des Bildes auf. In wie weit die Verzerrungen akzeptabel sind, wird sich nach der Implementierung des Anzeigekonzeptes im Fahrversuch zeigen; für den erste Schritt soll die Variante mit ebenem Display und asphärischen Spiegeln umgesetzt werden. Mit der Positionierung der Bildquelle und der Positionierung, Größe und Oberflächengestaltung der optischen Bauteile im System (vgl. Kapitel 4.3) ist unter Berücksichtigung der vorgegebenen Bauraumeinschränkungen ein virtuelles Bild mit der in Abbildung 54 gezeigten Form realisierbar. Die kürzeste virtuelle Distanz, die mit diesem System angezeigt werden kann, beträgt 12m; die Sicht auf die Fahrbahn vor dem Fahrzeug beginnt – gemessen vom Augpunkt und abhängig von der Sitzposition – bei ca. 5m. Der Bereich der Fahrbahn in einer Entfernung von 5m bis 12m vor dem Augpunkt kann nicht als Anzeigefläche verwendet werden. Für eine Distanz vom Augpunkt bis zum vordersten Punkt am Fahrzeug von ca. 2,5m ist also eine Anzeige ab 9,5m vor dem Fahrzeug möglich. Das virtuelle Bild schneidet den Horizont in einer Entfernung von ca. 31m; Darstellungen in dieser Entfernung erscheinen somit am Horizont. Physikalisch endet das virtuelle Bild in einer Entfernung von 35m; Darstellungen in einer Entfernung zwischen 31m und 35m erscheinen für den Fahrer über dem Horizont. Somit ist in Längsrichtung eine Anzeigemöglichkeit von ca. 9,5m vor dem Fahrzeug bis über den Horizont hinaus möglich. Aussagen über die tatsächlich empfundene virtuelle Distanz einer solchen Anzeige folgen in Kapitel 6.

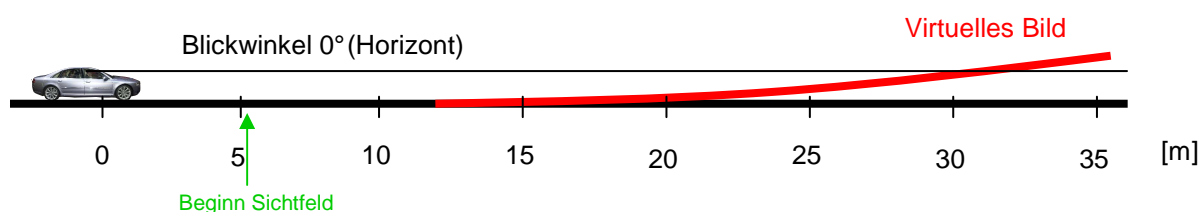


Abbildung 54: Umgesetzte Längsform des virtuellen Bildes

Nach der Definition der Längsauslegung werden nun die Anforderungen an die Breite des virtuellen Bildes ermittelt. Hierfür ausschlaggebend ist der Fahrbahnverlauf in einer Kurve in Zusammenhang mit der Geschwindigkeit, mit der die Kurve

durchfahren wird. Für eine sicherheitsrelevante Auslegung des Systems sei somit im ersten Schritt angenommen, dass bei Abregelgeschwindigkeit  $v_{MAX} = 250\text{km/h}$  eine Kurve mit der maximal möglichen Querbeschleunigung von  $a_{quer/MAX} = 0,8g$  (nach [18], S. 558) durchfahren wird. Die weiteren Daten sind identisch mit denen zur Berechnung des Anhalteweges. In Abbildung 55 ist der Zusammenhang zur Ermittlung der maximalen Querabweichung  $y_S$  der Anzeige beschrieben.

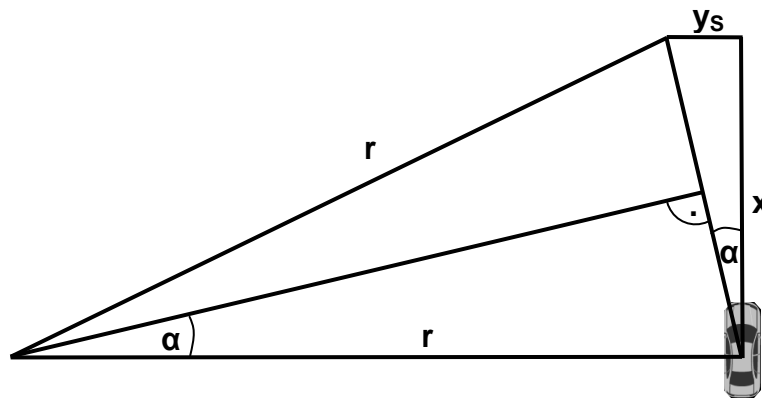


Abbildung 55: Grundlage zur Berechnung der maximalen Querabweichung

Es gelten folgende Zusammenhänge:  $\sin \alpha \approx \frac{y_S}{x_A}$  und  $\sin \alpha = \frac{x_A/2}{r}$

$$\text{Somit gilt in Näherung: } y_S = \frac{x_A^2}{2r} \quad (15)$$

Des Weiteren gilt  $x_A = v_{MAX} \cdot t_R + \frac{v_{MAX}^2}{2a_{MAX}}$  und  $r = \frac{v_{MAX}^2}{a_{quer/MAX}}$

Somit ergibt sich zur Berechnung von  $y_S$  Formel (16): (16)

$$y_S = \frac{\left( v_{MAX} \cdot t_R + \frac{v_{MAX}^2}{2a_{MAX}} \right)^2}{2 \cdot \frac{v_{MAX}^2}{a_{quer/MAX}}} = \frac{v_{MAX}^2 \cdot a_{quer/MAX}}{8a_{MAX}^2} + \frac{v_{MAX} \cdot a_{quer/MAX} \cdot t_R}{2a_{MAX}} + \frac{a_{quer/MAX} \cdot t_R^2}{2}$$

Die bekannten Werte liefern somit in einer maximalen empfundenen Anzeigeentfernung von  $x_A = 371\text{m}$  für die maximale Querabweichung einen Wert von  $y_S = 114\text{m}$ . Nimmt man die umgesetzte virtuelle Distanz von  $31\text{m}$  für Annäherung an

den Horizont als tatsächliche Anzeigenentfernung an, so benötigt man in dieser Entfernung nach dem Strahlensatz die Möglichkeit zur Anzeige von maximal 9,5m Querabweichung. Die tatsächlich im Straßenverkehr auftretenden Querbeschleunigungen bei Durchschnittsfahrern liegen jedoch für 99,8% der Strecke unter 0,3g (nach [18], S. 559f). Dies ergibt für die maximale empfundene Anzeigentfernung von 371m eine geforderte Darstellungsmöglichkeit für Querabweichungen von 42m. Bezogen auf eine virtuelle Distanz von 31m ergibt sich somit für die Darstellungsmöglichkeit der Querabweichung eine Forderung von 3,5m. Bei der Umsetzung des Head-up-Displays ist der limitierende Faktor für die Auslegung der Breite des virtuellen Bildes die maximal mögliche Größe des letzten Spiegels im Strahlengang. Die in Kapitel 4.1 beschriebenen Randbedingungen beschränken diese Größe auf 320mm. Die in der maximalen virtuellen Entfernung von 35m mögliche Gesamtbreite des virtuellen Bildes liegt daher bei ca. 4m; es kann also eine Querabweichung von ca. 2m beidseitig dargestellt werden. Eine Darstellung der errechneten Querabweichung von beidseitig 3,5m in der virtuellen Distanz von 31m kann somit im vollen Umfang nicht umgesetzt werden. Für das Beispiel einer Anhalteweganzeige in Form eines Balkens heißt dies, dass sich bei zügigen Kurvenfahrten der Balken aus dem virtuellen Bild herausbewegt und nicht mehr ganz sichtbar ist. Die Information über die Länge des Anhalteweges geht jedoch nicht verloren. Abbildung 56 zeigt die umgesetzte Breitenauslegung des virtuellen Bildes.

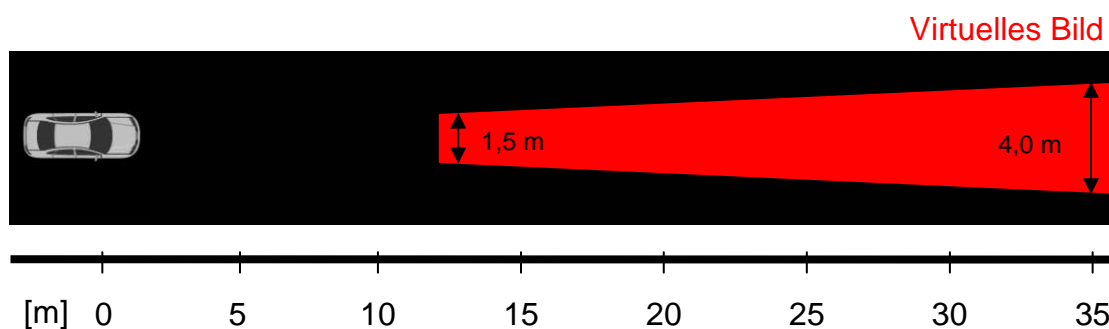


Abbildung 56: Umgesetzte Breitenauslegung des virtuellen Bildes

Die somit festgelegte Form des virtuellen Bildes erlaubt es – unter gewissen Einschränkungen bei zügigen Kurvenfahrten – die Fahrbahn vor dem Fahrzeug als Anzeigefläche zu verwenden. Die bei der Auslegung berücksichtigten Randbedingungen für die Umsetzung eines solchen Systems im Fahrzeug führten mit Hilfe von Simulationen mit ZEMAX zu dieser größtmöglichen Auslegung des virtuellen Bildes. Hierbei wurde über ZEMAX die Formgebung der optischen Bauteile des Head-up-Displays berechnet. Maßgebende Kriterien der Gestaltung der

optischen Bauteile waren somit der vorhandene Bauraum und die Forderung nach einem größtmöglichen virtuellen Bild in der beschriebenen Raumlage. Die Beschreibung der optischen Bauteile geschieht im folgenden Kapitel 4.3.

## 4.3 Optikauslegung

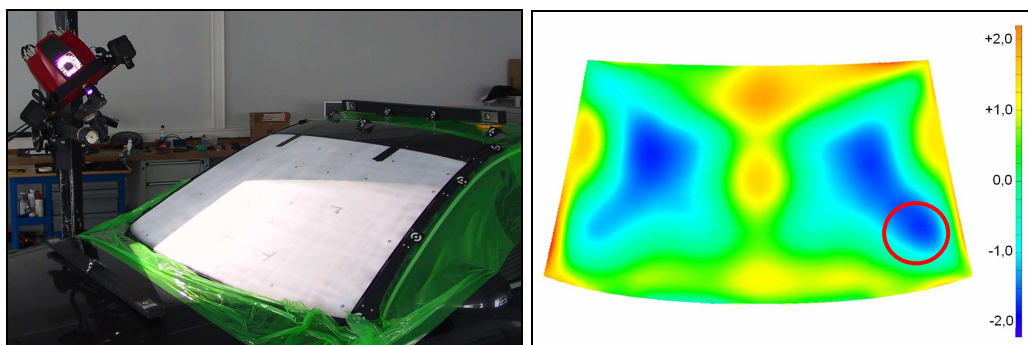
Das optische System des kontaktanalogen Head-up-Displays wird unter der Berücksichtigung der folgenden Kriterien mit Hilfe des Optik-Programms ZEMAX errechnet:

- Einhaltung des unter 4.1 beschriebenen maximalen Bauraumes
- Größtmögliche Auslegung des virtuellen Bildes (vgl. Kapitel 4.2)
- Sicherstellung einer hohen Bildqualität durch Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Studie über Abbildungsfehler in virtuellen Bildern (vgl. Kapitel 2.1.5)
- Berücksichtigung der optischen Eigenschaften der ausgewählten Windschutzscheibe mit Keilfolie

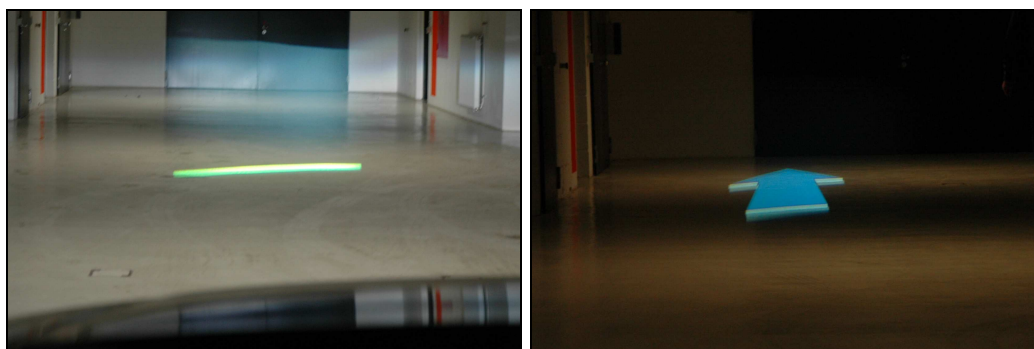
Die Definition des zur Verfügung stehenden Bauraumes, die Dimensionierung des virtuellen Bildes und die Einhaltung der Grenzwerte für optische Abbildungsfehler wurden bereits detailliert beschrieben. Um die optischen Eigenschaften der Windschutzscheibe bei der Optikauslegung berücksichtigen zu können, ist die Kenntnis der exakten Oberflächengeometrie der Scheibe nötig. Ein CAD-Datensatz der Normscheibe für den Audi A8 ist zwar vorhanden, enorme Abweichungen der tatsächlichen Oberflächengeometrie hiervon sind jedoch zu erwarten, da die Windschutzscheibe mit Keilfolie für dieses Fahrzeug nicht in Serie hergestellt wurde, sondern auf Anfrage in geringer Stückzahl für den Einsatz in Versuchsfahrzeugen mit Head-up-Displays angefertigt wurde und somit die Toleranzen noch größer sein können als bei Scheiben aus der Serienproduktion. Um die exakte Oberflächengeometrie der Windschutzscheibe zu ermitteln, wird diese im eingebauten Zustand im Fahrzeug photogrammetrisch vermessen. In Abbildung 57 (links) ist der Messaufbau zu sehen; die Scheibe ist zur Vermessung weiß beschichtet und mit aufgeklebten Messpunkten versehen. Für die Definition der Scheibenlage und den Vergleich mit der Normscheibe in Einbaulage sind auch auf der Fahrzeugkarosserie Messpunkte angebracht. Im rechten Teil der Abbildung 57 ist das Ergebnis der Vermessung dargestellt. Die Farbgebung zeigt die Abweichung der gemessenen Scheibe von der Geometrie der Normscheibe in Millimeter. Ein positiver Wert bedeutet eine Erhöhung gegenüber der Normscheibe; eine negativer Wert eine Absenkung. Es ist zu erkennen, dass die Windschutzscheibe links und rechts jeweils



im mittleren Bereich eine Einsenkung Richtung Fahrzeuginnenraum aufweist. Die maximale Ausprägung dieser Formabweichung beträgt auf der Fahrerseite ca. 2,0mm (rote Markierung) und befindet sich im Reflexionsbereich der Anzeige des Head-up-Displays. Diese Abweichung der Scheibengeometrie von der Form der Normscheibe fließt in die Berechnung der Oberflächenform der optischen Elemente mit ein; somit kann das Head-up-Display für eine verzerrungsfreie Darstellung im virtuellen Bild ausgelegt werden. Eine Verwendung der Geometrie der Normscheibe würde im fertigen System zu einer Verletzung der Vorgaben bezüglich der Grenzwerte für optische Abbildungsfehler führen; als Beispiel zeigt Abbildung 58 die Auswirkung einer Formabweichung der verwendeten Windschutzscheibe vom Berechnungsstand für die Optikauslegung. Im gezeigten Beispiel ist eine Verzerrung des virtuellen Bildes nach unten links festzustellen, die für den in Abbildung 57 gezeigten Diskrepanzcharakter einer Scheibe typisch ist. Mit einer Verwendung der Scheibendaten aus der photogrammetrischen Vermessung für die Optikauslegung werden solche negativen Einflüsse durch Form- und Lagetoleranzen vermieden; die Darstellung eines unverzerrten virtuellen Bildes ist möglich.



*Abbildung 57: Links: Aufbau zur photogrammetrischen Vermessung der Windschutzscheibe; Rechts: Ergebnis der Messung*



*Abbildung 58: Auswirkungen der Diskrepanz von Windschutzscheibengeometrie und Vorgabefläche für die Optikberechnung*

Mittels eines hier nicht näher beschriebenen Vorgehens werden mit Hilfe von ZEMAX die Lage und Oberflächenformen der optischen Elemente im Strahlengang berechnet. Das Ergebnis ist ein System definierter optischer Bauteile, die in Abbildung 59 zu sehen sind. Das erste Bauteil im Strahlengang nach dem Display (D) ist eine asphärische Linse (1). Nach Brechung der Lichtstrahlen fällt das Licht über den planen Umlenkspiegel (2) auf den ersten asphärischen Spiegel (3), von dort auf den zweiten (4) und schließlich auf den dritten (5) asphärischen Spiegel im System. Dieser nutzt die gesamte zur Verfügung stehende Breite des Bauraumes aus; die maximal mögliche Größe des virtuellen Bildes wird von der Größe dieses Spiegels bestimmt. Nach Ablenkung am Spiegel (5) fällt das Licht in die Windschutzscheibe und wird von dort in das Auge des Fahrers gelenkt. In Abbildung 60 ist der optische Strahlenverlauf im kontaktanalogen Head-up-Display dargestellt.

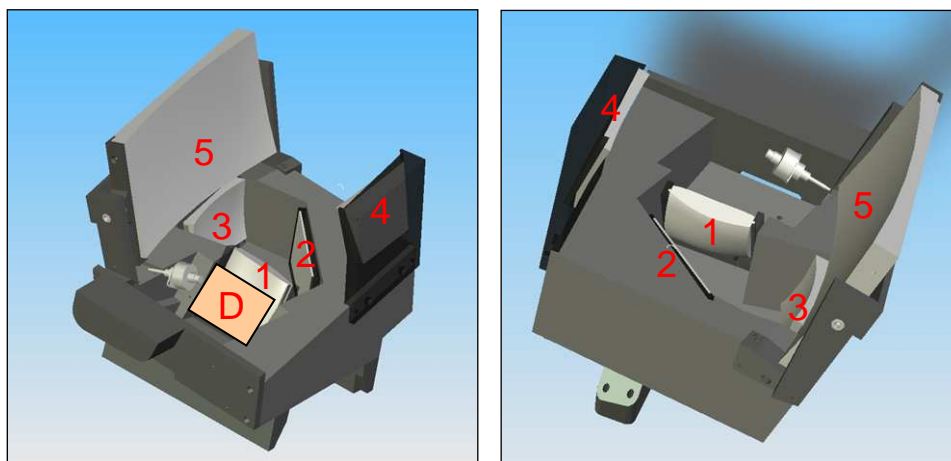


Abbildung 59: Optische Komponenten im kontaktanalogen Head-up-Display

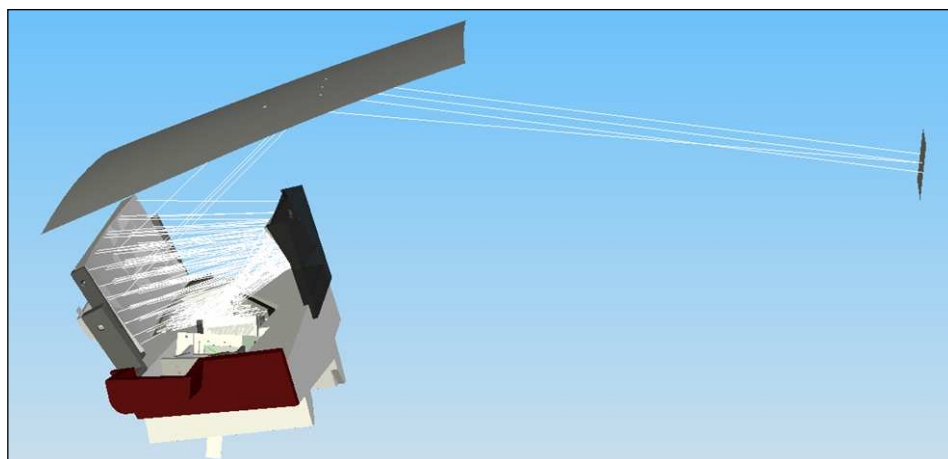


Abbildung 60: Strahlenverlauf im kontaktanalogen Head-up-Display

Der asphärische Spiegel (5) ist beweglich gelagert; er kann über eine elektrische Verstelleinrichtung um die Längsachse gekippt werden. Diese Einstellmöglichkeit soll bei eventuell auftretenden Ungenauigkeiten beim Einbau des Head-up-Displays in das Versuchsfahrzeug eine Nachjustierung des virtuellen Bildes ermöglichen. Der benötigte Bauraum für das fertig ausgelegte System beträgt ca.  $12\text{dm}^3$ . Die hier beschriebene Optik erfüllt somit die gestellten Anforderungen an Bauraum, Dimension und Qualität des resultierenden virtuellen Bildes. Die optischen Bauteile wurden gefertigt und auf einem Metallträger in beschriebener Anordnung positioniert. Der Einbau dieses kontaktanalogen Head-up-Displays in das Versuchsfahrzeug ist Gegenstand des Kapitels 4.6. Vorab folgen die technischen Daten der Bildquelle und die Beschreibung der Datenbereitstellung und Ansteuerung des Head-up-Displays.

## 4.4 Bildquelle

Als Bildquelle für das kontaktanaloge Head-up-Display wird ein TFT-Display verwendet. Die Alternative der Laser-Display-Technologie ist für die Anwendung in diesem prototypischen Head-up-Display technisch prinzipiell ebenso geeignet (siehe Kapitel 2.1.3), allerdings hat sich bei der Erprobung von Head-up-Displays mit einem Laserdisplay als bildgebender Einheit gezeigt, dass Temperaturprobleme die stabile Funktionsweise der Bildquelle verhindern. Zudem sind die Kosten für eine Einzelanfertigung der bildgebenden Einheit für das Laser-Display-System enorm hoch. Die TFT-Display-Technologie dagegen bietet den Vorteil, dass bei dem von BMW angebotenen Head-up-Display bereits eine solche, für den Serieneinsatz taugliche Bildquelle verwendet wird und ist somit sowohl bezüglich der Systemstabilität als auch bezüglich der anfallenden Kosten für diesen konkreten Fall eines prototypischen Aufbaus der Laser-Display-Technologie vorzuziehen. Das verwendete Display ist ein vollfarbiges 1,8-Zoll TFT-Display mit einer Auflösung von  $480 \times 240$  Pixel. Die maximale Leuchtdichte der LED-Beleuchtungseinheit liegt bei ca.  $700.000\text{cd/m}^2$  und entspricht somit den Anforderungen für ein Head-up-Display. Die Helligkeit des Displays ist regelbar; eine Anbindungsmöglichkeit an den Lichtsensor des Fahrzeugs besteht jedoch nicht, d.h. die Helligkeit der Anzeige muss während der Fahrt manuell durch den Fahrer an die jeweilige Umgebungssituation angepasst werden.

Charakteristisch für die Umsetzung des beschriebenen virtuellen Bildes sind die unterschiedliche Auflösung der Anzeige im virtuellen Bild und der somit einhergehende Unterschied in der Genauigkeit der Anzeige für unterschiedliche virtuelle Distanzen. In größeren Distanzen führen geringe Veränderungen der Position der Anzeige auf dem Display bereits zu deutlichen Unterschieden in der

angezeigten virtuellen Distanz. Der Unterschied des Anzeigeortes auf dem Display für die verschiedenen empfundenen virtuellen Distanzen von 60m und 70m beträgt beispielsweise 10 Pixel; somit ergibt sich für diesen Bereich eine Anzeigegenauigkeit von 1m. Der Pixelunterschied für Anzeigen in 15m und 25m Entfernung liegt bei 80 Pixel; die daraus resultierende Anzeigegenauigkeit beträgt somit 0,125m. Die Ermittlung dieser Abbildungsfunktion wird im Kapitel 5.1 genauer beschrieben. Eine solche Verringerung der Anzeigegenauigkeit für größere Distanzen ist jedoch für die Umsetzung von kontaktanalogen Anzeigen nicht kritisch, da eine beispielsweise zentimetergenaue Darstellung für Anzeigen in empfundenen 70m Entfernung für den Fahrer keinen Mehrwert an Information bringen würde.

