

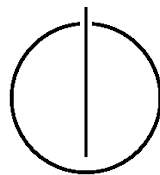
FAKULTÄT FÜR INFORMATIK

DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Doktorarbeit in Informatik

**Augmented Reality in der  
Fahrzeugnavigation**

Axel Jansen





TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Fakultät für Informatik

# Augmented Reality in der Fahrzeugnavigation

Axel Jansen

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Informatik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Matthias Althoff

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Gudrun J. Klinker, Ph.D.
2. Prof. Dr. Andreas Butz

Die Dissertation wurde am 04.04.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Informatik am 14.08.2018 angenommen.



Ich versichere, dass ich diese Doktorarbeit selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

München, den 12. März 2018

Axel Jansen



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Frau Professor Gudrun Klinker, die mir überhaupt erst die Möglichkeit gab, in ihrer Forschungsgruppe Augmented Reality am Lehrstuhl für Informatikanwendungen in der Medizin und Augmented Reality zu promovieren. Ich möchte mich bei ihr sowohl für die vielen wissenschaftlichen Diskussionen, als auch die gewährte Freiheit bei der Umsetzung meiner eigenen Ideen bedanken.

Ich bedanke mich bei Prof. Dr. Andreas Butz für die Beurteilung der Arbeit und bei Prof. Dr.-Ing. Matthias Althoff für den Vorsitz des Promotionsverfahrens.

Ebenso möchte ich mich bei meinen Kollegen der Forschungsgruppe Augmented Reality für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und den Einblick in die Arbeit am Lehrstuhl bedanken. Vor allem die fundierten Gespräche mit Dr. Christina Simon, Dr. Marcus Tönnis, Dr. Alexander Neumann und Dr. Markus Duschl über Augmented Reality und Head-up-Display haben ihre Spuren in dieser Arbeit hinterlassen.

Ein besonderer Dank gilt all meinen Kollegen bei der BMW Group, die mich während meiner Doktorandenzeit unterstützt haben. Vor allem Robert Hein, der stets ein offenes Ohr und einen guten Ratschlag für mich hatte. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Meinen Kollegen der Gruppe Navigation und Datendienste möchte ich für die spannenden und lehrreichen Jahre als Doktorand danken. Das fundierte Wissen im Bereich Anzeige- und Bedienkonzepte von Dr. Josef Schumann, Dr. Wolfgang Spiessl und Dr. Boris Israel hat in unseren Gesprächen und Diskussionen geholfen das vorgestellte Anzeigekonzept zu entwickeln. Dr. Mark Riebe, Dr. Armin Wagner-Gentner und Gunnar Franz haben ihr Fachwissen zum Head-up-Display durch viele aufschlussreiche Fachgespräche in die Arbeit einfließen lassen.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den Werkstattkollegen der BMW Forschung und Technik GmbH für ihre hervorragende Unterstützung beim Aufbau des Versuchsträgers bedanken.

Zu guter Letzt danke ich meiner Familie und meinen Freunden für das Verständnis meiner Abwesenheit an den Nachmittagen und Abenden, sowie Wochenenden während der Erstellung der Arbeit, aber auch für ihre nachhaltige Motivation die Arbeit tatsächlich zu beenden.





# Kurzfassung

**Motivation** Heutige Navigationssysteme präsentieren lediglich eine abstrakte Sicht auf Navigationsinformationen, entweder in Form einer Karte mit eingezeichnetem Weg und der aktuellen Position oder als Schritt-für-Schritt-Routenführung mit Navigationshinweisen für das nächste Fahrmanöver in Gestalt von Piktogrammen beziehungsweise in Textform. Der Fahrer muss anschließend diese abstrakt dargestellten Hinweise in konkrete Fahrmanöver auf der Straße umwandeln. Augmented Reality (AR) beschreibt verschiedene Methoden zur Ergänzung der realen Welt durch die Überlagerung mit computer-generierten Informationen und künstlichen Objekten. Durch den Einsatz von AR im Fahrzeug können dem Fahrer Handlungsanweisungen direkt auf der Straße angezeigt werden. Zukünftige Navigationssysteme im Fahrzeug sollten dem Fahrer mit Hilfe von AR ein neues Fahrerlebnis mit einem hohen Maß an Benutzerfreundlichkeit und Sicherheit bieten können.

**Ziel** Im Rahmen dieser Dissertation sollen die möglichen Einsatzorte von AR in der Fahrzeugnavigation identifiziert und bewertet werden. Basierend auf diesen Untersuchungen soll ein Anzeigekonzept für Navigationsanzeigen im kontakt-analogen Head-up-Display (HUD) erarbeitet werden. Dabei soll das kontaktanaloge HUD die Möglichkeiten, die durch AR entstehen, optimal ausnutzen. Dieses Anzeigekonzept soll prototypisch implementiert und dadurch erlebbar gemacht werden. Anschließend sollen mittels Untersuchungen, sowohl im Fahrsimulator als auch im Realfahrzeug, Antworten auf die zahlreichen Fragestellungen gefunden werden.

**Ansatz** Zu Beginn der Arbeit werden verschiedenen Ausprägungen von Augmented Reality identifiziert und anschließend ihre Verwendungsmöglichkeiten im Navigationsumfeld im Fahrzeug beurteilt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird ein neuartiges Anzeigekonzept für Navigationsinformationen abgeleitet. Die Hauptmerkmale dieses Konzeptes sind die kontaktanaloge Markierung des optimalen Fahrstreifens sowie die kontaktanaloge Darstellung der einzelnen Fahrmanöverhinweise. Anschließend wird ein skalierbares Framework für die schnelle prototypische Implementierung verschiedener Anzeigekonzepte auf unterschiedlichen Zielplattformen entwickelt und umgesetzt. Dadurch lassen sich verschiedene Darstellungsformen von kontaktanalogen Anzeigen sowohl im Versuchsfahrzeug als auch im Simulator erlebbar darstellen. Mit Hilfe von Versuchen im Fahrsimulator wird das Potential der kontaktanalogen Darstellung von Navigationshinweisen nachgewiesen sowie die Toleranz der Probanden gegenüber spezifischen Fehlern in der Darstellung analysiert. Zum Abschluss der Arbeit wird das erarbeitete und prototypisch umgesetzte Anzeigekonzept im Versuchsfahrzeug mittels Expertenstudie in realen Verkehrssituationen beurteilt.



# Abstract

**Motivation** Today's navigation systems present an abstract view at navigation information, either in the form of a map with a marked path and the current position or as step-by-step route guidance with navigation instructions for the next driving maneuver in the form of pictograms as well as in text form. The driver has to translate these abstractly presented indications into concrete driving maneuvers on the street. Augmented Reality (AR) describes various methods to complement the real world by overlaying with computer-generated information and artificial objects. Through the use of AR in the vehicle the instructions to the driver can be displayed directly on the road. Future in-vehicle navigation systems should be able to provide a new driving experience with a high degree of usability and safety through the use of AR.

**Goal** The scope of this thesis is to identify and evaluate possible ways to use AR within an in-vehicle navigation system. Afterwards a display concept for the presentation of navigation advices in an contact-analogue head-up display should be created based on these results. This display concept is to be implemented prototypically and thereby be experienced. Subsequently, with the help of investigations in a driving simulator and in a real test vehicle, answers to the numerous questions should be found.

**Approach** At the beginning of the work different forms of augmented reality are identified. Afterwards their usage within an in-vehicle navigation system should be assessed. Based on this findings a new type of display concept for navigation advices is derived. The main features of this concept are the contact-analogue marking of the optimal lane and the contact analogue presentation of guiding advices. Subsequently, a scalable framework for fast prototypical implementation of different display concepts on different target platforms is developed and implemented. This allows to experience different contact-analogue displays in a driving simulator and in a real test vehicle. The potential of the contact-analogue presentation of guiding advices is demonstrated and evaluated in an experiment in a driving simulator. In another experiment the tolerance of the subjects against specific errors in the presentation is analyzed. At the end of this thesis the developed and prototypically implemented display concept is evaluated by an experiment within a test vehicle in real traffic situations.



# Inhaltsverzeichnis

<b>I. Einleitung und Grundlagen</b>	<b>1</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1. Einleitung . . . . .	3
1.2. Motivation und Zielsetzung . . . . .	6
1.3. Aufbau der Arbeit . . . . .	8
1.4. Veröffentlichungen im Vorfeld . . . . .	10
<b>2. Stand der Technik</b>	<b>11</b>
2.1. Augmented Reality . . . . .	11
2.1.1. Definition und Abgrenzung . . . . .	12
2.1.2. Allgemeiner Aufbau und Funktionsweise von AR Systemen . . . . .	13
2.1.3. Allgemeine AR-Anwendungen . . . . .	18
2.1.4. AR-Systeme im automobilen Umfeld für Navigationstätigkeiten . . . . .	19
2.2. Navigation . . . . .	28
2.2.1. Digitale Karte . . . . .	29
2.2.2. Positionsbestimmung . . . . .	34
2.2.3. Koordinatensysteme . . . . .	41
2.2.4. Routenberechnung . . . . .	44
2.2.5. Wegführung . . . . .	46
2.2.6. Übersicht der Elemente in klassischen Wegführungskonzepten . . . . .	48
2.3. Head-up-Display . . . . .	52
2.3.1. Technologieüberblick . . . . .	53
2.3.2. Vom klassischen zum kontaktanalogen HUD . . . . .	59
2.3.3. Realisierungsformen von kontaktanalogen HUDs . . . . .	62
<b>3. Metaanzeigekonzept</b>	<b>67</b>
3.1. Anzeigorte im Fahrzeug . . . . .	67
3.2. Unterteilung nach Perspektive und Wissensbereich . . . . .	69
3.3. Verteilung der Information über die Anzeigorte . . . . .	71
<b>4. Softwareframework</b>	<b>75</b>
4.1. Plattform- und Komponentenüberblick . . . . .	75
4.1.1. Allgemeiner Aufbau der Plattform CORONA . . . . .	75
4.1.2. Guiding-Konfiguration von CORONA . . . . .	79
4.2. Komponenten- und Schnittstellenbeschreibung . . . . .	80
4.2.1. Guiding-Modul . . . . .	81
4.2.2. Guidance-Renderer-Umgebung . . . . .	85

<b>II. Neue erlebbare Navigationsfunktionen</b>	<b>89</b>
<b>5. Situationsvorausschau mittels fotobasiertem AR-System</b>	<b>91</b>
5.1. Konzept und prototypische Umsetzung . . . . .	91
5.2. Bewertung . . . . .	94
<b>6. Navigationsanweisungen mit integrierten Orientierungspunkten</b>	<b>99</b>
6.1. Grundlagen Orientierungspunkte . . . . .	99
6.2. Konzept und prototypische Umsetzung . . . . .	102
6.3. Bewertung . . . . .	105
<b>7. Kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen</b>	<b>109</b>
7.1. Anzeigekonzept . . . . .	109
7.1.1. Augmented Reality-Einsatzmöglichkeiten in der Wegführung . . . . .	110
7.1.2. Anzeigekonzept für kontaktanaloge Navigationsdarstellung . . . . .	113
7.2. Prototypische Umsetzung der kontaktanalogen Navigationsanzeigen . . . . .	117
7.2.1. Anforderung an Bildgröße und -lage . . . . .	117
7.2.2. Auswirkung reduzierter Anzeigefläche und Blickwinkel . . . . .	119
7.2.3. Prototypaufbau für Versuche in der Fahrsimulation . . . . .	123
7.2.4. Aufbau des Versuchsträgers für Versuche auf der Straße . . . . .	125
7.2.5. Interaktive Generierung der AR-Navigationsanzeigen . . . . .	129
7.3. Versuch im Fahrsimulator: Potentialanalyse . . . . .	131
7.3.1. Versuchsbeschreibung und -aufbau . . . . .	131
7.3.2. Auswertung . . . . .	133
7.4. Versuch im Fahrsimulator: Fehlertoleranz . . . . .	138
7.4.1. Versuchsbeschreibung und -aufbau . . . . .	138
7.4.2. Auswertung . . . . .	141
7.5. Nutzerstudie im Versuchsträger: Nickwinkelausgleich . . . . .	145
7.5.1. Versuchsbeschreibung und -aufbau . . . . .	145
7.5.2. Auswertung . . . . .	149
7.6. Expertenstudie im Versuchsfahrzeug: Konzeptbewertung . . . . .	151
7.6.1. Versuchsbeschreibung und -aufbau . . . . .	151
7.6.2. Auswertung . . . . .	154
7.7. Zusammenfassende Konzeptbewertung und Machbarkeitsaussage . . . . .	157
7.8. Anzeigekonzept 2.0 . . . . .	158
7.8.1. Schwächen der ursprünglichen Implementierung . . . . .	159
7.8.2. Überarbeitung des Anzeigekonzepts . . . . .	159
<b>III. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>163</b>
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>165</b>
8.1. Zusammenfassung . . . . .	165
8.2. Ausblick . . . . .	173
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>177</b>

# Aufbau der Arbeit

## Teil I: Einleitung und Grundlagen

### KAPITEL 1: EINLEITUNG

Die Arbeit beginnt mit einer Einleitung in die Themen Augmented Reality und Navigation im Fahrzeug. Dadurch wird die Arbeit motiviert. Zusätzlich präsentiert dieses Kapitel einen Überblick über den Aufbau der Arbeit.

### KAPITEL 2: STAND DER TECHNIK

Im zweiten Kapitel werden der aktuelle Stand der Technik sowie die notwendigen Grundlagen für diese Arbeit vorgestellt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf den Themen Augmented Reality, Navigation sowie Head-up Display Technologie.

### KAPITEL 3: METAANZEIGEKONZEPT

Der Inhalt des dritten Kapitels ist ein Metaanzeigekonzept. In diesem werden alle im Folgenden vorgestellten Anzeigekonzepte eingeordnet. Dabei beschreibt dieses Metaanzeigekonzept die Verteilung von Navigationshinweisen auf die verschiedenen verfügbaren Anzeigeflächen in aktuellen Fahrzeugen.

### KAPITEL 4: SOFTWAREFRAMEWORK

Ziel der Arbeit war es, die verschiedenen Konzepte auch prototypisch zu realisieren, um sie so bewerten zu können. Daher wurden alle Konzepte mit Hilfe desselben Softwareframeworks prototypisch umgesetzt. Dieses Softwareframework wird in diesem Kapitel vorgestellt. Zusätzlich erfolgt eine Abgrenzung zwischen Komponenten, die bereits vorhanden waren und denen, die im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet wurden.

## **Teil II: Neue erlebbare Navigationsfunktionen**

### KAPITEL 5: FOTOBASIERTE SITUATIONSVORAUSSCHAU

Das erste vorgestellte Navigationskonzept ist die fotobasierte Situationsvorausschau. Dabei werden dem Fahrer vor Erreichen der jeweiligen Manöversituation Straßenfotos von dieser Situation, mit entsprechenden grafischen Navigationshinweisen überlagert, angezeigt. Dieses Konzept wurde erarbeitet, prototypisch umgesetzt und anschließend in einer Expertenstudie evaluiert.

### KAPITEL 6: INTEGRATION VON ORIENTIERUNGSPUNKTEN

Die Zuordnung von Ortsangaben auf Basis von Entfernungsangaben zu konkreten Straßensituationen ist für den Menschen im Allgemeinen sehr aufwendig. Daher wurde ein Konzept erarbeitet, welches Navigationshinweise mit zusätzlichen visuellen Orientierungspunkten anreichert. In diesem Kapitel werden das zugrundeliegende Konzept, die prototypische Umsetzung sowie die Evaluierung des Prototypen beschrieben.

### KAPITEL 7: KONTAKTANALOGES NAVIGATIONSANZEIGEN

Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der kontaktanalogen Darstellung von Navigationshinweisen. Dabei entsteht beim Betrachter der Eindruck, als würden die grafischen Hinweise direkt mit der Umgebung verschmelzen. Dadurch können Fahrhinweise virtuell direkt auf die Straße projiziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Anzeigekonzept für die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen entwickelt. Dieses Konzept wird in diesem Kapitel vorgestellt. Für die Evaluierung des Konzeptes wurde dieses prototypisch sowohl in der Fahrsimulation als auch in einem Versuchsträger umgesetzt. Mit Hilfe verschiedener Versuche wurden anschließend das erarbeitete Konzept sowie die technische Machbarkeit bewertet. Aus diesen Ergebnissen wurde im Anschluss ein überarbeitetes Anzeigekonzept abgeleitet, welches die technischen Rahmenbedingungen der Umsetzung im Realfahrzeug besser beachtet.

## **Teil III: Zusammenfassung und Ausblick**

### KAPITEL 8: ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

Dieses Kapitel fasst die bisherigen Erkenntnisse zusammen. Zusätzlich werden die Ergebnisse nochmals kritisch analysiert. Zum Abschluss wird noch ein Ausblick auf mögliche Folgearbeiten gegeben.



**Teil I.**

# **Einleitung und Grundlagen**



# 1. Einleitung

## 1.1. Einleitung

In den letzten Jahren haben immer mehr Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssysteme (FIS und FAS) ihren Weg in aktuelle Serienfahrzeuge gefunden. Neben der Differenzierungsmöglichkeit für Fahrzeughersteller im Premiumbereich (wie beispielsweise AUDI, Daimler oder BMW) tragen diese Systeme erheblich zur Verbesserung der Verkehrssicherheit aktueller Fahrzeuge bei. Eingreifende Fahrerassistenzsysteme, wie beispielsweise die "Aktive Geschwindigkeitsregelung mit Stop&Go-Funktion", können den Fahrer in kritischen Situationen unterstützen, indem sie aktiv in das Fahrgeschehen eingreifen und so helfen Unfälle aktiv zu vermeiden oder zumindest die Unfallfolgen zu reduzieren [97]. Fahrerinformationssysteme hingegen unterstützen den Fahrer bei seinen Fahraufgaben, indem sie beispielsweise auf die jeweils gültige Geschwindigkeitsbegrenzung hinweisen oder vor möglichen Gefahren entlang der geplanten Route warnen.

Sogenannte Navigationsgeräte gehören ebenfalls zu den Fahrerinformationssystemen. Eine der wichtigsten Funktionen von Navigationsgeräten ist die Zielführung. Mit Hilfe entsprechender Hinweise und Manöverbeschreibungen leitet die Zielführung den Fahrer entlang einer zuvor gewählten Route an sein jeweiliges Ziel. Vor allem in für den Fahrer unbekanntem Umgebungen kann die Zielführung die Fahrt für den Fahrer deutlich angenehmer und entspannter gestalten.

In den letzten Jahren hat sowohl die Akzeptanz, Nutzung und Verbreitung solcher System stetig zugenommen. Nach einer Studie der BITKOM nutzen 73 % der Befragten im Automobil ein Navigationssystem [12]. Am häufigsten werden dabei mobile, nachrüstbare Navigationsgeräte von Herstellern wie beispielsweise Garmin oder TomTom verwendet (siehe Abbildung 1.1).

Auch wenn nur 29 % der Befragten auf eine fest integrierte Navigationslösung zurückgreifen, werden diese Lösungen auch zukünftig ihre Daseinsberechtigung behalten. Denn nur diese vollständig ins Fahrzeug integrierten Navigationssysteme können dem Fahrer ein hochwertiges und ganzheitliches Navigationserlebnis bieten. Neben der Möglichkeit von neuartigen Zielführungs- und Anzeigeformaten mit Hilfe der verschiedenen Anzeigeflächen im Fahrzeug können diese Systeme durch Verwendung der im Fahrzeug bereits verbauten Sensorik die Fahrzeugposition besser bestimmen und somit ein deutlich wertvolleres Kundenerlebnis schaffen.

Premiumfahrzeuge zeichnen sich dadurch aus, dass Kunden bereit sind, für diese Fahrzeuge mehr Geld zu bezahlen als für vergleichbare Fahrzeuge anderer Hersteller. Diese Bereitschaft erzielen Premiummarken unter anderem durch ihre Innovationen, welche durch entsprechende Vermarktung die Innovationsfähigkeit dieser Marke etablieren und somit der Marke ein Premium-Image verleihen [110]. Für Premiumfahrzeughersteller liefern die fest verbauten Navigationsgeräte mit ihrem entsprechenden Deckungsbeitrag einen wesentlichen Beitrag zum wirtschaftlichen Erfolg des Unternehmens. Daher sind die Her-

### „Was nutzen Sie zur Navigation beim Autofahren, um an Ihr Ziel zu kommen?“

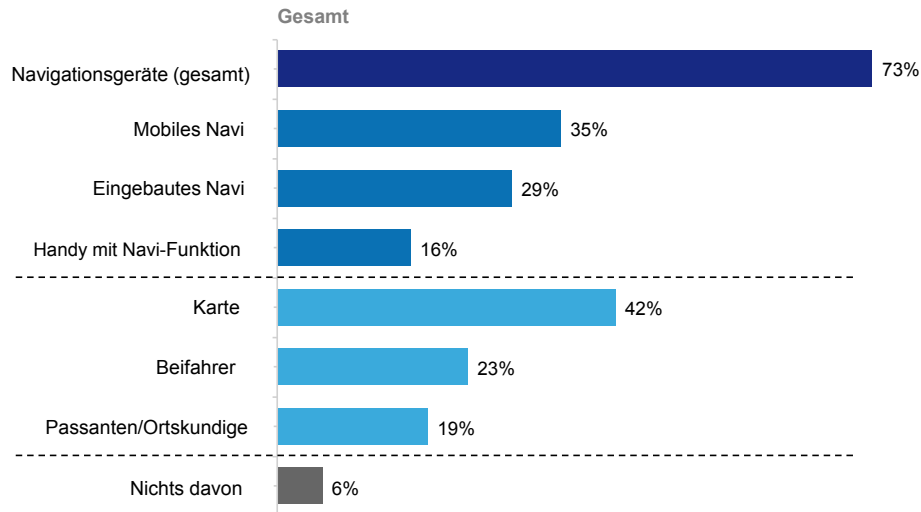


Abbildung 1.1.: Navigationsnutzung beim Autofahren[12]

steller stets bemüht, die Zahl der fest verbauten Navigationslösungen mindestens stabil zu halten und idealerweise zu steigern.

Auf der Suche nach neuen Technologien und zukünftigen Innovationen stößt man unweigerlich auf den "Hype Cycle for Emerging Technologies", welcher jedes Jahr von der Gartner Group veröffentlicht wird [43]. Durch die Darstellung des Hype Cycles in Form eines Graphen gibt dieser einen guten Überblick über aktuelle Technologien und deren öffentliche Wahrnehmung [72]. In Abbildung 1.2 ist der typische Verlauf des Hype Cycles dargestellt. Auf der Y-Achse des Graphen wird der Grad der Erwartung an eine entsprechende Technologie, ausgedrückt durch deren wahrgenommenen Aufmerksamkeit, aufgetragen. Die X-Achse stellt den zeitlichen Verlauf seit Bekanntwerden der jeweiligen Technologie dar und gibt somit Rückschlüsse auf das Alter der jeweiligen Technologie und die entsprechenden produktiven Einsatzmöglichkeiten. Nach Definition der Gartner Group durchläuft jede Technologie während ihrer Entstehung fünf Phasen. Daher ist der Graph ebenfalls in fünf verschiedene Abschnitte eingeteilt und jeder Abschnitt wird einer entsprechenden Phase zugeordnet. Die entsprechende dargestellte Position der einzelnen Technologien gibt deren aktuelle Phase an.

Der 'Technologische Auslöser' stellt die erste Phase dar. In dieser Phase erzeugt ein Projektbeginn oder ein entscheidender Durchbruch eine starke Aufmerksamkeit beim Fachpublikum. In der zweiten Phase, dem 'Gipfel der überzogenen Erwartungen', werden durch zahlreiche Veröffentlichungen oft unrealistische Erwartungen an diese neue Technologie erzeugt. Darüber hinaus existieren bereits die ersten Anwendungen mit dieser Technologie, welche aber bei weitem nicht das gesamte Potential ausschöpfen. Die meisten Anwendungsprojekte kämpfen in dieser Phase mit den Herausforderungen, welche

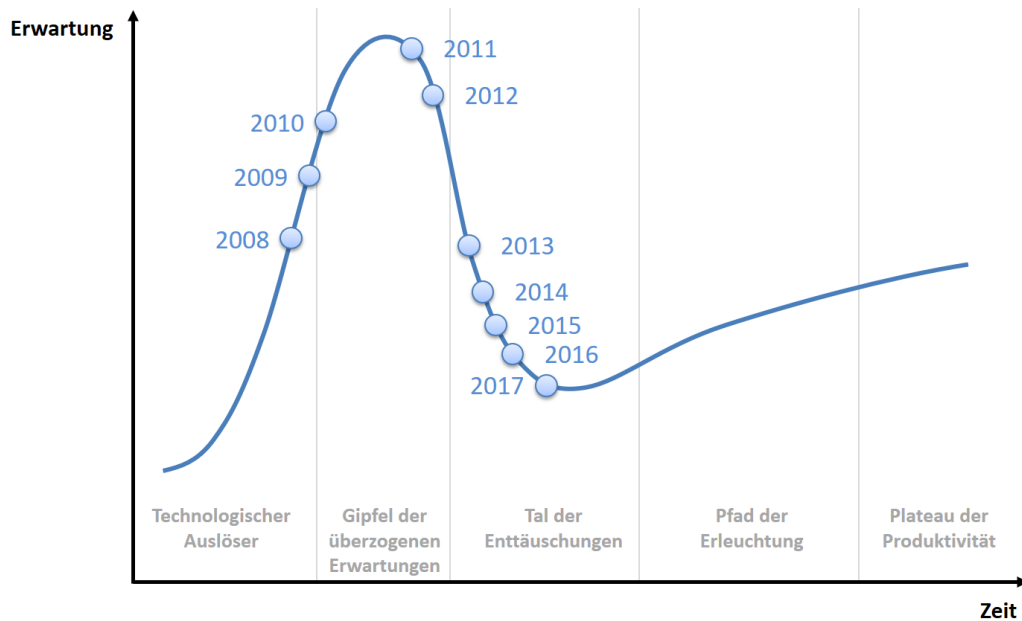


Abbildung 1.2.: AR im Hype Cycle for Emerging Technologies 2008 bis 2017 [43]

die neue Technologie begleiten. Als dritte Phase folgt das 'Tal der Enttäuschungen', in der die Berichterstattung über die jeweilige Technologie nachlässt, da die Technologien im Allgemeinen die hohen Erwartungen aus der zweiten Phase nicht vollständig erfüllen können. Nachdem die Berichterstattung über die jeweilige Technologie abgenommen hat, kann ohne öffentliches Interesse das Verständnis in dieser Technologie vertieft werden und die Technologie dadurch in die vierte Phase, den 'Pfad der Erleuchtung', fortschreiten. Neben der realistischeren Einschätzung der möglichen praktischen Anwendungen sind vor allem auch die technischen Grenzen dieser Technologien besser einzuordnen. Als letzte Phase folgt das 'Plateau der Produktivität'. In dieser Phase haben die Vorteile der Technologie die entsprechende Anerkennung gefunden, und die Technologie wird im produktiven Umfeld eingesetzt und stetig weiterentwickelt [72].