## 4.5 Datenbereitstellung und Ansteuerung

Um mit dem beschriebenen Head-up-Display Informationen für den Fahrer kontaktanalog anzuzeigen, bedarf es außer der optischen Einheit und der Bildquelle weiterer Komponenten. Der Anzeigeort der kontaktanalogen Information ist abhängig von verschiedenen Fahrzeug- und Umgebungsdaten, die im Fahrzeug vorliegen. Für die in Kapitel 5.3 beschriebenen Anzeigen sind Daten des Navigations- und ACC-Systems, die Fahrzeuggeschwindigkeit, die Querschleunigung und die Daten der Niveauregulierung nötig. Tabelle 2 zeigt, welche dieser benötigten Botschaften auf welchem CAN-Bussystem im verwendeten Technikträger Audi A8 hinterlegt sind.

Botschaft	CAN-Bussystem
Navigationsdaten	CAN „Kombiinstrument“
ACC-System: „Objekt erkannt“	
ACC-System: „Übernahmeaufforderung“	
ACC-System: „Abstand zum Zielobjekt“	CAN „Abstandsregelung“
Fahrzeuggeschwindigkeit	CAN „Antrieb“
Querschleunigung	
Daten Niveauregulierung	

*Tabelle 2: Zuordnung der benötigten Botschaften zu CAN-Bussystemen*

Ein im Handschuhfach verbauter CAN-Konverter liest die Botschaften der benötigten drei CAN-Bussysteme aus und sendet die Daten über die Schnittstelle „RS232“ an

ein Notebook. Die Daten des CAN-Konverters dienen als Eingangsgrößen für ein Programm in der Programmiersprache C# (siehe Anhang), welches ausgehend von diesen Daten die Position und die Dynamik der gewünschten Anzeige auf dem Display berechnet. Als Ausgabe liefert die Software eine Darstellung der gewünschten Symbole mit der für eine kontaktanaloge Darstellung notwendigen Dynamik unter Berücksichtigung der jeweils momentan aktuellen Daten des Fahrzeugs. Das Ergebnis wird über eine DVI-Schnittstelle vom Notebook an die Bilderzeugungseinheit im Head-up-Display übertragen. Zusätzlich ist diese Anzeige auf dem Display des Notebooks dargestellt; somit kann von einer zweiten Person im Fahrzeug – beispielsweise bei Probandenstudien – die für den Fahrer sichtbare Anzeige im virtuellen Bild kontrolliert und dokumentiert werden. Abbildung 61 zeigt im Überblick die beschriebenen Komponenten im Fahrzeug und deren Vernetzung.

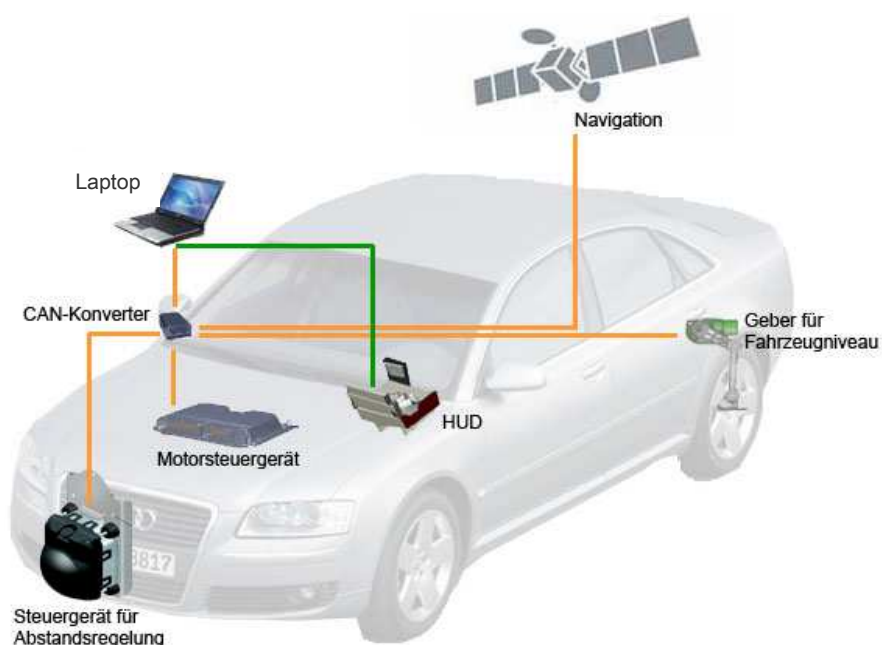


Abbildung 61: Datenliefernde Komponenten im Technikträger

Die technischen Voraussetzungen für die Umsetzung einer kontaktanalogen Anzeige im Head-up-Display sind mit dem beschriebenen Aufbau des Versuchsträgers erfüllt. Das entwickelte Head-up-Display ermöglicht auf Grund der Lage des virtuellen Bildes eine Anzeige von Informationen auf der Fahrbahn vor dem Fahrzeug; der physikalische Ort und die Gestaltung der Anzeige auf der bilderzeugenden Einheit im Head-up-Display für eine kontaktanaloge Darstellung wird über die Auswertung der Umfelddaten und notwendiger Daten des Fahrzeugs beeinflusst. Genauere Zusammenhänge zwischen den verwendeten Daten und deren Auswirkungen auf die

kontaktanaloge Darstellung sind der Beschreibung des Anzeigekonzeptes in Kapitel 5 zu entnehmen. Als Abschluss der Beschreibung der technischen Umsetzung des kontaktanalogen Head-up-Displays mit dem Prinzip der schrägen Displayebene wird auf den Einbau der Komponenten in den Versuchsträger eingegangen. Auf Grund der enorm kritischen Bauraumsituation liegt der Fokus hierbei besonders auf der optischen Einheit.

## 4.6 Einbau in den Versuchsträger

Neben der optischen Einheit des Head-up-Displays und der Windschutzscheibe mit Keilfolie ist der Einbau des CAN-Konverters, des Notebooks zur Erzeugung der Darstellungen und einer Bedieneinheit für Grundfunktionen des Head-up-Displays im Versuchsträger notwendig. Diese Bedieneinheit ist hinter dem Automatikwählhebel anstelle des Cupholders unter einem beweglichen Dekorelement eingebaut. Neben der Helligkeitsregelung und der Möglichkeit zur Feinjustierung des letzten Spiegels im Strahlengang ist hier der Schalter zur Inbetriebnahme des Head-up-Displays positioniert. Nach Aktivierung des Systems und Anpassung der Displayhelligkeit auf die Umgebungsbedingungen kann die Bedieneinheit mit der Dekorklappe verdeckt werden und ist somit für den Fahrer nicht mehr einsehbar. Der CAN-Konverter und das Notebook befinden sich im Normalfall im geschlossenen Handschuhfach; bei Bedarf kann ein Mitfahrer die Anzeigen im Head-up-Display simultan auf dem Notebook verfolgen. Somit sind auch diese Einbauten für den Fahrer nicht einsehbar im Versuchsfahrzeug verbaut. Die Windschutzscheibe mit Keilfolie muss in der gleichen Lage eingeklebt werden, in der sie photogrammetrisch vermessen wurde. Auf Grund der asphärischen Form der Scheibe ist die Geometrie des für die Head-up-Darstellung relevanten Bereiches der Scheibe nur in dieser Position mit der bei der Berechnung des optische Systems verwendeten Geometrie identisch. Für eine andere Positionierung der Scheibe wäre das optische System somit nicht mehr auf ein verzerrungsfreies virtuelles Bild ausgelegt; optische Abbildungsfehler wären die Folge. Da es für die Zugänglichkeit des Head-up-Displays nützlich ist, die Windschutzscheibe zu entfernen, wird diese nur punktuell mit der Karosserie verklebt. Ein zerstörungsfreies Entfernen der Scheibe im Bedarfsfall ist somit möglich. Der Einbau der optischen Bauteile, also des Head-up-Displays selbst, in den Versuchsträger ist enorm aufwändig. Die Maßnahmen am Technikträger, die den Verbau des Systems schließlich ermöglichen, sind im Folgenden beschrieben.

Grundlegend am Packagekonzept für diesen Einbau ist die Idee, den Schalttafelquerträger vor dem Kombiinstrument auf eine Breite von ca. 400mm zu entfernen und das Gehäuse des kontaktanalogen Head-up-Displays an den

Schnittflächen des Querträgers zu befestigen. Dieses Gehäuse wird also Teil des Schalttafelquerträgers und stellt somit die tragende Funktion des Bauteils wieder her. Eine massive Ausführung des Gehäuses soll sicherstellen, dass Kräfte auf den Schalttafelquerträger im Fahrbetrieb nur vernachlässigbar geringe Einflüsse auf die Geometrie des Gehäuses haben und zu keinen Veränderungen der Positionierung der optischen Komponenten zueinander führen. Die Lüftungskanäle für den linken Teil der Windschutzscheibenbelüftung und für die Lüftungsdüsen links vom Lenkrad werden entfernt; eine Verlegung ist packagebedingt nicht möglich. Das Schalttafeloberteil ist fahrzeugmittig geteilt, um den Zugang zum Head-up-Display bei eventuell auftretenden Wartungsarbeiten zu erleichtern. Die Demontage der linken Hälfte des Schalttafeloberteils ermöglicht für diesen Fall freien Zugang zum System. Im Bereich vor der Hutze wird die Schalttafel großflächig ausgeschnitten; nach Positionierung der optischen Komponenten wird eine Abdeckung mit kleinerem Ausschnitt angefertigt, der exakt der Dimension des maximalen Lichtstrahlenbündels des Head-up-Displays entspricht. Die Öffnung in diesem Bereich der Schalttafel wird aus der Fahrerposition nicht eingesehen. Das Kombiinstrument kann weder in der ursprünglichen Bauart, noch in der ursprünglichen Position im Versuchsträger eingesetzt werden. Der in x-Richtung im Fahrzeugkoordinatensystem zur Verfügung stehende Bauraum reicht hierfür nicht aus. Daher wird das Kombiinstrument an der Rückseite baulich verändert. Die Abdeckung wird vollständig entfernt und einige technische Komponenten werden im Bereich der Luftdüse links vom Lenkrad ausgelagert angebracht. Zusätzlich wird die Einbaulage des Kombiinstrumentes in Richtung des Fahrers verschoben. Um den Übergang zu der ansonsten unveränderten Geometrie beispielsweise im Bereich der Luftdüsen links und rechts vom Lenkrad zu überdecken, dient ein speziell angefertigtes Aufsatzteil für die Vorderseite des Kombiinstrumentes, welches das Erscheinungsbild des gesamten Kombiinstrumentes zwar verändert, die Einsicht auf die Anzeigeelemente jedoch nicht beeinträchtigt. Die im Versuchsfahrzeug eingebaute elektrisch verstellbare Lenksäule wird aus Platzgründen durch eine mechanisch verstellbare ersetzt. Diese Maßnahme ermöglicht es, den für das Head-up-Display benötigten Bauraum in z-Richtung im Fahrzeugkoordinatensystem zu schaffen. Zusätzlich muss das Lenkradverstellfeld im oberen Verstellbereich stark eingeschränkt werden. Wegen der geringen Distanz der Lenksäule zum Gehäuse des Head-up-Displays und der damit verbundenen Gefahr einer Beschädigung der optischen Bauteile des Head-up-Displays bei unachtsamer Einstellung der Lenksäule, wird im Technikträger der Verstellmechanismus der Lenksäule durch Entfernen der Entriegelungsvorrichtung stillgelegt. Somit befindet sich das Lenkrad für sämtliche Versuchsfahrten in derselben Position, die für die meisten Testpersonen als unter der von ihnen frei gewählten empfunden wird. Durch die beschriebenen Maßnahmen

ist es also möglich, ein kontaktanaloges Head-up-Display ohne Beeinträchtigung der normalen Nutzungsfähigkeit des Fahrzeugs in den Versuchsträger einzubauen. Lediglich die Einstellbarkeit der Lenksäule ist aus beschriebenen Gründen nicht mehr gegeben. Abbildung 62 zeigt eine Fotodokumentation zum Einbau des Systems in den Technikträger. Bild 1 und Bild 2 zeigen das Gehäuse des Head-up-Displays als Teil des Schalttafelquerträgers; die optischen Komponenten im Gehäuse sind in Bild 3 zu sehen; die Umbaumaßnahmen am Kombiinstrument werden in Bild 4 dokumentiert; Bild 5 zeigt den Einbau des linken Schalttafeloberteils und Bild 6 den Fahrerarbeitsplatz des vollständig aufgebauten Technikträgers mit dem beschriebenen Aufsatzteil für das Kombiinstrument.



*Abbildung 62: Details zum Einbau des kontaktanalogen Head-up-Displays in den Technikträger*



## 5 Anzeigekonzept für kontaktanaloge Head-up-Displays

Für das in Kapitel 4 beschriebene kontaktanaloge Head-up-Display wird nun im Versuchsträger ein Anzeigekonzept für erste Anwendungen des Systems implementiert. Kapitel 5.1 geht auf die Bestimmung der Abbildungsfunktion ein; Kapitel 5.2 gibt einen Überblick über die Einflüsse der Fahrdynamik auf den kontaktanalogen Charakter der Anzeige. Realisierte Anzeigen im Head-up-Display sind Inhalt des Kapitels 5.3.; weitere mögliche, noch nicht implementierte Anzeigehalte werden in Kapitel 5.4 beschrieben.

### 5.1 Abbildungsfunktion

Für die virtuelle Markierung eines Objektes in einer bestimmten Entfernung muss die Symbolik auf dem Display an einer definierten Stelle erscheinen. Die Beschreibung der Form des virtuellen Bildes in Kapitel 4.2 und die technischen Daten der verwendeten Bilderzeugungseinheit bilden die Grundlage zur Ermittlung der Abbildungsfunktion, also des Zusammenhanges zwischen der Symbolposition  $x_d$  auf dem Display und der empfundenen Symbolposition  $x_e$  in der überlagerten Realität. Mit Hilfe einer mathematischen Beziehung kann eine ein-eindeutige Abhängigkeit zwischen diesen beiden Größen hergestellt werden; wie bereits in Kapitel 4.4 beschrieben, ist dieser Zusammenhang nicht linear. Prinzipiell kann dieser Zusammenhang mathematisch berechnet werden; für die hier gewählte gebogene Form des virtuellen Bildes wurde zur Ermittlung der Abbildungsfunktion jedoch der empirische Ansatz gewählt, da noch keine Daten zur Genauigkeit der Geometrie des virtuellen Bildes bekannt waren. Somit stellte der empirische Ansatz gewissermaßen die sicherere Methode dar. Hierfür ist es erforderlich, dass die Fahrbahn im Bereich des Fahrzeugs und der davorliegenden maximalen Anzeigedistanz keine Krümmung aufweist. Zur Ermittlung des mathematischen Zusammenhanges der beiden Größen werden virtuelle Markierungen des Head-up-Displays mit Objekten der realen Umgebung in unterschiedlichen Distanzen im statischen Zustand überlagert. Die Entfernung des Objektes ( $x_e$ ) und die Position der Symbolik auf dem Display ( $x_d$ ) werden dokumentiert (Abbildung 63). Die somit erhobenen Wertepaare dienen als Stützpunkte für die Näherung an die Abbildungsfunktion. Abbildung 64 zeigt die genäherte Abbildungsfunktion, die es ermöglicht, für jede darzustellende empfundene virtuelle Distanz die Position des Symbols auf dem Display festzulegen.

Für den statischen Zustand können mit den bisher beschriebenen Mitteln kontaktanaloge Informationen angezeigt werden. Für den dynamischen Fall müssen jedoch die Bewegungen des Fahrzeugs und die daran gekoppelten Bewegungen des virtuellen Bildes ausgeglichen werden, da die beschriebene Abbildungsfunktion nur für die rechnerische Normallage des Fahrzeugs Gültigkeit besitzt. Ausgehend von der Abbildungsfunktion wird nun ein Regelkonzept entworfen, das die negativen Einflüsse der fahrdynamischen Größen auf den kontaktanalogen Charakter der Anzeige minimiert.

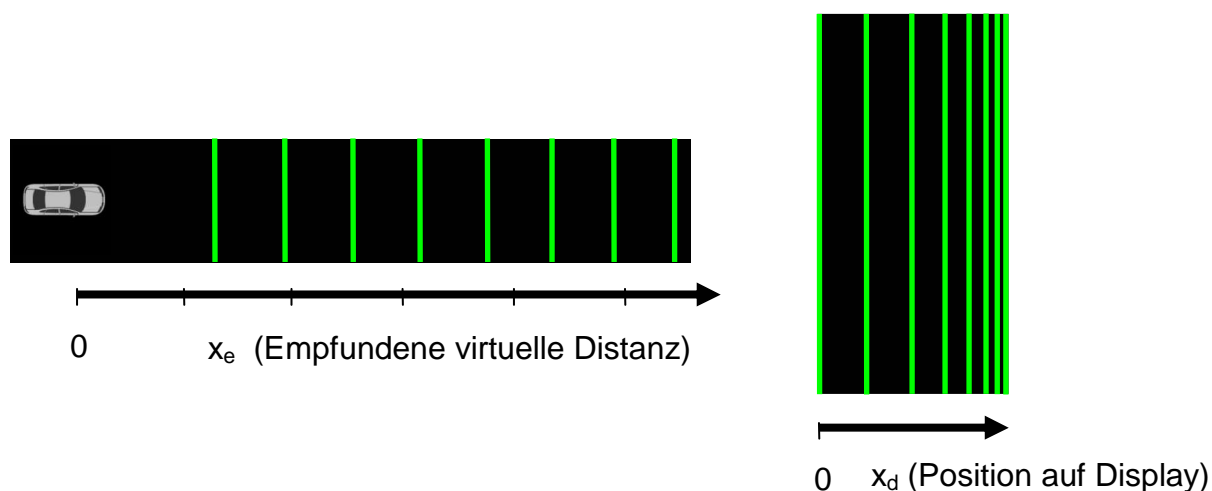


Abbildung 63: Ermittlung der Abbildungsfunktion

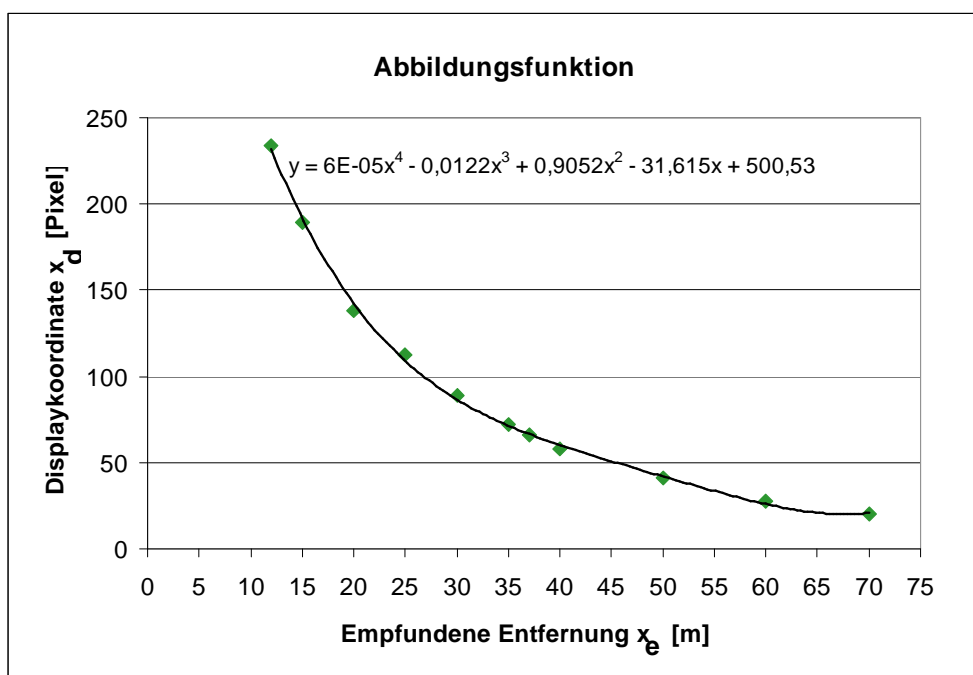


Abbildung 64: Näherung der Abbildungsfunktion

## 5.2 Einflüsse der Fahrdynamik

Die fahrdynamischen Größen des Fahrzeugs (Abbildung 65) haben unterschiedlich starke Einflüsse auf die kontaktanaloge Darstellung im Head-up-Display. Auf Grund der großen Distanz der Anzeige von der z- und y-Achse des Fahrzeugkoordinatensystems sind vor allem die rotatorischen Bewegungen Gieren und Nicken als kritisch für die Umsetzung einer korrekten kontaktanalogen Anzeige zu betrachten. Das Wanken ist wegen der Auslegung des virtuellen Bildes auf die Fahrbahnmitte und der damit verbundenen geringen Distanz zur x-Achse als unkritisch anzusehen. Auch die translatorischen Bewegungen Zucken, Schieben und Heben werden für den ersten Schritt der Auslegung nicht berücksichtigt; sollte sich eine merkliche Abweichung der Anzeige auf Grund dieser Bewegungen im Realversuch zeigen, kann im zweiten Schritt ein Algorithmus zum Ausgleich dieser Bewegungen implementiert werden.

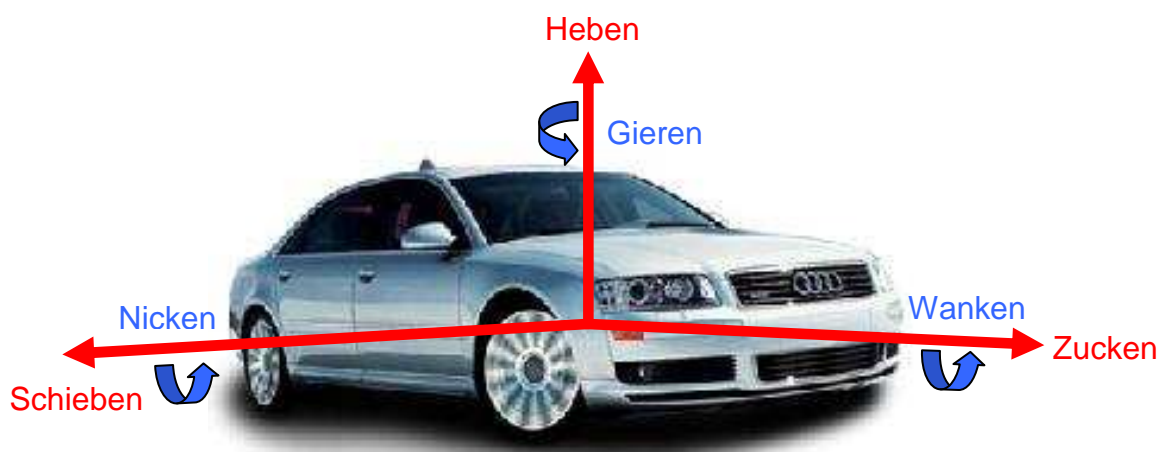


Abbildung 65: Fahrdynamische Größen

Der Einfluss des Gierens auf die Lage des virtuellen Bildes in Relation zur Fahrbahn erfordert – wie für eine Krümmung des Fahrbahnverlaufes in Kapitel 4.2 bei der Auslegungsberechnung des virtuellen Bildes bereits beschrieben – eine Anpassung der Anzeige in y-Richtung. Der Wert dieser Anpassung  $y_s$  lässt sich in Abhängigkeit von der Querbeschleunigung  $a_{\text{quer}}$  und der Zeitlücke  $t_A$  bis zum Erreichen der momentan angezeigten virtuellen Distanz aus den bereits bekannten geometrischen Verhältnissen und den Bewegungsgleichungen wie folgt errechnen:

Aus  $y_s = \frac{x_A^2}{2r}$  und  $a_{quer} = \frac{v^2}{r}$  und  $t_A = \frac{x_A}{v}$  folgt:

$$y_s = \frac{1}{2} a_{quer} \cdot t_A^2 \quad (17)$$

Somit kann für eine gewünschte anzuzeigende Zeitlücke  $t_A$  mit Hilfe der gemessenen Querbeschleunigung  $a_{quer}$  der erforderliche seitliche Versatz  $y_s$  der Anzeige errechnet werden. Mit den momentan im Fahrzeug zur Verfügung stehenden Daten kann die Anzeige in der beschriebenen Art allerdings nur auf Basis der aktuell gemessenen Querbeschleunigung angepasst werden. Da die virtuelle Anzeige jedoch in der Distanz  $x_A$  vor dem Fahrzeug liegt, hinkt die seitliche Korrektur der Anzeige um  $t_A$  hinterher. Für Kurvenfahrten mit annähernd gleichbleibender Querbeschleunigung ist dieser Zeitversatz nur beim Einfahren in die Kurve erkennbar. Prädiktive Streckendaten würden es ermöglichen, aus der Kenntnis der Entfernung bis zur Kurveneinfahrt und der Fahrzeuggeschwindigkeit den Zeitpunkt zu ermitteln, an dem die Entfernung des Fahrzeugs vom Eintrittspunkt in die Kurve noch die Zeitlücke  $t_A$  entfernt ist. Mit dem in den prädiktiven Streckendaten enthaltenen Kurvenkrümmungsradius und der Fahrzeuggeschwindigkeit kann die prädizierte Querbeschleunigung ermittelt werden und die seitliche Anpassung der Anzeige somit zeitlich korrekt erfolgen. Die Daten des Navigationssystems sind für eine solche Anwendung allerdings nicht genau genug; im Versuchsträger wird die zeitliche Verzögerung der seitlichen Anpassung für die ersten Testfahrten als gegeben akzeptiert.