In Abbildung 1.2 sind neben dem allgemeinen Verlauf des Graphen auch die verschiedenen Einordnungen der AR-Technologie aus den Jahren 2009 bis 2017 dargestellt. Zu Beginn dieser Arbeit 2009 befand sich AR direkt am Übergang vom 'Technologischen Auslöser' zum 'Gipfel der überzogenen Erwartungen'. In vielen Forschungseinrichtungen wird zu diesem Zeitpunkt an der Technologie und vor allem den verschiedenen Einsatzmöglichkeiten gearbeitet. Mit Hilfe diverser AR-Anwendungen auf den mobilen Plattformen erlangt AR die erste große öffentliche Aufmerksamkeit. Es ist der ideale Zeitpunkt, um die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten in anderen Bereichen, wie dem automobil Umfeld, zu untersuchen und so das Potential für neue Innovationen zu bewerten.

Während der Erstellung dieser Arbeit ist die AR Technologie im Hype Cycle stetig weiter in Richtung 'Tal der Enttäuschungen' gewandert. Die ersten Prototypen konnten die überzogenen Erwartungen nicht erfüllen. Somit hat das allgemeine Interesse an dieser Technologie abgenommen. Dennoch muss an der Technologie weiter gearbeitet werden,

um in der Zukunft für verschiedene Anwendungsmöglichkeiten der AR-Technologie das 'Plateau der Produktivität' zu erreichen. Im Rahmen dieser Arbeit wird dazu das Potential der Augmented Reality Technologie im Bereich der Fahrzeugnavigation bewertet. So werden Möglichkeiten für neue Innovationen in diesem Bereich geschaffen, welche den Premium-Charakter der Marke BMW auch zukünftig unterstreichen können.

### 1.2. Motivation und Zielsetzung

Heutige Navigationssysteme präsentieren lediglich eine abstrakte Sicht auf Navigationsinformationen, entweder in Form einer Karte mit eingezeichnetem Weg und der aktuellen Position oder als Schritt-für-Schritt-Routenführung dann mit Navigationsanweisungen für das nächste Fahrmanöver als Piktogramme oder in Textform. Dadurch ist der Fahrer stets gezwungen, diese abstrakt dargestellten Handlungsinformationen in konkrete Fahrmanöver auf der Straße umzuwandeln.



Abbildung 1.3.: Kontaktanaloge Navigationsdarstellung: Die Navigationshinweise verschmelzen mit der Straße

Augmented Reality (AR) beschreibt verschiedene Methoden zur Ergänzung der realen Welt durch die Überlagerung mit computergenerierten Informationen und künstlichen Objekten. Der Einsatz von AR im Fahrzeug sollte die Möglichkeit bieten, dem Fahrer Informationen unmittelbar und mit direktem Bezug zur Straße zu präsentieren. In Verbindung mit einem Navigationssystem sind so völlig neue Anzeigekonzepte für die Darstellung von Navigationshinweisen denkbar. Es müsste möglich sein, beim Fahrer den Eindruck zu erwecken, der Navigationshinweis befinde sich direkt auf der Straße vor dem Fahrzeug, wie in Abbildung 1.3 dargestellt. Durch Auswertung der verfügbaren Sensoren in aktuellen Fahrzeugen und geschickte Kombination mit den Informationen der digitale Navigationskarte sollte AR in Lage sein, dem Fahrer ein völlig neues Fahrerlebnis mit einem hohen Maß an Benutzerfreundlichkeit und Sicherheit zu bieten.

Jedoch sind bis zur Fertigstellung dieses neuartigen Fahrerlebnisses noch zahlreiche Fragen zu beantworten:

- **Systemanforderungen:** Welche Anforderungen müssen vom AR-System im Fahrzeug erfüllt werden, damit für den Benutzer eine wertige und nützliche Anzeige entsteht? Von aktuellen AR-Anwendungen sowohl in anderen Bereichen als auch im automobilen Umfeld lassen sich bereits technische Anforderungsprofile an AR-Anwendung ableiten. So müssen diese Systeme in der Lage sein, ihre eigene Position und Orientierung im Raum exakt und schnell zu identifizieren. Mit Hilfe dieser Information wird zunächst die Anzeige für den Benutzer erzeugt und anschließend präsentiert. Darüber hinaus kann jede Ausprägung der verschiedenen Anzeigekonzepte einzelne, spezifische Anforderungen mit sich bringen. Doch wie sehen diese Anforderungen für die jeweilige Ausprägung im Detail aus? Wie ist das Zusammenspiel zwischen den technischen Möglichkeiten und dem vom Benutzer wahrgenommenen Erlebnis?
- **Informationsquelle:** Welche Informationsquellen werden für eine korrekte Darstellung benötigt? Für die Erzeugung der Navigationsanzeigen existieren mehrere verschiedene Informationsquellen im automobilen Umfeld. Eine entscheidende Rolle spielt hierbei die digitale Karte. Allerdings ist noch nicht bekannt, wie genau die Informationen in der Karte hinterlegt sein müssen, damit die daraus resultierenden Anzeigen für den Benutzer nützlich und wertig sind. Neben der digitalen Karte verfügt das Fahrzeug über weitere Informationsquellen, die vor allem für die Bestimmung der Position des Fahrzeuges und des Fahrzeugumfeldes benutzt werden können. Hierzu zählen neben dem GPS-System und der Fahrzeugodometrie vor allem weitere Sensoren wie Kamera-, Radar- und Ultraschallsysteme. Hier ist die Frage: Wie exakt müssen die Fahrzeugposition und die Fahrzeugeigenbewegung bestimmt werden können? Und somit stellt sich die Frage wie genau diese Sensoren sein müssen.
- **Anzeigekonzept:** Wie sieht ein gutes Anzeigekonzept für diese neue Art der Darstellung von Navigationshinweisen aus? Da die AR-Technologie noch neu ist und nur begrenzt Erfahrungen mit dem entsprechenden Einsatz im automobilen Umfeld existieren, muss ebenfalls am Anzeigekonzept gearbeitet werden. Hier lauten die Fragen: Welche Elemente der klassischen Navigationsanzeigen lassen sich durch die Verwendung von AR verbessern? Welche neuen Anzeigeelemente sind mit Hilfe von AR realisierbar? Wie sollte ein umfassendes Anzeigekonzept für eine auf AR basierte Darstellung von Navigationshinweisen aussehen? Welche Wechselwirkungen gibt es zwischen den Eigenschaften des Gesamtsystems und der Qualität der verwendeten Informationsquellen mit dem realisierbaren Anzeigekonzept?

Auf einen Teil dieser Fragen sollen im Rahmen dieser Arbeit entsprechende Antworten gefunden werden. Dazu soll untersucht werden, inwieweit sich die Wegführung im Fahrzeug durch den Einsatz von Augmented Reality Methoden verbessern lässt? Dazu werden die verschiedenen Formen der Augmented Reality analysiert. Anschließend wird ihre Verwendbarkeit für die Wegführung bewertet. Auf Basis dieser Analyse können dann verschiedene Ausprägungen von Anzeigekonzepten erarbeitet werden. Mit Hilfe einer prototypischen Realisierung der Konzepte sowohl im Fahrzeug als auch im Fahrsimulator können diese dann erlebt und so auch bewertet werden.

### 1.3. Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an den einzelnen Arbeitspaketen, die im Rahmen der Doktorandentätigkeit bearbeitet wurden, und ist in Abbildung 1.4 skizziert. Das erste Kapitel die Einleitung stellt das Fundament der Arbeit da. In diesem Kapitel werden die Aufgabenstellung sowie die Motivation dieser Arbeit beschrieben.



Abbildung 1.4.: Aufbau der Arbeit: Grafische Darstellung der Gliederung der Arbeit

Im zweiten Kapitel werden der aktuelle Stand der Technik und die Grundlagen dieser Arbeit vorgestellt. Dabei werden vor allem die Themenbereiche, die maßgeblich bei der Namensgebung dieser Arbeit beteiligt sind: Augmented Reality und Navigation detailliert erklärt. Da im späteren Verlauf verschiedene Ausprägungen von Head-Up Displays verwendet werden, gibt dieses Kapitel zusätzlich eine grundlegende Einführung in Head-Up Displays.

Nachdem der Stand der Technik, der dieser Arbeit zu Grund liegt, näher beschrieben wurde, wird im dritten Kapitel das übergreifende Anzeigekonzept vorgestellt. Dieses Metaanzeigekonzept beschreibt die Art und Weise, wie Navigationsinformationen auf verschiedene Anzeigeorte im Fahrzeug verteilt werden können.

Alle Implementierungen, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind, basieren auf einem Softwareframework. Dieses Softwareframework ist eine Eigenentwicklung der BMW Forschung und Technik GmbH und dient der schnellen prototypischen Umsetzung von Navigationsfunktionen. Im vierten Kapitel wird dieses Softwareframework vorgestellt.



Darüber hinaus werden die Architektur neu entstandener Komponenten sowie das Zusammenspiel der bereits existierenden mit den neu erschaffenen Komponenten beschrieben.

In den Kapiteln fünf bis sieben werden anschließend drei verschiedene Navigationsfunktionen, die von Augmented Reality Gebrauch machen, vorgestellt. Dabei werden jeweils das Konzept hinter diesen Funktionen, die prototypische Implementierung sowie die Bewertung mittels verschiedener Verfahren vorgestellt.

Die erste Integration von Augmented Reality-Technologien in eine Navigationsfunktion stellt das in Kapitel fünf beschriebene System dar. Dieses System ist im Rahmen einer Diplomarbeit entstanden und dient der Situationsvorausschau. Das System präsentiert dem Fahrer während der Annäherung an eine Manöversituation ein entsprechendes Straßenfoto dieser Situation, welches mit den jeweiligen Navigationshinweisen angereichert ist.

Das Ergebnis einer weiteren Diplomarbeit wird in Kapitel sechs beschrieben. Dabei handelt es sich um die Integration von Orientierungspunkten in Navigationshinweise. Die Verwendung von Orientierungspunkten kann die präsentierten Navigationshinweise für den Fahrer verständlicher machen, da dadurch Entfernungsangaben in Metern entfallen können.

Der Schwerpunkt der Arbeit, die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen, ist Inhalt des siebten Kapitels. Mittels der Kontaktanalogie soll beim Fahrer der Eindruck entstehen, die Navigationsdarstellungen würden mit der Umgebung verschmelzen - wie in Abbildung 1.3 überzeichnet dargestellt. In diesem Kapitel wird zunächst das entstandene Anzeigekonzept vorgestellt. Anschließend werden die beiden prototypischen Realisierungen, einmal im Fahrzeug und einmal im Fahrsimulator, beschrieben. Mit Hilfe dieser Prototypen wurden verschiedene Fragestellungen untersucht. Im Fahrsimulator wurde das Potential der kontaktanalogen Darstellung von Navigationshinweisen gegenüber der klassischen Darstellung analysiert. Die Fehleranfälligkeit der kontaktanalogen Darstellung, die in diesem Versuch kritisiert wurde, ist Bestandteil des zweiten Versuches im Fahrsimulator. Mit der prototypischen Realisierung im Versuchsträger konnte das Konzept in realen Verkehrssituationen im Straßenumfeld bewertet werden. Nach der Darstellung dieser Versuche endet das siebte Kapitel mit einer kurzen Zusammenfassung.

Den Abschluss der Arbeit bildet das achte Kapitel. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der gesamten Arbeit zusammengefasst und an der Aufgabenstellung reflektiert. Die gewonnenen Erkenntnisse der Arbeit bilden die Grundlage für das abschließende Fazit und den Ausblick.

## 1.4. Veröffentlichungen im Vorfeld

Während der Entstehung dieser Arbeit und der damit verknüpften Analyse der verschiedenen Themen wurden zahlreiche Erkenntnisse gewonnen. Ein Teil dieser Ergebnisse wurde bereits in Zeitschriften und auf Konferenzen präsentiert oder für entsprechende Patentanmeldungen der BMW AG offengelegt. Nachfolgend sind alle Vorveröffentlichungen aufgezählt, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind:

- Verfahren zur Positionsermittlung für ein Kraftfahrzeug [59]
- Verfahren zur Ausgabe von grafischen Fahrhinweisen [60]
- Verknüpfung von Navigations- und Sicherheitshinweisen in einem Fahrzeug [63]
- Darstellung einer Straßenumgebung für Fahrmanöver eines Fahrzeugs [62]
- Besser als die Wirklichkeit: Reale und virtuelle Welt verschmelzen zu einer neuartigen Fahrerlebniswelt [65]
- Augmented Reality Navigation in zukünftigen Head-Up Displays: Prototypenaufbau und erste Bewertung mittels Probandenstudie [64]
- Augmented Reality Navigation in zukünftigen Head-Up Displays: Prototypische kontaktanaloge Navigationsdarstellung im Versuchsfahrzeug [61]

## 2. Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen sowie der aktuelle Stand der Technik in den für diese Arbeit prägenden wissenschaftlichen Bereichen vorgestellt. Neben den aus dem Titel der Arbeit ableitbaren Bereichen "Augmented Reality" und "Navigation" wird noch die "Head-Up Display" Technologie näher vorgestellt, da sie für die Realisierung des Prototypen eine zentrale Rolle einnimmt.

Das Kapitel beginnt mit dem Bereich Augmented Reality. Es wird zunächst der Begriff definiert und von ähnlichen Bereichen abgegrenzt. Anschließend werden die notwendigen Komponenten eines allgemeinen Augmented Reality Systems vorgestellt und die Unterschiede zu einer Realisierung im Fahrzeugumfeld aufgezeigt. Anschließend werden einige Augmented Reality-Anwendungen im Bereich Navigation vorgestellt.

Da der Bereich Navigation ebenfalls sehr umfangreich ist, wird der Schwerpunkt auf die Funktion Wegführung gelegt. Es werden daher die für die Wegführung benötigten Komponenten Digitale Karte, Positionierung und Routenberechnung vorgestellt. Darüber hinaus gibt das Kapitel einen Überblick über verschiedene Koordinatensysteme und deren Verwendung sowie eine Übersicht über die verwendeten Anzeigeelemente in klassischen Wegführungskonzepten.

Zum Abschluss des Kapitels wird die Head-up Display Technologie als Realisierungsmöglichkeit für Augmented Reality-Anwendungen im Fahrzeug vorgestellt. Es werden zunächst die optischen Grundlagen sowie die Technologie im Allgemeinen vorgestellt. Anschließend wird eine neue Form der Darstellung, die Kontaktanalogie erläutert. Anschließend werden mögliche technische Realisierungen diskutiert.

### 2.1. Augmented Reality

Augmented Reality, oder auch kurz AR, stellt eine neue Form der Mensch-Maschine-Interaktion dar. Dabei werden die Sinneseindrücke der realen Welt mit künstlich generierten Eindrücken angereichert. Diese künstliche Erweiterung der Realitätswahrnehmung kann alle menschlichen Sinnesmodalitäten ansprechen. Allerdings wird AR überwiegend mit der visuellen Darstellung von zusätzlichen, computergenerierten Informationen und Inhalten in Verbindung gebracht.

Das Ziel von AR ist die Erschaffung eines Systems, in dem der Benutzer keinen Unterschied mehr zwischen der realen Welt und der virtuellen Erweiterung dieser feststellen kann. AR ist für eine Vielzahl verschiedener Bereiche interessant, wie beispielsweise elektronische Unterhaltung und Bildung, industrielles Design und Herstellung, Robotik und militärisches Training. In diesen Bereich wird AR teilweise schon in frühen Ausbaustufen verwendet und stetig weiterentwickelt.

Nachfolgend wird der Begriff AR definiert und gegenüber der Virtual Reality (VR) abgegrenzt. Anschließend folgt ein Überblick über den allgemeinen Aufbau eines AR-Systems

sowie die Betrachtung der wesentlichen Kernkomponenten.

Zum Abschluss werden einige Beispielanwendung aus verschiedenen Bereichen aufgezählt und es folgt eine genauere Betrachtung ausgewählter Anwendungen, welche AR im automobilen Umfeld und vor allem auf dem Feld der Navigation einsetzen.

### 2.1.1. Definition und Abgrenzung

Ziel von AR ist es, Informationen dort anzuzeigen, wo sie benötigt werden. Daten sollen als räumlich korrekt positionierte Objekte in das Sichtfeld des Nutzers eingeblendet werden [6]. Diese neue Form der Verschmelzung der virtuellen Welt mit der Realität wird von Milgram in einem Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum dargestellt [83].

#### Definition nach Azuma

Die bisher am häufigsten verwendete Definition von Augmented Reality stammt von Ronald Azuma:

“ AR is about augmenting the real world environment with virtual information by improving peoples senses and skills. AR mixes virtual characters with the actual world. [...] AR supplements reality, rather than completely replacing it.” [6]

Azuma definiert AR als die Erweiterung der realen Welt mit virtuellen Informationen. Dabei werden die beiden Welten Realität und Virtualität für den Benutzer kombiniert. Für ein gutes Nutzererlebnis muss diese Kombination für den Benutzer möglichst transparent sein. Dies lässt sich durch zwei Anforderungen an diese Kombination erreichen: Zum einen müssen die virtuellen Objekte in einem korrekten dreidimensionalen Bezug zur Realität erzeugt werden, und zum anderen muss es dem Benutzer möglich sein, in Echtzeit mit dem System zu interagieren. [6]

Diese Definition aus dem Jahr 1997 beschränkt die Anwendungsmöglichkeiten der AR nicht auf spezielle Hardware, sondern beschreibt vielmehr das Nutzungserlebnis. Dadurch kann diese Definition auch noch heute verwendet werden, obwohl sich der Fokus im Bereich AR teilweise in andere Richtungen entwickelt und neue Anwendungsgebiete entstanden sind. Zum Beispiel wird nicht mehr nur die reale Welt erweitert, sondern eine Vielzahl von bereits digitalisierten Inhalten, wie zum Beispiel Videoaufzeichnungen mittels zusätzlicher Einblendung von abstrakten virtuellen Objekten, neu aufbereitet. [6]

Die wesentlichste Eigenschaft von Augmented Reality ist die Möglichkeit der direkten Interaktion mit den computergenerierten Objekten und Zusatzinformationen. Diese Interaktion bieten alle heute bekannten AR-Anwendungen. Teilweise wird diese Interaktionsmöglichkeit noch um die Möglichkeit der direkten Manipulation der künstlich erzeugten Informationselemente erweitert, um so neue Einsatzfelder, wie beispielsweise das Produktdesign, zu erschließen [114].

#### Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum

In seinem Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum (siehe Abbildung 2.1) stellt Milgram den Zusammenhang zwischen virtueller Welt und realer Welt dar [83].

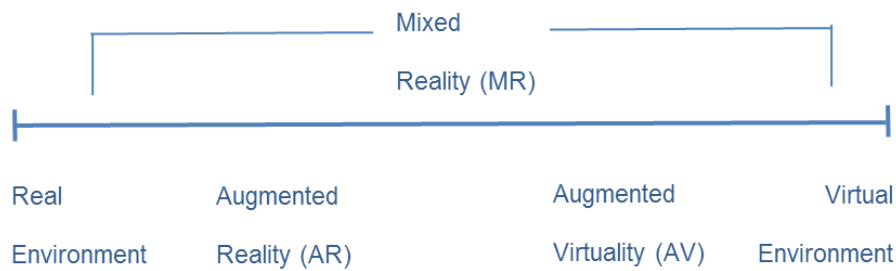


Abbildung 2.1.: Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum [83]

Virtuelle Umgebungen lassen den Nutzer in eine synthetische Welt eintauchen, von der aus er die reale Welt um ihn herum nicht erkennen kann. Dem Zwang, den Gesetzen der Realität zu folgen, unterliegen virtuelle Umgebungen somit nicht. Dadurch ist es möglich, dass innerhalb einer künstlichen Welt die physikalischen Gesetze der Schwerkraft, Zeit und Materie keine Geltung haben [83]. Somit lassen sich Szenen schaffen, die in dieser Form nicht oder nicht mehr real existieren. Dies kann zum einen der Unterhaltung und zum anderen der Wissenschaft dienen, zum Beispiel in Computerspielen oder bei der grafischen Rekonstruktion vergangener Zeitalter.

Durch die vollständige Immersion der virtuellen Umgebungen fehlt dem Benutzer der Bezug zur realen Welt und er kann sie nicht mehr wahrnehmen. Dies ist nachteilig für einige Anwendungen, wie beispielsweise die Fahrzeugnavigations.

Im Gegensatz dazu kann der Nutzer in der Augmented Reality neben den überlagerten virtuellen Informationen auch die reale Szene wahrnehmen. Daraus leitet sich der Grundgedanke von AR ab, in dem künstlich erzeugte Objekte mit der Realität vereint werden. Aus diesem Grund entstand die Namensgebung der erweiterten Realität, da diese nicht ersetzt wird [83].

Aus der Abbildung wird deutlich, dass sich die AR wesentlich näher an der Realität orientiert, während sich die Augmented Virtuality von der realen Welt distanziert darstellt. Das Vereinen beider Welten wird als gemischte Realität (Mixed Reality) bezeichnet.

Zusammenfassend kann man also sagen, dass die virtuelle Realität eine rein synthetisch erzeugte Welt ist, wohingegen die Augmented Reality als Technologie genau zwischen der realen und der virtuellen Welt anzuordnen ist.

### 2.1.2. Allgemeiner Aufbau und Funktionsweise von AR Systemen

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Kernkomponenten identifiziert, welche sich in jedem AR-System, unabhängig von der Ausprägung, wiederfinden lassen. Anschließend wird basierend auf diesen Kernkomponenten die allgemeine Funktionsweise von AR-Systemen beschrieben.

#### Kernkomponenten eines AR-Systems

Basierend auf den drei wesentlichen Merkmalen eines AR-Systems - Kombination von Virtualität und Realität, Räumlicher Bezug und Interaktion in Echtzeit - lassen sich Kompo-

nennten ableiten, welche die technische Grundlage für ein AR-System bilden. Die folgenden drei Komponenten finden sich in entsprechender Form in jedem AR-System [24]:

- Trackingsystem: Positionserfassung in 3D für korrekten räumlichen Bezug und Interaktion
- AR-Software: Erzeugung der passenden virtuellen Welt für die Kombination von Virtualität und Realität und Interaktion.
- Anzeigesystem: Darstellung der erzeugten Szene für Kombination der Realität mit Virtualität

Die zentrale Einheit des AR-Systems stellt der Szenengenerator dar, welcher mit Hilfe der Informationen aus dem Trackingsystem die virtuellen Objekte erzeugt, die anschließend auf dem Anzeigesystem zur Anzeige gebracht werden.

Viele AR-Systeme nutzen darüber hinaus noch eine Anbindung an ein Datenbanksystem, in welchem spezifische Informationen für die jeweilige Anwendung gespeichert sind. Diese Informationen können vom Szenengenerator benutzt werden, um die Szene mit weiteren Informationen anzureichern. Ein Beispiel für solch ein Datenbanksystem ist die digitale Karte in einem AR-Navigationssystem.

### Funktionsweise eines AR-Systems

Nachfolgend wird die Funktionsweise eines AR-Systems gemäß Azuma und Alt beschrieben [6] [3]. Mit Hilfe des Trackingsystems werden sowohl die Pose des Benutzers, also die Position und Orientierung im Raum, ermittelt als auch die Pose weiterer relevanter realer Objekte im Raum, welche mit der dargestellten virtuellen Szene interagieren sollen. Diese Informationen werden anschließend im Szenengenerator innerhalb der AR-Software verarbeitet. Es werden alle notwendigen Berechnungen für die Erzeugung der fertigen Bilder - wie beispielsweise Pose der virtuellen Objekte, Pose der virtuellen Kamera, Beleuchtung und eventuell notwendige Ausgleichberechnungen - durchgeführt. Bei Bedarf greift der Szenengenerator zusätzlich auf das angebundene Datenbanksystem zu, um zusätzliche Informationen, wie beispielsweise abgespeicherte 3D-Modelle für die Szenenerzeugung, abzufragen. Anschließend werden dem Benutzer die fertig erzeugten Bilder mit Hilfe des Anzeigesystems präsentiert. Nachfolgend werden Trackingsystem, das Interaktionsverhalten eines AR-System sowie die verschiedenen Anzeigesysteme detaillierter vorgestellt.

**Tracking:** Ein AR-System verwendet Trackingverfahren, um zum einen die Pose von Objekten in der Umgebung des Anwenders zu bestimmen, und zum anderen, um die Pose des Anwenders oder des eigentlichen AR-Systems zu ermitteln. Je nach verwendetem Anzeigesystem werden hier unterschiedliche Anforderungen an die Güte der bestimmten Pose gestellt. Es existieren zahlreiche Ansätze für Trackingverfahren: magnetische, mechanische, akustische, inertielle, elektromagnetische und optische Verfahren [95]. Jedes Trackingverfahren besitzt verschiedene Randbedingungen und Systemparameter basierend auf den zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien. Da diese Systemparameter einen erheblichen Einfluss auf die Qualität des jeweiligen Trackingverfahrens haben und

diese teilweise untereinander konkurrieren, existiert kein ideales Trackingsystem [109]. Zu den Systemparametern zählen:

- Abtaste: Frequenz, mit der das jeweilige Verfahren messen kann
- Auflösung: Der minimal erkennbare Unterschied in Messungen
- Genauigkeit: Abweichung zwischen Messung und Realität
- Zeit-Versatz: Benötigte Zeit für die Verarbeitungskette
- Interferenz: Einflüsse der Umwelt auf das Verfahren
- Reichweite: Mögliche Abstände für die Messung

Diese stellen einen großen Einflussfaktor bei der Wahl von geeigneten Verfahren für das jeweilige AR-System dar [3].

Für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahren sei an diese Stelle auf entsprechende Arbeiten verwiesen, beispielsweise von Alt [3] und Pankratz [95].

**Interaktion:** Die Art und Weise, wie ein Anwender mit dem AR-System interagieren kann, wird von einem Regelkreis gesteuert. Dieser Regelkreis beeinflusst den Austausch von Informationen zwischen AR-System und Anwender. Symietz hat einen entsprechenden Regelkreis für VR-Systeme erstellt [125]. Dieser ist in Abbildung 2.2 auf der linken Seite dargestellt. Das System nimmt die Eingaben des Anwenders in Form von Kommandos, Gesten und/oder Bewegungen entgegen und erzeugt mit entsprechenden Algorithmen eine Ausgabe. Diese Ausgabe wird dem Anwender anschließend in visueller, auditiver oder taktischer Form präsentiert.