Das Nicken hat einen Einfluss auf die empfundene virtuelle Distanz der Darstellung. Physikalisch gesehen taucht das virtuelle Bild bei einem Bremsvorgang in die Fahrbahnoberfläche ein; beim Beschleunigen hebt sich das virtuelle Bild von der Fahrbahnoberfläche ab. Eine solche Höhenänderung der Anzeige hat – auf Grund des auf die Fahrbahn projiziert wahrgenommenen Charakters der Anzeige – eine Änderung der empfundenen virtuellen Distanz zur Folge. In Abbildung 66 ist dieser Zusammenhang vereinfacht für ein eben liegendes virtuelles Bild dargestellt. Die obere Graphik zeigt den Normalzustand ohne Nicken, die mittlere Graphik zeigt das Verhalten der Anzeige beim Bremsvorgang, die untere beim Beschleunigen.  $x_A$  beschreibt die tatsächliche virtuelle Entfernung;  $\Delta x_A$  die empfundene Änderung der virtuellen Entfernung für den Nickwinkel  $\varphi$ . Der Augpunkt des Fahrers befindet sich in der Höhe  $z_{AP}$  über der Fahrbahn.

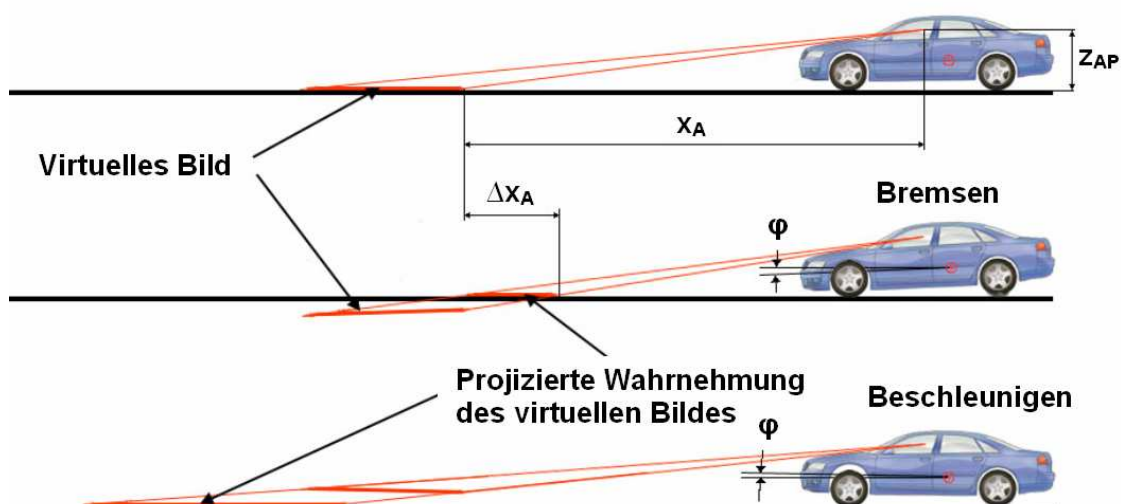


Abbildung 66: Einfluss des Nickens auf die empfundene Entfernung der Anzeige

Rechnerisch kann man die empfundene Änderung der virtuellen Anzeige  $\Delta x_A$  unter den Annahmen, dass die Höhe  $z_{AP}$  des Augpunktes über der Fahrbahn annähernd gleich bleibt und sowohl Nickwinkel  $\varphi$  als auch Blickwinkel auf die Anzeige klein sind, folgendermaßen ermitteln:

$$\Delta x_A = x_A - \frac{z_{AP}}{\tan \varphi + \frac{z_{AP}}{x_A}} \quad (18)$$

Mit dem bekannten Wert für  $z_{AP}$  kann somit für jede Anzeigentfernung  $x_A$  für jeden Nickwinkel  $\varphi$  die auszugleichende Entfernungsdiskrepanz  $\Delta x_A$  berechnet werden. Positive Nickwinkel beschreiben ein Eintauchen des Fahrzeuges; positive Werte für  $\Delta x_A$  beschreiben eine Verringerung der empfundenen virtuellen Distanz. Tabelle 3 zeigt für Anzeigentfernungen  $x_A$  von 20m, 45m und 70m in Abhängigkeit vom Nickwinkel  $\varphi$  Beispiele für die Entfernungsdiskrepanz  $\Delta x_A$ . Für  $z_{AP}$  wird die z-Koordinate des Augpunktes für den normal proportionierten 50-Perzentil Mann im Audi A8 in Konstruktionslage verwendet ( $z_{AP} = 1205,5\text{mm}$ ). Die untersuchten Nickwinkel bewegen sich im Bereich von  $-1,2^\circ$  bis  $+0,6^\circ$ ; dies entspricht nach [12] den im normalen Straßenverkehr auftretenden Nickwinkeln. In Abbildung 67 ist zu sehen, dass vor allem für negative Nickwinkel (d.h. für Beschleunigungsvorgänge) die Anzeigediskrepanz mit größer werdender Distanz enorm ansteigt. Für eine Anzeigedistanz von 70m führt diese Diskrepanz bei einem Nickwinkel von  $-1^\circ$  bereits zu einer Darstellung der Anzeige über dem Horizont. Die Einflüsse durch positive

Nickwinkel (d.h. für Abbremsvorgänge) sind bei weitem nicht so ausgeprägt. Hier ergeben sich für eine Anzeigedistanz von 70m maximale Abweichungen von 26,5m.

Nickwinkel $\varphi$ [°]	Entfernungsdiskrepanz $\Delta x_A$ [m]		
	Für $x_A = 20m$	Für $x_A = 45m$	Für $x_A = 70m$
+0,6	3,0	12,6	26,5
+0,2	1,1	5,2	11,8
-0,2	-1,2	-6,7	-17,8
-0,6	-4,2	-28,9	-108,6
-0,8	-6,0	-49,0	-300,0
-1,0	-8,2	-84,2	---
-1,2	-10,7	-161,4	---

Tabelle 3: Entfernungsdiskrepanz der kontaktanalogen Anzeige beim Nicken

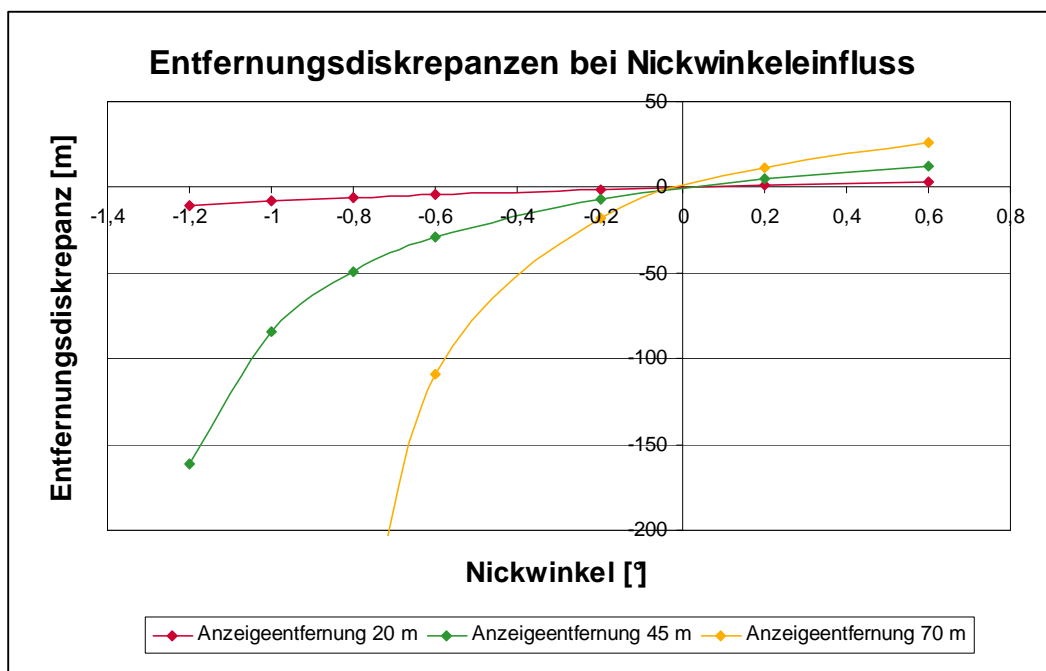


Abbildung 67: Zusammenhang der Entfernungsdiskrepanz der kontaktanalogen Anzeige und des Nickwinkels in Abhängigkeit von der Anzeigedistanz

Die Berechnungen zeigen, dass die Nickbewegung des Fahrzeugs für die Umsetzung einer korrekten Anzeige im kontaktanalogen Head-up-Display berücksichtigt werden muss. Der Nickwinkel liegt nicht direkt als Botschaft im Fahrzeug vor, er kann jedoch über die Daten der Niveauregulierung angenähert ermittelt werden. Hierzu werden die Daten der Höhenstände der Räder ausgewertet. Für das Regelkonzept wird der pro Achse an beiden Rädern gleichmäßig ein- oder ausgefederte Federweg verwendet, um Einflüsse auszuschließen, die beispielsweise auf Grund von Fahrbahnunebenheiten nur auf ein Rad wirken. Somit kann für jede Achse der momentane Einfederungszustand ermittelt werden und aus der Differenz der Nickwinkel bestimmt werden. Ausgehend von den Daten des Nickwinkels und der Anzeigeentfernung kann dann die Anzeigediskrepanz  $\Delta x_A$  berechnet werden und unter Zuhilfenahme der Abbildungsfunktion auf dem Display die Position für eine korrekte kontaktanaloge Anzeige bestimmt werden. Erste Fahrversuche zeigten allerdings, dass ein Ausgleich der Nickbewegungen des Fahrzeugs zu einem enorm unruhigen Verhalten der Anzeige im Head-up-Display führt. Grund hierfür ist, dass der Ausgleich der Anzeigediskrepanz sehr schnell geschehen muss, um nicht dem Verhalten des Fahrzeugs hinterherzuhinken, was auf Grund der häufigen Nickwinkeländerungen im Fahrbetrieb die wahrgenommene Unruhe der Anzeige erklärt. Der Versuch, die Ausgleichsbewegungen der Anzeige zu dämpfen, war wegen der geforderten kurzen Umsetzungszeit ebenso nicht erfolgreich. Für das weitere Vorgehen wurde daher beschlossen, die Versuchsreihe ohne einen Ausgleich der nickwinkelbedingten Anzeigediskrepanz durchzuführen und die daraus resultierenden Ungenauigkeiten von den Probanden hinsichtlich Akzeptanz bewerten zu lassen.

Die Ermittlung der Abbildungsfunktion und die Klärung der Einflüsse der Fahrdynamik auf den kontaktanalogen Charakter der Anzeige stellen neben den in Kapitel 4 beschriebenen technischen Anforderungen an das System die wesentlichen Voraussetzungen für die Umsetzung einer kontaktanalogen Anzeige im Head-up-Display dar. Im Folgenden bleibt zu definieren, welche Anzeigen den Fahrer unterstützen sollen und wie diese gestalterisch zu konzipieren sind.

## 5.3 Realisierte Anzeigen

Die von Bubb in [7] beschriebene Bremsweganzeige wird unter Einbeziehung der Daten des ACC-Systems weiterentwickelt; das umgesetzte Konzept ist in Kapitel 5.3.1 beschrieben. Des Weiteren werden Informationen des Navigationssystems in das Anzeigekonzept des Head-up-Displays integriert: der Abbiegepeil wird, wie in Kapitel 5.3.2. dargelegt, kontaktanalog dargestellt. Die Anzeige der

Fahrzeuggeschwindigkeit im Head-up-Display ist auf Grund der häufigen Nutzung dieser Information auch für ein kontaktanaloges System unabdingbar. Wie eine solche Information, die nicht kontaktanalog darzustellen ist, im vorliegenden System implementiert werden kann, ist Inhalt des Kapitels 5.3.3. Schließlich beschreibt Kapitel 5.3.4 das Steuerungskonzept des vollständigen Anzeigebereiches für das entwickelte kontaktanaloge Head-up-Display.

### **5.3.1 Distanzanzeige**

Basierend auf dem Vorschlag von Bubb (siehe [7]), das kontaktanaloge Head-up-Display zum Anzeigen des Bremsweges oder des Sicherheitsabstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug zu verwenden, werden im Folgenden die Daten eines ACC-Systems für die Weiterentwicklung einer solchen Distanzanzeige verwendet. Generell kann eine Distanzanzeige sinnvoll nur in kontaktanaloger Ausführung erfolgen, da beispielsweise eine Darstellung des einzuhaltenden Abstandes im Kombiinstrument oder auch im herkömmlichen Head-up-Display dem Fahrer die schwierige Aufgabe abverlangen würde, Abstände vor dem eigenen Fahrzeug einzuschätzen. Für die Weiterentwicklung der kontaktanalogen Distanzanzeige wird dem Fahrer bei aktiviertem ACC-System eine Information über den Systemzustand gegeben; dies geschieht über die relative Lage des Distanzbalkens zum vorausfahrenden Fahrzeug und über die Farbgebung des Balkens. Hierbei unterstützt die Anzeige also bei der monitiven Aufgabe des Abstandshaltens. Ist das ACC-System deaktiviert oder verfügt ein Fahrzeug nicht über ein solches System, zeigt der Distanzbalken – wie in [7] beschrieben – den vom Fahrer einzuhaltenden Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug an und unterstützt ihn somit bei der aktiven Aufgabe des Abstandshaltens. Eine solche Anwendung erfordert sowohl für die monitive, als auch für die aktive Aufgabe, die Breite des Balkens in Abhängigkeit von der gewünschten Anzeigedistanz zu verändern. Für diese Breitenauslegung ist eine Skalierungsgröße hinterlegt, welche den Zusammenhang zwischen der Breite des Balkens und der virtuellen Distanz definiert. Mit Hilfe dieser Beeinflussung der Wahrnehmung monokularer Tiefenkriterien wird der räumliche Charakter der Anzeige auch für Distanzen, in denen sich das virtuelle Bild deutlich von der Fahrbahnoberfläche abhebt, sichergestellt. Der Wert dieser Skalierungsgröße wird empirisch im Versuchsfahrzeug ermittelt; die definierte Berechnungsformel ist in Kapitel 5.3.4 angegeben. Auch die Formgebung des Balkens dient der gewünschten räumlichen Wahrnehmung: Zugrunde liegt kein Rechteck, sondern ein Trapez, wodurch ebenso der liegende Charakter des Balkens verstärkt wird.



### Einsatz mit ACC-System (monitive Aufgabe)

Für ein ACC-System werden die Zustände „Freie Fahrt“ (kein Fahrzeug erkannt), „Folgefahrt“ (Fahrzeug erkannt) und „Übernahmeaufforderung“ (Bremseingriff durch den Fahrer nötig) unterschieden. Der momentane Zustand des ACC-Systems wird beim verwendeten Technikträger in der Serienausführung im Kombiinstrument über die in Abbildung 68 dargestellte Symbolik angezeigt.



Abbildung 68: Symbolik des ACC-Systems

Die Distanzanzeige im Head-up-Display in Form eines Balkens ist je nach Systemzustand in einer der Farben Gelb, Grün oder Rot ausgeführt. Für eine „Freie Fahrt“ ist die Farbe Gelb gewählt, für den geregelten Zustand „Folgefahrt“ ist der Distanzbalken grün eingefärbt und im Falle einer Übernahmeaufforderung wechselt die Farbgebung entsprechend der Kritikalität zu Rot und der Balken blinkt. Die vom ACC-System eingehaltene Distanz zum vorausfahrenden Fahrzeug kann vom Fahrer in vier verschiedenen Stufen eingestellt werden. Die Zeitlücken  $t_d$  dieser Stufen betragen 1s (Distanzstufe 1), 1,3s (Distanzstufe 2), 1,8s (Distanzstufe 3) und 2,3s (Distanzstufe 4). Dementsprechend kann für die jeweils eingestellte Distanzstufe der vom ACC-System automatisch eingehaltene Abstand  $x_A$  für die momentane Geschwindigkeit  $v$  nach  $x_A = v \cdot t_d$  berechnet und kontaktanalog angezeigt werden. Für die in Kapitel 6 beschriebene Studie ist die Distanzstufe 1 gewählt; sie kann vom Fahrer nicht verändert werden, damit eine Differenz der unterschiedlichen mittleren angezeigten Distanzen über die Gesamtdauer des Versuches bei verschiedenen Versuchspersonen vermieden wird und somit die Vergleichbarkeit der Aussagen sichergestellt ist. Für eine solche Verwendung der Distanzanzeige im Zusammenspiel mit dem ACC-System lässt sich vermuten, dass der momentane Systemzustand des ACC-Systems vom Fahrer besser erkannt werden kann, da er anhand des Distanzbalkens sowohl den momentanen Regelzustand (durch die Farbgebung des Balkens) als auch eventuelle Abweichungen von der einzuhaltenden Distanz (durch die Position des Balkens in Relation zum vorausfahrenden Fahrzeug) erkennen kann. Fundierte Aussagen hierzu wird die in Kapitel 6 dokumentierte Probandenstudie liefern.

### Einsatz ohne ACC-System (aktive Aufgabe)

Für eine Verwendung des Distanzbalkens ohne ACC-System fällt die Information über den Systemzustand – also die unterschiedliche Farbgebung des Balkens – weg; der Balken hat immer die Farbe Gelb. Die Einstellung der anzuzeigenden Zeitlücke kann über das Bedienelement des ACC-Systems für die automatisch eingehaltene Zeitlücke erfolgen. Somit ermöglicht die Distanzanzeige ohne ACC-System eine korrekte Einhaltung des gewählten Abstandes ohne automatische Regelung. Im Versuchsträger ist dies für Fahrten ohne aktiviertes ACC-System umgesetzt; Kapitel 6 zeigt hierzu die Ergebnisse der Probandenbewertung.

Mit dem hier beschriebenen Anzeigekonzept und der in Kapitel 5.2. beschriebenen Korrektur der Anzeigeposition bei Kurvenfahrten besteht somit also die Möglichkeit, entlang der Fahrbahn verschiedene sicherheitsrelevante Abstände zur Anzeige zu bringen und über eine Farbänderung den Systemzustand des ACC-Systems anzuzeigen. In Abbildung 69 sind Beispiele für „freie Fahrt“, „Folgefahrt“ und „Übernahmeaufforderung“ mit einer kontaktanalogen Anzeige des Distanzbalkens zu sehen (monitive Aufgabe: oben links, oben rechts und unten links); das Bild unten rechts zeigt eine Situation ohne Regelung des ACC-Systems (aktive Aufgabe); der Fahrer kann sich noch weiter an das vorausfahrende Fahrzeug annähern. Die hier beschriebene kontaktanalogue Distanzanzeige wird mittels der in Kapitel 6 beschriebenen Probandenstudie validiert.



Abbildung 69: Beispiele für eine Anzeige des kontaktanalogen Distanzbalkens

### 5.3.2 Navigationsanzeige

Neben der Bremsweganzeige wird in [7] bereits die Idee einer Navigationsanzeige im kontaktanalogen Head-up-Display angedacht. Allerdings waren zu dieser Zeit weder die Entwicklung der Navigationssysteme noch die der Displaytechnologien so weit fortgeschritten, dass die Anzeige eines Navigationspfeils im Head-up-Display umsetzbar gewesen wäre. Mit der hier beschriebenen Technologie ist es nun jedoch möglich, über das frei programmierbare vollfarbige Display jedes beliebige Symbol im Head-up-Display anzuzeigen. Des Weiteren liegen – wie in Kapitel 4.5 beschrieben – Daten des Navigationssystems im Fahrzeug vor. Bei der somit realisierbaren kontaktanalogen Navigationsanzeige wird beispielsweise ein Abbiegepfeil so auf der Fahrbahn liegend der Realität überlagert, dass die Pfeilspitze genau in die Richtung der vorzunehmenden Abbiegung zeigt. Dieser Pfeil bleibt am Ort des vorgeschlagenen Abbiegevorganges liegen; er verhält sich wie ein fahrbahnfester Richtungspfeil. Vorteilhaft für den Fahrer sind einerseits die Eindeutigkeit einer solchen Anzeige und andererseits natürlich die Vermeidung von Blickabwendungen. Im Versuchsträger ist eine Navigationsanzeige im kontaktanalogen Head-up-Display in Form eines Richtungspfeils umgesetzt. Der empfundene virtuelle Abstand des Pfeils entspricht prinzipiell der Entfernungsangabe des Navigationssystems bis zum Abbiegevorgang. Da allerdings die Daten für diese Entfernungsangabe in Schritten von 20m aktualisiert werden, wird zwischen diesen gegebenen Werten interpoliert, um ein Springen des Navigationspfeils zu verhindern. Die Größenauslegung des Pfeils geschieht auch hier empirisch im Versuchsträger und ist von der Anzeigeentfernung anhängig. Für große Anzeigedistanzen hat sich herausgestellt, dass der Navigationspfeil ab einer bestimmten Grenze nicht mehr kleiner werden sollte, da die Information ansonsten sehr schlecht wahrgenommen werden kann. Daher empfiehlt es sich, die Größe des Navigationspfeils für Distanzen größer als 70m basierend auf der empirisch ermittelten Größenauslegung (siehe Kapitel 5.3.4) nicht mehr kleiner werden zu lassen. Für den Navigationspfeil wird – ähnlich wie beim Distanzbalken – eine perspektivische Darstellungsart gewählt, um den gewollt liegenden Charakter der Anzeige zu verstärken (vgl. Kapitel 3.2.1.1, monokulare Tiefenkriterien). Bei der Farbgebung für den Navigationspfeil ist für die Probandenstudie die Farbe Grün gewählt; die Farbe Blau, wie sie bei Audi-Fahrzeugen standardmäßig für die Darstellung von Navigationsinformationen verwendet wird, hat sich im Versuchsträger als weniger geeignet herausgestellt, da eine Sichtbarkeit bei hohen Beleuchtungsstärken in der Umgebung nicht mehr gegeben ist. In Abbildung 70 ist ein Beispiel des kontaktanalogen Navigationspfeils aus dem Versuchsträger zu sehen.



Abbildung 70: Beispiel für eine Anzeige des kontaktanalogen Navigationspfeils

Aussagen zur umgesetzten Variante des kontaktanalogen Navigationspfeils sind – ebenso wie die zur Distanzanzeige – den Ergebnissen der Probandenstudie in Kapitel 6 zu entnehmen.

### 5.3.3 Geschwindigkeitsanzeige

Die Probandenuntersuchung in Kapitel 2.4 zeigt, dass 90% der Probanden das Head-up-Display für den geeigneten Ort einer Geschwindigkeitsanzeige halten. Dies ist auch aus ergonomischer Sicht sinnvoll, da die ständige Änderung dieser wesentlichen fahrdynamischen Größe eine oftmalige Blickzuwendung bedingt. Daher besitzt auch bei den bereits auf dem Markt erhältlichen Head-up-Displays die Anzeige der Fahrgeschwindigkeit eine zentrale Anzeigeposition (vgl. Kapitel 2.3.1). Diese Gründe erfordern, dass auch ein kontaktanalogenes Head-up-Display die Möglichkeit bietet, die momentan gefahrene Geschwindigkeit anzuzeigen, wobei diese Information jedoch nicht auf der Fahrbahn liegend, sondern in gewohnter Weise stehend vor dem Fahrzeug dargestellt werden soll. Hierfür kann die Darstellung auf dem Display umgekehrt perspektivisch ausgeführt werden, wodurch im virtuellen Bild die Wahrnehmung der monokularen Tiefenkriterien beeinflusst und der perspektivische Charakter der Anzeige neutralisiert wird. Die Darstellung der Geschwindigkeit wird stehend vor dem Fahrzeug empfunden. Der Ort dieser Darstellung ist immer der untere Rand im virtuellen Bild; die virtuelle Distanz der Geschwindigkeitsanzeige beträgt somit ca. 12m. Für den Fall der gleichzeitigen Darstellung einer anderen Information in derselben virtuellen Distanz erscheint die Geschwindigkeitsanzeige der anderen Anzeige überlagert. Beispiele hierfür sind in Abbildung 71 zu sehen. Das linke Bild zeigt die Geschwindigkeitsanzeige ohne zugeschalteter Distanzanzeige; im rechten Bild ist die Überlagerung der

Distanzanzeige durch die Geschwindigkeitsanzeige bei Darstellung am untersten Displayrand zu sehen.



*Abbildung 71: Beispiele für die Geschwindigkeitsanzeige im kontaktanalogen Head-up-Display*

### 5.3.4 Generierung der Darstellung

Für die Umsetzung des beschriebenen Anzeigekonzepts im Versuchsträger bedarf es einer speziellen Software. Als Eingang hierfür dienen Querbewegung, Geschwindigkeit, Entfernung zum Navigationsereignis, ACC-Zustand und Navigationsdaten vom CAN-Konverter. Aus Querbewegung, Geschwindigkeit und ACC-Zustand muss Position, Größe und Farbe des Distanzbalkens ermittelt werden. Hierbei ist eine Variabilität der Zeitlücke  $t_d$  sicherzustellen. Für die Definition von Position, Größe und Richtung des Navigationspfeils sind die Daten der Geschwindigkeit, der Entfernung zum Navigationsereignis und Navigationsdaten zur Pfeilrichtung zu verwenden. Der Datensatz der momentan gefahrenen Geschwindigkeit soll lediglich um die Einheit „km/h“ ergänzt und direkt zur Anzeige gebracht werden. Ein Ablaufdiagramm zur Generierung dieser Darstellungen im Head-up-Display ist in Abbildung 72 zu sehen. Als Programmiersprache wird C# verwendet (siehe Anhang); der Algorithmus aus Abbildung 72 kann jedoch auch in anderen geeigneten Programmiersprachen umgesetzt werden. Die erstellte Software ist auf dem Notebook im Fahrzeug installiert (siehe Abbildung 61). Somit sind alle Details für die Umsetzung des beschriebenen Anzeigekonzepts im Versuchsträger definiert und stellen im Weiteren die Basis für die in Kapitel 6 beschriebene Probandenstudie dar. In wie weit technische oder das Anzeigekonzept betreffende Kriterien ein Verbesserungspotenzial aufweisen, werden die Ergebnisse dieser Studie zeigen. Vorab soll jedoch auf weitere mögliche, allerdings zum momentanen Stand noch nicht umgesetzte Anzeigemöglichkeiten im vorliegenden kontaktanalogen Head-up-Display eingegangen werden.

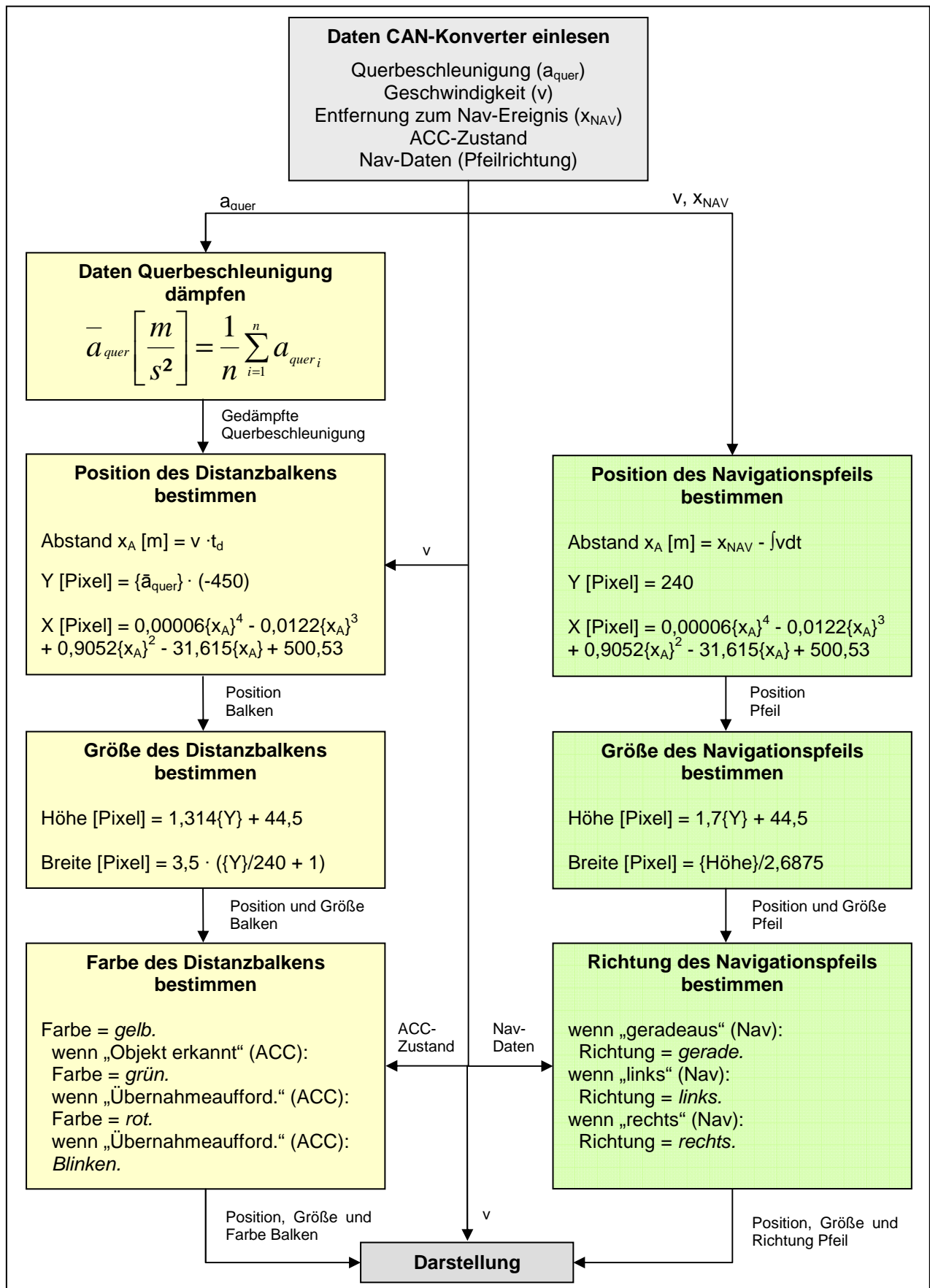


Abbildung 72: Ablaufdiagramm zur Generierung der Darstellung im Head-up-Display

## 5.4 Weitere mögliche Anzeigen

Die in Kapitel 5.3 beschriebenen Anzeigen dokumentieren den Stand des Anzeigekonzepts für das kontaktanaloge Head-up-Display im Rahmen der Probandenstudie. Es können in einem solchen Anzeigemedium jedoch noch weitere sinnvolle fahrrelevante Informationen dargestellt werden. Wesentliches Problem bei vielen kontaktanalogen Anzeigen ist der Mangel an Kenntnis von Umfelddaten, die jedoch häufig Basis für eine korrekte kontaktanaloge Darstellung sind. Im Beispiel „Überholanzeige“ in Kapitel 5.4.1 ist dies nur bedingt der Fall, wohingegen die Anzeige einer Hindernismarkierung (Kapitel 5.4.2) oder eines Ausweichmanövers (Kapitel 5.4.3) sehr genaue Umfelddaten erfordert.

### 5.4.1 Überholanzeige

Die Anzeige zur Beurteilung der Sicherheit eines Überholvorganges im kontaktanalogen Head-up-Display ist bereits von Bubb angedacht worden. In der in [7] beschriebenen Ausführung liegt die Information in Form eines Balkens vor, der auf der Gegenfahrbahn die Distanz markiert, innerhalb derer sich kein entgegenkommendes Fahrzeug befinden darf, damit der Überholvorgang sicher ausgeführt werden kann. Die Einflüsse der Geschwindigkeit und des Beschleunigungsverhaltens des eigenen Fahrzeugs, der einzuhaltende Sicherheitsabstand zum überholenden Fahrzeug (vor und nach dem Überholvorgang) und die Geschwindigkeit des entgegenkommenden Verkehrs sind die Parameter, deren Werte zum Anzeigen einer solchen Information erforderlich sind. Die Berechnung des notwendigen freien Weges – der Überholsicherheitsdistanz  $x_{ÜS}$  – zur sicheren Durchführung des Überholvorganges erfolgt nach Formel 19. Hierbei steht  $v_0$  für die eigene Geschwindigkeit bei Beginn des Überholvorganges; sie ist gleich der Geschwindigkeit des zu überholenden Fahrzeuges.  $t_s$  beschreibt die Zeitlücke des Sicherheitsabstandes zum zu überholenden Fahrzeug. Mit  $v_{max}$  ist die Höchstgeschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs angegeben und der Wert  $D$  ist ein die dynamischen Eigenschaften des eigenen Fahrzeugs wiedergebender Faktor, der sich nach Formel 20 berechnet; hierbei ist  $t_{100}$  die minimal nötige Zeit zur Beschleunigung vom Stillstand bis zum Erreichen von 100km/h. Die Berücksichtigung der Bewegung des entgegenkommenden Verkehrs wird nach Bubb – mit der Annahme einer auf Landstraßen maximal zulässigen Geschwindigkeit von  $v_{100} = 100\text{km/h}$  – über eine Vergrößerung des reinen Überholweges um die in der Zeit des Überholvorgangs mit der Geschwindigkeit  $v_{100}$  gefahrene Strecke des Gegenverkehrs erzielt.

$$x_{\dot{U}S} = 2v_0 t_s + 2 \cdot (v_0 + v_{100}) \cdot \sqrt{\frac{v_0 t_s}{D \cdot (v_{\max} - v_0)}} \quad (19)$$

$$D = \frac{\ln \frac{v_{\max} - v_{100}}{v_{\max}}}{t_{100}} \quad (20)$$

Mit diesen Ergebnissen von Bubb lässt sich im entwickelten kontaktanalogen Head-up-Display mittels der in Abbildung 64 beschriebenen Abbildungsfunktion eine Überholanzeige einblenden. Auf Grund der Beschränkung der Anzeigemöglichkeit auf etwa die Breite der eigenen Fahrbahn, kann die virtuelle Markierung für die Überholsicherheitsdistanz bei Geradeausfahrt nicht auf der Gegenfahrbahn zur Anzeige gebracht werden. Es empfiehlt sich eine Positionierung der beispielsweise pfeilförmigen Markierung am linken Rand des virtuellen Bildes im Bereich der Fahrbahnmitte. In Abbildung 73 ist beispielhaft eine solche Anzeige dargestellt.



*Abbildung 73: Beispielhafte Anzeige der Überholsicherheitsdistanz im kontaktanalogen Head-up-Display*

Die beschriebene Überholanzeige unterstützt den Fahrer – ähnlich wie die Distanzanzeige – bei der schwierigen Aufgabe, Abstände vor dem Fahrzeug abzuschätzen und stellt ihm folglich eine Entscheidungsgrundlage für die Durchführung des Überholvorganges zur Verfügung. Die Beurteilung, ob die Straßenverhältnisse eine Ausnutzung der maximal möglichen Beschleunigung des Fahrzeugs erlauben und der Überholvorgang somit in der berechneten Strecke beendet werden kann, bleibt jedoch immer noch in der Verantwortung des Fahrers. Auch der Einfluss der Geschwindigkeit des Gegenverkehrs – für die Auslegung mit



maximal 100km/h angenommen – bedingt unter Umständen eine Situation, in der die Überholsicherheitsdistanz zu kurz angezeigt wird, nämlich dann, wenn der Gegenverkehr die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreitet. Somit ist zu prüfen, ob für den Einsatz einer solchen Überholanzeige beispielsweise Daten des ESP-Systems, die Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des Kontaktes zwischen Reifen und Straßenoberfläche zulassen, in Form eines korrigierenden Terms Einfluss auf die angezeigte Überholsicherheitsdistanz haben und somit die Diskrepanz zwischen maximaler und momentan maximal nutzbarer Beschleunigung ausgleichen. Bei der Ermittlung der Geschwindigkeit des Gegenverkehrs können Radarsysteme – ähnlich derer in einem ACC-System – genauere Angaben für die Berechnung der angezeigten Distanz liefern. Die ermittelte Geschwindigkeit des entgegenkommen- den Fahrzeugs ersetzt dann in Formel 19 den Wert  $v_{100}$  und sorgt für eine Anpassung der Überholsicherheitsdistanz auf den der Situation entsprechenden Wert. Für das kontaktanaloge Head-up-Display stellt die Überholanzeige folglich eine Anwendung mit großem Potenzial dar; eine Weiterentwicklung der Sensorik im Fahrzeug hilft, diese extrem sicherheitsrelevante Anzeige in der geforderten Genauigkeit und Zuverlässigkeit umzusetzen.

### **5.4.2 Hindernismarkierung**

Das beschriebene kontaktanaloge Head-up-Display bietet die Möglichkeit, detektierte Hindernisse – wie beispielsweise Personen, Tiere, Fahrzeuge, etc. – im Bereich vor dem Fahrzeug virtuell zu markieren. Die hierfür benötigte Position des Hindernisses in Relation zum Fahrzeug wird beispielsweise basierend auf den Daten eines Stereokamerasystems bereitgestellt. Objekterkennungsalgorithmen können definierte Geometrien in den aufgenommenen Szenarien erkennen, wodurch die relative Lage eines Hindernisses zum Fahrzeug definiert ist. Da die Lage des virtuellen Anzeigebereiches ebenso wie das Kamerasystem fahrzeugfest ist, kann somit aus der Hindernisposition der Videodaten direkt auf die Position der Darstellung auf dem Display geschlossen werden. Die ermittelte Distanz des Hindernisses definiert über die Abbildungsfunktion (s. Abbildung 64, Seite 79) die x-Koordinate für die Darstellung auf dem Display. In Abhängigkeit von der Anzeigedistanz  $x_A$  kann die y-Koordinate der Darstellung auf dem Display mit einer Abbildungsfunktion ausgehend von den y-Werten des Kamerabildes bestimmt werden. Geschieht die Umfeldwahrnehmung beispielsweise mittels eines Night-Vision-Systems mit Objekterkennung, können detektierte Hindernisse bereits kontaktanalog markiert werden, wenn sie sich noch außerhalb des Lichtkegels der Scheinwerfer befinden. Abbildung 74 zeigt beispielhaft eine solche Anzeige.



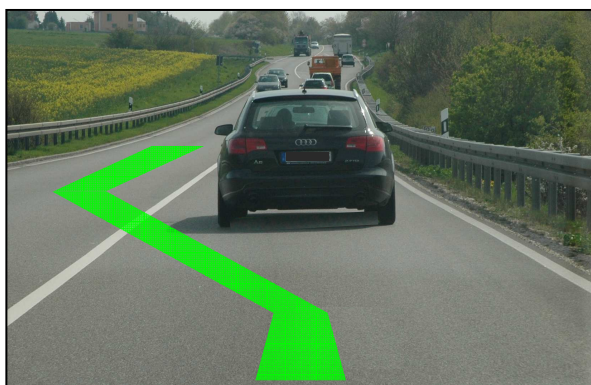
*Abbildung 74: Anzeige einer Hindernismarkierung im kontaktanalogen Head-up-Display*

Vorteilhaft an dieser beschriebenen Objekterkennungsanzeige im Vergleich zu beispielsweise videobildüberlagerten Ausführungen ist der direkte Bezug zur Umgebung. Die für Night-Vision-Systeme momentan übliche direkte Darstellung des Videobildes mit der überlagerten Markierung von Hindernissen muss vom Fahrer am Anzeigeort (Mittel- oder Kombidisplay) wahrgenommen und anschließend in Bezug zur realen Umgebung gebracht werden. Hieraus wird das Potenzial des kontaktanalogen Systems bezüglich Minimierung von Blickabwendungs- und Reaktionszeiten deutlich. Die Auslegung des beschriebenen Systems mit einer maximalen empfundenen Anzeigedistanz am Horizont ermöglicht somit eine frühzeitige Warnung des Fahrers vor Hindernissen auf der Fahrbahn und bietet eine Anzeigemöglichkeit, die sowohl für die Wahrnehmung als auch für die Umsetzung der Information ein großes Potenzial für die Minimierung der dafür benötigten Zeit bietet.

### **5.4.3 Ausweichmanöver**

Als Weiterentwicklung steht nach der reinen Erkennung und Markierung eines Hindernisses auf der Fahrbahn die Anzeige eines Ausweichmanövers. Das kontaktanaloge Head-up-Display eignet sich hierbei beispielsweise zur Anzeige eines Fahrschlauches, der die Ausweichroute um das Hindernis beschreibt. Die benötigten Informationen über das momentane Verkehrsgeschehen im Umfeld des Fahrzeugs müssen mittels geeigneter Sensortechnik erkannt und ausgewertet werden. Hierauf wird nicht näher eingegangen – die Thematik der maschinellen Wahrnehmung für Fahrerassistenzsysteme wird beispielsweise von Maurer in [15] beschrieben. Geht man nun davon aus, dass auf Grund der Auswertung von

Sensordaten die Position der Route für das Ausweichmanöver relativ zum Fahrzeug vorliegt, kann über die beschriebenen Abbildungsfunktionen ein Fahrschlauch zur Anzeige gebracht werden, der die berechnete Ausweichroute darstellt. In Abbildung 75 ist ein Vorschlag für eine solche Anzeige zu sehen. Die Farbgebung sollte zwar auffallend sein, allerdings keinen warnenden Charakter haben; im Beispiel ist die Darstellung daher in der Farbe Grün gewählt.



*Abbildung 75: Anzeige der Route für ein Ausweichmanöver im kontaktanalogen Head-up-Display*

Die Anzeige einer solchen Ausweichroute ist ein Beispiel für eine Information, die nur im kontaktanalogen Head-up-Display umgesetzt werden kann. Jeder andere Anzeigort würde vom Fahrer in der Situation einer drohenden Kollision entweder nicht wahrgenommen werden oder würde zu einer Blickabwendung vom eigentlichen Fahrgeschehen führen. Da ein Ausweichvorgang jedoch charakteristischer Weise zur Seite hin erfolgt, ist für die Umsetzung einer solchen Anzeige die Breite des virtuellen Bildes ein kritischer Parameter. Für den Fall, dass die Breite des virtuellen Bildes zur Anzeige des gesamten Fahrschlauches für das Ausweichmanöver nicht ausreicht, ist für den Fahrer bereits die Richtung des optimierten Ausweichvorganges hilfreich. Nach Einlenken in die vorgeschlagene Richtung hat sich die relative Lage der Ausweichroute zum Fahrzeug verändert und der nächste Teil des Fahrschlauches kann im virtuellen Bild gesehen werden. Der Fahrer würde also im ungünstigsten Fall immer nur eine Teilstrecke der berechneten Ausweichroute in kontaktanaloger Darstellungsweise sehen. Für die beschriebene Anwendung in kritischen Situationen als Entscheidungshilfe bei der Fahrmanöverauswahl zur Kollisionsvermeidung ist allerdings bereits die Information, ob ein Ausweichen die richtige Entscheidung ist – und wenn ja, in welche Richtung – eine hilfreiche Unterstützung.

Durch die Möglichkeit, die Fahrbahn vor dem Fahrzeug als Anzeigefläche zu verwenden, werden sich auch in Zukunft neue Anwendungsgebiete für das kontaktanaloge Head-up-Display anbieten. Die zunehmende Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen bedingt eine ebensolche Zunahme von visuellen Informationen für den Fahrer. Eine Konzentration all dieser Informationen in den bereits im Fahrzeug vorhandenen Displays stellt die Entwickler vor die zunehmend schwieriger werdende Aufgabe, die gegenläufigen Eigenschaften Vollständigkeit und Übersichtlichkeit der Displayinhalte gleichermaßen zu berücksichtigen. Eine Einbeziehung des kontaktanalogen Head-up-Displays in die Auslegung der Anzeigekonzepte neuer Fahrzeuge hilft durch die Verlagerung von umgebungsbezogener Information in das kontaktanaloge Head-up-Display, die herkömmlichen Anzeigeflächen im Fahrzeug übersichtlicher zu gestalten und umweltbezogene Informationen in eindeutiger Art darzustellen.

## 6 Validierung der umgesetzten Technologie und des Anzeigekonzeptes

Das entwickelte kontaktanaloge Head-up-Display wird nun im Probandenversuch validiert. Ziel dieser Studie ist einerseits, Aussagen über die technische Umsetzung des Systems – beispielsweise Form und Lage des virtuellen Bildes – zu erhalten und andererseits, die umgesetzten Darstellungen als erste Anwendungen eines kontaktanalogen Head-up-Displays bewerten zu lassen. Kapitel 6.1 beschreibt hierzu das Versuchsdesign; Ergebnisse und Interpretation der Probandenbefragung werden in Kapitel 6.2 dokumentiert.

### 6.1 Versuchsdesign

Das Versuchsdesign wird im Folgenden durch das Probandenkollektiv, den Versuchsträger, die Versuchsstrecke und den Versuchsablauf beschrieben.

#### Probandenkollektiv

Die 31 rekrutierten Versuchspersonen wurden aus der Belegschaft der AUDI AG ausgewählt; basierend auf ihr berufliches Tätigkeitsfeld wurden 15 Probanden (48%) in die Gruppe „Techniker“ und 16 Probanden (52%) in die Gruppe „Nichttechniker“ eingeteilt. Im verwendeten Probandenkollektiv sind 24 der Versuchspersonen männlich (77%) und 7 weiblich (23%). Das Durchschnittsalter der Probanden beträgt 36,7 Jahre. Eine korrigierte Sehschwäche gaben 17 Personen (55%) an, wobei 12 (39%) kurzsichtig und 5 (16%) weitsichtig sind. 13 Versuchspersonen (42%) haben Erfahrung mit Head-up-Displays, 21 Versuchspersonen (68%) mit ACC-Systemen.

#### Versuchsträger

Der verwendete Versuchsträger ist ein Audi A8 4.2 quattro mit den in Kapitel 4 beschriebenen Einbauten und dem im Kapitel 5 beschriebenen Anzeigekonzept für das Head-up-Display. Für die Probanden ist der Einbau des Head-up-Displays an der Öffnung in der Schalttafel und dem zum Fahrer versetzten Kombiinstrument zu erkennen. Die durch die packagebedingte Stilllegung des Lenksäulenverstellmechanismus fixe Position des Lenkrades ist für große Fahrer nicht optimal. Das restliche Erscheinungsbild des Fahrzeugs ist sowohl im Interieur als auch am Exterieur unverändert.

### **Versuchsstrecke**

Bei der Auswahl der Versuchsstrecke ist zu berücksichtigen, dass der geplante Beurteilungsumfang unterschiedliche Straßenbedingungen und Verkehrssituationen erfordert. Die berücksichtigten Kriterien hierbei sind im Folgenden festgehalten:

- Die Strecke muss einen innerstädtischen Teil, einen Landstraßenabschnitt und einen Autobahnabschnitt enthalten, um Fragestellungen zum System differenziert nach diesen drei Straßenarten abfragen zu können.
- Die Strecke muss Senken und Kuppen aufweisen, um Aussagen über die empfundene Störung durch den nicht implementierten Ausgleich des Distanzfehlers der kontaktanalogen Anzeige durch solche Bodenunebenheiten erhalten zu können.
- Die Strecke muss Kurven enthalten, die mit unterschiedlichen Querschleunigungen durchfahren werden, um Aussagen über den Ausgleich der Anzeige in y-Richtung im Fahrzeugkoordinatensystem erhalten zu können.
- Die Strecke muss Abschnitte enthalten, in denen dichter Verkehr herrscht, um die Einsatzmöglichkeit des ACC-Systems und der zu bewertenden kontaktanalogen Anzeige sicherzustellen.
- Die Strecke muss Abschnitte enthalten, in denen sehr wenig Verkehr herrscht, um die für die Beurteilung des Nickwinkeleinflusses auf die kontaktanaloge Anzeige notwendigen Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge gefahrlos ausführen zu können.
- Die Strecke muss Abbiegevorgänge enthalten, um einen Einsatz des zu bewertenden kontaktanalogen Navigationspfeils zu ermöglichen.
- Um sicherzustellen, dass für alle Probanden ähnliche Verkehrsbedingungen herrschen, darf die Strecke zu den Zeiten der Testfahrten keine großen Schwankungen der Verkehrsdichte aufweisen.