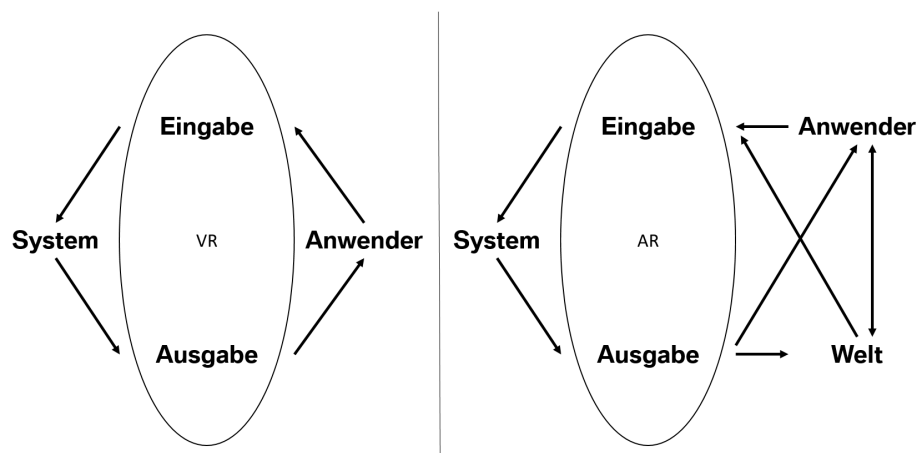


Abbildung 2.2.: Interaktionsschema für VR nach Symietz und Interaktionsschema für AR nach Schilling [125] [118]

Schilling hat in seiner Arbeit das in Abbildung 2.2 auf der rechten Seite dargestellte AR-Schema aus dem VR-Schema weiterentwickelt [118]. Dieses AR-Schema betrachtet neben System und Anwender noch die Umgebung, da es im Gegensatz zur VR bei der AR

nicht nur die künstliche Welt und den Anwender gibt, sondern zusätzlich die reale Welt mit einbezogen werden kann. Ein Beispiel dafür ist die kontaktanaloge Darstellung der Funktion Adaptive Cruise Control (ACC) [57]. Hier muss das System neben der Orientierung des eigenen Fahrzeuges und den vom Fahrer gewählten Soll-Abstand auch die Pose anderer Fahrzeuge erkennen und für die visuelle Darstellung mit berücksichtigen.

### Anzeigesysteme für AR-Anwendungen

Für AR-Anwendungen werden im Allgemeinen drei verschiedene Arten von Anzeigesystemen verwendet: Head Mounted Displays, tragbare Anzeigesysteme und festverbaute Anzeigen [24].

**Head Mounted Displays:** Head Mounted Displays (HMD) sind Anzeigeräte, die am Kopf getragen werden. Es existieren verschiedene Ausprägungen von HMDs. Die ersten genutzten HMDs waren beispielsweise an Helmen von Piloten montiert (siehe linke Seite in Abbildung 2.3). Da HMDs direkt am Kopf getragen werden, hat der Anwender beide Hände frei für andere Tätigkeiten. Dies ist vor allem dann von Vorteil, wenn das AR-System den Anwender bei seiner eigentlichen Primäraufgabe unterstützen soll, wie beispielsweise bei der Wartung von Maschinen [42] oder dem Steuern von Flugzeugen [22]. Die neuere Form von HMDs sind Brillen. Bei den Brillen-HMDs wird zum einen zwischen durchsichtigen und video-basierten Ausführungen (siehe Abbildung 2.3 Mitte und Rechts) und zum anderen zwischen monokularen und biokularen Ausführungen unterschieden.



Abbildung 2.3.: Verschiedene HMD-Ausprägungen: Helm-Anzeige, videobasierte und durchsichtige AR-Brille [U.S. Air Force / Oculus VR / BMW AG ]

**Tragbare Anzeigesysteme:** Tragbare Anzeigesysteme sind Geräte mit Recheneinheiten und einer Anzeigefläche, die der Benutzer in der Hand tragen kann. Zu ihnen gehören beispielsweise Smartphones, Tablet PCs und tragbare Spielekonsolen (siehe Abbildung 2.4). Diese Systeme nutzen videobasierte Verfahren, um für den Anwender das AR-Erlebnis zu erzeugen. Dabei werden mit einer Kamera Bilder der realen Umgebung aufgezeichnet und anschließend mit künstlich erzeugten Grafiken überlagert. Damit ein gutes AR-Erlebnis für den Anwender entsteht, nutzen tragbare Anzeigesysteme verschiedene Sensoren, wie beispielsweise GPS und Beschleunigungssensoren, um die Pose der verwendeten Kamera im Raum genau zu bestimmen und so passende Grafiken für die Überlagerungen erzeugen zu können [24].





Abbildung 2.4.: Beispiele für tragbare Anzeigesysteme: AR-Anwendungen auf Apples iPhone und Nintendo 3DS

**Festverbaute Anzeigen:** Die bisher genannten Anzeigesysteme sind in gewisser Art und Weise direkt mit dem Anwender des AR-Systems verbunden. Bei festverbauten Anzeigesystemen wird diese Verbindung aufgelöst und die Anzeigentechnologie direkt in die Umgebung integriert. Beispiele hierfür sind monitorbasierte Systeme für videobasierte AR-Anwendungen und transparente Monitore, optische Hologramme und Videoprojektoren für durchsichtige AR-Anwendungen (siehe Abbildung 2.5). Diese Systeme sind daher im Allgemeinen nicht mehr für den mobilen Verwendungszweck geeignet. Diesen Nachteil können diese Systeme durch andere Vorteile ausgleichen. So können manche dieser Systeme zum einen sehr kostengünstig aufgebaut werden, da sie mit Technologien aus dem Massenmarkt erzeugt werden, und zum anderen erlauben diese Systeme, dass mehrere Anwender gleichzeitig mit derselben AR-Anwendung interagieren können [11].



Abbildung 2.5.: Beispiele für festverbaute Anzeigesysteme: Magischer Spiegel mit Röntgenfunktion [14], ARmy: Kombination aus AR und Tabletop-Spiel [31], Virtueller Spiegel zum Tauschen der Schuhe [34]

Weitere Beispiele für festverbaute Anzeigesysteme sind das Head-Up Display (HUD) und das zentrale Informationsdisplay (CID), welche sich in aktuellen Fahrzeugen finden lassen. Das HUD erzeugt eine künstliche Anzeigefläche vor dem Fahrzeug, auf welcher dem Fahrer Informationen präsentiert werden können, und das CID befindet sich als zentrale Anzeigefläche für Infotainment-Funktionen in der Mitte des Amaturenbretts. Weitere Details zu den verfügbaren Anzeigeflächen im Fahrzeug finden sich im Abschnitt 3.1 dieser Arbeit. Da das HUD für die im Rahmen dieser Arbeit umgesetzten Prototypen sehr wichtig ist, können weitere Details dazu im Abschnitt 2.3 nachgelesen werden.

### 2.1.3. Allgemeine AR-Anwendungen

Die Verschmelzung der virtuellen mit der realen Welt ermöglicht eine Vielzahl von Einsatzgebieten in den unterschiedlichsten Anwendungsbereichen. Es gibt Anwendungen für fast alle Bereiche des Lebens. Die Anzahl aller existierenden AR-Anwendungen ist schlicht zu groß, um alle Anwendungen hier aufzuführen. Daher werden nachfolgend einige ausgewählte AR-Anwendungen aus verschiedenen Bereichen exemplarisch vorgestellt.

**Medizin:** Die Medizin kann ebenfalls von AR-Anwendungen profitieren. Da hier dem Benutzer komplexe Zusammenhänge vereinfacht und bereits vorverarbeitet dargeboten werden können. Ein Beispiel hierfür ist der magische Spiegel, der das eigene Spiegelbild mit Röntgenaufnahmen überlagert, sodass der Anwender in sich selbst schauen kann. Dies kann bei operativen Eingriffen und der Patientenaufklärung genutzt werden [14].

**Design und Verkauf:** Die Möglichkeit, Produkte zu sehen, die noch gar nicht existieren, kann vor allem im Bereich Design und Verkauf genutzt werden. Potenzielle Kunden erhalten Eindrücke, wie neue Kleidung oder die mögliche zukünftige Brille an Ihnen aussehen [34]. Designer können im Vorfeld erleben, wie sich entsprechende Änderungen, wie beispielsweise eine neue Polsterfarbe im Fahrzeuginneren, auf ihr Produkt auswirken.

**Industrielle Produktion und Montage:** Bereits Anfang der neunziger Jahre wurde mit einem umfangreichen Projekt beim Flugzeughersteller Boeing der Grundstein für den AR-Einsatz in der Produktion gelegt. In diesem Projekt wurde ein Prototyp entwickelt, welcher bei der Montage des Kabelbaums im Flugzeug unterstützt. Leider konnte trotz mehrjähriger Projektlaufzeit dieser Prototyp nicht in den Serieneinsatz überführt werden [87].

Neben der Flugzeugindustrie versucht auch die Automobilindustrie in den Bereichen Produktion, Wartung und Montage AR-Systeme einzusetzen. Dabei soll AR nicht nur in der Anlagen- und Fabrikplanung sowie der Montage, sondern auch im Servicebereich eingesetzt werden [134].

**Medien und Spiele:** Sehr bekannte Vertreter für AR-Anwendungen sind die künstlich erzeugten Einblendungen bei Sportübertragungen im Fernsehen, wie beispielsweise die Abseits-Linie beim Fußball oder die entsprechenden Entfernungslinien beim Football [8].

Im Bereich der digitalen Spiele sind bereits zahlreiche Varianten entstanden, welche AR nutzen. In dieser Arbeit wurden bei den unterschiedlichen Anzeigesystemen verschiedene Beispiele genannt [31]. Darüber hinaus existieren viele weitere Varianten und es entstehen stets neue Anwendungen [127].

**Fahrerassistenz:** Im Bereich der Fahrerassistenzsysteme wird in aktuellen Fahrzeugen bereits Augmented Reality verwendet. Kameraunterstützte Einparkhilfen weisen den Fahrer akustisch und visuell auf den aktuellen Abstand zwischen dem Fahrzeug und erkannten Hindernissen hin. Darüber hinaus präsentieren sie dem Fahrer in Abhängigkeit vom gewählten Lenkwinkel die zu erwartende Trajektorie des Fahrzeuges. Diese Systeme helfen, Parkschäden zu reduzieren und erhöhen den Komfort beim Parken und Rangieren [28].

#### 2.1.4. AR-Systeme im automobilen Umfeld für Navigationstätigkeiten

In den letzten Jahren wurden zunehmend Projekte gestartet, welche das Ziel verfolgen, Augmented Reality im automobilen Umfeld während der Fahrt für Navigationstätigkeiten zu nutzen. Die Verfügbarkeit von immer besseren Sensoren sowie die stets wachsenden Möglichkeiten moderner Smartphones und deren Integration in die verschiedenen Fahrzeuge ermöglichen immer neue Anwendungen.

Nachfolgend wird eine mögliche Form der Einteilung verschiedener AR-Anwendung, basierend auf deren technischer Umsetzung, vorgestellt.

Anschließend werden einige ausgewählte Beispiele näher vorgestellt. Der Schwerpunkt bei der Auswahl der Anwendungen liegt auf Anwendungen, die neue Möglichkeiten der Nutzung von AR im Fahrzeug bieten sowie einen Beitrag zu Navigationsfunktionen leisten.

**Einteilung der Anwendungen:** Die bisher bekannten AR-Anwendungen im automobilen Umfeld können in drei Klassen aufgeteilt werden. Kontaktanaloge Systeme, welche direkt die wahrgenommene Umgebung erweitern, videobasierte Systeme, welche die AR-Anzeigen mittels Überlagerung eines Videobildes erzeugen, und fotobasierte Systeme, welche mittels aufgezeichneter Fotos der jeweiligen Situation arbeiten und diese dem Benutzer zum entsprechenden Zeitpunkt präsentieren. Aufgrund der Anforderungen an die Anwendung und die entsprechende Komplexität der jeweiligen technische Umsetzung sind fotobasierte Systeme am einfachsten zu realisieren. Videobasierte Systeme stellen ähnliche Anforderungen an die Komplexität des verwendeten Tracking-Systems sowie der AR-Software zur Erzeugung der jeweiligen Anzeigen. Allerdings lassen sich videobasierte Systeme gegenüber kontaktanalogen Systemen leichter realisieren, da videobasierte Systeme geringere Anforderungen an das verwendete Anzeigesystem stellen.

##### Fotobasierte Systeme

Vor allem die Reaktion des Systems auf die jeweilige Umgebung und die Möglichkeit der Interaktion in Echtzeit machen laut Definition eine entsprechende Anwendung zu einer AR-Anwendung. Allerdings sind diese Reaktionen und Interaktionsmöglichkeiten sowie die Echtzeitanforderung nicht klar abgegrenzt. So kann ein System, welches entsprechende grafische Anzeigen lediglich zu einem passenden Zeitpunkt präsentiert, ebenfalls zu einem AR-System gezählt werden, wenn der Anwender durch sein Verhalten Einfluss auf den Präsentationszeitpunkt nehmen kann und sich die Anzeigen an das Verhalten des Anwenders anpassen. Somit kann auch mit Hilfe von Fotos ein AR-System realisiert werden.

Zwei Verfahren, um entsprechende AR-Fotos zu erzeugen, sind möglich. Zum einen können diese Fotos, ähnlich dem videobasierten Ansatz, direkt von einer Kamera aufgezeichnet und dem Fahrer, mit entsprechenden Anzeigen überlagert, präsentiert werden. Zum anderen ist die Verwendung einer Datenbank mit georeferenzierten Fotos denkbar. In Abhängigkeit von der aktuellen Fahrzeugposition und -situation werden dem Fahrer entsprechend angereicherte Fotos angezeigt.

**Google Maps Navigation:** Mit Google Maps Navigation hat Google eine Navigationsanwendung erschaffen, die mit Hilfe der verschiedenen verfügbaren Sensoren in aktuellen

## 2. Stand der Technik

---

Smartphones die Position des Anwenders bestimmt und diese Position anschließend mit der eigenen Kartendatenbank von Google abgleicht und so dem Anwender zahlreiche Navigationsfunktionen anbieten kann.

Seit August 2011 bietet Google dem Anwender mit der Version 5.9 von Google Maps Navigation eine neue Darstellung der Navigationshinweise, basierend auf den georeferenzierten Straßenfotos aus der Bilddatenbank Street View [4]. Bei diesem Darstellungsmodus wird bei Annäherung an ein Manöver ein Foto der entsprechenden Kreuzung aus der Street View Datenbank heruntergeladen. Dieses Foto wird anschließend mit einer Visualisierung des Routenverlaufs, basierend auf dem Kartenmaterial, überlagert. Das Ergebnis, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, wird dann dem Anwender präsentiert.

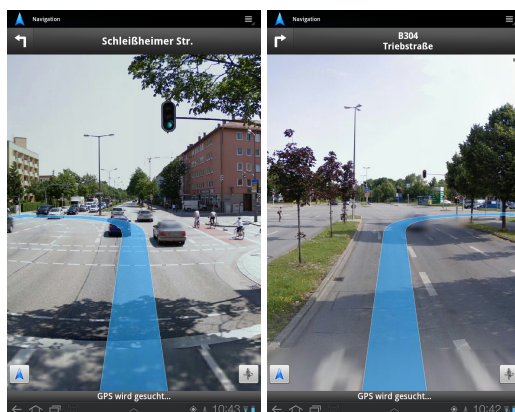


Abbildung 2.6.: Street View-Modus der Google Maps Navigation [8]

**Situationsvorausschau mittels AR-Fotos:** In seiner Diplomarbeit hat David Baumbach eine fotobasierte AR-Anwendung aufgebaut, welche ebenfalls auf den Fotos aus der Google Street View Datenbank basiert. Im Gegensatz zur Google Maps Navigation Anwendung werden die Fotos in dieser Anwendung entsprechend der Annäherung an die Kreuzung vorverarbeitet und mit einer Piktogrammdarstellung des entsprechenden Manövers überlagert [8]. Abbildung 2.7 zeigt das Ergebnis an vier Manöverbeispielen. Weitere Hintergründe zu dieser Arbeit sind in Kapitel 5 zusammengefasst.

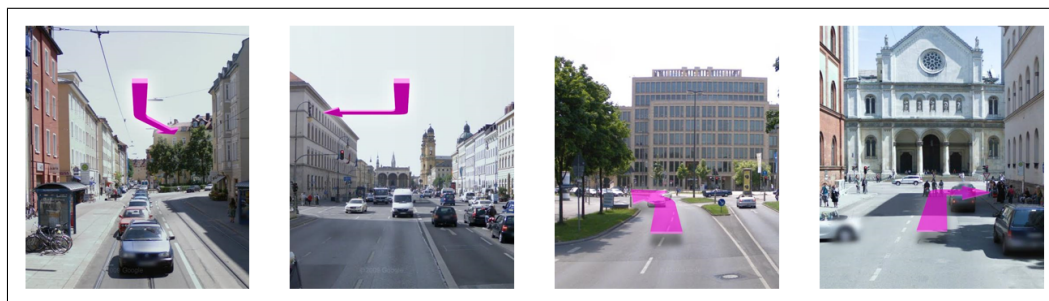


Abbildung 2.7.: Situationsvorausschau mittels fotobasierter AR-Anwendung

**Integration von Orientierungspunkten:** Ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit ist die Diplomarbeit von Frederik Löffert entstanden. Aufbauend auf den Ergebnissen von David Baumbach wurde eine Anwendung entwickelt, welche die AR-Fotos neben der Piktogrammendarstellung des Manövers noch zusätzlich mit einer Hervorhebung entsprechender Orientierungspunkte überlagert (siehe Abbildung 2.8). Dadurch bekommt der Anwender neben der Information zum entsprechenden Manöver und der allgemeinen Ansicht der Kreuzung noch eine zusätzliche Hilfestellung in Form von markanten Orientierungspunkten [74]. In Kapitel 6 können weiterführende Informationen zu dieser Arbeit nachgelesen werden.



Abbildung 2.8.: AR-Navigationsanwendung mit Orientierungspunkten [74]

### Videobasierte Systeme

Videobasierte AR-Anwendungen im Fahrzeug nutzen eine Kamera, um Bilder von der Umgebung des Fahrzeugs aufzuzeichnen. Die jeweilige Anwendung erzeugt dann, passend zu diesen Bildern, Grafiken, welche die zusätzlichen Informationen transportieren. Anschließend werden die Bilder mit den erzeugten Grafiken überlagert und dem Anwender auf einer entsprechenden Anzeigenfläche präsentiert. Viele der vorgestellten Systeme basieren auf Smartphones, da heutige Smartphones mit leistungsstarken Grafikprozessoren, Mehrkernprozessoren, Sensoren zur Orts- und Lagebestimmung sowie einer integrierten Kamera ausgestattet sind. Nachfolgend werden verschiedene videobasierte AR-Anwendungen im automobilen Umfeld mit Schwerpunkt auf Navigationsfunktionen vorgestellt.

**Wikitude Drive:** Die Smartphone-Anwendung Wikitude Drive nutzt AR für die Fahrzeugnavigation. Es wird das reale Kamerabild mit einer perspektivisch korrekten Darstellung des vorausliegenden Straßenverlaufs überlagert, wie in Abbildung 2.9 dargestellt. Der Straßenverlauf wird mit Hilfe des hinterlegten Kartenmaterials der Firma NAVTEQ sowie der GPS-basierten Bestimmung der aktuellen Position ermittelt [20].

Damit die Anwendung im Fahrzeug verwendet werden kann, muss das Smartphone mit einer entsprechenden Halterung hinter der Windschutzscheibe so befestigt werden, dass die integrierte Kamera in Fahrtrichtung schaut. Anschließend muss die Anwendung auf das entsprechende Fahrzeug eingestellt und kalibriert werden.



Abbildung 2.9.: Aufbau Wikitude Drive [8]

Neben der beschriebenen AR-Darstellung präsentiert die Anwendung dem Fahrer noch weitere Informationen, wie die Entfernung zum nächsten Manöver und POI-Informationen. Laut Hersteller leistet diese Anwendung einen Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit beim Umgang mit Navigationsanwendungen, da selbst beim Blick auf das Smartphone durch die AR-Darstellung noch eine Wahrnehmung der Straße und gegebenenfalls anderer Verkehrsteilnehmer und Hindernisse möglich ist.

**Projekt AugSatNav:** AugSatNav (Augmented Reality Navigation System) von Phyllora überlagert analog zu Wikitude Drive die Fahrscene mit einer Visualisierung des Kartenverlaufs. Allerdings verwendet AugSatNav eine andere Form der grafischen Repräsentation. Statt des Fahrteppichs wird eine halbtransparente, weiße Linie über das Videobild der Fahrscene gelegt [99].

**Blaupunkt Travepilot:** Der TravelPilot der Firma Blaupunkt bietet mit dem Modus Video-Navigation eine erste Ausprägung der videobasierten AR-Navigation. Auf der Rückseite des Gerätes befindet sich eine integrierte Kamera. Mit Hilfe dieser Kamera kann die vor dem Fahrzeug liegende Fahrscene auf dem Bildschirm in Echtzeit dargestellt werden. Abbildung 2.10 zeigt, wie in dieser Videodarstellung entsprechende Abbiegehinweise in Piktogrammen eingeblendet werden. Dadurch sollen eine realistische Darstellung sowie eine sichere Form der Navigation gewährleistet werden. Die Piktogramme werden als 2D-Grafik mittig über das Kamerabild gelegt. Es findet kein Abgleich mit der Orientierung des Fahrzeuges bzw. der Kamera statt. Dadurch entsteht nur in bestimmten Verkehrssituationen und nur bei passender Montage und Ausrichtung des Gerätes ein vollwertiges AR-Erlebnis für den Anwender.



Abbildung 2.10.: Blaupunkt Travepilot Video-Navigation [8]

**TomTom:** Bereits 2006 reichte TomTom einen Patentantrag über die Einblendung von Navigationshinweisen in entsprechende Videobilder auf portablen Navigationsgeräten ein. TomTom verfolgt damit das Ziel, Navigationshinweise verständlicher darzustellen. Durch die Einblendung von entsprechenden Routeninformationen in das Videosignal sollen Anwender die dargestellte Situation leichter in die Realität übertragen und so eine fehlerhafte Interpretation der dargestellten Navigationshinweise vermeiden können. Dem Patentantrag zufolge möchte TomTom ebenfalls auf Kartendaten sowie GPS-Positionsdaten zurückgreifen. Darüber hinaus sollen Bildverarbeitungsalgorithmen verwendet werden, um die dargestellten Manövergrafiken möglichst exakt über die Kamerabilder legen zu können [44]. Allerdings ist bis zum heutigen Zeitpunkt noch kein fertiges Produkt von TomTom bekannt, welches das beschriebene Verfahren umsetzt.

**INSTAR Navigation:** 2003 entstand durch eine Kooperation der Universität Linz und der Siemens AG das Forschungsprojekt "Information and Navigation Systems Through Augmented Reality" (INSTAR). Das vorgestellte System nutzt mehrere Komponenten, um die Anzeige für den Anwender zu generieren. Mit einer Kamera wird die Straße vor dem Fahrzeug aufgezeichnet und auf einem entsprechenden Farbdisplay dargestellt. Mit Hilfe von GPS, Radsensoren, Beschleunigungssensoren sowie eines Kompasses werden fortlaufend die Position und Orientierung des Fahrzeuges bestimmt. Basierend auf 2D- und 3D-Navigationskarten werden 3D-Punkte bestimmt, welche dem Verlauf der Route folgen. Aus diesen Punkten werden Splines erzeugt, welche die Basis für die präsentierte Navigationsgrafik darstellen [88].

Abbildung 2.11 zeigt eine erzeugte Navigationsgrafik, welche für die Überlagerung verwendet wird. Es handelt sich dabei um einen halbtransparenten dreidimensionalen Schlauch mit blauer Kontur, der dem Verlauf der Route folgt. Die linke Seite des Schlauchs ist rot eingefärbt, die rechte Seite grün. Durch die Verwendung dieser aus der Schifffahrt bekannten Farben, Rot für Backbord und Grün für Steuerbord [26], kann der Verlauf des Schlauchs auch bei schlechter Perspektive und in größerer Entfernung besser erkannt werden.

Als weiteren Visualisierungsvorschlag stellt INSTAR ein virtuelles, vorausfahrendes Fahrzeug vor. Diesem virtuellen Fahrzeug kann der Fahrer folgen. Mit Hilfe der virtuellen Bremslichter und der entsprechenden Entfernungsdarstellung kann der Fahrer dazu bewegt werden, ebenfalls zu bremsen oder schneller zu fahren [88].

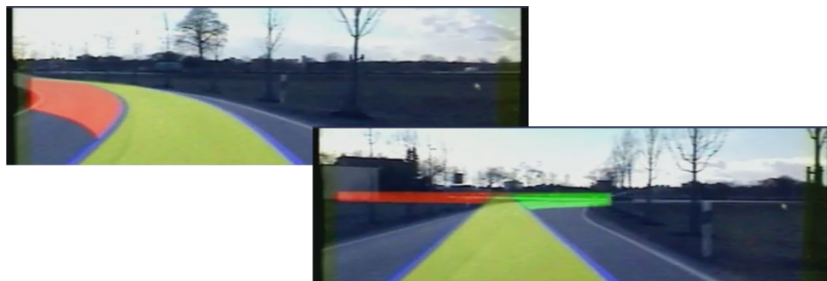


Abbildung 2.11.: Darstellung der INSTAR AR-Anwendung [8]

**Route66 Follow Me:** Anfang 2011 stellt der Navigationsanbieter Route66 mit der Anwendung Follow Me eine Navigationslösung vor, welche ebenfalls auf der Verfolgen eines virtuellen Fahrzeuges basiert. Wie die meisten bisher vorgestellten Anwendungen ist Follow Me ebenfalls für aktuelle Smartphones ausgelegt und nutzt die integrierte Kamera, um Videobilder von der vorausliegenden Fahrszene aufzuzeichnen [111].

Allerdings wird statt der bisher vorgestellten Einblendung von Piktogrammen ein virtuelles Fahrzeug in die Szene eingeblendet (siehe Abbildung 2.12). Dieses Fahrzeug signalisiert dem Fahrer durch Blinker und Bremslichter den Verlauf der Route sowie die Annäherung an entsprechende Manöverpunkte. Der Anwender muss die Navigationshinweise nicht mehr auf die reale Fahrsituation abbilden, sondern lediglich dem virtuellen Fahrzeug folgen [111].



Abbildung 2.12.: Darstellung der Follow Me AR-Anwendung von Route66 [8]

### Kontaktanaloge Systeme

Im Gegensatz zu fotobasierten und videobasierten Systemen erweitern kontaktanaloge Systeme direkt die wahrgenommene Umgebung des Fahrers. Es werden keine Bild- oder Videosignale als Zwischenmedium benötigt. Dadurch werden die Nachteile von videobasierten Systemen ausgeglichen. Zwischen der Darstellung und der Realität existiert kein zeitlicher Versatz mehr und der Fahrer kann die Umgebung direkt wahrnehmen, ohne auf andere Anzeigeflächen angewiesen zu sein. Allerdings stellt dies eine neue Anforderung an das verwendete System: Die virtuellen Anzeigen müssen mit harten Echtzeitanforderungen erstellt werden. Das bedeutet, dass sämtliche Verzögerungen der Verarbeitungskette zwischen Sensor und Anzeige durch geeignete Verfahren ausgeglichen werden müssen, da sonst beim Fahrer ein negativer Eindruck entstehen und das System als nicht wertig empfunden werden kann.

**Anzeigen im Fahrzeug-HUD:** Das Head-Up Display im Fahrzeug bietet die Möglichkeit für den Fahrer, eine zusätzliche künstlich erzeugte Anzeigefläche zu erzeugen. Dies erlaubt es, die wahrgenommene Umgebung des Fahrers direkt mit virtuellen Anzeigen zu überlagern. Dies macht das HUD zu einer idealen Technologie für zukünftige kontaktanaloge Systeme. Mit unterschiedlichen Auslegungen dieser Technologie kann der Weg für den Einsatz von AR im Fahrzeug geebnet werden [65]. Im Kapitel 2.3 wird diese Technologie daher detailliert vorgestellt. An dieser Stelle werden ausgewählte Anwendungsbeispiele für AR-Anzeigen auf Basis des HUD vorgestellt.