Im Umkreis von Ingolstadt wurde eine Versuchsstrecke festgelegt, welche die oben genannten Bedingungen erfüllt. In Abbildung 76 ist der Verlauf dieser 55km langen Strecke abgebildet, deren Start- und Endpunkt das Werksgelände der AUDI AG in Ingolstadt ist. Der erste Teilabschnitt (grün) – eine gut ausgebaute Landstraße – wird als Eingewöhnungsstrecke bezeichnet, bei der sich der Fahrer an das Fahrzeug und die neuartige Anzeigeeinheit gewöhnen kann. Von dieser Landstraße geht die Teststrecke in den Autobahnabschnitt über (blau). Es handelt sich um eine

dreispurige Autobahn mit in der Regel hohem Verkehrsaufkommen und ohne Geschwindigkeitsbegrenzungen. Der darauf folgende Landstraßenabschnitt (violett) ist durch zahlreich Kurven und geringes Verkehrsaufkommen charakterisiert. Der beschriebene Einfluss der Senken und Kuppen kann an einem Bahnübergang veranschaulicht werden. Der letzte Teil der Versuchsstrecke ist innerstädtisch (rot); hier kann die kontaktanaloge Navigationsanzeige anhand zahlreicher Abbiegevorgänge bewertet werden. Die Anforderungen an die Versuchsstrecke sind somit erfüllt; auch das Verkehrsaufkommen auf der gewählten Strecke entspricht den genannten Voraussetzungen einer geringen Abhängigkeit von der Tageszeit.

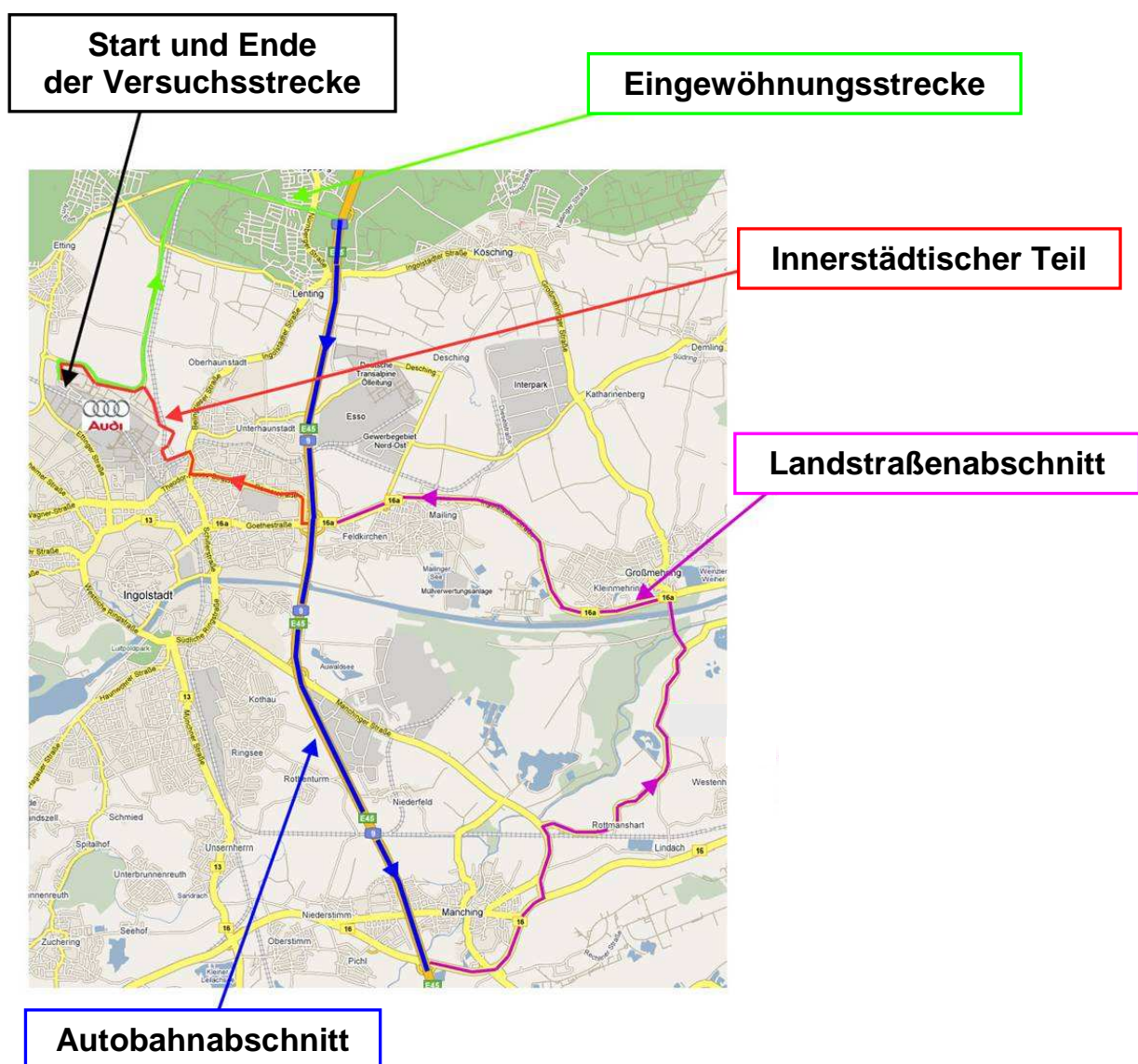


Abbildung 76: Verlauf der Versuchsstrecke

## **Versuchsablauf**

Zu Beginn der Versuchsfahrt wird die Versuchsperson instruiert. Es werden hierbei keine Details zum verwendeten Head-up-Display erklärt; es wird lediglich darauf hingewiesen, dass im Versuchsträger eine Anzeigeeinheit verbaut ist, die über ein virtuelles Bild Informationen in das primäre Sichtfeld des Fahrers bringt. Nach Einstellung von Sitz, Spiegel und Helligkeit des virtuellen Bildes und nach Aufnahme der Daten zur Versuchsperson beginnt die Versuchsfahrt mit der Eingewöhnungsstrecke. In diesem ersten Teil der Versuchsstrecke sind eine digitale Geschwindigkeitsanzeige und ein Distanzbalken im Head-up-Display zu sehen. Der Distanzbalken zeigt die zeitliche Distanz von 1s an; der Ausgleich der Diskrepanz in y-Richtung bei Kurvenfahrt ist noch nicht aktiviert. Welche Information der Balken dem Fahrer liefert, wird vom Versuchsleiter nicht erklärt. Nach der Eingewöhnungsstrecke wird die Versuchsperson zu den Anzeigen im Head-up-Display befragt. Hierbei werden Aussagen zur Wahrnehmung des virtuellen Bildes und zu möglichen Anwendungen des Distanzbalkens aufgenommen; des Weiteren ist die Diskrepanz der Anzeige in y-Richtung bei Kurvenfahrt zu beurteilen. Bevor im zweiten Teil der Versuchsstrecke die Autobahn befahren wird, erhält der Proband die Information, dass es sich bei dem angezeigten Balken um den Sicherheitsabstand („1-Sekunden-Abstand“) handelt. Der Ausgleich der Diskrepanz bei Kurvenfahrt wird aktiviert und der Proband erhält die Anweisung, das ACC-System auf der Autobahn zu aktivieren. Nach Durchfahren der Teilstrecke „Autobahnabschnitt“ werden der Versuchsperson Fragen zum ACC-Anzeigekonzept im kontaktanalogen Head-up-Display gestellt. Die darauf folgende Teilstrecke „Landstraßenabschnitt“ dient zur Beurteilung des Diskrepanzausgleichs bei Kurvenfahrt und der auftretenden Ungenauigkeiten sowohl durch Nickbewegungen des Fahrzeugs als auch bei Senken und Kuppen. Hierzu wird der Proband an geeigneten Stellen zu Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen aufgefordert; die Befragung des Probanden hierzu erfolgt vor Beginn der innerstädtischen Fahrt. Der letzte Streckenabschnitt „Innerstädtischer Teil“ soll Aussagen über die kontaktanaloge Distanzanzeige bei dichtem, langsam fließendem Verkehr bringen und dient als Teststrecke für die Anzeige des kontaktanalogen Navigationspfeils. Nach diesem Teilabschnitt ist die Versuchsfahrt beendet und der Proband wird bezüglich des Einsatzes eines kontaktanalogen Head-up-Displays bei Fahrten innerhalb geschlossener Ortschaften befragt. Außerdem folgt eine abschließende Befragung zur Gesamtbeurteilung des kontaktanalogen Head-up-Displays. Hier werden sicherheitsrelevante Kriterien, empfundene Verhaltensweisen des Fahrers und Verbesserungsvorschläge dokumentiert.



## 6.2 Ergebnisse und Interpretation

Der vollständige Fragebogen zum Probandenversuch ist im Anhang enthalten. Die Darstellung und Interpretation der Ergebnisse ist in drei Abschnitte aufgeteilt: Kapitel 6.2.1 beinhaltet Ergebnisse zur Wahrnehmung des kontaktanalogen Charakters der Anzeige; hieraus können Aussagen zur technischen Umsetzung des Head-up-Displays abgeleitet werden. Die Ergebnisse der Beurteilung der konkreten Anwendungen „Distanzanzeige“ und „Navigationsanzeige“ sind in den Kapiteln 6.2.2 und 6.2.3 dargestellt. Kapitel 6.2.4 geht auf die Beurteilung des Systems für den Einsatz im Stadtverkehr ein und dokumentiert die Aussagen der Versuchspersonen über die empfundene Sicherheit während der Fahrt mit dem kontaktanalogen Head-up-Display. Des Weiteren werden die von den Probanden genannten Verbesserungsvorschläge aufgeführt.

### 6.2.1 Kontaktanaloger Charakter des Systems

Die Wahrnehmung des kontaktanalogen Charakters des Head-up-Displays wird über die dokumentierten Äußerungen während der Eingewöhnungsstrecke (Kapitel 6.2.1.1) beschrieben. Darüber hinaus dienen Aussagen zur Wahrnehmung des virtuellen Bildes am Ende der Versuchsfahrt dazu, eine Aussage über die von den Versuchspersonen empfundenen virtuellen Distanzen zu machen (Kapitel 6.2.1.2). Die Beurteilung von Umwelt- und Fahreinflüssen auf die kontaktanaloge Darstellung und Einflüsse der Bildlage auf das Fahrverhalten sind Inhalte der Kapitel 6.2.1.3 und 6.2.1.4.

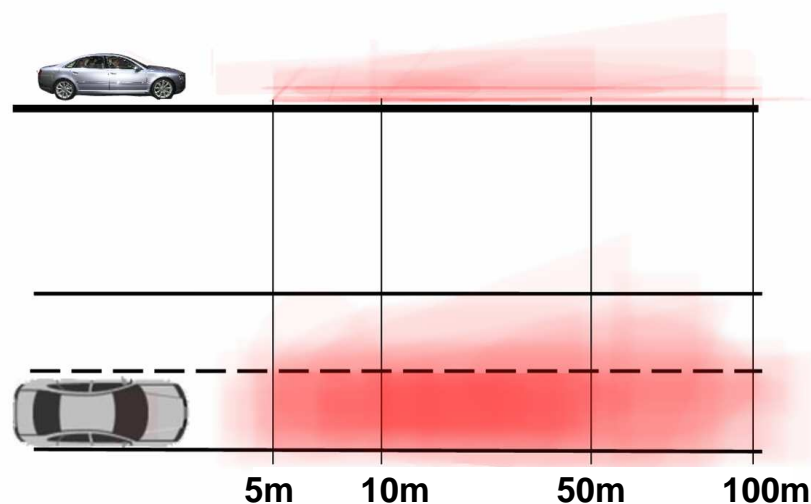
#### 6.2.1.1 Erste Eindrücke

Von Beginn der Versuchsfahrt an war für den Probanden ab einer Geschwindigkeit von 30km/h die Distanzanzeige für eine Zeitlücke von 1s und eine Geschwindigkeitsanzeige in digitaler Form sichtbar. Die Frage *„Was für eine Anzeige haben Sie im HUD gesehen“* beantworteten nach der Eingewöhnungsstrecke 25 Probanden (81%) mit der Antwort *„Balken, der den Sicherheitsabstand anzeigte“* und 3 Probanden (10%) mit der Antwort *„Balken, der auf der Straße lag / sich bewegte“*. Lediglich 2 Personen (6%) beantworteten die Frage mit *„Balken, der sich nach oben / unten bewegte“*. Die nicht näher definierende Aussage *„Strich / Balken“* und die Aussage *„Balken, der den Bremsweg anzeigte“* wurden von keinem der Probanden gewählt. Die Frage nach dem Anzeigeort des Balkens (*„Haben Sie den Balken als auf der Straße liegend empfunden?“*) wurde von 9 Probanden (29%) mit *„lag auf der Straße“*,

von 15 Probanden (48%) mit „*schwebt parallel über der Straße*“ und von 3 Probanden (10%) mit „*steigt nach hinten an*“ beantwortet. 2 der Testpersonen (6%) empfanden den Balken „*senkrecht vor dem Fahrzeug*“, ebenfalls 2 Probanden (6%) sahen ihn „*auf der Windschutzscheibe*“. Aus den Antworten auf diese beiden Fragen ist bereits zu erkennen, dass der liegende Charakter des virtuellen Bildes von der Mehrheit erkannt wird. Die Antworten „*lag auf der Straße*“ und „*schwebt parallel über der Straße*“ verbalisieren beide diesen gewünschten Effekt und werden von 24 Probanden (77%) angegeben. Auch die Aussage „*Balken, der den Sicherheitsabstand anzeigte*“ (81%) auf die Frage nach dem Zweck der Anzeige beinhaltet eine Interpretation als dreidimensionale, liegende Anzeige. Die Darstellung von kontaktanaloger Information auf dem gekrümmten virtuellen Bild wird somit vom Großteil der Probanden so interpretiert, wie es bei der Auslegung des Head-up-Displays vermutet wurde, nämlich als liegende Anzeige in variabler Entfernung. Die Darstellung der digitalen Geschwindigkeitsanzeige wurde auf die Frage „*Haben Sie die Geschwindigkeitsanzeige als stehend, liegend oder geneigt empfunden?*“ von 21 Probanden (68%) als geneigt und von 10 Probanden (32%) als stehend empfunden. Keiner der Probanden empfand die Anzeige als liegend. Im Versuchsträger war die perspektivische Darstellung nicht optimal gewählt; die Aussagen der Probanden, die Geschwindigkeitsanzeige geneigt zu sehen, beruht vermutlich auf dieser Gegebenheit. Mittels einer Manipulation der monokularen Tiefenkriterien kann durch Anpassung der Perspektive somit im zu beurteilenden Head-up-Display eine Anzeige auch in herkömmlicher Form – also stehend – implementiert werden. Für den Serieneinsatz eines solchen kontaktanalogen Head-up-Displays bedeutet dies, dass im unteren Bereich des Displays herkömmliche Anzeigen – beispielsweise die Geschwindigkeit – angezeigt werden können. Das kontaktanaloge Head-up-Display bietet somit auch die Möglichkeit, bereits bekannte Inhalte von Seriensystemen anzuzeigen.

### **6.2.1.2 Wahrnehmung des virtuellen Bildes**

Neben den abschließenden Fragen am Ende der Testfahrt wurden die Versuchspersonen aufgefordert, den Bereich vor dem Fahrzeug in einer Skizze zu markieren, in dem sie die während der Versuchsfahrt gesehenen Anzeigen vermuten. In Abbildung 77 ist die Vorlage mit der Überlagerung der verschiedenen von den Probanden eingezeichneten Bereiche zu sehen. Jede eingezeichnete Fläche wurde teiltransparent in die Datei übertragen, wodurch sich ein dunklerer Bereich bei mehreren Überlagerungen ergibt. Somit stellt die dunkelrote Fläche den Bereich dar, in dem die meisten Probanden eine Anzeige zu sehen glaubten.



*Abbildung 77: Empfundener Bereich der kontaktanalogen Darstellung vor dem Fahrzeug während der Versuchsfahrt*

Die geringst mögliche Anzeigedistanz beträgt 12m; für einen angenommenen Geschwindigkeitsbereich während der Versuchsfahrt von bis zu 200km/h liegt die größte Anzeigedistanz für den Distanzbalken für den „1-Sekunden-Abstand“ bei einer Entfernung von 56m; die kontaktanalogue Navigationsanzeige liegt maximal in einer Entfernung von 70m. Wie in Abbildung 77 zu erkennen ist, befindet sich der Bereich in dem die meisten Versuchspersonen die Anzeige wahrnehmen, ungefähr in diesem Distanzbereich. Auch die maximale Breite der Anzeige wird von den Versuchspersonen realistisch wahrgenommen. Die von den Probanden empfundene Höhenlage des virtuellen Bildes kann man am besten mit „in geringer Höhe über der Fahrbahn schwebend“ beschreiben. Die Tatsache, dass die Anzeige nicht ausschließlich als auf der Fahrbahn liegend wahrgenommen wird, liegt vermutlich an den noch nicht vollständig umgesetzten Kompensationen der Fahrzeugbewegungen und der damit verbundenen Unruhe des virtuellen Bildes vor allem in z-Richtung. Insgesamt wurde die Annahme, dass auf Grund des gekrümmten virtuellen Bildes und der Beeinflussung der Wahrnehmung monokularer Tiefenkriterien eine wesentlich größere empfundene virtuelle Distanz realisiert werden kann, als dies physikalisch der Fall ist, in der Versuchsreihe bestätigt. Die Abweichungen der Aussagen der Probanden von den rechnerisch ermittelten empfundenen Distanzen liegen in gewissem Maße auch an der grundsätzlichen Problematik einer Distanzabschätzung durch den Menschen.

### 6.2.1.3 Beurteilung von Umwelt- und Fahreinflüssen

Während der Eingewöhnungsstrecke war die Anpassung der Distanzbalkenlage in y-Richtung nicht aktiviert. Bei Kurvenfahrt bewegte sich der Distanzbalken somit nicht entlang des Fahrschlauches, sondern lag bei Rechtskurven auf der Gegenfahrbahn und bei Linkskurven im Bankett. 14 Probanden (45%) antworteten bei der Befragung nach der Eingewöhnungsstrecke auf die Frage „*Hat es Sie gestört, dass in Kurven der Balken neben der Straße war?*“ mit „*ja, sehr*“ oder mit „*ja*“. Die empfundene Störung ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Anzeige des Sicherheitsabstandes nur entlang des eigenen Fahrschlauches intuitiv wahrnehmbar ist. Liegt die Anzeige neben der Fahrbahn, bedarf es eines gewissen kognitiven Aufwandes, die angezeigte Distanz auf die eigene Fahrspur zu transformieren. Im weiteren Verlauf der Versuchsfahrt war die Anpassung der Distanzbalkenlage in y-Richtung aktiviert. Die nun wahrzunehmende Bewegung des Distanzbalkens entlang des Fahrschlauches wird von 29 Probanden (94%) als „*viel besser*“ oder als „*besser*“ bewertet („*Finden Sie es besser, dass der Balken sich nun in der Kurven mitbewegt?*“). Wenn auch nur 45% der Probanden bei der Eingewöhnungsstrecke angaben, dass die nicht korrigierte Lage des Balkens bei Kurvenfahrt störend war, bewerteten dennoch fast alle Probanden die korrigierte Anzeige als besser. Für eine intuitive Anzeige des Sicherheitsabstandes ist somit eine Korrektur der Distanzbalkenlage in y-Richtung bei Kurvenfahrten zu empfehlen. Der Konflikt zwischen einem möglichst verzögerungsfreiem Ausgleich und einer ruhigen Darstellung der Anzeige wird in den Aussagen der Versuchspersonen deutlich: 16 Probanden (52%) waren mit der im Versuchsträger gewählten Einstellung zufrieden; 11 Probanden (35%) wünschten sich eine stärkere Dämpfung der Anzeige und somit ein ruhigeres Bild, wohingegen 4 Probanden (13%) eine schnellere Anpassung des Balkens an den Fahrschlauch und somit eine präzisere Überlagerung als Verbesserungsvorschlag angaben. Mit den im Versuchsträger vorhandenen Möglichkeiten ist eine Optimierung der Dynamik des Balkens nicht umzusetzen. Für den Einsatz des Systems in Serienfahrzeugen ist eine entsprechende Datenbereitstellung und –verarbeitung sicherzustellen, die eine ruhige und dennoch schnelle Anpassung der Balkenlage ermöglicht. Hierzu ist noch ein gewisser Erprobungsaufwand erforderlich, der im Rahmen dieser Arbeit nicht abgeleistet wurde. Die Ungenauigkeit der Anzeige durch Nickbewegungen des Fahrzeugs wird für das Manöver „Bremsen“ von 29 Probanden (94%) als nicht oder wenig störend bewertet. Die Distanz des Balkens wird beim Verzögern verringert; durch das Nicken des Fahrzeugs verringert sich die empfundene virtuelle Distanz der Anzeige zusätzlich. Diese Überlagerung wird vermutlich von den Probanden lediglich als schnellere Anpassung der Anzeigedistanz an die aktuelle Geschwindigkeit

wahrgenommen und daher nicht als störend empfunden. Des Weiteren hat in näheren virtuellen Distanzen ein durch Nicken hervorgerufener Höhenunterschied keine so großen Auswirkungen auf die empfundene virtuelle Distanz wie in größeren Entfernungen. Dies ist tendenziell auch an den Bewertungen für die Ungenauigkeit der Anzeige durch Beschleunigungsvorgänge zu erkennen. 26 Probanden (84%) fanden die dadurch entstehenden Abweichungen der Anzeige nicht oder wenig störend. 5 Probanden (16%) bewerteten die Diskrepanz als störend. Da der Unterschied in der empfundenen virtuellen Distanz bei einer durch das Ausfedern der Vorderachse bedingten Anhebung der Darstellung auf Grund der geometrischen Verhältnisse des virtuellen Bildes wesentlich größer ist als bei einer Absenkung der Darstellung (Bremsvorgang), ist die Bewertung der daraus sich ergebenden Störung höher als bei Bremsvorgängen. Dennoch ist das Störpotenzial durch die beiden Fahrmanöver „Bremsen“ und „Beschleunigen“ den Aussagen der Probanden zu Folge sehr gering. Einen ähnlichen Effekt auf den kontaktanalogen Charakter der Anzeige haben Fahrten durch Senken oder über Kuppen. Hierbei liegt die Ursache der Störung nicht an der Fahrzeugbewegung, sondern am Höhenverlauf der Fahrbahn. Der empfundene Effekt ist allerdings der gleiche. Im Verlauf der Versuchsstrecke befanden sich nur gering ausgeprägte Senken und Kuppen; die größte Abweichung der kontaktanalogen Anzeige entstand bei der Überfahrt über einen Bahnübergang. Die Bewertung durch die Probanden fiel ähnlich aus wie die für die Abweichungen durch Beschleunigungsvorgänge: 24 Probanden (77%) empfanden keine oder nur eine geringe Störung bei Senken, bei Kuppen waren es 23 Probanden (74%). Da die Ausprägungen der Kuppen und Senken auf der Versuchsstrecke eher gering waren, sind diese Ergebnisse nur bedingt auf alle baulichen Straßenverhältnisse zu übertragen. Für bergige Landstraßen wäre die Bewertung des Störpotenzials vermutlich größer.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Korrektur der Querabweichung der Anzeige bei Kurvenfahrt den Ergebnissen zufolge durchwegs sinnvoll ist; ein optimiertes dynamisches Verhalten der Anzeige muss für ein Seriensystem sichergestellt sein. Die Einflüsse durch Nickbewegungen des Fahrzeugs werden als unkritisch angesehen; eine Behebung sollte nur dann erfolgen, wenn dies nicht zu Lasten der Forderung nach einer ruhigen Darstellung geschieht. Der Einfluss durch Senken und Kuppen auf die kontaktanaloge Darstellung ist im Versuchsträger nicht zufriedenstellend gelöst; prädiktive Streckendaten können hier helfen, die Anzeige auf den Höhenverlauf des kommenden Streckenabschnittes anzupassen.

#### 6.2.1.4 Einflüsse der Bildlage auf das Fahrverhalten

Am Beispiel des Distanzbalkens im Head-up-Display soll im Rahmen der Versuchsreihe geklärt werden, ob der Fahrer die kontaktanaloge Anzeige als Anhaltspunkt zur Querregelung des Fahrzeugs verwendet. Hierfür wird ein eventueller Einfluss auf das Fahrverhalten durch eine Positionsänderung der Anzeige untersucht. Der Distanzbalken wird während der Fahrt im Streckenabschnitt „Landstraße“ nach links zur Fahrbahnmitte hin verschoben. Diese Verschiebung wird von allen Probanden erkannt; 27 Probanden (87%) empfanden dies als sehr störend oder störend. Auf die Frage „*Warum stört Sie das?*“ antworteten 23 Probanden (74%), dass die Anzeige dadurch den kontaktanalogen Charakter verliert. 5 Probanden (16%) gaben an, sie hätten versucht, das Fahrzeug so zu steuern, dass sich der Balken wieder mittig zur Fahrbahn befindet. Der Versuchsleiter hat das tatsächliche Verhalten der Probanden in dieser Situation beobachtet und in eine der drei folgenden Kategorien eingeteilt:

„**Vollständige Kompensation**“: Der Fahrer gleicht den Versatz des Balkens vollständig über die Positionierung des Fahrzeugs auf der Straße aus. Das Fahrzeug befindet sich mit den rechten Rädern in diesem Fall bereits auf dem weißen Seitenstreifen.

„**Teilweise Kompensation**“: Der Fahrer gleicht den Versatz des Balkens teilweise über die Positionierung des Fahrzeugs auf der Straße aus. Das Fahrzeug befindet sich deutlich weiter rechts als vorher.

„**Keine Kompensation**“: Der Fahrer gleicht den Versatz des Balkens nicht aus. Das Fahrzeug erfährt keine seitliche Positionsänderung.

Keiner der Probanden kompensierte den Versatz des Balkens vollständig. Eine teilweise Kompensation wurde bei 12 Probanden (39%) festgestellt; die restlichen 19 Probanden (61%) kompensierten den Balkenversatz gar nicht. Die Ergebnisse der hier vorliegenden Befragung und die Beurteilung durch den Versuchsleiter zeigen, dass tendenziell ein Übergang von einer Steuerung des Fahrzeuges auf eine Steuerung des Distanzbalkens festzustellen ist. Für exakte Aussagen wäre hier jedoch eine genauere Untersuchung des Sachverhaltes angebracht, bei der objektive Daten wie beispielsweise der tatsächliche Abstand des Rades zur Seitenlinie oder Korrekturen am Lenkrad aufgezeichnet und ausgewertet werden. Sollte sich hierbei die Tendenz bestätigen, dass der Fahrer über eine Positionierung des Distanzbalkens die Position des Fahrzeugs auf der Fahrbahn definiert, ist bei der Auslegung der Anzeige für das kontaktanaloge Head-up-Display der Charakter einer sicherheitsrelevanten Information zu berücksichtigen.

## 6.2.2 Beurteilung der Distanzanzeige

Für den Streckenabschnitt „Autobahn“ wurden die Versuchspersonen aufgefordert, das ACC-System zu benutzen. Sie wussten nicht, dass der Distanzbalken als Anzeige für den Status des ACC-Systems dient. Nach der Aktivierung des ACC-Systems und Beginn der Folgefahrt erkannten alle Probanden die Farbänderung des Balkens von Gelb nach Grün. Diese Farbänderung brachten 24 Probanden (77%) auf die Frage *„Haben Sie die Farbänderung des Balkens mit einer Funktion des Fahrzeugs in Verbindung gebracht?“* mit dem Modus „Folgefahrt“ des ACC-Systems in Verbindung, 6 Probanden (19%) deuteten die Farbänderung nach Grün als Information, dass der momentan gehaltene Abstand richtig sei. 1 Proband (3%) konnte keine Information aus der Farbänderung gewinnen. Die 24 Probanden, die angaben, die Anzeige mit dem ACC-System in Verbindung zu bringen, wurden gefragt, ob durch die umgesetzte Farbcodierung für die Zustände „Freie Fahrt“, „Folgefahrt“ und „Übernahmeaufforderung“ die Funktion des ACC-Systems besser zu verstehen oder vorherzusehen ist. 11 Probanden (46%) beantworteten diese Frage positiv (*„ja, viel besser“* oder *„ja, besser“*), 4 Probanden (17%) negativ (*„nein, eher nicht“* oder *„nein, überhaupt nicht“*). 2 Probanden (8%) waren sich nicht sicher, ob ein besseres Verständnis des Systems gegeben ist und 7 Probanden (29%) kannten das herkömmliche Anzeigekonzept des ACC-Systems nicht so gut, dass sie eine Aussage machen konnten. Die Ergebnisse zeigen, dass die gewählte Farbcodierung zwar mehr als 3/4 der Versuchspersonen mit der richtigen Information (ACC-Folgefahrt) in Verbindung bringen, dass allerdings auch knapp 1/5 der Probanden die Balkenfarbe Grün mit der Information „sicherer Abstand“ in Verbindung bringen, was für die eingependelte Situation in der Folgefahrt auch der Fall ist, für eventuelle systembedingte Unterschreitungen des Mindestabstandes allerdings nicht zutrifft. Als Verbesserung könnte nicht mehr die Farbe sondern die Form des Balkens als Anzeige für den ACC-Status dienen; die unterschiedliche Farbgebung des Balkens (grün, gelb, rot) könnte dann zur Anzeige der Kritikalität des tatsächlichen Abstandes verwendet werden und entspräche somit der gewohnten Bedeutung dieser Farben. Für Fahrten ohne aktiviertes ACC-System könnte dieses verbesserte Anzeigekonzept ebenso umgesetzt werden, da hier lediglich die Anzeige des ACC-Zustandes über die Formänderung des Balkens entfällt. Der Balken hätte in diesem Fall immer die herkömmliche Form und würde in Abhängigkeit vom eingehaltenen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug lediglich die Farbe ändern. Aussagen zur Akzeptanz dieses Anzeigekonzeptes müssten jedoch für einen Vergleich mit dem bisherigen Konzept in einer weiteren Probandenstudie ermittelt werden, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt wird. Die generelle Akzeptanz einer Rückmeldung der ACC-Informationen in Form

einer Distanzanzeige zeigen die Ergebnisse der abschließenden Befragung der Probanden. 20 Probanden (65%) gaben auf die Frage, wie eine kombinierte Anzeige von ACC-Informationen und Distanzbalken zu bewerten ist an, dass die Anzeige des Distanzbalkens eine sinnvolle Ergänzung zum ACC-System ist, da der Zustand des Systems verdeutlicht wird (42%) bzw. der Anzeigeort besser ist (23%). 5 Probanden (16%) sehen in der Anzeige des Distanzbalkens eine Alternative zum ACC-System, bei welcher der Fahrer zwar bei der Durchführung des Aufgabe „Einhalten des richtigen Abstandes“ unterstützt wird, allerdings die Regelung selber übernimmt. Auch die Ergebnisse zu den Fragen nach dem Anzeigeort der ACC-Informationen zeigt ein großes Potenzial für das kontaktanaloge Head-up-Display. 23 Probanden (74%) bevorzugten die Information „Objekt erkannt“ und „Übernahmeaufforderung“ im Head-up-Display im Vergleich zum Kombidisplay; 24 Probanden (77%) machen diese Aussage für die Information des ACC-Regelabstandes. Somit bleibt festzuhalten, dass eine Kombination von Distanzbalken und ACC-Informationen durchwegs positiv bewertet wurde; das Anzeigekonzept sollte allerdings die gewohnte Bedeutung der Farben Grün, Gelb und Rot als Sicherheitsmaßstab berücksichtigen und den ACC-Status über die Form des Balkens anzeigen.

### **6.2.3 Beurteilung der Navigationsanzeige**

Da die Positionierung des kontaktanalogen Navigationspfeils auf Basis der Daten des Seriennavigationssystems beruht und somit den Ungenauigkeiten des verwendeten Datensatzes unterliegt, ist die Darstellung des Pfeils nicht an allen Abbiegungen exakt an der richtigen Stelle. Dennoch gaben 19 Probanden (61%) an, dass sie das Gefühl hatten, der Navigationspfeil zeige immer in die richtige Straße. Die Toleranz gegenüber Abweichungen der korrekten Position des Navigationspfeils scheint hier also verhältnismäßig groß zu sein. Bezüglich der Einbeziehung dieser Anzeige in das bestehende Navigationssystem bevorzugten 16 Probanden (52%) die kontaktanaloge Anzeige als Zusatz, 11 Probanden (35%) als Alternative zu den bereits im Fahrzeug vorhandenen Navigationsanweisungen; 4 Probanden (13%) fanden die kontaktanaloge Anzeige unnötig. Grundsätzlich scheint somit die Akzeptanz eines kontaktanalogen Navigationspfeils gegeben zu sein. Bei der Frage nach gewünschten Verbesserungen bei der Darstellung des Pfeils, zeigte sich, dass die gewählte Farbe (Grün) von 13 Probanden (42%) als schlecht sichtbar beurteilt wurde. Als Abhilfe hierfür kann entweder eine Farbe mit einem höheren Kontrast zur Umgebung verwendet, oder die Helligkeit der bilderzeugenden Einheit vergrößert werden. Statt des Navigationspfeils erwarteten 4 Probanden (13%) die Anzeige eines Fahrschlauches; 3 Probanden (10%) bemängelten, dass der Navigationspfeil dem



vorausfahrenden Fahrzeug überlagert ist. Möglich wäre hier eine Fahrschlauchanzeige mit einem höheren Grad an Transparenz in dem Bereich des Fahrschlauches, der anderen Fahrzeugen überlagert wird. Somit könnte der Effekt des liegenden Bildes auch für die Situationen erreicht werden, bei denen sich im Bereich der Anzeige ein anderes Fahrzeug befindet. Generell bedarf es für die serienreife Umsetzung einer kontaktanalogen Navigationsanzeige im Head-up-Display exakter Streckendaten, vor allem wenn die Anzeige als Fahrschlauch erfolgen soll. Der nächste Schritt in der Entwicklung wäre somit die Integration eines Navigationssystems mit prädiktiven Streckendaten in den Versuchsträger.

## 6.2.4 Weitere Ergebnisse

Aussagen zur Verwendung des kontaktanalogen Head-up-Displays im Stadtverkehr und Eindrücke der Versuchspersonen zur Sicherheit des Systems sind neben den Verbesserungsvorschlägen der Probanden die Inhalte des folgenden Kapitels.

### 6.2.4.1 Verwendung des Systems im Stadtverkehr

Im Vergleich zum außerstädtischen Straßenverkehr ist das Blickverhalten des Fahrers im Stadtverkehr wesentlich dynamischer. Grund hierfür sind erforderliche Einsichten in kreuzende Straßen, Beobachtung des Verhaltens von Fußgängern und Radfahrern, Blicke auf Lichtsignalanlagen und häufig durchzuführende Spurwechsel. Wegen der dadurch entstehenden hohen kognitiven Belastung könnte eine zusätzlich Anzeige im primären Blickfeld, wie beispielsweise der kontaktanaloge Distanzbalken, als zusätzlich beanspruchend oder störend empfunden werden. Der letzte Abschnitt der Teststrecke führte über innerstädtische Straßen. Über die gesamte innerstädtische Strecke wurden dem Probanden der Distanzbalken und die digitale Geschwindigkeitsanzeige im kontaktanalogen Head-up-Display angezeigt. Auf die Frage *„Wie empfinden Sie die Anzeige des Sicherheitsabstandes in der Stadt“* am Ende der Versuchsfahrt äußerten sich 17 Probanden (55%) positiv (*„sehr gut“* oder *„gut“*), 7 Probanden (23%) waren unentschlossen und 7 Probanden (23%) bewerteten die Verwendung der Anzeige im Stadtverkehr als negativ. Als Grund für ihr negatives Urteil gaben 4 Probanden an, die Anzeige störe und lenke ab; 3 Probanden empfanden die Anzeige als unnötig. Die direkte Frage *„Lenkte Sie die Anzeige in der Stadt vom übrigen Verkehrsgeschehen ab?“* beantworteten 17 Probanden (55%) mit *„ja, sehr“* oder *„ja“*. 11 dieser Probanden gaben als Grund für ihre Antwort an, dass sie sich zu stark auf den Balken konzentrierten.

12 Probanden (39%) fühlten sich durch den Balken nicht abgelenkt, 2 (6%) waren unentschlossen. Es fällt auf, dass nur 39% der Probanden angaben, sich nicht abgelenkt zu fühlen, allerdings 55% der Probanden die Anzeige des Distanzbalkens im Stadtverkehr befürworteten. Somit scheint eine empfundene Ablenkung nicht unbedingt die Ablehnung der neuartigen Anzeige zur Folge zu haben. Eine genaue Analyse der Blickbewegungen und ein Vergleich der Ergebnisse mit und ohne kontaktanaloger Anzeige in Form einer erweiterten Probandenuntersuchung ist erforderlich, um eine fundierte Aussage über Nutzen und eventuelle Risiken einer kontaktanalogen Anzeige in der Situation „Stadtverkehr“ treffen zu können.

#### **6.2.4.2 Eindrücke zur Sicherheit**

Nach Beendigung der Versuchsfahrt wurden die Versuchspersonen zu sicherheitsrelevanten Aspekten in Zusammenhang mit den kontaktanalogen Anzeigen befragt. Hierbei gaben 27 Probanden (87%) an, dass sie keine Sichtverdeckung durch den Distanzbalken empfanden. Für die Navigationsanzeige gaben dies 26 Probanden (84%) an. Die restlichen Probanden empfanden eine zeitweise Sichtverdeckung durch eine der Anzeigen, beispielsweise in Situationen, in denen die Anzeige anderen Verkehrsteilnehmern überlagert wurde. Bezogen auf den Distanzbalken kann dies nur auf Grund von zu geringem Abstand oder der im Versuchsträger auftretenden, für einen Serieneinsatz noch zu behebenden Ungenauigkeit bei Kurvenfahrt geschehen und ist somit nicht als kritisch einzustufen. Für eine Behebung der Verdeckungsproblematik beim Navigationspfeil bedarf es Sensordaten, über die eine Lokalisierung anderer Verkehrsteilnehmer geschehen kann. Eine Überlagerung beispielsweise eines Fußgängers mit dem Navigationspfeil kann somit vermieden werden. Außerhalb der durchgeführten Versuchsreihe, die ausschließlich bei Tageslicht stattfand, fiel bei weiteren Testfahrten auf, dass der Distanzbalken nachts oft zu hell erscheint. Die niedrigste Dimmungsstufe, die für die verwendete Lichtquelle im Head-up-Display eingestellt werden kann, ist in manchen Situationen noch zu hell. Kritisch sind Nachtfahrten auf Autobahnen mit Geschwindigkeiten von über 180km/h, da sich hier der Distanzbalken am Ende des Ausleuchtungsbereiches des Fahrlichtes befindet. Bei geringer Verkehrsdichte und somit nahezu keiner Fremdbeleuchtung ist dieser Bereich vom Fahrer ständig auf eventuell auftretende Hindernisse zu scannen. Für den beschriebenen Fall einer zu hellen Darstellung besteht somit die Gefahr einer Überlagerung von Hindernissen auf der Fahrbahn durch den Distanzbalken. Für die weitere Entwicklung des Head-up-Displays ist sicherzustellen, dass für Situationen mit sehr wenig Streulicht die Helligkeitseinstellung des Displays Werte annimmt, die gering genug sind, um solche Situationen zu verhindern. Des Weiteren würde ein verlässliches System zur

Hinderniserkennung mit einer entsprechenden kontaktanalogen Anzeige (siehe Kapitel 5.4.2) helfen, mittels des Head-up-Displays auftretende Hindernisse hervorzuheben. Für diesen Fall würde der Distanzbalken ausgeblendet werden.

Eine Ablenkung durch den Distanzbalken bezogen auf die gesamte Versuchsfahrt wurde von 13 Probanden (42%) empfunden. Der am häufigsten genannte Grund der Ablenkung war die zu starke Konzentration auf den Distanzbalken (67%). Insgesamt ist die empfundene Ablenkung über die gesamte Versuchsstrecke geringer als für die Teilstrecke im Stadtverkehr. Für weitere Untersuchungen sollten eine Aufzeichnung von Blickbewegungen während der Fahrt und daraus eine Ableitung der tatsächlichen Ablenkung durch die Anzeige erfolgen. Des Weiteren ist noch nicht geklärt, wie sich Gewöhnungseffekte auf die tatsächliche und die empfundene Ablenkung des Fahrers durch kontaktanaloge Anzeigen auswirken.

Speziell für die Darstellung des Distanzbalkens wurde der Fahrer nach dem empfundenen Nutzen befragt. 24 Probanden (77%) hatten das Gefühl, mit Hilfe des Distanzbalkens den Sicherheitsabstand leichter einhalten zu können; 4 Probanden (13%) waren dagegen der Meinung, dass die Anzeige des Distanzbalkens dazu verleitet, nur den angezeigten Mindestabstand einzuhalten; sie hatten das Gefühl, ohne Distanzbalken einen größeren Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu halten. Eine situative Anzeige des Distanzbalkens bei Unterschreitung des Mindestabstandes würde diese Problematik ausschließen. Die Untersuchung von Akzeptanz und Nutzen einer solchen Anzeige bleibt hier noch offen; problematisch hinsichtlich erzwungener Blickabwendungen kann hierbei allerdings ein zu häufiges Ein- und Ausblenden des Balkens werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen von Assmann in [1] zeigen für die Situation einer Kolonnenfahrt ein sichereres Verhalten der Fahrer bei einer Anzeige des Distanzbalkens im Vergleich zu Fahrten mit ausgeschaltetem Head-up-Display. Ein signifikanter Effekt ist vor allem für die relative Dauer der Unterschreitung des Mindestabstandes im Vergleich zur Gesamtfahrzeit, aber auch für die Häufigkeit der Situation „Mindestabstand unterschritten“ festzustellen. Bei Fahrten auf Landstraßen beispielsweise wurde ohne Head-up-Display über 56% der Fahrzeit der Sicherheitsabstand nicht eingehalten; bei der Anzeige des Distanzbalkens sinkt dieser Wert auf 35%. Diese Ergebnisse von Assmann bestätigen das subjektive Empfinden der Versuchspersonen in der hier vorliegenden Versuchsreihe, mit Hilfe des Distanzbalkens den Sicherheitsabstand besser einzuhalten als in einer Fahrsituation ohne Distanzbalken.

Grundsätzlich fühlten sich 68% der Befragten (21 Probanden) durch die Anzeige des Sicherheitsabstandes sicherer als ohne. Dieses Vertrauen in die Distanzanzeige erfordert eine fehlerfreie Funktion und verlangt weitere Untersuchungen zu den empfundenen angezeigten Distanzen, da eine Fehlinterpretation der Distanz zu einer

Unterschreitung des Mindestabstandes führen kann. Des Weiteren ist zu untersuchen, ob die dauerhafte Benutzung des Distanzbalkens über einen langen Zeitraum negative Auswirkungen auf darauffolgende Fahrten ohne kontaktanalogen Distanzbalken hat, was auf Grund auftretender Gewöhnungseffekte möglich wäre.

### **6.2.4.3 Verbesserungsvorschläge**

Die von den Versuchspersonen genannten Verbesserungsvorschläge betreffen hauptsächlich die Qualität der Darstellung. Die häufigste Nennung (11 Probanden) war der Wunsch nach einem ruhigeren Bild. Der Konflikt zwischen schneller Aktualisierung der Position und ruhiger Darstellung ist bereits in Kapitel 5.2 beschrieben. Eine Einbindung von prädiktiven Streckendaten und somit eine Loslösung der Anzeigenpositionierung von den Querschleunigungsdaten ist eine Möglichkeit, die Anzeige ruhiger zu gestalten. Die Sichtbarkeit der Anzeigen bei großer Umgebungshelligkeit wurde von 9 Probanden als verbesserungswürdig genannt. Für eine Weiterentwicklung des kontaktanalogen Head-up-Displays muss somit darauf geachtet werden, dass die Leuchtdichte der bilderzeugenden Einheit höher ist (beispielsweise LED-Backlight mit  $1.000.000\text{cd/m}^2$ ). Die Forderung nach einem schärferen Bild (5 Nennungen) kann in der Serienproduktion durch eine exakte Abstimmung zwischen dem optischen System im Head-up-Display und der Keilfolie in der Windschutzscheibe erfolgen. In dem verwendeten prototypischen Aufbau sind die Toleranzen bei der Positionierung der Spiegel im Strahlengang höher als bei einer späteren Serienproduktion. Diese Unstimmigkeiten führen zu optischen Abbildungsfehlern, die von den Probanden meist als leichte Unschärfe in der Darstellung wahrgenommen werden. Die Empfehlung, dass der Distanzbalken nur situativ angezeigt wird, wurde von 3 Probanden gegeben. Der Balken sollte nur bei einer Unterschreitung des Sicherheitsabstandes angezeigt werden. Dies muss ebenso wie die Forderung nach einem schmaleren Balken (3 Nennungen) in einer Studie bewertet werden.

Die genannten Verbesserungsvorschläge beziehen sich auf Optimierungen des Anzeigekonzeptes oder lassen sich über eine Aktualisierung von Hardwarekomponenten im Head-up-Display umsetzen. Die grundlegende Idee, eine Anzeigemöglichkeit auf der Fahrbahn umzusetzen wurde nicht in Frage gestellt. Somit sollten die nächsten Schritte bei der Weiterentwicklung des kontaktanalogen Head-up-Displays einerseits die Sicherstellung der Serientauglichkeit der Hardwarekomponenten und andererseits eine Optimierung des Anzeigekonzeptes an Hand von detaillierten Probandenuntersuchungen sein.