**Erste kontaktanaloge Darstellung eines Fahrerassistenzsystems:** Bubb stellte bereits 1978 ein HUD-System vor, mit dessen Hilfe dem Fahrer ein Sicherheitsabstand, basierend auf der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit, angezeigt werden kann [21]. Dazu wird ein HUD-System basierend auf dem Konzept der schrägen Bildebene verwendet (siehe Kapitel 2.3.3).

**Kontaktanaloge Darstellung von Fahrerassistenzsystemen im Fahrzeug:** Schneid und Israel bauten einen HUD-Prototyp, basierend auf dem vom Bubb beschriebenen Konzept, auf und untersuchten damit erste kontaktanaloge Anzeigen im Fahrzeug. Zu diesen Anzeigen gehörten die in Abbildung 2.13 dargestellte Visualisierung von Abbiegehinweisen in Pfeildarstellung sowie die Visualisierung des erkannten Vorderfahrzeuges und des eingestellten Soll-Abstands der Aktiven Geschwindigkeitsregelung (ACC) [119] [56].



Abbildung 2.13.: Kontaktanaloge ACC- und Navigationsdarstellung [56] [119]

**Navigationsanzeigen auf dem Windschutzscheiben-HUD:** Sato et al nutzen einen Prototyp des Windschutzscheiben-HUD (siehe Abschnitt 2.3.3), um dem Fahrer Navigationshinweise in Form von Richtungsangaben und Navigationsflaggen zu präsentieren (siehe Abbildung 2.14 links und Mitte) [116]. Die Navigationsflaggen stehen virtuell am entsprechenden Zielort und geben Auskunft über Name, Entfernung und Richtung. Neben dieser Navigationsanwendung wurde das Windschutzscheiben-HUD auch für weitere Funktionen, wie beispielsweise für den in Abbildung 2.14 auf der rechten Seite dargestellten virtuellen Rückspiegel, genutzt [86].



Abbildung 2.14.: AR-Anzeigen im Windschutzscheiben-HUD: Navigationsanzeigen sowie virtueller Rückspiegel [116] [86]

**Kontaktanaloge Nachtsichtfunktion:** Bergmeier kombiniert ein Combinerscheiben-HUD (siehe Abschnitt 2.3.3) mit einer Infrarot-Kamera, um ein kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem aufzubauen [10]. Mit Hilfe von Bildverarbeitungsalgorithmen werden die hellsten Punkte im Infrarotbild erkannt. Basierend auf der Lage dieser Punkte im Bild werden entsprechende Markierungsrahmen im HUD angezeigt. Dadurch entsteht für den Fahrer der Eindruck, als würden Personen vor dem Fahrzeug direkt markiert werden. Die linke Grafik in Abbildung 2.15 zeigt die Ausprägung der Funktion. Darüber hinaus hat Bergmeier die Verwendung solch eines Systems vorgeschlagen, um den Fahrer bei schlechter Sicht zu unterstützen, indem der Verlauf der Straße kontaktanalog nachgezeichnet wird, wie in Abbildung 2.15 mittig dargestellt. In derselben Abbildung wird auf der rechten Seite eine mögliche Kombination aus beiden Systemen aufgezeigt [10].

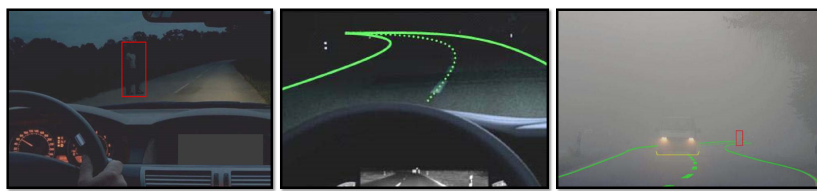


Abbildung 2.15.: Kontaktanaloge Sichtverbesserung im Kombiner-HUD [10]

**AR-Anzeigen im HUD für Längs- und Querführung und Aufmerksamkeitssteuerung:** Tönnis greift das Konzept des Abstandsbalken von Bubb auf und erweitert es zu einer unterstützenden Anzeige für die Längs- und Querführung des Fahrzeuges. Abbildung 2.16 zeigt auf der linken Seite die erarbeitete Anzeige. Der dargestellte Abstandsbalken wird um zwei Verbindungslinien zum Fahrzeug erweitert. Die Lage des Abstandsbalkens verändert sich basierend auf dem aktuellen Lenkwinkel sowie der derzeitigen Geschwindigkeit. Dadurch wird dem Anwender neben dem benötigten Bremsweg auch die zukünftige Fahrzeugtrajektorie mitgeteilt [131].

Darüber hinaus hat Tönnis eine kontaktanaloge Darstellung in Form eines 3D-Pfeils, welcher auf Höhe der vorderen Stoßstange schwebt und den Fahrer auf mögliche Gefahren hinweist analysiert. Abbildung 2.16 zeigt diesen 3D-Pfeil auf der rechten Seite. Die Untersuchungen haben ergeben, dass die kontaktanaloge Darstellungsform zu schnelleren Reaktionszeiten bei den Testpersonen führte [131].

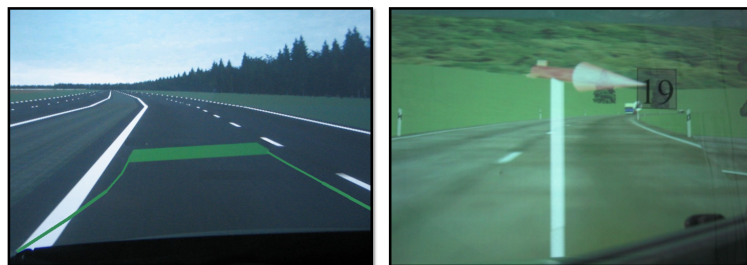


Abbildung 2.16.: Kontaktanaloge Anzeigen im Fahrsimulator: Bremsbalken und Fahrweg sowie 3D-Pfeil für Aufmerksamkeitslenkung [131]

**Virtual Cable:** Das Virtual Cable erzeugt Anzeigen, welche mit Hilfe von Laser, Linsen und Spiegeln direkt in das Sichtfeld des Fahrers projiziert werden und somit das vorausliegende Straßennetzwerk überlagern. Aufgrund dieser Art der Darstellung zählt das Virtual Cable ebenfalls zu den kontaktanalogen Formen [8].

Das Virtual Cable präsentiert dem Fahrer eine virtuelle Orientierungslinie, wie in Abbildung 2.17 dargestellt, welcher er folgen kann. Im Gegensatz zu anderen AR-Anwendungen befindet sich dieser Navigationshinweis oberhalb des Straßenhorizontes. Die Position und Form dieser Orientierungslinie stellt eine neuartige Darstellungsform von Navigationshinweisen dar [8].



Abbildung 2.17.: Virtual Cable aus Sicht des Fahrers [8]

## 2.2. Navigation

Der Begriff *Navigation* wird umgangssprachlich sowohl für die Zielführung als auch für die Positionsbestimmung verwendet. Er beschreibt die Tätigkeit des Navigierens. Der Ursprung des Wortes liegt im Lateinischen (*navigare*) und bedeutet sinngemäss: *Führen eines Schiffes*. Dodel und Häupler definieren den Begriff Navigation wie folgt:

“Navigation, die *Steuermannskunst*, ist die Bestimmung einer optimalen Route von einem Standort zu einem Zielort, beide bekannter Position, optimal bezüglich kürzester Weglänge, kürzester Reisezeit, sicherster Strecke, schönster Route etc., und die planvolle Führung zu diesem Zielort – der Kursverlauf. [30]”

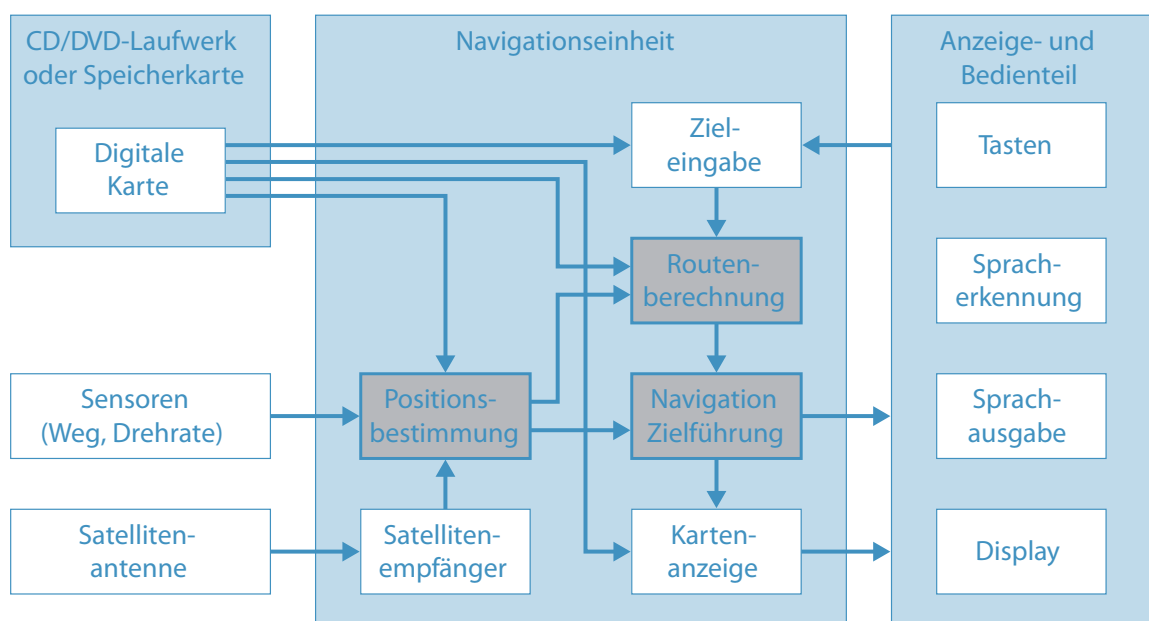


Abbildung 2.18.: Komponenten eines Navigationssystems im Fahrzeug [108]

In Abbildung 2.18 sind die Basisbestandteile eines klassischen Navigationssystems nach Reif [108] dargestellt. Die digitale Karte stellt das Kernstück und Grundlage aller Funktionalitäten eines Navigationssystems dar. Weiterhin sind die Bestandteile der drei Grundfunktionen eines Navigationssystems abgebildet:

- **Positionsbestimmung:** Bestimmen der Fahrzeugposition durch Verarbeitung von entsprechenden Positionssignalen
- **Routenberechnung:** Berechnung einer optimalen Route vom aktuellen Standort bis zum Zielort
- **Zielführung:** Den Fahrer mit Hilfe von akustischen und visuellen Hinweisen entlang dieser Route zum Ziel führen.

In den folgenden Abschnitten werden diese Grundfunktionen sowie die digitale Karte näher betrachtet und vorgestellt. Diese Arbeit konzentriert sich auf die Erarbeitung und Analyse neuartiger Methoden für die Zielführung. Daher werden die weiteren Komponenten klassischer Navigationssysteme, wie die Zieleingabe mit den zugehörigen Funktionen Gesten- und Spracherkennung sowie Empfang und Verarbeitung von Verkehrsinformationen, nicht weiter betrachtet.

### 2.2.1. Digitale Karte

Digitale Karten bilden die Basis zur Erzeugung von Navigationssystemen. Auf ihrem Datenbestand basieren die meisten Funktionen des Navigationssystems. Mit Hilfe dieser Daten können Routen berechnet, Kartendarstellungen zur Anzeige gebracht und Audiohinweise erzeugt werden. Dazu enthalten die Datenbanken von Kartenlieferanten, wie beispielsweise HERE oder TomTom, Informationen zu geografischen Gegebenheiten, Straßennetzen und Gebäuden in vektorisierter Form [90].

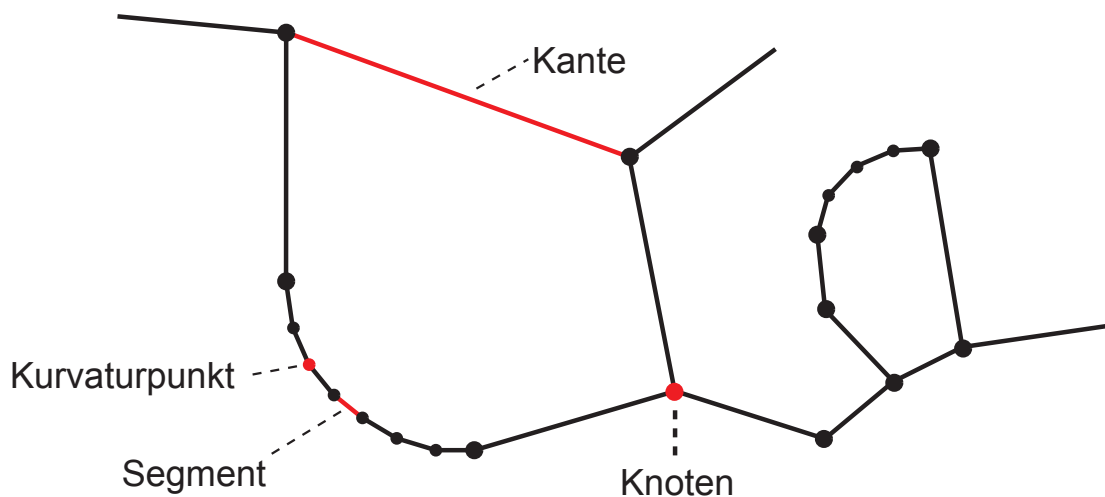


Abbildung 2.19.: Grundelemente einer digitalen Karte [74]

#### Aufbau von digitalen Karten

Abbildung 2.19 zeigt einen typischen Ausschnitt einer digitalen Karte. Anhand der Grundelemente Knoten und Kanten (auch als Nodes und Links bezeichnet) wird die Topologie des Straßennetzwerkes repräsentiert. Mit Hilfe von Segmenten und Kurvaturpunkten kann diese Topologie feiner aufgelöst und mit weiteren Attributen angereichert werden.

Durch geschickte Indizierung der einzelnen Elemente können diese später von den entsprechenden Funktionen verwendet und jeweilige Referenzen aufgelöst werden.

**Knoten und Kanten:** Eine Straße wird durch mindestens eine Kante mit einem entsprechenden Start- und Endknoten modelliert. Sollte sich die reale Straße nicht nur durch solch ein einzelnes gerades Teilstück repräsentieren lassen, kann die Straße in mehrere Teilstücke

zerteilt werden. Zusätzlich können kurvige Abschnitte durch die Verwendung von Krümmungspunkten (sogenannte shape points) besser modelliert werden.

Jeder Knoten besitzt eine Längen- und Breitengradkoordinate und beschreibt damit einen Ort auf der Erdoberfläche (siehe Abschnitt 2.2.3). Zudem verfügt ein Knoten über eine relative Höhenangabe, mit deren Hilfe eine Sortierung der Punkte entlang der Hochachse erfolgen kann. Dadurch kann bei sich kreuzenden Straßen unterschieden werden, ob diese verbunden sind oder beispielsweise eine Über-/Unterführung darstellen.

Durch die Kombination von Knoten und Kanten lässt sich das Straßennetzwerk sowohl geometrisch als auch topologisch vollständig modellieren [90].

**Indizierung und Attribute:** Jedem Link wird über ein entsprechendes Nummerierungsverfahren eine Kennzahl, eine sogenannte ID, zugeordnet. Diese ID ist innerhalb einer Version einer digitalen Karte eindeutig. Zusätzlich können an jeden Link weitere Informationen und Attribute, wie beispielsweise Straßentyp, Anzahl der Fahrstreifen, Straßename und Fahrtrichtung, angehängt werden.

Zusätzlich können neben diesen Grundelementen noch weitere Informationen in digitalen Karten gespeichert werden. Zu diesen zusätzlichen Informationen zählen unter anderem die im nächsten Abschnitt beschriebenen, erweiterten Fahrstreifeninformationen sowie die sogenannten Points of Interest (POI). Ein POI beschreibt einen markanten Punkt, wie beispielsweise eine Tankstelle, ein Parkhaus oder eine Sehenswürdigkeit, und kann mit weiteren Details, wie zum Beispiel den Öffnungszeiten, angereichert werden [90].

**Zusammengesetzte Digitalisierung:** Das beschriebene Knoten- und Kanten-Modell kann durch die zusammengesetzte Digitalisierung einzelner Straßenabschnitte noch verfeinert werden. Bei der zusammengesetzten Digitalisierung wird ein einzelner reeller Straßenabschnitt mit Hilfe mehrerer Kanten dargestellt. Diese Modellierung findet vor allem bei baulich getrennten Straßen Anwendung. Hier werden je Fahrtrichtung einzelne Kanten erzeugt. Ein weiteres Beispiel für die zusammengesetzte Digitalisierung sind komplexe Kreuzungsbereiche sowie Autobahnaus- und einfahrten.

### Erweiterte Fahrstreifeninformation

Das Attribut "numberOfLanes" beschreibt die ungefähr verfügbare Anzahl der vorhandenen Fahrstreifen entlang eines Straßenabschnittes. Allerdings ist die Anzahl oft ungenau, und zusätzlich fehlen Informationen über die Verbundenheit von Fahrstreifen. Dadurch lässt sich die reale Fahrstreifensituation in komplexen Kreuzungssituationen nicht vollständig rekonstruieren. 2005 haben Kartenlieferanten damit begonnen, neben Topologie, Geometrie und allgemeinen Attributen auch die exakte Fahrstreifensituation entlang der Straße zu modellieren. Dieses neue Modell der Fahrstreifen wird in den sogenannten erweiterten Fahrstreifeninformationen abgelegt [106] und beinhaltet die folgenden Zusatzinformationen:

- **Erweiterte Anzahl der Fahrstreifen:** Sie gibt die gesamte Anzahl aller vorhandenen Fahrstreifen auf dem jeweiligen Straßensegment an. Die erweiterte Anzahl der Fahrstreifen umfasst, im Gegensatz zu der herkömmlichen Fahrstreifenanzahl,

sämtliche Auf- und Abfahrten, Abbiegespuren, Beschleunigungstreifen sowie spezielle Fahrstreifen nur für Busse, Taxis oder Einsatzkräfte.

- **Fahrstreifenverbundenheit:** Mit Hilfe der Fahrstreifenverbundenheit wird angegeben, wie die Fahrstreifen zwischen zwei verschiedenen Straßensegmenten verbunden sind. Sie geben an, welcher Fahrstreifen auf der Ursprungskante zu welchem Fahrstreifen auf der Zielkante wird. Dadurch ist es möglich, zu erkennen, von welcher Straßenseite neue Fahrstreifen hinzukommen oder wegfallen und ob es sich bei dem jeweiligen Fahrstreifen um eine Abbiegespur handelt.
- **Fahrstreifeneinschränkungen:** Sie geben für bestimmte Fahrstreifen auf einem Straßensegment etwaige zeitliche oder manöverbedingte Einschränkungen an.

Die erweiterten Fahrstreifeninformationen dienen der Verbesserung der bisherigen Navigationsgeräte, da sie eine Routenführung auf Fahrstreifenebene erlauben. Dadurch kann dem Fahrer frühzeitig mitgeteilt werden, auf welchem Fahrstreifen er sich einordnen sollte, um unnötige oder sehr späte Fahrstreifenwechsel zu vermeiden. Weiterhin ist es möglich, den Fahrer mit Hilfe der erweiterten Fahrstreifeninformationen besser durch komplex gestaltete Kreuzungsbereiche zu führen.

### Modellierung von Kreuzungsbereichen

Wie bereits beschrieben, wird die reale Straßensituation in der digitalen Navigationskarte mit Knoten und Kanten modelliert. Bei der vereinfachten Kreuzungsmodellierung, wie in Abbildung 2.20 auf der linken Seite dargestellt, repräsentiert ein einzelner Knoten die Kreuzung und die verbundenen Straßen werden mittels Kanten modelliert. Die komplexe Kreuzungsmodellierung, wie in Abbildung 2.20 auf der rechten Seite aufgezeigt, enthält deutlich mehr Elemente und kann so die reale Verkehrssituation besser abbilden. So können beispielsweise die Verbindungsarme, die für einen besseren Verkehrsfluss benötigt werden, ebenfalls modelliert werden. Dasselbe gilt für jede Fahrtrichtung.

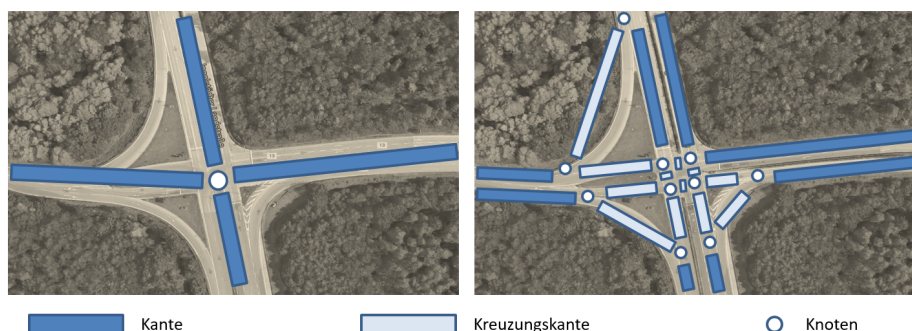


Abbildung 2.20.: Vereinfachte und Komplexe Modellierung von Kreuzungen

Beide Modellierungsvarianten haben je nach Anwendungsfall Ihre Vor- und Nachteile. Die komplexe Darstellung ermöglicht eine bessere Wegführung aufgrund Ihres Detailgrades, während die einfache Darstellung für eine schnelle Berechnung der Route notwendig ist. Daher enthalten digitale Karten in der Regel verschiedene Abstraktionsebenen des

Straßennetzwerkes. In den höheren Ebenen werden alle komplexen Kreuzungen durch die jeweils einfacheren Abstraktionen dieser Kreuzungen ersetzt.

In Abbildung 2.21 ist die komplexe Modellierung einer typischen innerstädtischen Kreuzung dargestellt. Jede Fahrtrichtung ist einzeln modelliert. Der Kreuzungsbereich selber ist im Allgemeinen nicht exakt definiert, da es keine fest vorgeschriebenen Pfade gibt, denen die Fahrzeuge folgen. Stattdessen ergeben sich diese Pfade durch Verkehrsregeln, den aktuellen Verkehrsfluss sowie grobe Orientierungsmarkierungen im Kreuzungsbereich. Daher werden für die Modellierung des Kreuzungsbereichs spezielle Kreuzungskanten verwendet. Diese besitzen deutlich weniger Attribute als normale Kanten und dienen hauptsächlich der Routenberechnung durch die Kreuzung sowie der Ermittlung der entsprechenden Manöver.

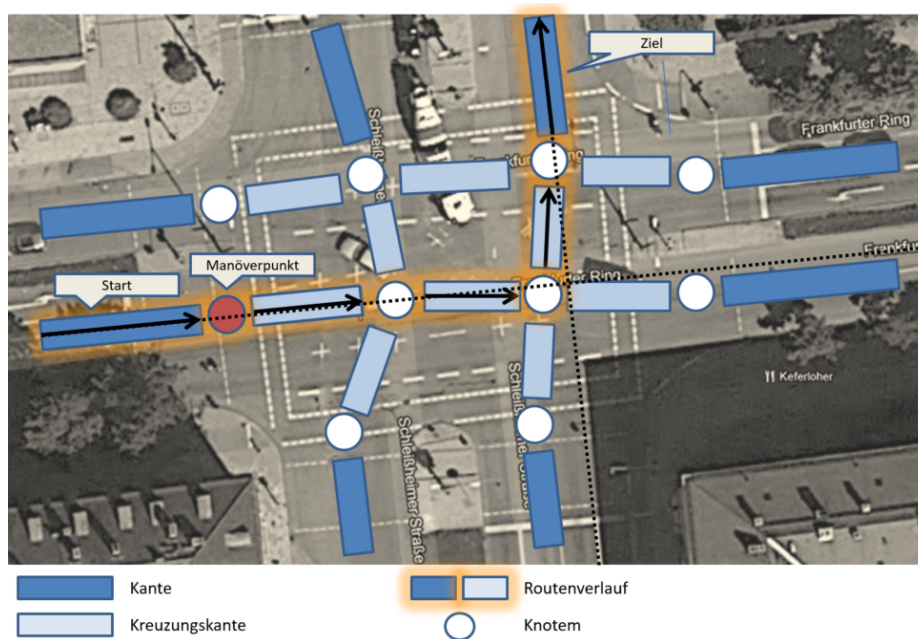


Abbildung 2.21.: Modellierung von Kreuzungsbereichen und Wegführung

Darüber hinaus sind in der Abbildung 2.21 die notwendigen Elemente für die Wegführung am Beispiel des Linksabiegen-Manövers markiert. Die letzte Kante vor dem Kreuzungsbereich ist die Startkante. Die erste Kante nach dem Kreuzungsbereich ist die Zielkante. Der Knoten zwischen Startkante und der ersten Kreuzungskante stellt den Manöverpunkt dar. Später kann mit diesen Informationen das Manöver beschrieben werden.

### Kartenformate

Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Formate zum Abspeichern der Daten einer digitalen Karte. Jedes Format wurde für einen bestimmten Verwendungszweck entwickelt. Im Allgemeinen lassen sich die Formate nach Ihrem Hauptverwendungszweck gliedern. So gibt es zum einen Formate für die effektive Erstellung und Bearbeitung von Kartendaten und zum anderen Formate, die speziell auf die Ausführung von Navigationsanwendungen optimiert sind.



Zu den erstgenannten zählen die Formate GDF und RDF. Das Geographic Data Files Format (GDF) beschreibt ein standardisiertes Format, welches speziell für die Autonavigationsindustrie entwickelt wurde [55]. Es stellt ein binäres Datenformat dar und wird vor allem für den Austausch von Kartendaten verwendet [91].

Beim Relational Data Format (RDF) werden die Informationen in der Karte in einem relationalen Datenbankschema gespeichert. Dadurch stehen für Entwicklungsarbeiten alle Informationen in der Karte zur Verfügung und können direkt bearbeitet werden [93].

Allerdings benötigen diese Kartenformate sehr viel Systemressourcen während des Kartenzugriffs. Dadurch sind diese Formate nicht für die Verwendung innerhalb eines Navigationssystems geeignet. Für diesen Zweck werden die Informationen entsprechend selektiert, komprimiert und in einem entsprechenden Binärformat abgelegt.

In der Vergangenheit hatte fast jeder Anbieter von Navigationssystemen sein eigenes proprietäres Format. Dadurch entstand oft eine Kopplung zwischen Kartenlieferant und Navigationssystementwickler. Um dem entgegenzuwirken, wurde das Navigation Data Standard Konsortium (NDS) gegründet. In diesem Konsortium sitzen Vertreter aus der Automobilindustrie, Kartenlieferanten und Navigationssystementwickler. Innerhalb des NDS Konsortiums wird gemeinsam das Physical Storage Format (PSF) erarbeitet, welches durch die Standardisierung eine Trennung zwischen Kartenlieferant und Navigationsanwendung ermöglicht [89].

### Genauigkeit

Bei der Erstellung von digitalen Karten werden reale Objekte (wie beispielsweise der Straßenverlauf) durch verschiedene Verfahren modelliert. Bei dieser Modellierung können verschiedene Fehler auftreten, welche die Qualität der digitalen Karte beeinflussen. Quddus unterteilt diese Fehler in die folgenden Klassen [102]:

- Projektion: Abbildung der gekrümmten Erdoberfläche in die Ebene
- Digitalisierung: Übertragung von Papierkarten in digitale Formate durch Menschen
- Generalisierungsgrad: Abstraktion der realen Objekte zu Modellen in der Karte mit verringerten Eigenschaften
- Skalierungsfaktor: Verhältnis der Entfernungsangaben innerhalb der Karte zur realer Entfernung sowie Abstraktion von komplexen Geometrien

All diese Fehler beeinflussen die Genauigkeit der Karte. Es existieren zwei Maße der Genauigkeit für die Basiselemente der digitalen Karte [90]:

- absolute Genauigkeit – Abweichung der Koordinatenwerte der Knotenpunkte und Zwischenknoten zu den tatsächlichen Koordinaten der Mittellinie der Straße, welche sie repräsentieren
- relative Genauigkeit – Abweichung der Entfernungsangaben zwischen den einzelnen Elementen innerhalb der Karte und somit der abgebildeten Geometrie

Aufgrund des Erstellungsprozesses von digitalen Karten ist die absolute Genauigkeit im Allgemeinen geringer als die relative Genauigkeit. Für Navigationsfunktionen, die nur innerhalb der digitalen Karte arbeiten, wie beispielsweise die Wegführung, wird eine hohe relative Genauigkeit benötigt, da durch geeignete Verfahren die reale Position in der Karte abgebildet wird und somit die absolute Genauigkeit zu einem großen Grad ignoriert werden kann. Die Ermittlung der realen Position und die entsprechenden Abbildungsverfahren werden im nächsten Abschnitt beschrieben.

### 2.2.2. Positionsbestimmung

Die Bestimmung der aktuellen Position des Fahrzeuges ist mit verschiedenen Ortungsverfahren möglich. Mansfeld [78] unterteilt Ortungsverfahren grundlegend in Verfahren der *Eigenortung* sowie Verfahren der *Fremdortung*. Für die Positionsbestimmung des Fahrzeuges werden Verfahren der *Eigenortung* benötigt, da diese Verfahren die eigene Position bestimmen. Verfahren der *Fremdortung* hingegen bestimmen die Position fremder Objekte (wie beispielsweise RADAR-gestützte Überwachungssysteme). Beide Gruppen werden nochmals unterteilt nach der Art der Ortung: autonom oder kooperativ (siehe Abbildung 2.22). Ein autonomes Verfahren bestimmt die Eigenposition nur mit eigenen Sensoren und ohne den Bedarf zusätzlicher äußerer Technologie oder Infrastruktur. Kooperative Systeme hingegen benötigen Unterstützung von Außen.

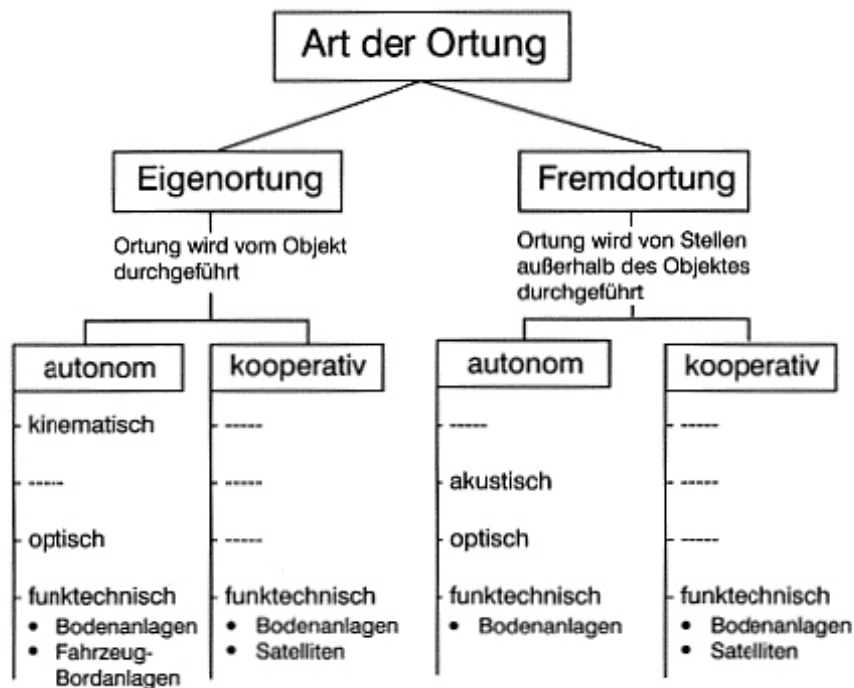


Abbildung 2.22.: Klassifizierung von Ortungsverfahren nach Mansfeld [78]

Durch die Kopplung von autonomen Verfahren mit kooperativen Verfahren können die gegenseitigen Nachteile der Verfahren kompensiert und dadurch die Positionierungsgenauigkeit des Navigationssystems im Allgemeinen verbessert werden. In klassischen

Fahrzeugnavigationssystemen wird daher oft das *Global Position System* (GPS) als Vertreter der kooperativen Verfahren mit dem autonomen Verfahren *Koppelnavigation* fusioniert. Mit Hilfe der *Koppelnavigation* werden der zurückgelegte Weg sowie die Änderung der Ausrichtung des Fahrzeuges bestimmt. Dadurch kann die Position, wenn sie einmal mit Hilfe von *Global Position System* bestimmt wurde, weitergeführt werden. Ausfälle des GPS-Systems, beispielsweise bei der Tunneldurchfahrt, lassen sich so kompensieren. In den folgenden Abschnitten werden die beiden Systeme näher vorgestellt.

### Global Position System

Das Global Positioning System (GPS) ist ein satellitengestütztes System zur weltweiten Positionsbestimmung und Zeitmessung. Es wurde vom US-Verteidigungsministerium in den frühen siebziger Jahren entwickelt. Seit Mitte der neunziger Jahre ist das System voll funktionsfähig und wurde neben der militärischen Nutzung auch für die zivile Nutzung freigegeben [35].

**Weltraumsegment:** Derzeit bilden 24 Satelliten auf konstanten Umlaufbahnen das Weltraumsegment des GPS-Systems. Die einzelnen Satelliten senden kontinuierlich ein Signal aus, bestehend aus Trägerfrequenzen, Binärcodes und der Navigationsnachricht. Dieses Signal beschreibt Position und Bahndaten des Satelliten sowie den Zeitpunkt, zu dem das Signal gesendet wurde [117].

**Positionsbestimmung durch Trilateration:** Ein GPS-Empfänger empfängt diese Signale und bestimmt anschließend die Zeiten, die die jeweiligen Signale vom Satelliten bis zum Empfänger benötigt haben. Aus diesen Zeitdifferenzen können die Entfernungen zu den jeweiligen Satelliten bestimmt werden. Anschließend kann der Empfänger seine Eigenposition mittels Trilateration bestimmen. In Abbildung 2.23 ist das Verfahren grafisch dargestellt: Die Position des Empfängers ist der Schnittpunkt der Entfernungskreise um die jeweiligen Satelliten. Allerdings werden, im Gegensatz zum zweidimensionalen Fall aus der Abbildung, drei Satelliten benötigt, um die räumliche Ausdehnung kompensieren zu können [117].

Es gibt exakt zwei Schnittpunkte. Da jedoch angenommen werden kann, dass sich der GPS Empfänger auf der Erdoberfläche - und nicht in den oberen Atmosphärenschichten - befindet und so der zweite Schnittpunkt ausgeschlossen werden kann, kann bereits mit Hilfe von drei sichtbaren Satelliten die Position bestimmt werden (2D-Fix). Soll zusätzlich noch die genaue Höhe des Empfängers über der Erdoberfläche ermittelt werden, wird eine weitere Entfernungsangabe zu einem zusätzlichen Satelliten benötigt (3D-Fix). Wenn der Empfänger die Signale von mehr als vier verschiedenen Satelliten empfangen kann, dann können die zusätzlichen Signale für die Korrektur der Ungenauigkeiten der einzelnen Zeitangaben genutzt werden. So lässt sich die Position noch genauer bestimmen.

### Koppelnavigation und Bewegungsmodelle

Die Koppelnavigation ist ein autonomes Eigenortungsprinzip, das unter Verwendung der Fahrzeugdynamikdaten die Eigenposition ermittelt. Zhao [143] beschreibt die Koppelnavigation als eine Methode zur Positionsbestimmung, wenn die Ausgangsposition so-

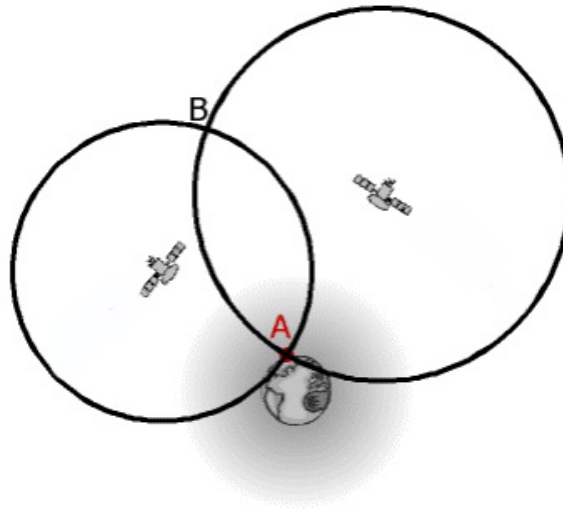


Abbildung 2.23.: Positionsbestimmung im zweidimensionalen Raum [70]

wie die durchgeführten Bewegungen des Fahrzeuges, die sogenannte Trajektorie, hinreichend genau bekannt sind. Diese Trajektorie lässt sich mit Hilfe eines Bewegungsmodells berechnen. Daher werden nachfolgend verschiedene Bewegungsmodelle vorgestellt. Anschließend werden notwendige Sensoren und die allgemeine Berechnung der Koppelnavigation erläutert.

**Schätzung der Fahrzeugtrajektorie mittels Bewegungsmodell:** Das Ziel eines Bewegungsmodells ist die Berechnung der tatsächlichen, vom Fahrzeug beschriebenen Trajektorie. Diese Trajektorie kann anschließend für die Koppelnavigation verwendet werden.

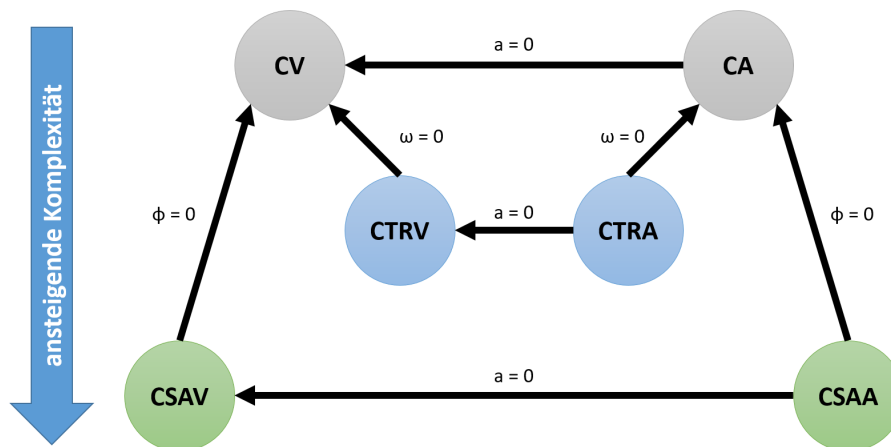


Abbildung 2.24.: Zusammenhang der verschiedenen Bewegungsmodelle

Es existiert eine Vielzahl verschiedener Bewegungsmodelle in der Literatur [120] [13]. Diese Modelle können anhand Ihrer Komplexität in verschiedene Klassen eingeteilt wer-

den. In Abbildung 2.24 sind die verschiedenen Bewegungsmodelle und deren Zusammenhang grafisch dargestellt.

Am unteren Ende der Komplexitätsskala befinden sich die linearen Bewegungsmodelle. Diese Modelle verwenden für die Berechnung der Trajektorie entweder eine konstante Geschwindigkeit (*constant velocity (CV)*) oder eine konstante Beschleunigung (*constant acceleration (CA)*). Der Vorteil dieser Modelle sind die linearen Zustandsübergangsgleichungen. Allerdings setzen diese Modelle auch einfache und geradlinige Bewegungen voraus. Dadurch sind sie nicht in der Lage, die Gierbewegung des Fahrzeuges zu betrachten [120].

Der Zustandsraum des einfachen CV Modells in der Ebene setzt sich zusammen aus der Position des Fahrzeuges in  $x$  und  $y$  sowie den jeweiligen Geschwindigkeitskomponenten  $v_x$  und  $v_y$  und lässt sich wie folgt beschreiben

$$\vec{x}(t) = (x \quad v_x \quad y \quad v_y)^T$$

Mit der Zustandsübergangsgleichung:

$$\vec{x}(t+T) = \begin{pmatrix} x(t) + Tv_x \\ v_x \\ y(t) + Tv_y \\ v_y \end{pmatrix}$$

Kurvenförmigen Bewegungsmodelle stellen das nächste Komplexitätslevel dar. Diese Modelle betrachten zusätzlich die Gierbewegung des Fahrzeuges. Dadurch ist die Beschreibung von kurvenförmigen Bewegungen des Fahrzeuges möglich. Das einfachste Bewegungsmodell der zweiten Ebene basiert auf konstanter Drehrate und Geschwindigkeit (*constant turn rate and velocity (CTRV)*). Durch die Annahme, dass sich die Geschwindigkeit nur linear ändert, kann statt der Geschwindigkeit die Ableitung der Geschwindigkeit konstant gehalten werden. Es entsteht das Bewegungsmodell mit konstanter Drehrate und Beschleunigung (*constant turn rate and acceleration (CTRA)*) [120].

Der Zustandsraum des CV Modells muss also um die Orientierung  $\Theta$ , die Beschleunigung  $a$  sowie die Drehrate  $\omega$  erweitert werden und stellt sich wie folgt dar:

$$\vec{x}(t) = (x \quad y \quad \Theta \quad v \quad a \quad \omega)^T$$

Daraus folgt die Zustandsübergangsgleichung für dieses Modell:

$$\vec{x}(t+T) = \begin{pmatrix} x(t+T) \\ y(t+T) \\ \Theta(t+T) \\ v(t+T) \\ a \\ \omega \end{pmatrix} = \vec{x}(t) + \begin{pmatrix} \Delta x(T) \\ \Delta y(T) \\ \omega T \\ aT \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

mit

$$\begin{aligned} \Delta x(T) = & \frac{1}{\omega^2} [(v(t)\omega + a\omega T) \sin(\Theta(t) + \omega T) \\ & + a \cos(\Theta(t) + \omega T) \\ & - v(t)\omega \sin \Theta(t) - a \cos \Theta(t)] \end{aligned}$$

und

$$\begin{aligned}\Delta y(T) = & \frac{1}{\omega^2} [(-v(t)\omega - a\omega T) \cos(\Theta(t) + \omega T) \\ & + a \sin(\Theta(t) + \omega T) \\ & + v(t)\omega \cos \Theta(t) - a \sin \Theta(t)]\end{aligned}$$

Beide Modelle treffen die Annahme, dass es keine Wechselwirkung zwischen Geschwindigkeit und Drehrate gibt. Dadurch könnte eine fehlerhafte Messung der Drehrate auch im Stand des Fahrzeuges zu einer Veränderung des Drehwinkels führen. Dies kann durch die Modellierung dieser Wechselwirkung mit Hilfe des Lenkwinkels als zusätzliche konstante Variable vermieden werden. Das Ergebnis ist ein Bewegungsmodell mit konstantem Lenkwinkel und konstanter Geschwindigkeit (*constant steering angle and velocity(CSAV)*). Auch bei diesem Modell kann eine lineare Änderung der Geschwindigkeit durch Konstanthalten der Beschleunigung erlaubt werden. Es entsteht ein Bewegungsmodell mit konstantem Lenkwinkel und konstanter Beschleunigung (*constant steering angle and acceleration(CSAA)*) [120].

Darüber hinaus haben Schubert et al. die Modelle CV, CTRV, CTRA und CSAA analysiert und gegeneinander verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Fahrzeugbewegung mit CTRV, CTRA und CCA deutlich besser darstellen lässt als mit dem einfachen CV Modell. Vor allem bei Fahrzeugbewegungen mit hohen Krümmungswerten zeigen die Modelle, welche die Drehrate des Fahrzeuges mitmodellieren, deutlich weniger Fehler in der Positionsschätzung des Fahrzeuges. Weiterhin scheint der Gewinn an Genauigkeit in der Positionsschätzung des Fahrzeuges durch Verwendung des CSAA Modell gegenüber dem CTRA Modell sehr gering zu sein. Daher empfehlen Schubert et al., für die Positionsschätzung des Fahrzeuges aufgrund des deutlich geringeren Berechnungsaufwandes, das CTRA Modell zu verwenden [120].

**Sensoren:** Für die Koppelnavigation müssen daher Sensoren verfügbar sein, welche zum einen den zurückgelegten Weg  $s$  des Fahrzeuges und zum anderen die Orientierung  $\Theta$  bzw. die Änderung der Orientierung  $\Delta\Theta$  erfassen können [143]. Für sehr kleine Abtastzeiten  $T$  entspricht die Drehrate  $\omega$  der Orientierungsänderung  $\Delta\Theta$ .

Der zurückgelegte Weg des Fahrzeuges kann mit Hilfe eines Odometriesensors erfasst werden. Ein Odometriesensor zählt die Umdrehungen der Räder des Fahrzeuges. Da der Durchmesser  $d$  der Räder bekannt ist, kann aus der Anzahl  $n$  der Radumdrehungen der zurückgelegte Weg  $s$  berechnet werden:

$$s = \pi \cdot d \cdot n$$

Da sich der Raddurchmesser aufgrund von Reifenabnutzung und Reifendruckänderung über die Zeit verändert, muss in regelmäßigen Abständen der Wert für den Durchmesser neu bestimmt werden.

Für die Bestimmung der Fahrzeugrichtung können Gyroskope verwendet werden. Gyroskope sind Sensoren, welche die Drehraten basierend auf der Corioliskraft messen.

**Allgemeine Berechnung:** Nachdem mit Hilfe der Sensoren der zurückgelegte Weg  $s_i$ , die Richtung der Bewegung  $\Theta_i$  sowie die Drehrate des Fahrzeuges  $\omega_i$  in der Zeit von  $t_{n-1}$  bis  $t_n$  bestimmt worden ist, können die Position  $(x_n, y_n)$  sowie die Orientierung  $(\theta_n)$  des Fahrzeuges zum Zeitpunkt  $t_n$  mit Hilfe der folgenden Gleichungen bestimmt werden[143]:

$$x_n = x_0 + \sum_{i=0}^{n-1} s_i \cos \theta_i$$

$$y_n = y_0 + \sum_{i=0}^{n-1} s_i \sin \theta_i$$

$$\theta_n = \sum_{i=0}^{n-1} \omega_i$$

Falls die Abtastrate  $T$  konstant sowie relativ klein im Verhältnis zur Änderungsrate der Dynamikgrößen des Fahrzeuges ist, können die bereits beschriebenen Gleichungen 2.2.2 sowie 2.2.2 des CTRA Modells verwendet werden. Mathematisch betrachtet, entspricht diese Methode der sukzessiven Aneinanderreihung mehrerer Bewegungsvektoren an einem definierten Startpunkt, wie in Abbildung 2.25 für drei Bewegungsschritte dargestellt.

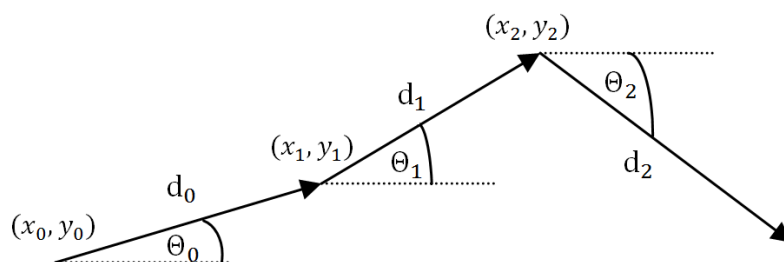


Abbildung 2.25.: Prinzip der Koppelnavigation

Die aktuell zu bestimmende Position ist abhängig von den Messungen der letzten Abtastperiode sowie der zuletzt bestimmten Position. Dadurch ist es schwer, Fehler zu eliminieren, die während der letzten Messungen auf Grund von Sensorungenauigkeiten entstanden sind. Eine so bestimmte Position ist deshalb anfällig für Fehler. Wenn diese Fehler nicht beseitigt oder korrigiert werden, akkumulieren sie sich während der Fahrt des Fahrzeuges. Dadurch wird die durch Koppelnavigation bestimmte Position von Messung zu Messung ungenauer.

Es ist möglich, die akkumulierten Fehler mit bestimmten Methoden zu erkennen und zu entfernen. Eine dieser Methoden besteht darin, die Koppelnavigation mit GPS zu verbinden, da das GPS System eine weitere Positionsangabe liefert und diese als neue Referenzposition genommen werden kann. Dadurch verringern sich die Fehler, die durch die Koppelnavigation entstehen. Wenn das GPS Signal aufgrund von Tunneln oder hohen Häuserschluchten nicht verfügbar ist, kann auf die reine Koppelnavigation zurückgegriffen werden, um für kurze Strecken weiterhin über eine Positionsbestimmung zu verfügen.

### Abbildung der Fahrzeugposition in die digitale Karte

Nachdem die Position des Fahrzeuges geschätzt wurde, muss ein Abgleich (Matching) dieser Positionsschätzung mit der digitalen Karte (Map) erfolgen, also die aktuelle Position innerhalb des Navigationsgraphen der digitalen Straßenkarte abgebildet werden. Dieser Prozess ist allgemein bekannt als Map-Matching [58].

Das Ergebnis des Map-Matching-Prozesses ist eine Position, beschrieben durch das aktuell befahrene Straßensegment (Link) sowie die Entfernung des Fahrzeuges vom Startpunkt dieses Segmentes (Offset). Diese Position ist der Ausgangspunkt für alle weiteren Navigationsalgorithmen. Nur wenn die eigene Position innerhalb des Navigationsgraphen der digitalen Straßenkarte bekannt ist, kann ein Routenplanungsalgorithmus die beste Route zum gewünschten Zielort finden und den Fahrer entlang dieser Route führen.

Die in den vorherigen Abschnitten gezeigten Fehler innerhalb der digitalen Straßenkarten sowie die Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der Fahrzeugposition erschweren das Map-Matching. Jedoch können gute Map-Matching-Algorithmen die Fehler teilweise erkennen und beseitigen und so die aktuelle Position im Straßennetzwerk genau bestimmen.

An dieser Stelle sei auf die Zusammenfassung von Quddus, Ochieng und Noland [103] verwiesen. Sie gibt einen Überblick über verschiedene Map-Matching-Verfahren und unterteilt diese in vier Gruppen: geometrische Verfahren, topologische Verfahren, probabilistische Verfahren sowie erweiterte Verfahren [103].

**Verfeinerung der Position durch Fahrstreifeninformation:** Die meisten Map-Matching-Verfahren bestimmen lediglich die Position des Fahrzeuges innerhalb der Topologie des digitalen Straßennetzwerkgraphen. Es wird also nur die aktuell befahrene Straße, aber nicht der aktuell befahrene Fahrstreifen bestimmt. Für die meisten klassischen Navigationsaufgaben, wie beispielsweise Routenberechnung und einfache Zielführung, ist dies völlig ausreichend. Allerdings werden die Kenntnis über den aktuell befahrenen Fahrstreifen sowie der Verlauf der einzelnen Fahrstreifen für zukünftige Navigationsfunktionen immer wichtiger [58]. Deshalb werden in diesem Abschnitt einzelne Ansätze erwähnt, die eine fahrstreifengenaue Positionierung ermöglichen.

**Genauigkeitsanforderungen für klassische Verfahren:** Böhm [17] nennt in seiner Arbeit die Anforderungen an die Genauigkeit der Positionierungssensorik sowie der digitalen Karte, um eine Positionierung des Fahrzeuges auf Fahrstreifenebene zu realisieren. So wird für eine fahrstreifengenaue Lokalisierung des Fahrzeuges eine Genauigkeit der Positionsangabe von  $\pm 1$  Meter in Transversalrichtung und  $\pm 30$  Meter in Longitudinalrichtung benötigt. Zusätzlich erschwert noch die begrenzte Auflösung der Karte die direkte Abbildung der Positionsangabe auf die Karte. Aktuelle Navigationskarten haben eine Auflösung von einem Mikrograd, das entspricht einer Auflösung im Meterbereich. Ein weiteres Problem aktueller Karten besteht darin, dass es lediglich Knoten-Kanten-Modelle sind, welche die Mitte des Fahrbahnverlaufs der Straße modellieren. Die bereits erwähnten erweiterten Fahrstreifeninformationen beinhalten die genaue Anzahl der Fahrstreifen und deren Verbundenheit als Attribut, jedoch nicht die Information über die Breite der einzelnen Fahrstreifen oder gar die Geometrien der Fahrstreifenbegrenzungen.



**Map-Matching auf Fahrstreifen mittels DGPS:** DuBarth hat ein Map-Matching auf Fahrstreifenebene aufgebaut. Sein Verfahren basiert auf einem Differential GPS (DGPS) sowie speziell erzeugten Navigationskarten. Mit Hilfe des DGPS Systems konnte eine Positionierungsgenauigkeit im Bereich von 0,1 m bis 4,0 m erreicht werden. Die verwendeten Karten wurden aus georeferenzierten Luftbildaufnahmen vom Testgebiet erzeugt. Das Knoten-Kanten-Modell in diesen Karten modelliert statt der Straßensegmente die einzelnen Fahrstreifen. Mit Hilfe eines erweiterten curve-to-curve Matchingalgorithmus werden die genaueren Positionsangaben auf die Kanten, und somit die Fahrstreifen, abgebildet [32].

**Fahrstreifenbestimmung mittels Kamera:** Mit Hilfe der verfügbaren Informationen in der digitalen Karte kann die tatsächliche Anordnung der einzelnen Fahrstreifen zu großen Teilen abstrahiert werden. In Kombination mit einem entsprechenden Kamerasystem kann auf Grundlage dieser abstrahierten Informationen der jeweils aktuell befahrene Fahrstreifen ermittelt werden. Durch eine Kombination aus den geometrischen Verläufen der einzelnen Links, dem Wissen über die Anzahl der vorhandenen Fahrstreifen sowie deren Verbundenheit untereinander kann für die meisten Straßenabschnitte berechnet werden, wie viele Fahrstreifen vorhanden sein müssten, von welcher Richtung neue Fahrstreifen hinzukommen oder wegfallen und welche Markierung die einzelnen Ränder der Fahrstreifen aufweisen müssten. Mit Hilfe eines entsprechenden Kamerasystems können der Abstand zu den beiden benachbarten Fahrstreifen sowie der Typ der entsprechenden Randmarkierung erkannt werden. Aus dem Typ der Randmarkierung kann ein erster Hinweis auf die entsprechende Straßenseite erzeugt werden, und mit Hilfe des Abstandes zu den jeweiligen Fahrstreifenrändern lassen sich Fahrstreifenwechsel entsprechend detektieren [58].