## 7 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und die Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays für ein Kraftfahrzeug. Hierfür wurden im ersten Schritt in Kapitel 2.1 die technischen Grundlagen der Head-up-Display-Technologie erarbeitet. Diese sind sowohl für die in Kapitel 2.2 beschriebenen herkömmlichen Head-up-Displays wie auch für das zu entwickelnde kontaktanaloge System relevant; sie bilden gewissermaßen die Basis beider Systeme. Einen wesentlichen Teilaspekt hierbei stellt die Behebung der optischen Abbildungsfehler im Head-up-Display dar. Eine Probandenstudie lieferte Aussagen über die Wahrnehmung solcher Abbildungsfehler und gibt Grenzwerte vor, die bei der Auslegung der Optikkomponenten berücksichtigt werden müssen. Neben diesen technischen Grundlagen der Head-up-Display-Technologie wurden in Kapitel 2.3 Anzeigehalte von momentan auf dem Markt erhältlichen Head-up-Displays aufgezeigt. Ein Vergleich dieser Anzeigekonzepte zeigte, dass keine einheitliche Systematik bei den verschiedenen Systemen erkennbar ist. Um ein optimales Anzeigekonzept zu entwickeln, diente die in Kapitel 2.4 beschriebene Probandenstudie im Fahrsimulator, deren Ergebnisse eine klare Bevorzugung kontaktanaloger Informationen widerspiegelt. Diese Bevorzugung zeigt sich sowohl im direkten Vergleich eines herkömmlichen Head-up-Displays mit einer kontaktanalogen Variante, als auch im Vergleich der bevorzugten Symbole für die Navigations- und ACC-Information; von der Mehrheit der Probanden wurde eine 2,5-D-Darstellung gewählt, die einer kontaktanalogen Anzeige ähnlich ist. Aus den Ergebnissen dieser Studie ist ersichtlich, dass kontaktanaloge Information im Head-up-Display eine sinnvolle Weiterentwicklung der herkömmlichen Technologie darstellt. Für die Umsetzung eines kontaktanalogen Head-up-Displays wurden in Kapitel 3 verschiedene Konzepte betrachtet. Die in Kapitel 3.2.1.3 beschriebene Variante „schräge Displayebene“ stellte sich als die erfolgversprechendste Umsetzungsmöglichkeit heraus, da sie mit geringem technischem Aufwand Darstellungen in unterschiedlichen virtuellen Distanzen ermöglicht. Das virtuelle Bild liegt bei dieser Variante auf der Fahrbahnoberfläche; die unterschiedlichen virtuellen Distanzen werden somit durch eine Positionsänderung auf dem Display in vertikaler Richtung erreicht. Die in Kapitel 4.1 beschriebenen Randbedingungen für die Umsetzung des kontaktanalogen Head-up-Displays mit schräger Displayebene stellen sicher, dass die Dimensionierung des Systems einen späteren Einbau in das Versuchsfahrzeug zulässt. Die Berechnung der erforderlichen Größe des virtuellen Bildes in Kapitel 4.2 zeigte, dass ohne weitere Optimierungsschritte eine Umsetzung im Versuchsträger an Packageproblemen scheitern würde. Um den Bauraum des Head-up-Displays zu

verkleinern, wurde ein virtuelles Bild in Form einer Zylindermantelfläche konzipiert, das durch eine Anhebung der Darstellungsfläche von der Fahrbahn und unter Einbeziehung der Gesetzmäßigkeiten von monokularen Tiefenkriterien eine kontaktanaloge Anzeige im Bereich von 12m vor dem Augpunkt des Fahrers bis zum Horizont ermöglicht. Die hierfür benötigten optischen Elemente, die Bildquelle, die technischen Komponenten für die Datenbereitstellung und Ansteuerung des kontaktanalogen Head-up-Displays im verwendeten Versuchsfahrzeug und schließlich der Einbau des Systems ins Fahrzeug wurden in den Kapiteln 4.3 bis 4.6 beschrieben. Für die technische Umsetzung des Anzeigekonzepts wurde in Kapitel 5.1 der Zusammenhang zwischen der Pixelposition auf dem Display und der Lage des entsprechenden Bildpunktes vor dem Fahrzeug – die Abbildungsfunktion – ermittelt. Art und Ausprägung von fahrdynamischen Einflüssen und die damit verbundenen Ungenauigkeiten für den kontaktanalogen Charakter der Anzeige wurden im Kapitel 5.2 aufgeführt. Erste Fahrversuche zeigten, dass eine Kompensation der Abweichung in y-Richtung bei Kurvenfahrt erforderlich ist; hierfür wurde als Eingangsgröße die Querbewegung des Fahrzeugs verwendet. Auf eine Kompensation der Abweichung in z-Richtung durch Nickbewegungen des Fahrzeugs wurde im ersten Schritt zugunsten einer ruhigen Darstellung verzichtet. Hiermit war die Grundlage für die ersten kontaktanalogen Anzeigen im Head-up-Display geschaffen. Als erste Anzeigehalte im neu entwickelten System wurden ein Distanzbalken, der den korrekten Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug anzeigt und über eine Farbänderung den Status des ACC-Systems angibt und eine kontaktanaloge Navigationsanzeige implementiert. Kapitel 5.3 beschreibt die Umsetzung dieser Darstellungen im Versuchsträger und zeigt, wie eine digitale Geschwindigkeitsanzeige sinnvoll eingebunden werden kann. Dieser Anzeigebereich stellte die Ausgangssituation für die in Kapitel 6 beschriebene Versuchsreihe zur Validierung des neuartigen Systems dar; die in Kapitel 5.4 beschriebenen Anzeigen des Überholwegs, der Hindernismarkierung und der Ausweichmanöver können unter Zuhilfenahme zusätzlicher Sensortechnik im Versuchsfahrzeug implementiert werden, waren jedoch nicht Teil der Probandenuntersuchung. Ziel der Probandenuntersuchung war, Aussagen über die Wahrnehmung des kontaktanalogen Charakters der Anzeige und über die implementierten Anzeigen zu erhalten. Die Idee, die Fahrbahnoberfläche vor dem Fahrzeug als Anzeigefläche zu verwenden, wurde von den Probanden größtenteils positiv bewertet. Es stellte sich allerdings auch heraus, dass die Querbewegungsdaten als einziger Anhaltspunkt zur Positionierung der Anzeige in y-Richtung nicht genügen, da das virtuelle Bild für eine geforderte schnelle Reaktion auf eintretende Querbewegungen zu unruhig wird. Ob die Verwendung von prädiktiven Streckendaten eine bessere Alternative ist, müsste sich

in weiteren Untersuchungen herausstellen. Die Anzeigeinhalte (Distanzanzeige und Navigationsanzeige) wurden ebenso von der Mehrheit der Probanden positiv bewertet. Die Farbgebung des Distanzbalkens in Abhängigkeit von dem momentanen ACC-Status ist jedoch nochmals zu überdenken. Ebenso ist die Anpassung der Leuchtdichte des Displays auf die Umgebungssituation zu überarbeiten, da sich herausstellte, dass nachts selbst für die niedrigste wählbare Displayhelligkeit die Anzeige zu hell erscheint. Die in Kapitel 6.2.4.3 beschriebenen Verbesserungsvorschläge, die von den Probanden nach der Versuchsfahrt genannt wurden, zeigten, dass vor allem am Anzeigekonzept noch Optimierungen vorzunehmen sind; das grundlegende Konzept einer Anzeige auf der Fahrbahn vor dem Fahrzeug wurde jedoch positiv angenommen.

## 8 Ausblick

Diese Arbeit zeigt erstmalig, dass ein kontaktanalogen Head-up-Display mit frei programmierbarer Displayeinheit seriennah in einen Versuchsträger funktionsfähig integriert werden kann. Vor allem die Sensorik moderner Fahrzeuge hilft, die hier geschaffene Möglichkeit einer fahrbahnüberlagerten Anzeige zukünftig umfassend zu nutzen. Des Weiteren können genauere Daten der relativen Positionierung von Fahrzeug und Gegenstand in der Umgebung helfen, die momentan noch kritische Anzeigegenauigkeit beispielsweise für die Markierung einer Straßenkreuzung oder des Fahrbahnverlaufes zu verbessern. Für das zunehmende Maß an Umfeldwahrnehmung in modernen Fahrzeugen stellt das kontaktanaloge Head-up-Display somit ein optimales Anzeigemedium dar, wobei darauf geachtet werden muss, dass der Fahrer nicht durch ein Übermaß an Anzeigen im primären Sichtfeld überfordert wird. Basierend auf der Technologie der herkömmlichen Head-up-Displays ist das kontaktanaloge System die zukunftsorientierte Weiterentwicklung für das intelligente Fahrzeug von morgen.



# Literaturverzeichnis

## ***Fachbücher, Artikel, Berichte, Schutzrechte:***

- [1] Assmann, E.: Untersuchung über den Einfluss einer Bremsweganzeige auf das Fahrverhalten. Dissertation, TU München 1985.
- [2] Bergmeier, U., Bubb, H.: Augmented Reality in vehicle – technical realisation of a contact analogue head-up-display under automotive capable aspects; usefulness exemplified through night vision systems. FISITA World Automotive Congress (F2008-02-043), München 2008.
- [3] Bierbaumer, N., Schmidt, R. F.: Biologische Psychologie. Teil III. Springer, Berlin 2006.
- [4] Blankenbach, K.: Die eierlegende Wollmilchsau muss erst noch erfunden werden – grundsätzlicher Vergleich von Displaytechnologien. In: Markt und Technik – Die Wochenzeitung für Elektronik und Informationstechnik. Sonderheft Displays. März 2001.
- [5] Brückmann, R.: Blickfixationen und Blickbewegungen des Fahrzeugführers sowie Hauptsichtbereiche an der Windschutzscheibe. FAT-Schriftenreihe 151. Frankfurt am Main 2000.
- [6] Bubb, H.: Einrichtung zur optischen Anzeige eines veränderlichen Sicherheitsabstandes eines Fahrzeuges. Schutzrecht DE 2633067 C2 (1978-02-02).
- [7] Bubb, H.: Arbeitsplatz Fahrer – Eine ergonomische Studie. In: Automobil Industrie, 30. Jg. 1985, Heft 3, S. 265ff.
- [8] Bubb, H., Reichart, G.: Braucht man HUD´s im Kraftfahrzeug? – Ergebnisse einer Literaturrecherche und eigener Versuche. VDI-Berichte Nr. 948. Düsseldorf 1992.
- [9] Franz, G.: Der richtige Durchblick – Anzeige einmal anders. Sonderausgabe von ATZ und MTZ – BMW 6er. Jahr unbekannt.
- [10] Gengenbach, R.: Fahrverhalten im Pkw mit Head-up-Display. Dissertation, VDI-Verlag, Düsseldorf 1997.
- [11] Goldstein, E. B.: Wahrnehmungspsychologie. Eine Einführung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1997.

- [12] Huhn, W.: Anforderungen an eine adaptive Lichtverteilung für Kraftfahrzeugscheinwerfer im Rahmen der ECE-Regelung. Dissertation, Utz Verlag, München 1999.
- [13] Marquardt, S.: Ergonomie der Kraftfahrzeugtechnik. Schuch, Weiden 1997.
- [14] Marstaller, R., Schweigert, M., Bubb, H.: Visual Feedback of advanced driver assistance systems via HUD. Proceedings of the conference WWDU 2002 World Wide Work. Berchtesgaden 2002.
- [15] Maurer, M., Stiller, C.: Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung. Springer, Berlin 2005.
- [16] Mayer, R., Blume, J.: Optik Design von Head-up-Displays für Kraftfahrzeuge. VDI-Berichte Nr. 1731. Düsseldorf 2003.
- [17] Merryweather, R. A.: Automotive head up display. Jahr unbekannt.
- [18] Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. Springer, Berlin 2004.
- [19] Mutschler, H.: Informationsdarstellung mit Hilfe eines Head-up-Displays. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 1995.
- [20] Nakamura, K., Inada, J., Kakizaki, M., Fujikawa, T., Kasiwada, S., Ando, H., Kawahara, N.: Windshield Display for Intelligent Transport System. Proceedings of the 11th World Congress on Intelligent Transportation Systems. Nagoya, Japan 2004.
- [21] Okabayashi, S., Sakata, M.: How an automotive Head-up-display affects a driver's ability to recognize the forward view. SID 1991.
- [22] Schmidtke, H.: Ergonomie. Hanser Verlag, München 1993.
- [23] Schneid, M., Sacher, H., Hummel, S., Bubb, H.: Ergonomischer Prozess bei der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle im Fahrzeug. VDI-Berichte Nr. 1960. Düsseldorf 2006.
- [24] Schneider, W., Beeck, M.-A., Thomas, J., Rackow, I.: Digitale Geschwindigkeitsanzeige im HUD, ein Beitrag zur Verkehrsicherheit?. VDI-Berichte Nr. 948. Düsseldorf 1992.
- [25] Schweizerische Lichttechnische Gesellschaft, Österreichische Lichttechnische Arbeitsgemeinschaft, Lichttechnische Gesellschaft e.V. Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.): Handbuch für Beleuchtung. Essen 1975.
- [26] Webb, P.: Holographic technology focussed on improved vehicle safety. In: Glass International. März 1992.

**Internetquellen:**

- [27] Alberti, M.: Technologien moderner Displaysysteme. Online-Publikation. [www.cineston.org/phpBB2/download.php?id=4300](http://www.cineston.org/phpBB2/download.php?id=4300). Stand: 24.02.2008.
- [28] Bredow, W.: Technische Informationen über Flugzeuge und Flugsimulatoren. [http://www.bredow-web.de/ILA\\_2000/Military/F-16\\_C/f-16\\_c.html](http://www.bredow-web.de/ILA_2000/Military/F-16_C/f-16_c.html). Stand: 22.12.2004.
- [29] Rosenzweig, R.: Experimentelle Bestimmung der „Verrechnungs“-Zeiten beim Stereosehen anhand der verzögert wahrgenommenen Tiefenumkehr von bewegten, teilweise verdeckten Objekten. Dissertation, Online-Publikation. [http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=967778867&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=967778867.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=967778867&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=967778867.pdf). Stand: 28.02.2008.
- [30] Unbekannt: Imatest, Distortion. [http://www.imatest.com/docs/tour\\_distortion.html](http://www.imatest.com/docs/tour_distortion.html). Stand: 25.02.2008.
- [31] Unbekannt: Laser-Projektionen. <http://www-user.tu-chemnitz.de/~klti/Praktikum/displays/projektion/laser.html>. Stand: 19.01.2005.
- [32] Unbekannt: LCD-Funktionsprinzip. <http://www.geoinformatik.uni-rostock.de/einzel.asp?ID=-701788262>. Stand: 13.01.2005.
- [33] Unbekannt: Navigationssystem. In: Wikipedia. <http://de.wikipedia.org/wiki/Navigationssystem>. Stand: 24.02.2008.
- [34] Unbekannt: Sterntest. <http://www.otterstedt.de/wiki/index.php/Sterntest>. Stand: 25.02.2008.
- [35] Unbekannt: Verzeichnung. In: Wikipedia. <http://de.wikipedia.org/wiki/Verzeichnung>. Stand: 25.02.2008.

# Anhang

## A.1 Quellcode zur Anzeigengenerierung

```
using System.Collections.Generic;
using System.Text;
using System.Threading;

namespace HeadUp
{
    partial class Form1
    {
        Thread readThread;

        void startRead()
        {
            // COM-Port öffnen
            if (!port.IsOpen)
                port.Open();

            // Lesen von der seriellen Schnittstelle in einem nebenläufigen Thread starten
            reading = true;
            if (readThread == null || !readThread.IsAlive)
            {
                readThread = new Thread(new ThreadStart(receive));
                readThread.Start();
            }

            /// <summary>
            /// Beendet das Lesen von der seriellen Schnittstelle.
            /// </summary>
            public void stopRead()
            {
                try
                {
                    // Einleseschleife nach Abbruch nicht erneut durchlaufen.
                    reading = false;

                    if (port != null && port.IsOpen)
                    {
                        // Durch port.Close() wird auch der Aufruf von port.ReadByte()
                        // wodurch der Lese-Thread nicht explizit abgebrochen werden muss.
                        port.Close();

                        // Das Schließen des Ports kann etwas Zeit beanspruchen, weshalb hier eine
                        // kleine Verweildauer spendiert wird, bevor ein eventueller Reconnect
                        stattfinden kann.
                        Thread.Sleep(250);
                    }
                }
                catch (Exception ex)
                {
                    Console.WriteLine(ex.Message);
                }
            }

            private volatile bool reading = true;

            /// <summary>
            /// Threadstart-Methode für Datenempfang.
            /// </summary>
            private void receive()
            {
                while (reading)
```

```

        {
            try
            {
                int? data = -1;

                data = port.ReadByte();

                if (data != null)
                    handleReceivedByte((byte)data);
            }
            catch (System.IO.IOException)
            {
                // Es ist natürlich, dass beim Schließen des COM-Ports eine IOException
auftritt.
            }
        }
        Console.WriteLine("Thread zum Lesen von COM-Port beendet.");
    }

    List<char> puffer = new List<char>();
    List<byte> bytePuffer = new List<byte>();

    void handleReceivedByte(byte inByte)
    {
        bytePuffer.Add(inByte);

        char[] c = ASCIIEncoding.ASCII.GetChars(new byte[] { inByte });

        if (c[0] != '\r' && c[0] != '\n')
            puffer.AddRange(c);

        if (c[0] == '\n')
        {
            //log(byteListToString(bytePuffer));

            handleLine(puffer.ToArray());
            puffer.Clear();
            bytePuffer.Clear();
        }
    }

    string byteListToString(List<byte> bytes)
    {
        StringBuilder sb = new StringBuilder();
        foreach (byte b in bytes)
        {
            sb.Append(b.ToString("x"));
            sb.Append(" | ");
        }
        return sb.ToString();
    }

    enum MessageTypes : sbyte
    {
        Invalid = -1,
        Speed = 1,
        ACC = 2,
        Abstand = 5,
        Querbeschleunigung = 6,
        NaviPfeil = 7,
        NaviEntfernung = 8
    }

    DataPacket currentValues = new DataPacket();

    bool isTrue(string wertString)
    {
        return wertString.Equals("1");
    }

    private void handleLine(char[] line)
    {
        string zeile = new string(line);
        log(zeile);

        // Daten werden im folgenden Format erwartet:
        // 1 250 (Geschwindigkeit in km/h)
    }

```

```

// 2 1 1 (ACC)
// 5 23 (Abstand zum Vordermann in m)
// 6 60 (Querbeschleunigung in 100/1 g)

byte id = 0;
MessageTypes mType = MessageTypes.Invalid;

string[] tokens = zeile.Split(new char[] { ' ' },StringSplitOptions.None);

try
{
    id = byte.Parse(tokens[0]);
    mType = (MessageTypes)id;
}
catch (Exception ex)
{
    log("Format-Fehler: {0} ({1})", ex.Message, zeile);
}

switch (mType)
{
    case MessageTypes.Speed:
        currentValues.speed = int.Parse(tokens[1]);
        break;
    case MessageTypes.Abstand:
        currentValues.distance = int.Parse(tokens[1]);
        break;
    case MessageTypes.Querbeschleunigung:
        currentValues.lateralForce = int.Parse(tokens[1]) / 100f;
        break;
    case MessageTypes.ACC:
        if (tokens[1] == "1")
        {
            currentValues.accObjektErkannt = true;
        }
        else
        {
            currentValues.accObjektErkannt = false;
        }
        if (tokens[2] == "1")
        {
            currentValues.accUebernahmeAufforderung = true;
        }
        else
        {
            currentValues.accUebernahmeAufforderung = false;
        }
        break;
    case MessageTypes.NaviPfeil:
        currentValues.kreuzungsRichtung = int.Parse(tokens[2]);
        break;
    case MessageTypes.NaviEntfernung:
        if (tokens[1] == "11" && tokens[2] == "0" && tokens[3] == "5")
        {
            currentValues.naviEntfernung = int.Parse(tokens[4]);
        }
        break;
    default:
        log("Kein Handling für MessageType: {0}", mType);
        break;
}
}
}

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

namespace HeadUp
{

```

```

public partial class Form1 : Form
{
    Image pfeillinks = Bitmap.FromFile("linksgrün-gebogen.jpg");
    Image pfeilrechts = Bitmap.FromFile("rechtsgrün-gebogen.jpg");
    Image pfeilgerade = Bitmap.FromFile("gerade-grün.jpg");

    Image balkengruen = Bitmap.FromFile("Balken_grün.jpg");
    Image balkengelb = Bitmap.FromFile("Balken_gelb.jpg");
    Image balkenrot = Bitmap.FromFile("Balken_rot.jpg");

    public Form1()
    {
        InitializeComponent(); //
        manualVaules setzen
        manualValues.speed = 0;
        manualValues.lateralForce = 0f;
        manualValues.accObjektErkannt = false;
        manualValues.accUebernahmeAufforderung = false;

        panell1.UseManualValues = cbDemoMode.Checked;
        headupPanell1.UseManualValues = cbDemoMode.Checked;
    }

    DataPacket manualValues = new DataPacket(); // updateView

    void updateView(DataPacket values)
    {
        Point balkenPos;
        Point pfeilPos;
        Size balkenSize;
        Size pfeilSize;

        balkenPos = getBalkenPosition(values.speed, lateralForceGedämpft);
        balkenSize = getArrowSize(balkenPos);
        pfeilPos = getPfeilPosition(values.speed, abstand);
        pfeilSize = getPfeilSize(pfeilPos);
        balkenPos.X = balkenoffset.Value + balkenPos.X - balkenSize.Width / 2;
        pfeilPos.X = 100 + pfeilPos.X - pfeilSize.Width / 2;

        Image pfeil = upatePfeil(values.kreuzungsRichtung);
        Image balken = updateBalkenColor(values.accObjektErkannt,
        values.accUebernahmeAufforderung);

        panell1.Pfeil = new HeadupPanel.HudImage(pfeil, pfeilPos, pfeilSize);
        headupPanell1.Pfeil = new HeadupPanel.HudImage(pfeil, pfeilPos, pfeilSize);
        panell1.Balken = new HeadupPanel.HudImage(balken, balkenPos, balkenSize);
        headupPanell1.Balken = new HeadupPanel.HudImage(balken, balkenPos, balkenSize);

        if (cbDemoMode.Checked)
        {
            panell1.ManualValues = values;
            headupPanell1.ManualValues = values;
        }
        else
        {
            panell1.CurrentValues = values;
            headupPanell1.CurrentValues = values;
        }

        // Alles neu zeichnen
        neuzeichnen();
    }

    /// <summary>
    /// //Position des
    Balkens bestimmen
    /// </summary>
    /// <param name="speed"></param>
    /// <param name="lateralForce"></param>
    /// <returns></returns>
    private Point getBalkenPosition(double speed, double lateralForce)
    {
        Point p = new Point();
    }
}

```

```

    double reaktionszeit = 1.01; // Reaktionszeit
    double sicherheitsAbstand = 0;
    double x, y, speedms;

    speedms = speed / 3.6d; // in m/s
    sicherheitsAbstand = speedms * reaktionszeit + 2; // Sicherheitsabstand in m.
    2m durch offset Auge Fahrzeugspitze

    x = -lateralForce * 450;
    y = calcY(sicherheitsAbstand);

    p.X = (int)x;
    p.Y = (int)y;

    return p;
}

//Pfeilposition

private Point getpfeilPosition(double speed, double abstand)
{
    Point p = new Point();
    int x = 240, y = -500;
    int voranzeige = 300;

    if (speed > 65)
    {
        voranzeige = 600;
    }

    updateLabel(lblY, abstand.ToString());

    if (abstand < voranzeige && abstand > 70)
    {
        y = calcY(70);
    }

    if (abstand < 70 && abstand > 20)
    {
        y = calcY(abstand);
    }
    if (abstand < 20)
    {
        y = calcY(20);
    }
    if (abstand < 1)
    {
        y = -500;
    }

    p.X = (int)x;
    p.Y = (int)y;

    return p;
}

int calcY(double abstand)
{
    double komponente1 = -0.002 * abstand * abstand * abstand;
    double komponente2 = 0.3322 * abstand * abstand;
    double komponente3 = -18.817 * abstand;
    double komponente4 = 407.82;

    double sum = komponente1 + komponente2 + komponente3 + komponente4;

    return (int)sum;
}

delegate void LabelUpdateCallback(Label lbl, string text);
void updateLabel(Label lbl, string text)
{
    if (lbl.InvokeRequired)
    {
        this.Invoke(new LabelUpdateCallback(updateLabel), new object[] { lbl, text });
    }
    else

```



```

        {
            lbl.Text = text;
        }
    }

// Farbe des Balken bestimmen
Image BalkenNone = new Bitmap(1, 1);
Image updateBalkenColor(bool objektErkannt, bool übernahmeAufforderungErfolgt)
{
    if (balkenaus.Checked)
    {
        return BalkenNone;
    }
    if (objektErkannt)
    {
        return balkengruen;
    }
    if (übernahmeAufforderungErfolgt)
    {
        return balkenrot;
    }
    if (!objektErkannt && !übernahmeAufforderungErfolgt)
    {
        return balkengelb;
    }

    return balkengelb;
}

//Größe des
Balken bestimmen
private Size getArrowSize(Point arrowPos)
{
    Size s = new Size();

    double w, h;

    w = 1.314f * arrowPos.Y + 44.5f;
    h = 3.5 * ((float)arrowPos.Y / 240f + 1);
    s.Height = (int)h;
    s.Width = (int)w;

    return s;
}

// Größe des
Pfeils bestimmen

private Size getPfeilSize(Point pfeilPos)
{
    Size s = new Size();

    double w, h;
    w = 1.7f * pfeilPos.Y + 44.5f;
    h = w / 2.6875;
    s.Height = (int)h;
    s.Width = (int)w;

    return s;
}

private void Form1_FormClosing(object sender, FormClosingEventArgs e)
{
    stopRead();
}

delegate void VoidHandler();

// Scroll für
manuelle Geschwindigkeit
private void trackBar1_Scroll(object sender, EventArgs e)
{
    manualValues.speed = (int)trackBar1.Value;
    if (cbDemoMode.Checked == true)

```

```

        {
            updateView(manualValues);
        }
    }

    DateTime zuletztGezeichnet = DateTime.Now;

    void neuzeichnen()
    {
        DateTime jetzt = DateTime.Now;
        if (jetzt - zuletztGezeichnet > TimeSpan.FromMilliseconds(20))
        {
            BeginInvoke(new VoidHandler(panell.Refresh));
            BeginInvoke(new VoidHandler(headupPanell.Refresh));
            zuletztGezeichnet = jetzt;
        }
    }

manuelle Querbeschleunigung // Scroll für
private void trackBar2_Scroll_1(object sender, EventArgs e)
{
    manualValues.lateralForce = (float)trackBar2.Value / 100;
    if (cbDemoMode.Checked == true)
    {
        updateView(manualValues);
    }
}

#region LOGGING
delegate void StringCallback(string text);
private void log(string logText)
{
    if (logBox.InvokeRequired)
    {
        logBox.Invoke(new StringCallback(this.log), new object[] { logText });
    }
    else
    {
        if (logBox.Items.Count > 500)
            logBox.Items.RemoveAt(0);
        logBox.Items.Add(logText);
        logBox.SelectedIndex = logBox.Items.Count - 1;
    }
}

void log(string format, params object[] values)
{
    log(string.Format(format, values));
}

#endregion // Portnamen

einlesen
private void btSelectPort_Click(object sender, EventArgs e)
{
    stopRead();

    port.PortName = tbPortname.Text;

    startRead();
}

private void tbPortname_TextChanged(object sender, EventArgs e)
{
}

private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    this.Invalidate();
}