Erkenntnisse aus ersten Prototypen zeigen, dass der aktuell befahrene Fahrstreifen mit diesem Ansatz bereits auf Basis heutiger Kartendaten und der verfügbaren Kamerasysteme in den meisten Fällen zuverlässig ermittelt werden kann [58] [59]. Durch Verwendung entsprechender statistischer Modelle, wie beispielsweise Partikelfilter, konnte Eckel die Robustheit der Erkennung steigern [33]. Eine weitere Möglichkeit der Optimierung hat Simon mit der Verwendung von geometrischen Verfahren für die kurzfristige Überbrückung von Detektionsausfällen im Kamerasystem gezeigt [122].

### 2.2.3. Koordinatensysteme

Mit Hilfe von Koordinatensystemen kann die Position eines Punktes im Raum angegeben werden. Allerdings existiert eine Vielzahl verschiedener Koordinatensysteme. Im Rahmen dieser Arbeit werden aufgrund der verschiedenen Arten der Positionsangaben zwei verschiedene Koordinatensysteme verwendet. Zum einen das Fahrzeugkoordinatensystem für die Angabe von Positionen relativ zum Fahrzeug und zum anderen das Gradnetz der Erde zur Angabe von geographischen Positionen mittels Längen- und Breitengrad.

#### Fahrzeugkoordinatensystem

Das Koordinatensystem des Fahrzeuges ist ein dreidimensionales, rechtshändiges, kartesisches Koordinatensystem [121]. Für diese Arbeit wird die Orientierung und Lage dieses Koordinatensystems wie in Abbildung 2.26 dargestellt festgelegt. Der Koordinatenursprung des Systems befindet sich im Mittelpunkt einer gedachten Verbindungslinie der

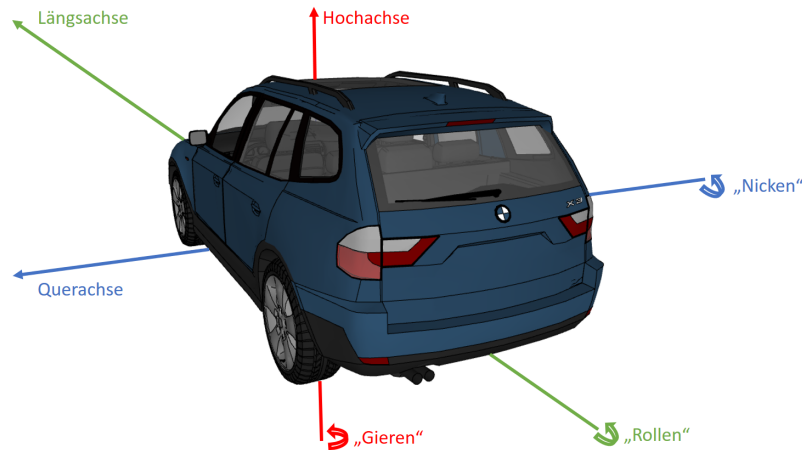


Abbildung 2.26.: Darstellung des Fahrzeugkoordinatensystems

beiden vorderen Fahrzeugrädern. Die Abszisse (x-Achse) verläuft entlang der Längsachse des Fahrzeuges und zeigt in Fahrtrichtung, die Ordinate (y-Achse) zeigt zur linken Seite des Fahrzeuges und verläuft entlang der Querachse und die Applikate (z-Achse) entspricht der Hochachse des Fahrzeuges und zeigt nach oben.

Durch Kombination der folgenden Elementarbewegungen lassen sich alle Bewegungsmöglichkeiten des Fahrzeuges beschreiben:

- Längsbeschleunigung: Eine Beschleunigung des Fahrzeuges entlang der x-Achse
- Querbeschleunigung: Eine Beschleunigung des Fahrzeuges entlang der y-Achse
- Vertikalbeschleunigung: Eine Beschleunigung des Fahrzeuges entlang der z-Achse
- Nicken: Eine Rotationsbewegung des Fahrzeuges um die y-Achse
- Gieren: Eine Rotationsbewegung des Fahrzeuges um die z-Achse
- Wanken: Eine Rotationsbewegung des Fahrzeuges um die x-Achse

### Geographische Länge und Breite

Das Gradnetz der Erde besteht aus 360 Längengraden und 180 Breitengraden, imaginären Kreislinien entlang der Erdoberfläche. Die Längengrade verlaufen vom Nord- zum Südpol und die Breitengrade parallel zum Äquator, dem längsten Breitengrad, welcher die Erde in die Nord- und Südhalbkugel teilt (siehe Abbildung 2.27). Mit Hilfe der geographischen Koordinaten, der Kombination von Längen- und Breitengrad, lässt sich die Lage eines beliebigen Punktes auf der Erdoberfläche beschreiben.

Aufgrund dieser Einteilung entsteht ein nichtlineares Koordinatensystem. Ohne eine entsprechende Transformation der geographischen Koordinaten in die Ebene ist eine Entfernungsangabe entlang der Erdoberfläche zwischen zwei Koordinaten nicht möglich.

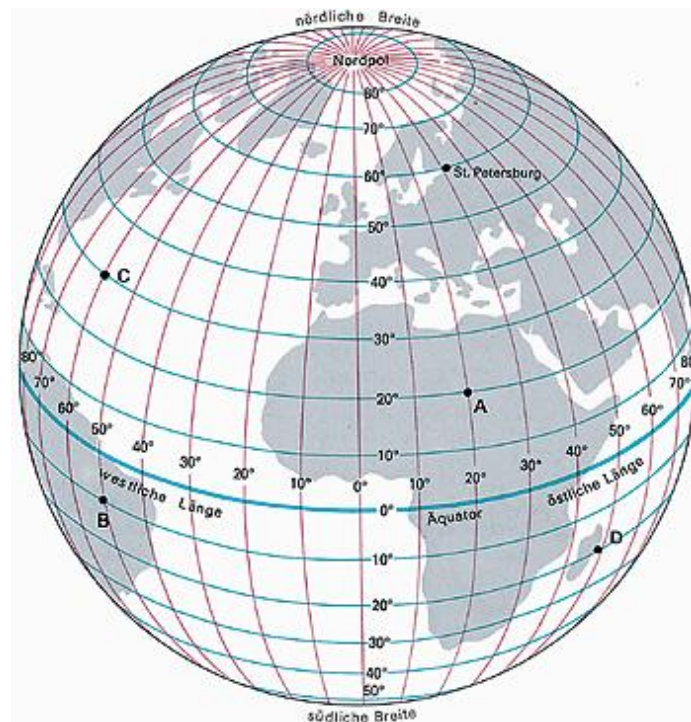


Abbildung 2.27.: Gradnetz der Erde mit Längen- und Breitengraden [113].

Der Abstand zwischen zwei Breitengraden und somit auch die Entfernung, die einem Grad geographische Breite entspricht, beträgt 111,32 km. Da die Längengrade aufgrund ihrer Lage nicht parallel zueinander verlaufen, beträgt der Abstand zwischen zwei Längengraden nur entlang des Äquators ebenfalls 111,32 km. Allerdings nimmt diese Entfernung mit zunehmender Entfernung vom Äquator ab. Die genauere Entfernung ( $L$ ) zweier Längengrade bei entsprechender geographischer Breite ( $B$ ) lässt sich unter der Annahme, die Erde sei eine Kugel, mit Hilfe folgender Funktion berechnen:

$$\delta L(B) = 111,32 \cdot \cos B$$

Somit entspricht der Unterschied von einem Grad Länge in München bei ca.  $48^\circ$  geographischer Breite einer Entfernung von circa 74 km.

### Transformation in die Ebene

Die Transformation der ellipsoidischen Koordinaten in Form von Winkelkoordinaten in die Ebene ermöglicht die Arbeit mit kartesischen Methoden. Im Bereich der Navigation wird im Allgemeinen die Mercator-Projektion für diese Transformation verwendet.

Der Versuch, die Oberfläche einer Kugel durch Zerschneiden unverzerrt in eine Ebene zu übertragen, führt dazu, dass Orte, die auf der Kugeloberfläche direkt benachbart waren, in der Ebene nicht mehr direkt benachbart sind. In Abbildung 2.28 ist auf der linken Seite solch ein mögliches Schnittmuster dargestellt [75].

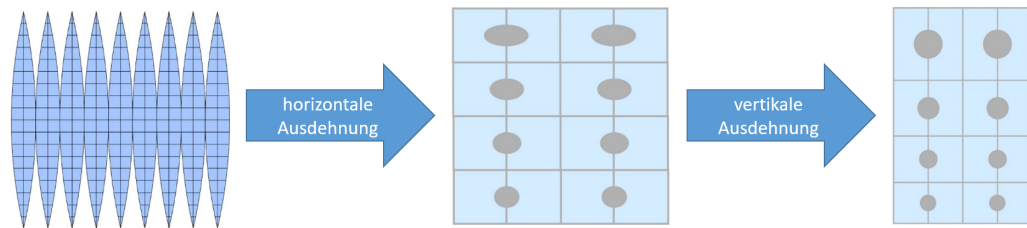


Abbildung 2.28.: Von der Kugeloberfläche zur Ebene: Schnittmuster, Verformung und lokale Korrektur [75].

Durch Ausdehnung der Flächen in horizontaler Richtung können diese Lücken überwunden werden, sodass benachbarte Orte auch in der Ebene wieder benachbart sind. Allerdings führt dies zusätzlich zu einer Verformung der Objekte. Diese Verformung ist deutlich in der mittleren Darstellung in Abbildung 2.28 zu erkennen. Auf der Kugeloberfläche und vor der Ausdehnung waren die Objekte ideale Kreise. Nach der Ausdehnung sind die oberen Kreise zu Ellipsen verformt [75].

Bei der Mercator-Projektion wird diese Verformung minimiert, indem Ausdehnung nicht nur in horizontaler Richtung geschieht, sondern die gleiche Ausdehnung zeitgleich auf die vertikale Richtung angewendet wird. Dadurch entsteht ein lokal einheitlicher Maßstab und die Objekte behalten ihre ursprüngliche Form. Allerdings kommt es, wie in Abbildung 2.28 rechts dargestellt, in steigender vertikaler Richtung zu einer Vergrößerung der Objekte [75]. Aus diesem Grund ist Grönland auf Landkarten mit der gleichen Größe wie Afrika abgebildet. Obwohl die Gesamtfläche von Grönland ( $2\,166\,000\text{ km}^2$ ) fast 14 Mal kleiner als der Kontinent Afrika ( $30\,370\,000\text{ km}^2$ ) ist.

Die Winkeltreue ist die wichtigste Eigenschaft der Mercator-Projektion. Die Winkeltreue führt in kleinen Bereichen zu einem konstanten Längenmaßstab in alle Richtungen. Allerdings bleibt der Längenmaßstab aufgrund der Abbildung nur entlang ausgewählter Linien konstant. Dadurch ist die Mercator-Projektion nicht flächentreu. Da die Winkeltreue auch zur Achsentreue führt, findet die Mercator-Projektion in fast allen abgebildeten Navigationskarten Anwendung, da die Nordrichtung in allen Kartenausschnitten gleich ist.

Es existieren verschiedene Ausprägungen der Mercator-Projektion. Für kleine Kartenausschnitte werden im Bereich der Vermessung sowohl die *Gauß-Krüger-Projektion* als auch die *Universale Transversale Mercator-Projektion (UTM)* verwendet. Beide ermöglichen die Abbildung der ellipsoidischen Koordinaten in kartesische Koordinaten. Bei hinreichend kleinen Ausschnitten können die bekannten mathematischen Verfahren von kartesischen Systemen sowie deren Darstellungsverfahren angewendet werden.

### 2.2.4. Routenberechnung

Damit das System den Fahrer bei seiner Navigationsaufgabe unterstützen kann, muss es in der Lage sein, auf Basis der digitalen Karte den besten Weg zwischen der aktuellen Fahrzeugposition und dem gewählten Ziel zu berechnen. Dieser Vorgang wird allgemein als Routenberechnung bezeichnet. Für diese Arbeit werden allgemeine Methoden der Routenberechnung verwendet, da die Berechnung der Route nur eine hinreichende Bedingung für die Evaluierung der verschiedenen Konzepte ist. Das heißt, die Route stellt lediglich

die Basis für die anschließende Wegführung dar. Daher folgt an dieser Stelle nur ein kurzer Überblick über das Thema. Für einen entsprechend tieferen Einstieg in das Thema sei auf entsprechende Literatur verwiesen ([105] und [81]).

Für die Berechnung einer Route können bekannte Algorithmen aus der Graphentheorie zur Berechnung des kürzesten Pfades (wie beispielsweise Dijkstras kürzester Pfad Algorithmus [29] oder der A\* - Algorithmus [51]) verwendet werden. Damit diese Algorithmen auf der digitalen Navigationskarte arbeiten können, müssen den einzelnen Straßensegmenten, welche in der Karte durch Kanten repräsentiert werden, entsprechende Kosten zugeteilt werden. Diese Kosten basieren unter anderem auf den bereits in der Karte gespeicherten Attributen der einzelnen Kanten: Straßenklasse, erwartete Geschwindigkeit, Länge, besondere Einschränkungen. Die Straßenklasse unterscheidet zwischen verschiedenen länderspezifischen Klassen, wie beispielsweise Autobahn, Bundesstraße oder Landstraße. Aus historischen Daten kann jedem Straßensegment während des Erstellungsprozesses der digitalen Karte ein Erwartungswert für die gefahrene Geschwindigkeit zugeordnet werden. Die Länge des jeweiligen Straßensegments kann genutzt werden, um den kürzesten Weg zu bestimmen oder in Verbindung mit der Geschwindigkeit auch den schnellsten Weg zu bestimmen. Darüber hinaus gibt es noch weitere Einschränkungen, wie beispielsweise Durchfahrtsverbote für bestimmte Fahrzeugklassen oder Mautpflicht.

Heutige Navigationssysteme bieten dem Nutzer eine Vielzahl verschiedener Kriterien, nach denen die Route optimiert werden kann. Zu den geläufigsten zählen:

- Kurze Route: eine Route mit der geringsten Fahrstrecke
- Schnelle Route: eine Route mit möglichst kurzer Fahrtzeit
- Eco Route: eine Route, optimiert auf minimalen Kraftstoffverbrauch

Da zum einen die Routenberechnung die Grundlage für alle weiteren Navigationsfunktionen darstellt und es zum anderen auch während der Fahrt notwendig sein kann, die Route erneut zu berechnen, muss die Routenberechnung möglichst schnell erfolgen. Dazu können verschiedene Methoden zur Optimierung verwendet werden [140]:

- Zwischenspeichern: Ablage der notwendigen Daten in schnelleren, aber flüchtigen Speichern, nachdem diese einmal von langsamen Datenträgern gelesen wurden.
- Verwendung von Datenhierarchien: In der digitalen Karte werden die Straßen in verschiedenen Levels gemäß ihrer Straßenklasse ausgedünnt. Dadurch muss nur in der Nähe des Starts und des Ziels der kürzeste Weg zur nächsten Fernverbindung in komplexen Straßennetzwerken gesucht werden. Anschließend kann das Netzwerk auf das Fernstraßennetzwerk reduziert werden.
- Vorberechnung: In der digitalen Karte oder in einer parallelen Datenbank werden vorberechnete Teilrouten für die spätere Verwendung gespeichert.

Nachdem die Routenberechnung eine entsprechende Route berechnet hat, wird diese anderen Komponenten im Navigationssystem, wie beispielsweise der Wegführung, zur Verfügung gestellt.

### 2.2.5. Wegführung

Die Wegführung hat die Aufgabe, den Fahrer mittels Manöver entlang seiner gewählten Route zum Ziel zu führen. Dazu werden zunächst alle relevanten Manöver entlang der Route bestimmt und dem Fahrer anschließend präsentiert. Dazu können neben akustischen Hinweisen auch verschiedene visuelle Darstellungsformen verwendet werden.

#### Manöver

Der Verlauf einer Route kann durch die Aneinanderreihung verschiedener Manöver definiert werden. Dabei beschreibt ein Manöver eine vom Fahrer auszuführende, notwendige Aktion, um dem Verlauf der Route weiterhin zu folgen. Typische Manöver sind Abbiegen an Kreuzungen, Verlassen eines Kreisverkehrs, Auf- und Abfahren von bestimmten Straßen sowie das Wenden. Darüber hinaus können Manöver auch abstrahierte Hinweise sein, die keine direkte Aktion des Fahrers zur Folge haben. Mit Hilfe dieser abstrakten Hinweise, wie beispielsweise *Geradeausfahrt* oder *Das Ziel ist erreicht*, kann die Wegführung eventuelle Unsicherheit beim Fahrer reduzieren.

**Aufschaltzeitpunkt:** Über den Abstand zwischen der aktuellen Fahrzeugposition und dem Manöverpunkt, also dem Ort, an dem das Manöver durchgeführt werden muss, wird der sogenannte *Aufschaltzeitpunkt'* eines Manövers definiert. Dabei kann der Abstand sowohl auf der Wegstrecke als auch auf der benötigten Zeit für diese Wegstrecke basieren.

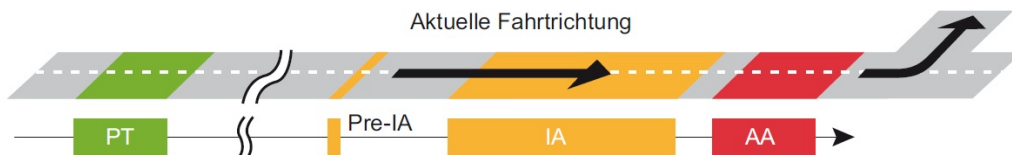


Abbildung 2.29.: Zeitlicher Ablauf der verschiedenen Manöverphasen [108]

**Manöverphasen:** Wie in Abbildung 2.29 dargestellt, durchläuft ein Manöver während der Annäherung an den Manöverpunkt verschiedene Phasen. In der folgenden Auflistung werden die von Reif [108] vorgeschlagenen Phasen sowie deren Übersetzung und die entsprechende Bezeichnung innerhalb von BMW-Systemen aufgeführt.

- Plain Text Announcement (PT): Texthinweis beziehungsweise *Unnotify*
- Pre-Information Announcement (Pre-IA): Vorankündigung beziehungsweise *Notify*
- Information Announcement (IA): Vorbereitung beziehungsweise *Prepare*
- Activation Announcement (AA): Durchführung beziehungsweise *Execute*

Die einzelnen Manöverphasen gewichten das Manöver von *rein informativ* bis *sehr dringlich*. Mit Hilfe dieser Phasen kann das Navigationssystem entscheiden, ob und mit welchen Mitteln der Fahrer auf das jeweilige Manöver hingewiesen wird.

**Texthinweis:** Solange sich das Manöver in der Texthinweisphase befindet, wird der Fahrer lediglich über das Vorhandensein des nächsten Manövers informiert. Dadurch vermittelt das Navigationssystem dem Fahrer, dass die Wegführung aktiv ist, aber derzeit kein Handlungsbedarf besteht.

**Vorankündigung:** Mit dem Übergang zur Vorankündigungsphase wird die entsprechende Präsentation der Wegführung aktiv. Dadurch wird dem Fahrer mitgeteilt, dass demnächst Handlungsbedarf besteht, um weiterhin der Route zu folgen.

**Vorbereitung:** Während der Vorbereitungsphase wird der Fahrer auf das bevorstehende Manöver vorbereitet. Dazu versucht das Navigationssystem dem Fahrer so viele Informationen wie möglich über das bevorstehende Manöver zu präsentieren. Dazu zählen die Art des Manövers sowie eine mögliche Beschreibung der Kreuzungssituation. Darüber hinaus wird der Fahrer spätestens in dieser Phase auf den optimalen Fahrstreifen hingewiesen.

**Durchführung:** In unmittelbarer Nähe zum Manöver wird der Fahrer vom Navigationssystem durch das Manöver geleitet. Dazu teilt das Navigationssystem dem Fahrer die genaue Art des Manövers und die exakte Lage des Manöverpunktes mit. Diese Hinweise werden mit einer entsprechenden Dringlichkeit präsentiert, sodass der Fahrer diese als direkte Handlungsanweisung wahrnimmt.

**Phasenmodell und kombinierte Manöver:** Die einzelnen Phasen der jeweiligen Manöver bauen aufeinander auf. Solange die Route nicht geändert wird und der Fahrer dem Verlauf der Route folgt, ist ein Zurückfallen in eine vorangegangene Phase ausgeschlossen. Es ist allerdings möglich, dass ein Manöver die ersten Phasen überspringt und direkt in einer höheren Phase initialisiert wird. Dies ist vor allem der Fall, wenn zwei aufeinanderfolgende Manöver einen sehr geringen Abstand haben. In diesen Fällen können die beiden Manöver direkt miteinander kombiniert werden. Dadurch kann das Navigationssystem den Fahrer bereits während des ersten Manövers auf die nachfolgenden hinweisen.

### Akustische Wegführung

Die akustische Wegführung nutzt Sprachausgaben, um den Fahrer entlang seiner Route zu führen. Dazu erzeugt das System, basierend auf dem Inhalt der jeweiligen Manöver und deren Phasen, entsprechende Sprachansagen. Neben dem flexiblen Sprachsyntheseverfahren *Text-to-Speech (TTS)* kann das Navigationssystem auch Textbausteine, welche im Vorfeld aufgezeichnet wurden (*pre-recorded-voice*), verwenden.

Da die einzelnen Textbausteine von einem professionellen Sprecher gesprochen werden, erzeugt das Navigationssystem damit Ausgaben, die dem natürlichen Sprachbild sehr nahe sind [82]. Allerdings ist die Wegführung dann durch die verfügbaren Textbausteine beschränkt.

Die Verwendung von Sprache als Übertragungsmedium birgt den großen Vorteil, dass dem Fahrer Informationen mitgeteilt werden können, ohne dass er den Blick von der Straße abwenden muss. Allerdings ist die auditive Wahrnehmung des Menschen schwächer ausgeprägt als die visuelle Wahrnehmung [67]. Darüber hinaus können die Sprachansagen

als störend empfunden werden, wenn sie beispielsweise ein Gespräch unterbrechen oder die abgespielte Musik überlagern. Für das Wohlbefinden des Fahrers und eine hohe Akzeptanz des Systems sind die Aufdringlichkeit, der Informationsgehalt und der Zeitpunkt der Ansagen entscheidend [47].

### Visuelle Wegführung

Neben der akustischen Wegführung nutzen Navigationssysteme im Allgemeinen auch die visuelle Darstellung der entsprechenden Manöver. Je nach Verwendungszweck kann das Navigationssystem zwischen zwei Ausprägungen der Darstellungsform wählen: die Routendarstellung und die Schritt für Schritt-Navigation.

**Routendarstellung:** Die Routendarstellung präsentiert allgemeine Informationen über die Route in Textform sowie eine Darstellung der Karte mit Hervorhebung der gewählten Route. Dabei kann die Karte in verschiedenen Vergrößerungsstufen und aus verschiedenen Perspektiven dargestellt werden.

Für die unmittelbare Wegführung ist eine in Fahrtrichtung ausgerichtete Darstellung der Karte von Vorteil [5]. Die anderen Darstellungsformen unterstützen den Fahrer ebenfalls bei der Navigationsaufgabe, indem sie Überblickswissen über die Route vermitteln (siehe Abschnitt 3.2).

**Schritt für Schritt-Navigation:** Die Schritt für Schritt-Navigation führt den Fahrer mit Hilfe konkreter Handlungsanweisungen sowie abstrahierter Manöverdarstellungen entlang seiner Route. Dabei wird der Fahrer auf notwendige Richtungs- oder Fahrstreifenwechsel hingewiesen. Die dazu genutzten Elemente werden im Abschnitt 2.2.6 vorgestellt.

### Abweichungserkennung

Neben der Vermittlung der notwendigen Informationen, die der Fahrer benötigt, um den Routenverlauf einzuhalten, überprüft die Wegführung zusätzlich, ob der Fahrer tatsächlich dem geplanten Verlauf der Route folgt. Sollte der Fahrer vom Verlauf der Route abweichen, so wird diese Abweichung von der Wegführung erkannt und eine entsprechende Neuberechnung der Route veranlasst.

#### 2.2.6. Übersicht der Elemente in klassischen Wegführungskonzepten

Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, durchlaufen die Navigationsanweisungen bei der Annäherung an ein bevorstehendes Manöver die drei wesentlichen Navigationsphasen: *Notify*, *Prepare* und *Execute*.

Klassische Navigationssysteme präsentieren dem Fahrer in den verschiedenen Navigationsphasen entsprechende grafische Elemente zur Unterstützung bei der Wegführung. Dabei nimmt die dargestellte Informationsdichte mit der Nähe zum Manöver in den jeweiligen Phasen zu. Nachfolgend werden die grafischen Elemente in den jeweiligen Phasen am Beispiel des Navigationssystems in aktuellen BMW-Fahrzeugen vorgestellt.



### Grafische Elemente der *Notify*-Phase

Während der *Notify*-Phase hat das Fahrzeug noch einen großen Abstand zum nächsten Manöver und der Fahrer entsprechend viel Zeit. Daher wird er in der *Notify*-Phase nur dezent auf das vor ihm liegende Manöver hingewiesen. Die geschieht mit den in Abbildung 2.30 gezeigten und nachfolgend beschriebenen Elementen.



Abbildung 2.30.: Grafische Elemente der Wegführung während der *Notify*-Phase

**Routenrichtungspfeil:** Der Routenrichtungspfeil zeigt, ausgehend von der aktuellen Orientierung des Fahrzeuges, in Richtung des unmittelbaren Verlaufs der gewählten Route. Vor allem wenn die Route auf Grund von kurvigen Straßen und etwaigen Umwegen nicht direkt zum gewählten Ziel zeigt, kann der Routenrichtungspfeil sehr hilfreich für den Fahrer sein.

**Manöverpfeil:** Durch die Abstraktion des nachfolgenden Manövers in eine von acht möglichen Manöverklassen und die entsprechende Darstellung in Form eines Pfeiles kann der Manöverpfeil dem Fahrer in Verbindung mit dem Routenrichtungspfeil einen entsprechenden Hinweis auf die Art des nächsten Manövers geben. So kann sich der Fahrer bereits frühzeitig mental auf das bevorstehende Manöver einstellen.

**Entfernungsangabe:** Die Darstellung der Entfernung bis zum nächsten Manöver in alphanumerischer Form vermittelt dem Fahrer eine bessere Abschätzung der Zeit, die noch benötigt wird, bis das Manöver ausgeführt werden muss. Dadurch gewinnt er zusätzliche Sicherheit, während er sich mit Hilfe der anderen Hinweise auf die Durchführung des Manövers vorbereitet.

**Straßenname:** Durch Angabe des Namens der aktuell befahrenen Straße sowie der Zielstraße des jeweiligen Manövers wird dem Fahrer ein zusätzliches Hilfsmittel an die Hand gegeben, um die Informationen aus dem Navigationssystem in die Realität zu übertragen. Er erhält dadurch die Möglichkeit, die in der Umgebung verfügbaren Schilder mit Straßennamen ebenfalls für seine Navigationsaufgabe zu verwenden.