```

```

// Checkbox
für Demonstrationsmodus

private void checkBox1_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    panell1.UseManualValues = cbDemoMode.Checked;
    headupPanell1.UseManualValues = cbDemoMode.Checked;

    if (cbDemoMode.Checked)
    {
        trackBar1.Enabled = true;
        trackBar2.Enabled = true;
        radioButton2.Enabled = true;
        radioButton3.Enabled = true;
        radioButton4.Enabled = true;
    }
    else
    {
        trackBar1.Enabled = false;
        trackBar2.Enabled = false;
        radioButton2.Enabled = false;
        radioButton3.Enabled = false;
        radioButton4.Enabled = false;
    }
}

erkannt Button // ACC Objekt
private void radioButton2_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (radioButton2.Checked)
    {
        manualValues.accObjektErkannt = true;
        manualValues.accUebernahmeAufforderung = false;
        updateView(manualValues);
    }
}

Fahrt // ACC freie
private void radioButton4_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (radioButton4.Checked)
    {
        manualValues.accUebernahmeAufforderung = false;
        manualValues.accObjektErkannt = false;
        updateView(manualValues);
    }
}

Übernahmeaufforderung Button // ACC
private void radioButton3_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)
{
    if (radioButton3.Checked)
    {
        manualValues.accObjektErkannt = false;
        manualValues.accUebernahmeAufforderung = true;
        updateView(manualValues);
    }
}

private void button1_Click_1(object sender, EventArgs e)
{
    StringBuilder sb = new StringBuilder();
    foreach (object o in logBox.Items)
    {
        sb.AppendLine(o.ToString());
    }
    Clipboard.SetText(sb.ToString());
}

private void lblY_Click(object sender, EventArgs e)
{
}

private void logBox_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)

```

```

    {
    }

    private void label8_Click_1(object sender, EventArgs e)
    {
    }

    // Pfeilrichtung bestimmen
    Image pfeilNone = new Bitmap(1, 1);

    Image upatePfeil(int pfeilrichtung)
    {
        if ((pfeilrichtung == 0 || // Möglichkeiten für gerade
            pfeilrichtung == 16 ||
            pfeilrichtung == 240 /*|| // Follow Street 255 ausgeblendet
            pfeilrichtung == 255*/) && !naviaus.Checked)
        {
            return pfeilgerade;
        }
        if ((pfeilrichtung == 32 || // Möglichkeiten links
            pfeilrichtung == 48 ||
            pfeilrichtung == 64 ||
            pfeilrichtung == 80 ||
            pfeilrichtung == 96 ||
            pfeilrichtung == 112) && !naviaus.Checked)
        {
            return pfeillinks;
        }
        if ((pfeilrichtung == 144 || // Möglichkeiten rechts
            pfeilrichtung == 160 ||
            pfeilrichtung == 176 ||
            pfeilrichtung == 192 ||
            pfeilrichtung == 208 ||
            pfeilrichtung == 224)&& !naviaus.Checked)
        {
            return pfeilrechts;
        }

        return pfeilNone;
    }

    private void trackBar4_Scroll(object sender, EventArgs e)
    {
    }

    // Timer für kontaktanaloges Navi
    double abstand = 0, naviEntfernungAlt = 0;

    private void navitimer_Tick(object sender, EventArgs e)
    {
        double speedms;
        speedms = (double)this.currentValues.speed / 3.6f;

        if ((this.currentValues.naviEntfernung != naviEntfernungAlt))
        {
            abstand = this.currentValues.naviEntfernung;
            abstand = abstand - 10;
            naviEntfernungAlt = this.currentValues.naviEntfernung;
        }
        if (abstand > 1)
        {
            abstand = abstand - (speedms / 10);
        }
        if (abstand < 1)
        {
            this.currentValues.naviEntfernung = 0;
        }
    }
}

```

```

// Dämpfung des Querschleunigungssignals über Mittelwerte der letzten 10 Signale // Dämpfer
double lf0 = 0, lf1 = 0, lf2 = 0, lf3 = 0, lf4 = 0, lf5 = 0, lf6 = 0, lf7 = 0, lf8 =
0, lf9 = 0;
double lateralForceGedämpft = 0;
private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    lateralForceGedämpft = lf0 * 0.1f + lf1 * 0.1f + lf2 * 0.1f + lf3 * 0.1f + lf4 *
0.1f +
                                lf5 * 0.1f + lf6 * 0.1f + lf7 * 0.1f + lf8 * 0.1f + lf9 *
0.1f;

    lf0 = lf1;
    lf1 = lf2;
    lf2 = lf3;
    lf3 = lf4;
    lf4 = lf5;
    lf5 = lf6;
    lf6 = lf7;
    lf7 = lf8;
    lf8 = lf9;

    if (querbeschleunigungaus.Checked) // Querschleunigung ausschalten
    {
        lateralForceGedämpft = 0;
    }

    updateLabel(lblX, lateralForceGedämpft.ToString());

    if (cbDemoMode.Checked) // kleine Werte rausfiltern
    {
        if (manualValues.lateralForce > 0.12 || manualValues.lateralForce < -0.12)
        {
            lf9 = manualValues.lateralForce;
            updateView(manualValues);
        }
        else
        {
            lf9 = 0;
            updateView(manualValues);
        }
    }
    // Daten kommen vom SerialPort
    else
    {
        if (this.currentValues.lateralForce > 0.12 || this.currentValues.lateralForce
< -0.12)
        {
            lf9 = this.currentValues.lateralForce;
            updateView(currentValues);
        }
        else
        {
            lf9 = 0;
            updateView(currentValues);
        }
    }
}

private void label11_Click(object sender, EventArgs e)
{
}

private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
{
}

private void headupPanel1_Paint(object sender, PaintEventArgs e)
{
}

private void panel1_Paint(object sender, PaintEventArgs e)

```

```

        {
        }

        private void label13_Click(object sender, EventArgs e)
        {
        }

    }
}

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;
using System.Drawing;

namespace HeadUp
{
    class HeadupPanel : Panel
    {
        public HeadupPanel()
        {
            SetStyle(ControlStyles.UserPaint | ControlStyles.AllPaintingInWmPaint |
ControlStyles.DoubleBuffer, true);

            initFonts();
        }

        Brush blurBrush = new SolidBrush(Color.FromArgb(30, Color.Black));
        int blurWidth = 4;
        protected override void OnPaint(PaintEventArgs e)
        {
            string kmh;

            e.Graphics.SmoothingMode = System.Drawing.Drawing2D.SmoothingMode.HighQuality;
            StringFormat.GenericDefault.Alignment = StringAlignment.Far;

            Point speedPos = new Point(Width / 2, Height - 40);
            Point speedLblPos = new Point(speedPos.X, speedPos.Y);
            speedPos.Offset(110, 0); //Offsetposition der
Geschwindigkeitsanzeige
            speedLblPos.Offset(110, 2); //Offsetposition "km/h"

            if (pfeil.bild != null)
                e.Graphics.DrawImage(pfeil.bild, new Rectangle(pfeil.pos, pfeil.size));

            if (balken.bild != null)
                e.Graphics.DrawImage(balken.bild, new Rectangle(balken.pos, balken.size));

            if (useManualValues)
            {
                kmh = manualValues.speed.ToString();
            }
            else
            {
                kmh = currentValues.speed.ToString();
            }

            // e.Graphics.FillRectangle(new SolidBrush(Color.Black), new Rectangle(speedPos.X -
52, speedPos.Y + 5, 90, 50));
            // e.Graphics.DrawString(kmh, new Font("Arial", 31, FontStyle.Bold), Brushes.Black,
speedPos.X+1, speedPos.Y-1, speedFormat);

            // blurred speedFont
            for (int x = -blurWidth; x < blurWidth; x++)
            {
                for (int y = -blurWidth; y < blurWidth; y++)
                {
                    e.Graphics.DrawString(kmh, speedFont, blurBrush, speedPos + new Size(x,y),
speedFormat);
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        e.Graphics.DrawString(kmh, speedFont, Brushes.White, speedPos, speedFormat);

        // blurred speedFont
        for (int x = -blurWidth; x < blurWidth; x++)
        {
            for (int y = -blurWidth; y < blurWidth; y++)
            {
                e.Graphics.DrawString("km/h", speedLabelFont, blurBrush, speedLblPos + new
Size(x, y));
            }
        }

        e.Graphics.DrawString("km/h", speedLabelFont, Brushes.White, speedLblPos);
    }

    private void InitializeComponent()
    {
        this.SuspendLayout();
        //
        // HeadupPanel
        //
        this.BackColor = Color.Black;
        this.ResumeLayout(false);
    }

    bool useManualValues = false;
    public bool UseManualValues
    {
        get { return useManualValues; }
        set { this.useManualValues = value; }
    }

    DataPacket currentValues;
    public DataPacket CurrentValues
    {
        get { return this.currentValues; }
        set { this.currentValues = value; }
    }

    DataPacket manualValues;
    public DataPacket ManualValues
    {
        get { return this.manualValues; }
        set { this.manualValues = value; }
    }

    HudImage pfeil, balken;
    public HudImage Pfeil
    {
        get { return this.pfeil; }
        set { this.pfeil = value; }
    }

    public HudImage Balken
    {
        get { return this.balken; }
        set { this.balken = value; }
    }

    public struct HudImage
    {
        public HudImage(Image bild, Point pos, Size size)
        {
            this.bild = bild;
            this.pos = pos;
            this.size = size;
        }

        public Image bild;
        public Point pos;
        public Size size;
    }





    Font speedFont = new Font("Arial", 30);           // Schriftart für Geschwindigkeit
    Font speedLabelFont = new Font("Arial", 12);      // Schriftart "km/h"
    StringFormat speedFormat = new StringFormat();

```

```
void initFonts()
{
    speedFormat.Alignment = StringAlignment.Far;
}
}
```



## A.2 Fragebogen zur abschließenden Validierung

 <p>INI.TUM INSTITUT FÜR INGENIEURWISSENSCHAFTEN DER TU MÜNCHEN</p>	FRAGEBOGEN KONTAKTANALOGES HUD	 <p>Audi</p>
<p>VP Nr. _____</p> <p>Interviewer: _____</p>		
<h3>Fragebogen zur Beurteilung des kontaktanalogen HUD</h3>		
		
	Dipl. -Ing. Marcus Schneid Boris Israel	1

### **Instruktion:**

*Sie führen nun eine Versuchsfahrt mit einem Head-Up Display durch. Ein Head-up Display bietet die Möglichkeit, mittels eines virtuellen Bildes vor dem Fahrzeug Information in das primäre Sichtfeld des Fahrers zu bringen.*

*Wir werden eine Versuchsstrecke von ca. 50 min fahren. Während der Fahrt werde ich Ihnen noch genauere Anweisungen zur Fahrweise geben.*

*Ich bitte Sie, während der Versuchsfahrt so zu fahren, wie Sie sich auch sonst im Straßenverkehr verhalten.*

*Selbstverständlich werden alle Ihre Angaben vertraulich behandelt!*

### **Einstellungen**

*Bitte stellen Sie ihren Sitz und die Spiegel auf die gewünschte Position ein. Beachten Sie, dass das Lenkrad nicht verstellbar ist.*

*Sie sehen vor sich einen Digitaltacho, dessen Helligkeit Sie einstellen können. Es gibt ebenfalls einen Nachtmodus, der auch am Tag bei bedecktem Himmel gefahren werden kann.*

*Das Head-up Display hat noch ein Doppelbild, das sich als leichte Unschärfe darstellt. In Serienfahrzeugen ist dieses nicht mehr vorhanden – ich bitte Sie, diesen Fehler nicht in Ihrer Bewertung des Anzeigekonzeptes mit einfließen zu lassen.*

*Sie werden als Eingewöhnungstrecke in Richtung Lenting/Autobahn fahren. Bitte beobachten Sie auf dieser Strecke das Anzeigekonzept und lassen dieses auf sich wirken.*

**Vielen Dank für Ihre Beteiligung  
an der Versuchsreihe!**





## Angaben zur Versuchsperson

Versuchsperson - Nr.:

Alter

Geschlecht

weiblich

männlich

Sehchwächen

Sehhilfe

HUD – Erfahrung

nein

ja

ja, im eigenen Fahrzeug

ACC – Erfahrung

nein

ja

ja, im eigenen Fahrzeug





## Eingewöhnungsstrecke

[Fahrt ohne Kurvenausgleich und ohne Navigation]

### Was für eine Anzeige haben Sie im HUD gesehen?

- Strich / Balken
- Balken, der sich nach oben/unten bewegte
- Balken, der auf der Straße lag/sich bewegte
- Balken, der den Sicherheitsabstand anzeigte
- Balken, der den Bremsweg anzeigte

### Haben Sie den Balken als auf der Straße liegend empfunden?

++ = lag auf der Straße - - = war irgendwo im Raum

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

### Hat es Sie gestört, dass in Kurven der Balken neben der Straße war?

++ = ja, sehr - - = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

### Haben Sie den die Geschwindigkeitsanzeige als stehend, liegend oder geneigt empfunden?

- stehend
- liegend
- geneigt

Mit HUD – Erfahrung: Welchen Unterschied haben Sie zu dem bisherigen HUD festgestellt?

---



---





### Autobahn / ACC – Test

*Der Balken, den Sie gesehen haben, stellt den Sicherheitsabstand dar. Er ist auf einen Sicherheitsabstand von 1s (genau wie das ACC) eingestellt.*

*Fahren Sie nun bitte auf die Autobahn Richtung München. Fahren Sie bitte auf der Autobahn ein Stück mit ACC in Folgefahrt und ein Stück mit etwas höherer Geschwindigkeit.*

*Der Balken wird nun auch quer auf der Straße bewegt, so dass er sich auch in Kurven auf der Straße befindet.*

#### [Kurvenausgleich einschalten]

#### [Bei eingeschaltetem ACC]

#### Haben Sie eine Änderung der Anzeige bemerkt?

- nein
- ja, der Balken hat seine Farbe geändert

#### wenn Farbe: Haben Sie die Farbänderung des Balkens mit einer Funktion des Fahrzeugs in Verbindung gebracht?

- nein
- ja, mit ACC
- ja, mit: \_\_\_\_\_

#### wenn ACC: Konnten Sie die Funktion des ACC durch den angezeigten Balken besser verstehen oder vorhersehen?

++ = ja, viel besser - - = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe





## Landstraße

### Finden Sie es besser, dass der Balken sich nun in der Kurve mitbewegt?

++ = ja, viel besser -- = nein, schlechter

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

### Finden Sie, dass die Querbewegung des Balkens gedämpfter oder schneller sein müsste?

++ = gedämpfter -- = schneller

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

### **[Der Balken wird nun in die Straßenmitte geschoben]**

#### Haben Sie eine Änderung in der Anzeige gemerkt?

- nein
- ja, der Balken hat sich nach links verschoben
- ja, \_\_\_\_\_

#### wenn „ja, Verschiebung“: Stört Sie diese Änderung in der Anzeige?

++ = ja, sehr -- = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

#### wenn ja: Warum stört Sie dies?

- es sieht schlecht aus (Qualität der Darstellung)
- eine solche Anzeige sollte sich mittig auf der Fahrbahn befinden, da sich auch dort das Anzuzeigende befindet (kontaktanalog)
- ich habe versucht, den Balken wieder mittig auf die Fahrbahn zu lenken, da ich denke, dass dies die Richtung meines Fahrzeuges ist (Führung über den Balken)
- \_\_\_\_\_

#### Der Proband ist subjektiv gesehen weiter rechts gefahren:

- nein
- ein wenig
- viel weiter rechts





**Wie empfinden Sie die Ungenauigkeit der Anzeige beim:**

**Bremsen:**

nicht störend	wenig störend	störend	sehr störend	sicherheitsbeeinträchtigend	keine Angabe
---------------	---------------	---------	--------------	-----------------------------	--------------

**Beschleunigen:**

nicht störend	wenig störend	störend	sehr störend	sicherheitsbeeinträchtigend	keine Angabe
---------------	---------------	---------	--------------	-----------------------------	--------------

**Senken:**

nicht störend	wenig störend	störend	sehr störend	sicherheitsbeeinträchtigend	keine Angabe
---------------	---------------	---------	--------------	-----------------------------	--------------

**Kuppen:**

nicht störend	wenig störend	störend	sehr störend	sicherheitsbeeinträchtigend	keine Angabe
---------------	---------------	---------	--------------	-----------------------------	--------------





**Stadt**

**Wie empfinden Sie die Anzeige des Sicherheitsabstandes in der Stadt?**

++ = sehr gut -- = störend

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

**Warum?**

- unnötig
- störend
- Sicherheitsabstand zu niedrig
- \_\_\_\_\_

**Lenkte Sie die Anzeige in der Stadt vom übrigen Verkehrsgeschehen ab?**

++ = ja, sehr -- = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

**Warum lenkte Sie die Anzeige ab?**

- ich konzentriere mich zu sehr auf den Balken (Tunnelblick oder Ähnliches?)
- ich muss immer hinschauen, weil sich die Anzeige bewegt/umspringt
- \_\_\_\_\_





### Allgemein

**Bitte zeichnen Sie den Bereich in die Bilder, in dem Sie die Anzeige wahrgenommen haben:**



### Lenkte Sie der Balken vom Verkehrsgeschehen ab?

++ = ja, sehr -- = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

### Warum?

- ich konzentriere mich zu sehr auf den Balken (Tunnelblick oder Ähnliches?)
- ich muss immer hinschauen, weil sich die Anzeige bewegt/umspringt
- die Anzeige war mit zu hell/blendete
- die Anzeige war zu künstlich/unrealistisch in der Umgebung
- \_\_\_\_\_

### Hatten Sie das Gefühl, dass der Balken Ihre Sicht verdeckte?

++ = ja, sehr -- = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe





**wenn ja: In welchen Situationen?**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Hatten Sie das Gefühl, dass die Navigationsanzeige Ihre Sicht verdeckte?**

++ = ja, sehr -- = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

**wenn ja: In welchen Situationen?**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Haben Sie den Balken als fahrzeugfest oder umweltfest empfunden?**

- fahrzeugfest
- umweltfest

**Hatten Sie das Gefühl, den Sicherheitsabstand leichter einhalten zu können als sonst?**

++ = ja, viel leichter -- = nein, schlechter

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

**Haben Sie sich durch die Anzeige des nötigen Sicherheitsabstandes sicherer gefühlt?**

++ = ja, sehr -- = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

**Wünschen Sie sich eine solche Anzeige im Fahrzeug?**

- nein
- ja





**Wie viel würden Sie für eine solche Anzeige ausgeben?**

\_\_\_\_\_ €

**wenn ja: Wie wünschen Sie sich diese Anzeige?** [Antworten vorgeben]

- als permanente Anzeige
- situationsabhängig, wenn ich drohe den Sicherheitsabstand zu unterschreiten
- wenn das ACC eingeschaltet ist
- manuell zuschaltbar
- \_\_\_\_\_

**Halten Sie diese Art der Darstellung des Sicherheitsabstandes (den Balken) für:**

- gut
- wünsche mir eine andere Darstellung:

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Wo würden Sie eine solche Anzeige benutzen?** [Antworten vorgeben]

- Stadt
- Landstraße
- Autobahn





**Treten beim Ablesen der Anzeige bei Ihnen Ermüdungserscheinungen auf?**

++ = ja, sehr -- = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

**Warum?** \_\_\_\_\_

**Was würden Sie ändern / verbessern:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_





**ACC**

**Da Sie nun mit eine Kombination aus ACC und Anzeige des Sicherheitsabstandes gefahren sind, wie beurteilen Sie die Kombination der Systeme?** [Antworten vorgeben]

- Der Balken ist unnötig, da das ACC schon den Abstand regelt
- Der Balken ist eine Alternative zum ACC, da ich mehr Kontrolle über das Fahrzeug habe
- Der Balken ist eine sinnvolle Ergänzung zum ACC, da
  - der Zustand des Systems verdeutlicht wird
  - der Anzeigeort besser ist
  - \_\_\_\_\_

**Finden Sie den Balken als Anzeigeort für die ACC – Funktionen „Objekt erkannt“ und „Übernahmeaufforderung“ besser als das Kombiinstrument?**

++ = ja, sehr -- = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

 keine Angabe

**Finden Sie den Balken als Anzeige für den ACC Regelabstand besser als das Kombiinstrument?**

++ = ja, sehr -- = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

 keine Angabe

**Navigation**

**Hatten Sie das Gefühl, dass der Navigationspfeil immer in die richtige Straße zeigte?**

++ = ja, sehr -- = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

 keine Angabe

**Empfanden Sie diese Art der Darstellung als Erleichterung der Navigationsanweisung?**

++ = ja, sehr -- = nein, überhaupt nicht

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

 keine Angabe




**Sollten die Navigationspfeile größer oder kleiner sein?**

++ = viel größer - - = viel kleiner

++	+	○	-	--
----	---	---	---	----

keine Angabe

**Finden Sie diese Art der Navigationsdarstellung im Vergleich zu den schon vorhandenen Navigationsanweisungen als:**

- unnötig
- Zusatz
- Alternative

**Was würden Sie an der Darstellung der Navigation verbessern?**

---

---

---

---

---

---

---



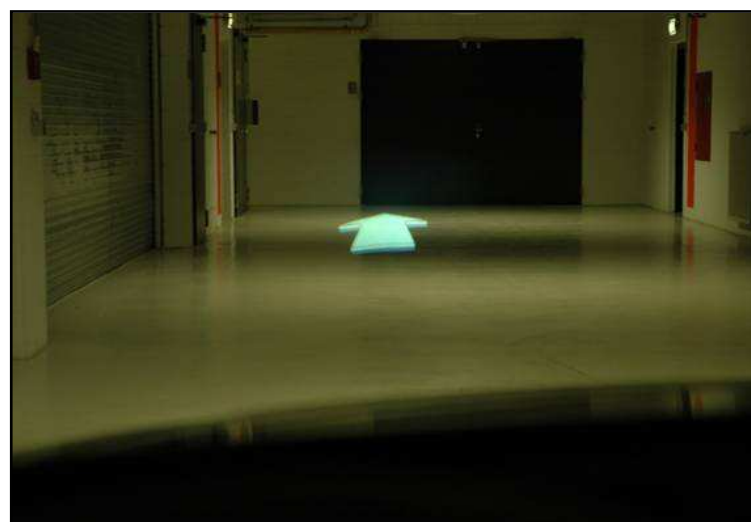
## A.3 Fotodokumentation



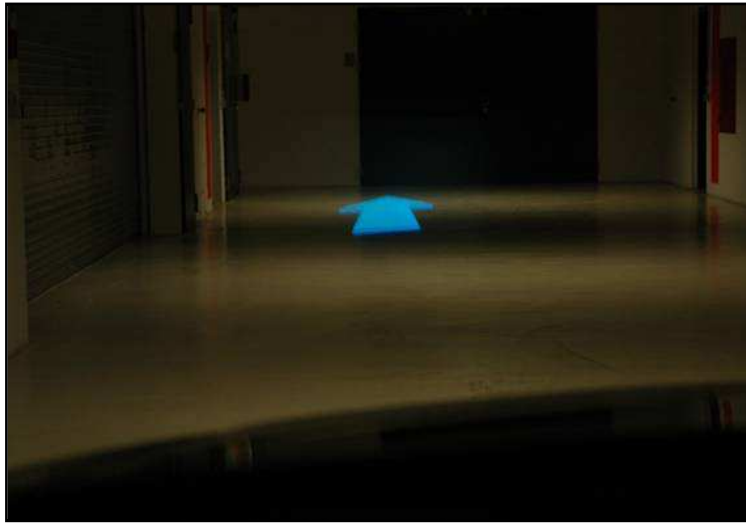
*Kontaktanaloges  
Head-up-Display im  
Versuchsträger*



*Versuche zur Realisierung  
verschiedener  
Anzeigidistanzen*



*Darstellung eines liegenden  
Navigationspfeils (hellblau)*



*Darstellung eines liegenden Navigationspfeils (dunkelblau)*



*Darstellung eines Distanzbalkens in realer Fahrsituation*



*Darstellung eines Distanzbalkens mit überlagelter Geschwindigkeitsinformation in realer Fahrsituation*