### Grafische Elemente der *Prepare*-Phase

Kurz bevor das Fahrzeug die Stelle des Manövers erreicht hat, wechselt die Darstellung in die *Prepare*-Phase. Sie hat das Ziel, den Fahrer auf das Manöver entsprechend vorzube-

reiten und abschließend das Manöver mit dem Übergang zur nächsten Phase einzuleiten. Diese Vorbereitung setzt sich zusammen aus der Einordnung auf dem korrekten Fahrstreifen für das anstehende Manöver sowie der entsprechenden Anpassung der Geschwindigkeit. Dazu wird, wie in Abbildung 2.31 dargestellt, der Name der Zielstraße durch die passive Fahrstreifenführung ersetzt.



Abbildung 2.31.: Grafische Elemente der Wegführung während der *Prepare*-Phase

**Passive Fahrstreifenführung:** Mit Hilfe der passiven Fahrstreifenführung wird dem Fahrer mitgeteilt, wie die Fahrstreifensituation unmittelbar vor dem Manöverpunkt aussieht. Dadurch kann der Fahrer direkt erkennen, wie viele Fahrstreifen vorhanden sein werden und auf welchem er sich einordnen sollte, um weiterhin der gewählten Route zu folgen. Sollten mehrere Fahrstreifen dem Verlauf der Route folgen können durch Betrachtung der anschließenden Manöver ein idealer Fahrstreifen und weitere optionale Fahrstreifen markiert werden. Bei Einordnung auf den idealen Fahrstreifen können notwendige Fahrstreifenwechsel vor dem nachfolgenden Manöver reduziert werden.

### Grafische Elemente der *Execute*-Phase

Unmittelbar vor und während des Manövers wird der Fahrer in der *Execute*-Phase mit konkreten Anweisungen und Handlungsvorschriften durch das Manöver geleitet. Dazu werden im Bereich, in dem sich bisher der Routenrichtungspfeil und der Manöverpfeil befanden, entsprechende grafische Elemente angezeigt. Diese können, wie in Abbildung 2.32 dargestellt, in Abhängigkeit von der Kreuzungssituation am Manöverpunkt verschiedene Ausprägungen haben. Es existieren das Low-Guiding für einfache Manöver, das High-Guiding für komplexe und/oder kombinierte Manöver sowie die Kreuzungsdarstellung für Auf- und Abfahrten sowie Autobahnkreuze. Alle Elemente werden durch eine grafische Repräsentation der Entfernungsangabe unterstützt.

**Grafische Entfernungsangabe:** Die grafische Darstellung der verbleibenden Entfernung bis zum Manöverpunkt wird bei BMW-Navigationssystemen durch eine sich füllende Säule (siehe Abbildung 2.32) dargestellt. Die Anzeige beginnt mit einer vollständig leeren Säule beim Übergang von der *Prepare*-Phase zur *Execute*-Phase. Während der Anfahrt zum Manöverpunkt füllt sich die Säule in Abhängigkeit von der aktuellen Entfernung, bis die Säule am Manöverpunkt vollständig gefüllt ist. Diese Metapher ermöglicht dem Fahrer eine verbesserte Abbildung der angezeigten Hinweise in die Umgebung und erleichtert die Abschätzung der verbleibenden Entfernung bis zum Manöverpunkt.

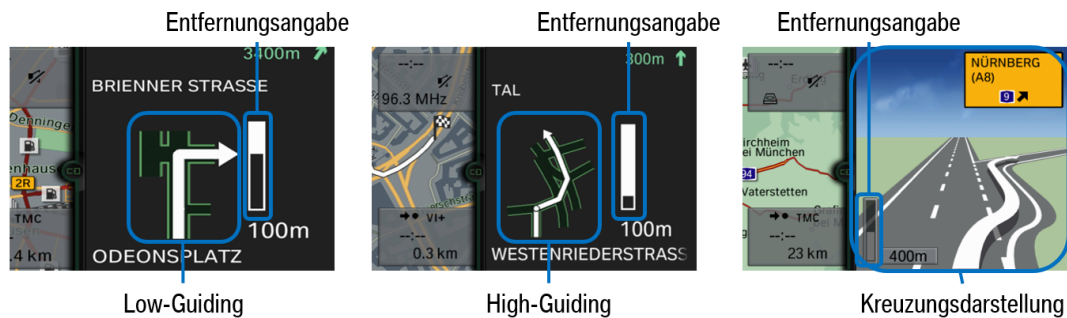


Abbildung 2.32.: Grafische Elemente der Wegführung während der *Execute*-Phase

**Low-Guiding:** Untersuchungen haben gezeigt, dass sich stark abstrahierte Darstellungen leichter in die Umwelt übertragen lassen, da diese weniger exakt verglichen werden können [129]. Daher versucht das Navigationssystem, einfache Manöverstrukturen mit Hilfe der stark abstrahierten Low-Guidingvarianten darzustellen. Diese Darstellung basiert auf einer im Vorfeld abgelegten Auswahl an Kreuzungssituationen, in welche anschließend der Verlauf des jeweiligen Manöver eingezeichnet wird (siehe Abbildung 2.32 links).

**High-Guiding:** Sollte sich das bevorstehende Manöver aufgrund seiner Komplexität oder der Kombinationen mit anderen Manövern nicht als Low-Guiding darstellen lassen, erzeugt das Navigationssystem, wie in Abbildung 2.32 mittig dargestellt, basierend auf der digitalen Karte einen detaillierten Ausschnitt der Kreuzungssituation, in welchem anschließend der Verlauf der Route sowie die jeweiligen Manöverpunkte eingezeichnet werden.

**Kreuzungsdarstellung:** Abbildung 2.32 rechts zeigt die grafische Kreuzungsdarstellung. Diese besteht aus dem abstrahierten Verlauf der einzelnen Fahrstreifen, kombiniert mit einer künstlich erzeugten Darstellung des entsprechenden Straßenschildes. Beide Elemente basieren ebenfalls auf der digitalen Karte. Diese Darstellung wird vor allem entlang wichtiger Straßen, wie beispielsweise Autobahnen oder Fernstraßen, verwendet, da sich hier die Manöver im Allgemeinen auf das richtige Einordnen und Verlassen der Straße reduzieren lassen.

### 2.3. Head-up-Display

Mit Hilfe eines sogenannten Head-up-Displays (HUD) können Informationen direkt ins Sichtfeld des Nutzers projiziert werden. Die Geschichte der Head-up-Displays reicht zurück bis in die 1940er-Jahre. Zu dieser Zeit wurden die ersten Reflexvisiere in Militärflugzeugen verbaut. In den 1970er-Jahren wurden Piloten die notwendigen Informationen mittels Frontschreibenprojektoren in Kampfflugzeugen angezeigt (siehe Abbildung 2.33 links).

In den 1990er-Jahren baute der amerikanische Automobilhersteller GM das erste Schwarzweiß-HUD in seine Fahrzeuge ein. 2001 folgte das erste farbige HUD in einem Fahrzeug des amerikanischen Herstellers Corvette (siehe Abbildung 2.33 Mitte). BMW brachte 2003 als erster europäischer Automobilhersteller mit den 5er- und 6er-Modellreihen ein HUD in Großserie (siehe Abbildung 2.33 rechts). 2005 folgte PSA mit dem Citroen C6 und 2010 Audi mit dem A7.



Abbildung 2.33.: Beispiele für Head-up-Displays: Frontscheibenprojektor in Kampfflugzeugen (links), erstes Farb-HUD von Corvette (mittig), HUD-Anzeige aus einem BMW 5er (rechts)

Das HUD im Fahrzeug bietet dem Fahrer einen deutlichen Gewinn an Komfort und Sicherheit, da ihm wichtige Informationen, wie Geschwindigkeit und Navigationshinweise, direkt ins Sichtfeld projiziert werden können. Durch die Funktionsweise des HUD entsteht beim Fahrer der Eindruck, als würde vor seinem Fahrzeug ein transparentes Display schweben, in welchem diese Informationen angezeigt werden. Dadurch kann er beim Ablesen dieser Informationen die Straße weiterhin im Blickfeld behalten. Dank der großen Projektionsdistanz und der deutlich höheren Lage des HUD minimiert sich die benötigte Akkumulationszeit der Augen für den Blickwechsel zwischen Fahrsituation und Anzeigeelement [138].

Gegenwärtig wird am nächsten Meilenstein der Head-up-Display-Technologie gearbeitet: dem kontaktanalogen Head-up-Display. Mit Hilfe eines kontaktanalogen Head-up-Displays kann beim Fahrer der Eindruck erweckt werden, als würden die dargestellten Informationen mit der Realität verschmelzen. Dies ermöglicht die Schaffung völlig neuer Anzeigekonzepte [65].

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über die technologischen Grundlagen des HUD gegeben. Dazu gehören die Grundlagen in geometrischer Optik sowie der allgemeine Aufbau einer HUD-Komponente. Anschließend werden die verschiedenen Darstellungsformen in aktuellen HUDs präsentiert, und es wird der Übergang zur kontaktanalogen Darstellung im HUD beschrieben. Zum Abschluss werden aktuell bekannte Realisierungsformen der kontaktanalogen HUDs vorgestellt.

### 2.3.1. Technologieüberblick

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen der HUD-Technologie im automobilen Umfeld. Dazu werden zunächst die notwendigen optischen Elemente und deren Eigenschaften für den Aufbau einer HUD-Komponente behandelt. Anschließend wird ein Überblick über den allgemeinen Aufbau eines Fahrzeug-HUD-Systems gegeben. Und zum Abschluß erfolgt ein kurzer Exkurs über aktuelle und mögliche zukünftige, optische Bauteile für die konkrete Realisierung moderner HUD-Komponenten im Fahrzeug.

#### Grundlagen der optischen Elemente für den HUD-Aufbau

In diesem Abschnitt werden die physikalischen Grundlagen der optischen Elemente Spiegel und Linse betrachtet, da diese Elemente zur Erzeugung von virtuellen Bildern verwendet werden können und somit die optischen Grundelemente des HUD im Fahrzeug darstellen. Für weiterreichende Information zu den optischen Grundlagen sei an dieser Stelle auf entsprechende Fachliteratur, wie beispielsweise [18], [48] und [49], verwiesen. Darüber hinaus werden die notwendigen optischen Eigenschaften von HUDs beschrieben.

**Geometrische Optik:** Wenn die geometrische Abmessung sowohl der abgebildeten Gegenstände als auch der abbildenden Elemente deutlich größer als die Wellenlänge des Lichtes ist, können Wellenphänomene des Lichtes, wie Beugung oder Interferenz, vernachlässigt und das Licht zu geradlinigen Lichtstrahlen vereinfacht werden. Dies erspart die sonst notwendige Lösung der Maxwell'schen Gleichungen für die Auslegung der entsprechenden optischen Systeme.

**Optische Abbildungen an Linsen:** Solange der Krümmungsradius der begrenzenden Fläche der Linse deutlich größer als die Dicke der Linse ist, kann die Lichtbrechung der Lichtstrahlen an den beiden Linsenoberflächen zu einer Brechung an der Hauptebene der Linse vereinfacht werden.

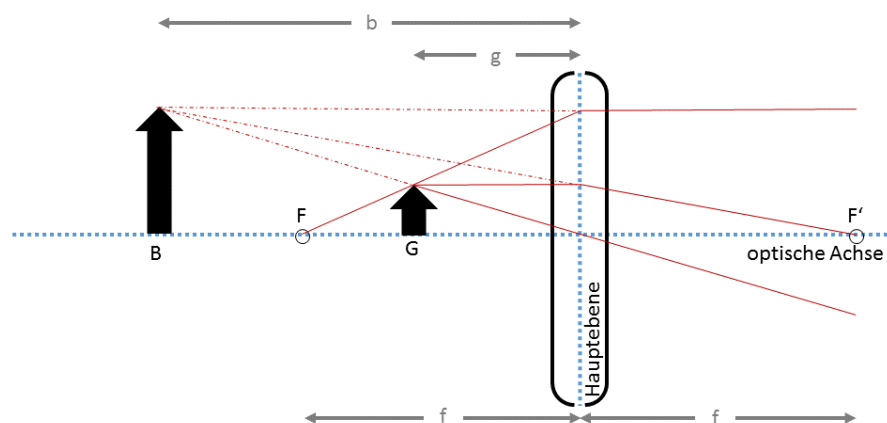


Abbildung 2.34.: Optische Abbildung an einer Konvexlinse

Die optischen Eigenschaften einer Linse werden durch die Brennweite  $f$  und die Form der Linse bestimmt. Bei konvex geformten Linsen werden Lichtstrahlen so abgelenkt, dass sie hinter der Linse durch den Brennpunkt  $F$  laufen. Dabei bestimmt die Brennweite  $f$  der Linse den Abstand zwischen Hauptebene der Linse und Brennpunkt. In Abbildung 2.34 ist die Entstehung eines virtuellen Bildes an einer konvexen Linse dargestellt. Da sich der Gegenstand  $G$  innerhalb der Brennweite befindet, divergieren die Lichtstrahlen hinter der Linse. Es entsteht daher kein reelles Bild. Allerdings schneiden sich die Verlängerungen der Strahlen auf der Seite des Gegenstandes, sodass ein aufrechtes, vergrößertes, virtuelles Bild  $B$  des Gegenstandes entsteht. Eine so verwendete konvexe Linse wird auch als Lupe bezeichnet und kann im Head-up-Display für die Vergrößerung eines auf einem Display dargestellten Bildes verwendet werden. Zusätzlich wird noch die vom Betrachter wahrgenommene Entfernung des dargestellten Bildes vergrößert.

Das Maß dieser Vergrößerung wird durch den Abbildungsmaßstab  $\beta$  beschrieben.

$$\beta = \frac{B}{G} = -\frac{b}{g}$$

Die Abbildung an einer spiegelnden Oberfläche erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie bei Linsen. Allerdings werden entsprechende Lichtstrahlen noch zusätzlich an der Hauptebene gespiegelt. Daher erzeugt ein konkav geformter Spiegel, auch bekannt als Hohlspiegel, ebenfalls ein vergrößertes Bild in einem größerem Abstand (siehe Abbildung 2.35).

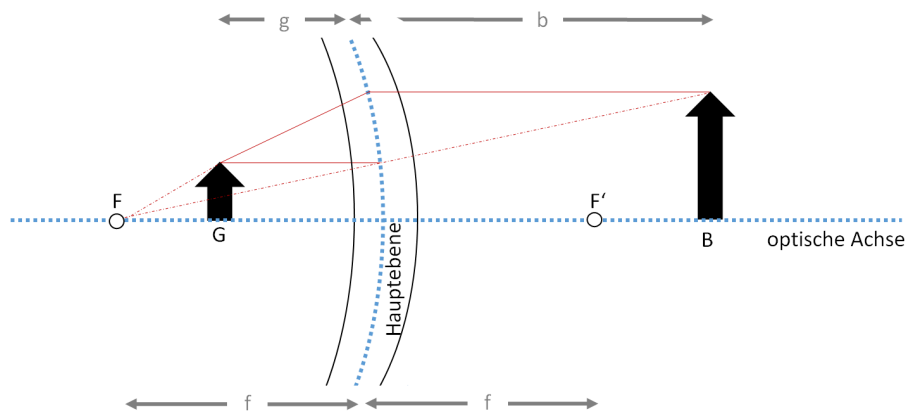


Abbildung 2.35.: Optische Abbildung an einem Hohlspiegel

**Spiegelbild als virtuelles Bild:** Wenn Licht auf eine sehr glatte, reflektierende Oberfläche trifft, entsteht an dieser Oberfläche eine Reflexion der Lichtstrahlen. Nach dem Reflexionsgesetz entspricht der Einfallswinkel der Lichtstrahlen dem Ausfallswinkel (siehe Abbildung 2.36). Nach der Reflexion verlaufen die Strahlen so, als kämen sie von einem Bild hinter dem Spiegel. Es entsteht ein virtuelles Spiegelbild. Die Größe dieses Bildes ist unabhängig vom Betrachtungswinkel. Allerdings entspricht der wahrgenommene Abstand des Bildes der Lauflänge des Lichtes und nicht dem Abstand zwischen Betrachter und Spiegeloberfläche. Wenn die Spiegeloberfläche noch zusätzlich transparent ist, sieht der

Betrachter gleichzeitig das virtuelle Spiegelbild sowie die reale Umgebung hinter dem Spiegelbild.

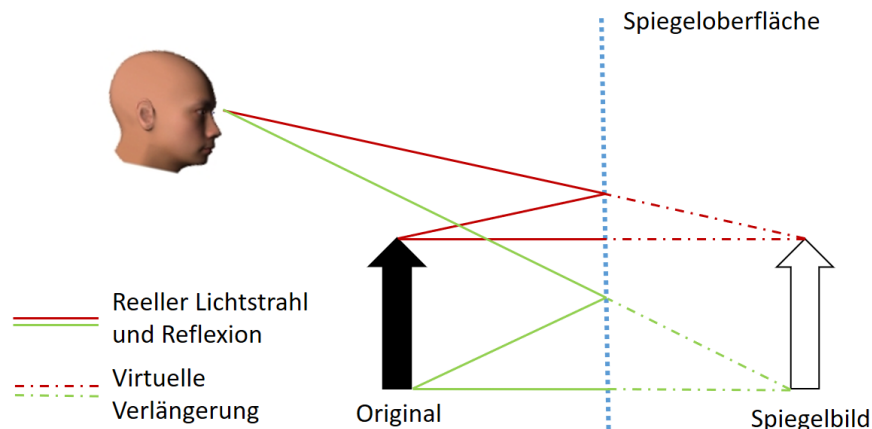


Abbildung 2.36.: Bildentstehung am ebenen Spiegel

Beim Head-up-Display wird durch diese zwei Effekte zum einen das virtuelle Bild parallel zur Umgebung dargestellt, und zum anderen kann das virtuelle Bild deutlich vor die Windschutzscheibe verschoben werden. Darüber hinaus kann mit Hilfe von planen Spiegeln die Größe und Form der HUD-Komponente an den verfügbaren Bauraum im Fahrzeug angepasst werden.

### Aufbau eines Head-up-Display

Ein HUD besteht im Allgemeinen aus diesen drei Komponenten: Bildgebende Einheit, optisches System und Projektionsfläche (siehe Abbildung 2.37). Die Bildgebende Einheit ist ein Display, welches ein extrem helles Abbild der darzustellenden Informationen erzeugt. Mit Hilfe des optischen Systems werden zum einen das dargestellte Bild sowie der wahrgenommene Projektionsabstand deutlich vergrößert, und zum anderen wird das Licht des Bildes von der Bildgebenden Einheit auf die Projektionsfläche abgelenkt. An der Projektionsfläche entsteht anschließend durch Spiegelung dieses Lichtes das virtuelle Bild, welches der Fahrer wahrnimmt. Nachfolgend werden diese drei Komponenten detaillierter vorgestellt.

**Bildgebende Einheit:** Die Bildgebende Einheit erzeugt das im System berechnete Bild. Da dieses Bild anschließend mit Hilfe des optischen Systems an die letzte Projektionsfläche transportiert und dabei mehrmals optisch verändert wird, sind an die Eigenschaften der Bildgebenden Einheit besondere Anforderungen gestellt.

Das erzeugte Bild muss sehr hell sein, da ein Großteil der Helligkeit im HUD-System absorbiert wird. Das resultierende HUD-Bild benötigt allerdings noch eine entsprechende Helligkeit, damit der Nutzer das Bild auch bei hellem Hintergrund und hoher Außenbeleuchtung, wie beispielsweise an sonnigen Wintertagen mit schneebedeckter Fahrbahn, noch gut erkennen kann.

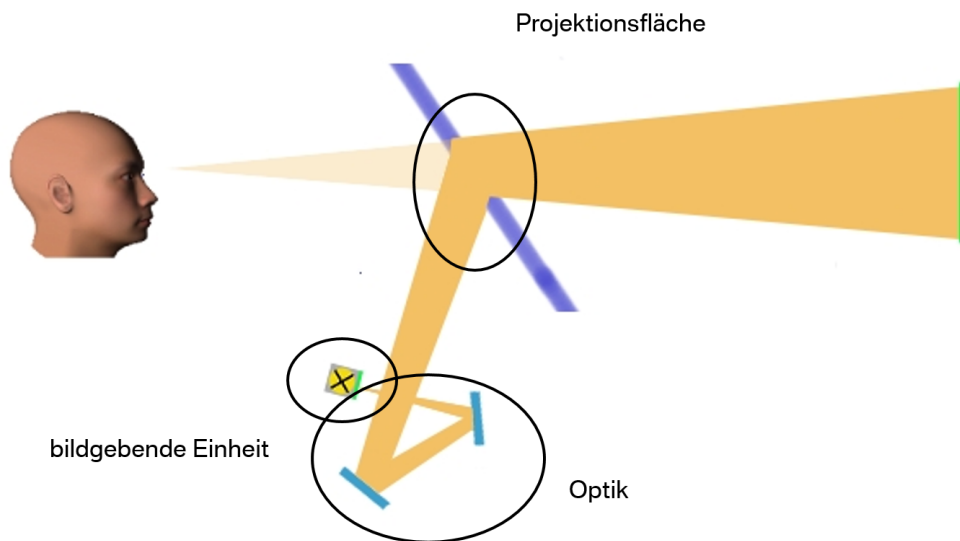


Abbildung 2.37.: Allgemeiner Aufbau eines HUD-Systems

Eine weitere Anforderung ist das realisierbare Dimmungsverhältnis. Hier werden sehr hohe Werte benötigt, damit das HUD-Bild den Fahrer bei niedriger Außenbeleuchtung nicht blendet.

Darüber hinaus muss das erzeugte Bild eine entsprechend hohe Auflösung besitzen, da dieses Bild anschließend über das optische System vergrößert wird. Um den benötigten Bauraum für das HUD-System zu reduzieren, werden im Allgemeinen kleine Displaygrößen und entsprechende Vergrößerungsfaktoren verwendet. Das menschliche Auge besitzt aufgrund der Netzhautstruktur im Durchschnitt ein Winkelaufklärungsvermögen von einer Bogenminute [50]. Das heißt, es werden mindestens 60 Pixel pro realisiertem Grad Bildwinkel benötigt. Für aktuelle Bildwinkel von  $5^\circ$  ist dies noch unproblematisch. Sobald der resultierende Bildwinkel jedoch sehr groß wird, werden hier Bildgeber mit HD-Auflösung benötigt.

**Optisches System:** Neben der bildgebenden Einheit hat das im HUD verbaute optische System (kurz Optik) einen wesentlichen Einfluss auf die visuellen Eigenschaften des HUD und somit auch auf das Kundenerlebnis. Im Allgemeinen besteht das optische System aus einer Kombination von denen in Abschnitt 2.3.1 vorgestellten Elementen: plane Spiegel, Hohlspiegel und Linsen. Mit Hilfe der verbauten optischen Elemente wird das Licht der bildgebenden Einheit durch die HUD-Komponente zum Deckglas gelenkt. Durch die Kombination der einzelnen optischen Elemente werden dabei die Eigenschaften des virtuellen Bildes so verändert, dass ein ansprechendes Bild für den Fahrer erzeugt werden kann. Darüber hinaus ermöglichen die verwendeten Spiegel im System eine Faltung des optischen Strahlengangs. Mit Hilfe dieser Faltung können die Größe und Form der HUD-Komponenten an den begrenzten Bauraum im Fahrzeug angepasst werden. In der Regel ist der letzte Spiegel drehbar gelagert, dies erlaubt eine Anpassung der Lage des virtuellen Bildes auf die Kopfposition des Fahrers.



**Projektionsfläche:** Nachdem das Licht durch das Deckglas der HUD-Komponente diese verlassen hat, trifft es auf die Projektionsfläche. In Fahrzeugen kann entweder direkt die Windschutzscheibe als Projektionsfläche verwendet werden, oder es wird eine zusätzliche, sogenannte Combinerscheibe verwendet. An der Projektionsfläche entsteht aus dem Lichtstrahlenbündel durch Spiegelung das für den Betrachter sichtbare virtuelle Bild.

Die Lage der Projektionsfläche im Raum hat entsprechenden Einfluss auf den Ort des virtuellen Bildes. Je nach Neigung der verwendeten Scheibe muss das Licht die HUD-Komponente in einem anderen Winkel verlassen. Da die Verbaumöglichkeiten der HUD-Komponente durch den verfügbaren Bauraum im Fahrzeug begrenzt werden, ist nicht jede Windschutzscheibe für den Einsatz eines HUD geeignet.

Aufgrund der Dicke der Projektionsfläche wird das Licht zweimal, einmal beim Eintreten und einmal beim Verlassen, reflektiert und es entstehen zwei virtuelle Bilder mit entsprechendem Abstand. Dadurch würde der Fahrer das eigentliche dargestellte Bild zweimal sehen. Um dies zu vermeiden, wird eine entsprechende Keilfolie in die Windschutzscheibe eingesetzt und somit die Bildung des Doppelbildes verhindert.

### Optische Eigenschaften und Effekte

Aufgrund der verwendeten Elemente und der physikalischen Grundlagen besitzen HUD-Systeme spezifische charakteristische Eigenschaften, wie beispielsweise das realisierbare Sichtfeld oder die verfügbare Eyebox, welche direkte Auswirkung auf die Möglichkeiten der Anzeige und dem damit verbundenen Kundenerlebnis haben.

Zusätzlich treten durch die Projektion des Bildes weitere optische Effekte, wie beispielsweise die Fokussierung oder die Parallaxe, auf. Beide müssen bei der Auslegung von entsprechenden Anzeigen betrachtet werden.

Deshalb werden diese Eigenschaften und Effekte nachfolgend vorgestellt. Den Abschluss dieses Abschnitts bildet eine kurze Vorstellung der verschiedenen Entfernungen, die im Zusammenhang mit HUD-Anzeigen auftreten können, da diese vor allem für die Realisierung eines kontaktanalogen Bildes eine wesentliche Rolle spielen.

**Sichtfeld:** Das Sichtfeld (engl.: field of view (FOV)) beschreibt den Raumwinkel, der von den Anzeigen des HUDs überdeckt werden kann. Je kleiner das darstellbare Sichtfeld ist, desto kleiner wird vom Betrachter die Ausdehnung des virtuellen Bildes wahrgenommen. In Abbildung 2.38 ist dieselbe 3D-Szene zur Verdeutlichung durch drei verschiedene Sichtfelder betrachtet dargestellt. Wenn das HUD für die Darstellung von kontaktanalogen Anzeigen (siehe Abschnitt 2.3.2) verwendet wird, beschreibt das Sichtfeld indirekt, wie groß der Bereich der Umgebung ist, in dem Anzeigen virtuell platziert werden können.



Abbildung 2.38.: Darstellung einer 3D-Szene mittels verschiedener Sichtfelder

**Eyebox:** Die Eyebox beschreibt einen Bereich im Raum, in welchem das Licht des HUD-Systems gebündelt wird. Mindestens ein Auge des Benutzers muss sich vollständig in diesem Bereich befinden, damit der Benutzer das virtuelle Bild wahrnehmen kann. In aktuellen HUD-Systemen entspricht die Breite der Eyebox in etwa dem doppelten durchschnittlichen Augenabstand. Die Höhe der Eyebox von aktuellen HUD-Systemen liegt im Bereich von 5 cm bis 6 cm. Dank dieser Größe kann der Fahrer das HUD-Bild auch bei leichten vertikalen und horizontalen Bewegungen seines Kopfes ohne Beschneidung wahrnehmen. In der Regel ist einer der Spiegel im HUD-System drehbar gelagert, sodass die vertikale Lage der Eyebox verschoben und so das HUD-System an die Größe des jeweiligen Fahrers angepasst werden kann [94]. Das HUD des BMW X3 (BMW-interne Bezeichnung F25) besitzt beispielsweise eine 130 mm x 55 mm Eyebox und einen 70 mm Verstellweg[136].



Abbildung 2.39.: Fokussierungen

**Fokussierung:** Die Fokussierung beschreibt die Anpassung der Augen an eine bestimmte Objektentfernungen. Wie in Abbildung 2.39 zu erkennen ist, führt eine Veränderung der Fokussierung zu verschiedenen Bereichen der Tiefenschärfe. Wenn der Fokuspunkt sehr nahe am Betrachter liegt, sind entfernte Objekte nicht mehr deutlich zu erkennen. Die gleichzeitige Wahrnehmung der Umwelt und des virtuellen Bildes des HUD ist erst möglich, wenn die Augen auf eine unendliche Entfernung fokussiert sind. In der Literatur werden verschiedene Werte für diese unendliche Entfernung angegeben. Die Angaben schwanken zwischen 6 m und 50 m [10] [56] [131].

**Parallaxe:** Der Effekt der Parallaxe führt zu einer scheinbaren Verschiebung eines Objektes bei Veränderung der Beobachterposition. In Abbildung 2.40 ist dieser Effekt zu sehen. Die Position des Mondes ändert sich in der Reflexion an der Wasseroberfläche, da sich durch die Reflexion sowohl der Betrachtungswinkel als auch die Betrachtungsposition verändern. Bei HUD-Systemen führt dieser Effekt dazu, dass sich der Ort der eingeblendeten Information in Abhängigkeit von der Kopfposition des Betrachters verändert. Je größer der Abstand zwischen Auge und virtuellem Bild ist, desto geringer sind der Parallaxeneffekt und somit diese scheinbare Verschiebung in der Darstellung.



Abbildung 2.40.: Parallaxe

**Entfernungen:** Bei der gleichzeitigen Betrachtung der Umgebung und der perspektivischen Darstellungen von Objekten im virtuellen Bild des HUD entstehen verschiedene Entfernungsangaben. Für den späteren Verlauf der Arbeit sind vor allem die Entfernung zur Fokalebene, die Entfernung zum realen Objekt sowie die Projektionsdistanz entscheidend [133]. In Abbildung 2.41 sind diese drei Entfernungen dargestellt. Der Betrachter

nimmt das virtuelle Bild des HUD in der Entfernung zur Fokalebene war. Diese Entfernung wird, wie oben beschrieben, durch das optische System des HUD beeinflusst. Die Entfernung zum realen Objekt stellt beispielsweise die Entfernung zu anderen Verkehrsteilnehmern oder Straßenelementen dar und wird durch die Umgebung beeinflusst. Mittels perspektivischer Darstellung und anderer Tiefenwahrmungskriterien (siehe 2.3.3) kann die Projektionsdistanz beeinflusst werden. Die Projektionsdistanz beschreibt die vom Betrachter wahrgenommene Entfernung zum dargestellten Objekt im virtuellen Bild.

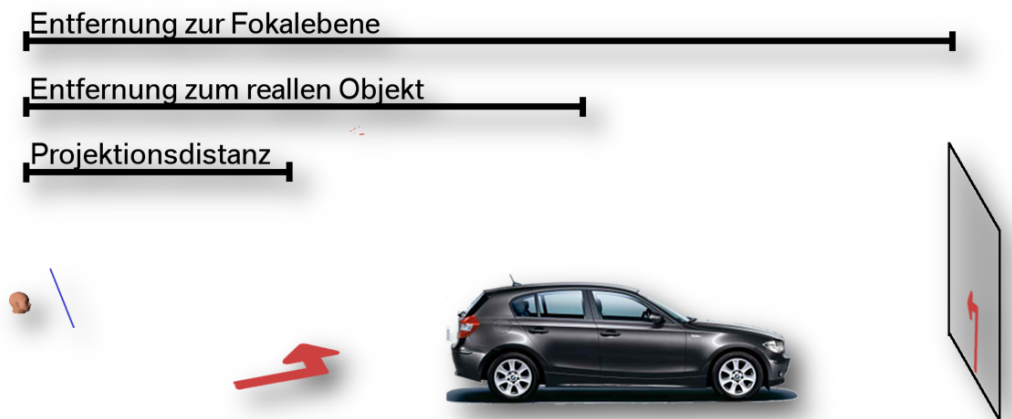


Abbildung 2.41.: Entfernungen im HUD (nach Tönis [133])

### 2.3.2. Vom klassischen zum kontaktanalogen HUD

Wie bereits erwähnt, werden seit mehreren Jahren Head-up-Displays in Fahrzeugen verbaut und als zusätzliches Anzeigeelement verwendet. In diesem Abschnitt werden zunächst die verschiedenen Darstellungsformen, welche im HUD realisiert werden können, beschrieben und anschließend die Anzeigen in heutigen HUDs vorgestellt. Zum Abschluss wird die Kontaktanalogie als neue Darstellungsform vorgestellt und von klassischen Anzeigen abgegrenzt. Durch diese diversen Arten der Darstellung entstehen neue technologische Anforderungen an die HUD-Komponente sowie Anforderungen an das Design der verwendeten Anzeigen. Diese Anforderungen bilden den Abschluss dieses Kapitels.

#### Darstellungsformen

Neben Informationsinhalt und Darstellungsort nennt Rühmann für optische Anzeigen noch die Darstellungsform als Klassifikation [112]. Bei den Darstellungsformen unterscheidet Israel, wie in Abbildung 2.42 dargestellt, zwischen den folgenden Varianten [56]:

- **Digitale Anzeigen:** Anzeigen ohne Ähnlichkeit mit der realen Situation. Ihre Informationen werden vollständig codiert dargestellt. Ein Beispiel für digitale Anzeigen ist die Entfernungsangabe in Metern in Navigationshinweisen.

- **Analoge Anzeigen:** Anzeigen mit einer abstrakten, bildhaften Form im Allgemeinen vom Typ *feste Skala - bewegter Zeiger*. Die Informationen werden bei analogen Anzeigen in die Position eines Zeigers codiert. Die Geschwindigkeitsanzeige im Kombi-Instrument ist ein Beispiel für eine analoge Anzeige.
- **bildhafte, situationsanaloge Anzeigen:** Anzeigen mit abstrakter, stilisierter Darstellung der Umwelt. Die Codierung der Information ist abhängig von der gewählten Abstraktionsstufe der Anzeige. Je abstrakter die Anzeige ist, desto weniger Informationen über die reale Situation enthält sie. Die Kreuzungsdarstellung während der Durchführungsphase ist ein typisches Beispiel für situationsanaloge Anzeigen.
- **kontaktanaloge Anzeigen:** Anzeigen, welche die reale Umgebung korrekt überlagern. Für den Benutzer entsteht der Eindruck, als würde die Anzeige mit der Umgebung verschmelzen. Die eigentliche Anzeige wird direkt als Teil der Realität wahrgenommen, wie beispielsweise der später vorgestellte Manöverimpuls.



Abbildung 2.42.: Darstellungsformen von visuellen Anzeigen [56]

Bei komplexen Sachverhalten, wie beispielsweise Navigationshinweisen, steigt beim Betrachter der mentale Aufwand, welcher benötigt wird, um die dargestellte Information zu erfassen und in den entsprechenden Kontext zu bringen, proportional zum Grad der Abstraktion der dargestellten Information[56].

### Anzeigen in aktuellen HUD-Systemen im Fahrzeug

HUD-Systeme in heutigen Serienfahrzeugen können ein Sichtfeld von circa  $5^\circ$  horizontal und circa  $2^\circ$  vertikal erzeugen. Im Allgemeinen beträgt der Abstand zur Fokalebene circa 2 m. Dadurch entsteht für den Fahrer der Eindruck, als würde ein zusätzliches Display oberhalb des vorderen Bereiches der Motorhaube schweben.



Abbildung 2.43.: Anzeigen im klassischen HUD (BMW AG)

Die möglichen Inhalte dieses zusätzlichen Displays sowie ihre beispielhafte Gestaltung sind in Abbildung 2.43 dargestellt. Neben allgemeinen Informationen zum aktuellen Fahrzeugzustand, wie der derzeitigen Geschwindigkeit und eventuell notwendigen Warnhinweisen, werden dem Fahrer im HUD Informationen aus den Domänen Fahrerassistenz, wie beispielsweise der eingestellten Regelgeschwindigkeit oder der Spurverlassenswarnung, und Fahrerinformation, wie beispielsweise der aktuell erlaubten Geschwindigkeit sowie Navigationshinweisen angezeigt. Untersuchungen haben gezeigt, dass Fahrer in komplexen Verkehrssituationen bei Verwendung eines HUD gegenüber der klassischen Kombi-Instrumente besser auf die Geschwindigkeit achten und schneller auf Änderungen der erlaubten Geschwindigkeit oder dringliche Ereignisse reagieren können [73].

### Kontaktanaloge Anzeigen: Realität und Anzeige verschmelzen

Wie bereits beschrieben, kann mit heutigen HUD-Systemen ein zusätzliches virtuelles Display für den Fahrer erzeugt werden. Dieses zusätzliche Display befindet sich im Allgemeinen am unteren Rand des primären Sichtfeldes des Fahrers. In diesem Display werden dem Fahrer quasi-statische Anzeigen an einer fest definierten Stelle eingeblendet. Die Informationen stehen nicht im räumlichen Bezug zu dem Ort, auf den sie referenzieren. Allerdings bieten diese Anzeigen bereits den Vorteil, dass der Fahrer sie ablesen kann, ohne den Blick vollständig von der Straße abwenden zu müssen.

Durch den Einsatz neuer technologischer Ansätze könnte dem Fahrer zukünftig eine weitere Art der Darstellung, die Kontaktanalogie, zur Verfügung gestellt werden. Die Kontaktanalogie zeichnet sich vor allem durch den dynamischen Charakter der Anzeigen aus. Das heißt, die Anzeigen sind nicht mehr an fest definierten Positionen platziert, sondern erwecken beim Fahrer den Eindruck, als würden sie mit der Umgebung verschmelzen. Dadurch werden die Anzeigen als direkter Bestandteil der Umgebung wahrgenommen.

Abbildung 2.44 zeigt den Vergleich zwischen den klassischen Anzeigen auf der linken Seite und einer kontaktanalogen Darstellung derselben Szenen auf der rechten Seite. Für die Anzeige der aktuellen Geschwindigkeit sowie der eingestellten Regelgeschwindigkeit wird in beiden Fällen die gleiche digitale Darstellungsform gewählt, da beides



Abbildung 2.44.: Vergleich zwischen klassischen (links) und kontaktanalogen (rechts) HUD-Anzeigen (BMW AG)

Statusinformationen sind, welche keinen räumlichen Bezug zur Umgebung besitzen. Allerdings können die Anzeigen der Fahrerassistenzsysteme, wie der Spurverlassenswarner oder das erkannte Vorderfahrzeug, in direkten Bezug zur Umgebung gebracht werden. Daher wechselt die Visualisierung der erkannten Fahrstreifenmarkierung von der gelben symbolischen Darstellung in der klassischen Anzeige hin zu zwei gelben Markierungen, welche in der kontaktanalogen Darstellung die erkannten Fahrstreifenmarkierungen direkt überlagern. Das erkannte Vorderfahrzeug kann in der kontaktanalogen Darstellung ebenfalls direkt markiert werden. Daher wechselt die orangefarbene symbolische Darstellung aus der klassischen Anzeige zu einer orangefarbenen Klammer, die unmittelbar hinter dem erkannten Vorderfahrzeug platziert ist.

Durch die kontaktanaloge Darstellungsform kann der Fahrer die dargestellte Information intuitiv wahrnehmen und die Markierungen eindeutig den entsprechenden Realobjekten zuordnen.

### 2.3.3. Realisierungsformen von kontaktanalogen HUDs

Für die Realisierung der kontaktanalogen Darstellung mit Hilfe eines Head-up-Displays sind verschiedene Varianten bekannt. Ein Großteil der bekannten Prototypen nutzt ein stehendes virtuelles Bild und erzeugt durch Ausnutzung der monokularen Tiefenkriterien beim Betrachter den Eindruck der kontaktanalogen Darstellung. Eine weitere Möglichkeit für die Realisierung ist die Verwendung eines liegenden virtuellen Bildes. Darüber hinaus ist es möglich, mit Hilfe der stereoskopischen Darstellung beim Betrachter einen entsprechenden Tiefeneindruck zu erzeugen. Da zu diesem Zweck für beide Augen verschiedene Bilder erzeugt werden müssen, ist diese Variante für HUD weniger geeignet. Allerdings nutzen vielen HMDs die stereoskopische Darstellung für die Erzeugung eines entsprechenden Tiefeneindrucks beim Betrachter. Nachfolgend werden die verschiedenen Varianten näher beschrieben und ausgewählte Vertreter exemplarisch vorgestellt.

### Stehendes virtuelles Bild und Ausnutzung monokularer Tiefenkriterien

Die evolutionäre Variante der Realisierung einer kontakthanlogen Darstellung stellt die Beibehaltung eines stehenden virtuellen Bildes dar. Allerdings müssen dazu zum einen die Lage und Größe des virtuellen Bildes sowie die Entfernung zum realisierten virtuellen Bild im Vergleich zu klassischen HUDs deutlich verändert werden (siehe Abbildung 2.45). Und zum anderen muss die Darstellung sehr stark auf die Verwendung von monokularen Tiefenkriterien angepasst werden.

**Menschliche Tiefenwahrnehmung:** Die menschliche Wahrnehmung von räumlicher Tiefe basiert auf visuellen und okulomotorischen Tiefenkriterien. Also auf den von den Augen gesehenen Bildern sowie den entsprechenden Muskelbewegungen der Augen. Darüber hinaus können die Tiefenkriterien noch zusätzlich in monokulare und binokulare Kriterien unterschieden werden [46]. Beim stehenden virtuellen Bild befindet sich das erzeugte Bild in einer gleichbleibenden Entfernung. Dadurch können okulomotorische Kriterien nicht verwendet werden, um die wahrgenommene Tiefe beim Betrachter zu verändern. Da beide Augen dasselbe Bild sehen, können binokulare Kriterien ebenfalls nicht verwendet werden. Es bleiben die visuellen monokularen Tiefenkriterien: Verdeckung, Perspektive, Größe und Texturgradient.

Für weiterführende Details sei an dieser Stelle an die ausführlichen Arbeiten von Bergmeier, Goldstein, Israel und Schneid verwiesen [10] [46] [56] [119].

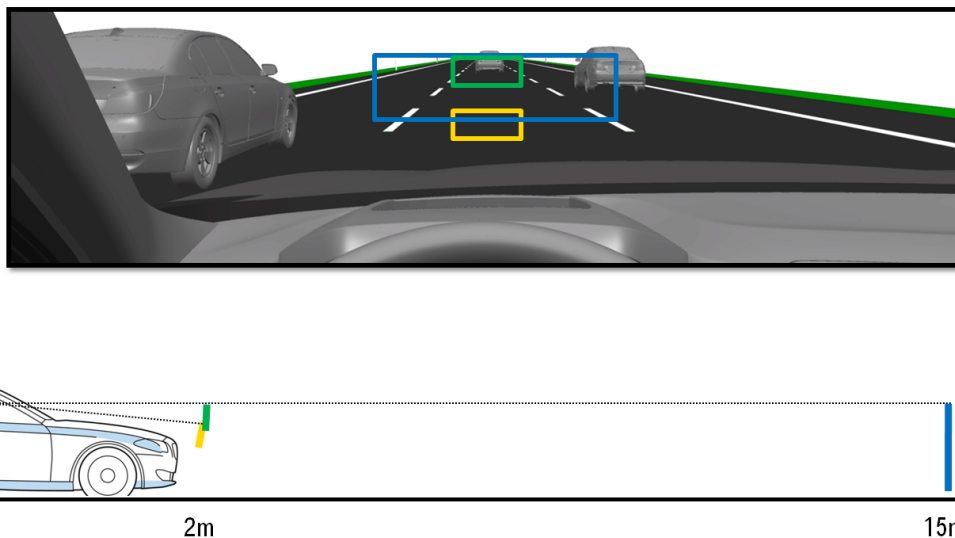


Abbildung 2.45.: Änderung der Lage, Größe und Projektionsentfernung beim Übergang vom klassischen zum kontakthanlogen HUD

**Veränderung des virtuellen Bildes:** Abbildung 2.45 skizziert die Änderungen am virtuellen Bild. Das in Gelb dargestellte virtuelle Bild klassischer HUD-Systeme muss in Richtung des Horizonts verschoben werden. Das so entstandene grüne Bild überlagert bereits

erste relevante Bereiche der Umgebung. Allerdings sind zum einen der abdeckbare Bereich und zum anderen die Projektionsentfernung zu gering. Daher muss das virtuelle Bild weiter vergrößert und in einem deutlich größeren Abstand erzeugt werden. Das so erzeugte blaue Bild erlaubt die kontaktanaloge Darstellung unter Ausnutzung monokularer Tiefenkriterien. Durch die Vergrößerung des Bildes wird ein größerer Bereich abgedeckt, sodass die relative Lage der kontaktanalogen Anzeigen deutlich öfter innerhalb des realisierbaren Blickfeldes liegt. Durch die Vergrößerung der Projektionsdistanz überwiegen beim Betrachter zum einen die monokularen Tiefenkriterien gegenüber den biokularen Tiefenkriterien bei der Tiefenwahrnehmung. Und zum anderen wird der Effekt der Parallaxe bei Kopfbewegungen des Fahrers deutlich abgeschwächt [131].

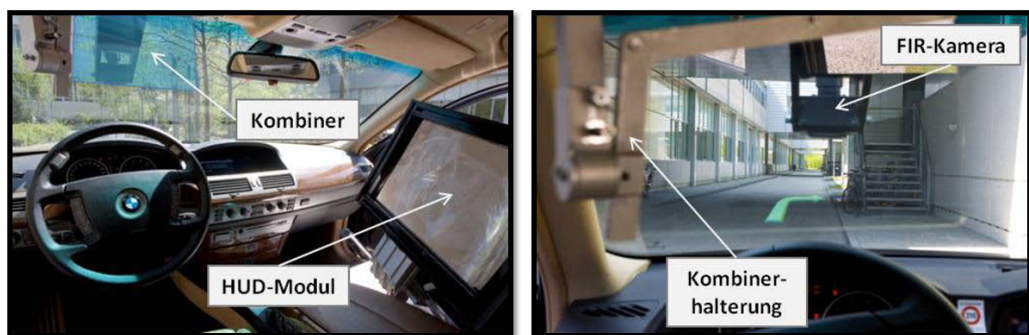


Abbildung 2.46.: Kontaktanaloge Darstellung im HUD mittels Kombiner-Scheibe [10]

**Kombiner-Scheibe HUD:** Bergmeier erzeugt in seinem HUD-Prototyp (siehe Abbildung 2.46) mit Hilfe klassischer HUD-Komponenten ein stehendes virtuelles Bild. Der Prototyp verwendet eine Kombiner-Scheibe für die Abbildung des virtuellen Bildes. Dadurch kann die Lage des virtuellen Bildes verändert werden und das System ist unabhängig von der verbauten Frontscheibe. Durch die Auslagerung des HUD-Moduls auf den Beifahrersitz kann der Prototyp mit deutlich einfacheren Optik- und Bilderzeugungselementen realisiert werden [10].

**Windschutzscheiben-HUD:** Abbildung 2.47 zeigt den von Sato et al. verwendeten Aufbau für die Untersuchung von kontaktanalogen Anzeigen. Für die Realisierung des groß-



Abbildung 2.47.: Kontaktanaloges HUD mittels Windschutzscheibenprojektion [116]



flächigen Windschutzscheiben-HUD wird ein auf dem Dach des Fahrzeuges montierter Projektor verwendet. Das Licht des Projektors wird mittels eines Spiegels nach unten auf das Armaturenbrett des Fahrzeuges gelenkt. Auf dem Armaturenbrett befindet sich ein Retroreflektor, welcher als Displayfläche verwendet wird. Hier entsteht das Bild, welches anschließend über die Windschutzscheibe in die Eyebox des Fahreres gespiegelt wird. Dieser Aufbau ermöglicht ein HUD mit einem sehr großen Sichtfeld [116].

### Liegendes virtuelles Bild

Für die meisten Anzeigen im Fahrzeugumfeld dient die Straße als Referenzsystem. Dadurch bietet es sich an, die Lage des virtuellen Bildes zu überdenken. Durch Verdrehen der Ebene der Bildquelle gegenüber dem Strahlengang kann ein virtuelles Bild erzeugt werden, welches parallel zur Fahrbahn liegt. Diese liegende Bildebene wurde erstmals von Bubb für die Darstellung eines Lichtbalkens vorm Fahrzeug verwendet [21]. Eine solche Bildebene ermöglicht die Darstellung von Anzeigen auf der Straßenoberfläche, welche sowohl die visuellen als auch die okulomotorischen Tiefenkriterien ansprechen. Es ist allerdings nicht möglich, Objekte oberhalb der Straßenoberfläche darzustellen.

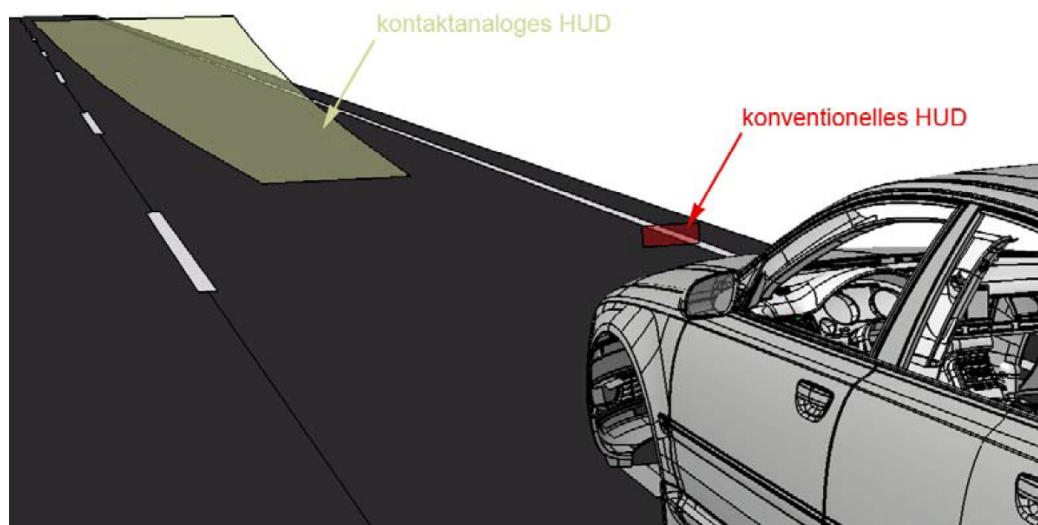


Abbildung 2.48.: Kombination von liegender und stehender Bildebene [57]

**Hybrid-Lösung:** Schneid kombiniert die beiden vorgestellten Verfahren. In Abbildung 2.48 ist die Lage des realisierten virtuellen Bildes dargestellt. Im Nahbereich wird ein liegendes virtuelles Bild verwendet, um auch die okulomotorischen Tiefenkriterien anzusprechen. Allerdings wird das virtuelle Bild mit zunehmender Entfernung nach oben gebogen, um mit Hilfe von monokularen Tiefenkriterien auch Anzeigen oberhalb der Straßenoberfläche erzeugen zu können [119] [57].

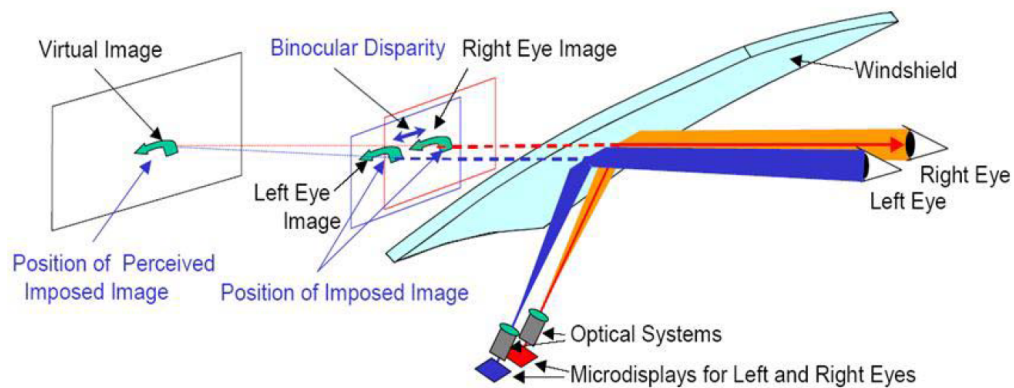


Abbildung 2.49.: Biokulares HUD auf Basis zweier monokulare HUD-Systeme[71]

### Stereoskopische Darstellung

Die bisher vorgestellten Ansätze erzeugen eine Tiefenwahrnehmung beim Betrachter ausschließlich durch monokulare Tiefenkriterien, da beide Augen stets dasselbe Bild sehen. Für die Realisierung einer Tiefenwahrnehmung mit Hilfe von biokularen Tiefenkriterien müssen die beiden Augen unterschiedliche Bilder betrachten. Nur dann kann das Gehirn aufgrund der Querdisparität der beiden Bilder die Entfernung zu verschiedenen Objekten berechnen [46]. Der begrenzte Bauraum im Fahrzeug erschwert die Erzeugung von getrennten Bildern pro Auge. Es existieren Ansätze mit HMDs und prototypische Versuchsaufbauten mit HUDs.

**Stereoskopisches HUD im Fahrzeug:** Koji et al. haben einen Prototyp der stereoskopiebasierte AR-Technologie im Fahrzeug dargestellt. In ihrem Versuchsaufbau wurde wie in Abbildung 2.49 mit Hilfe zwei getrennter HUD Systeme jeweils ein Bild für das linke und das rechte Auge erzeugt. Allerdings muss der Kopf des Fahrers fixiert werden, damit sich beide Augen in den entsprechenden Eyeboxen befinden. Eine Messung der aktuellen Augenposition und eine entsprechende Verschiebung der Eyeboxen ist nicht möglich. Diese starke Einschränkung der Kopfposition verhindert eine Nutzung des stereoskopischen HUD im Fahrzeug während der Fahrt [71].

### 3. Metaanzeigekonzept

In dieser Arbeit werden verschiedene Anzeigekonzepte zur Darstellung von Navigationshinweisen betrachtet. Dabei stellen die verschiedenen Varianten einzelne Bausteine in einem übergeordneten Anzeigekonzept dar. Dieses Metaanzeigekonzept beschreibt die Aufgaben sowie das Zusammenspiel der einzelnen Anzeigorte im Fahrzeug. Neben dem Inhalt, also der Art der Information sowie der Form der Darstellung, wird auch das zeitliche Verhalten der Anzeigen beschrieben.

Zum einen hilft dieses Metaanzeigekonzept, die verschiedenen Anzeigevarianten, die im späteren Verlauf dieser Arbeit beschrieben werden, den verschiedenen Anzeigorten im Fahrzeug zuzuordnen, und zum anderen bildet es für die einzelnen Varianten die entsprechenden Randbedingungen ab.

#### 3.1. Anzeigorte im Fahrzeug

Aktuelle Fahrzeuge verfügen über bis zu drei grundsätzlich verschiedene Anzeigeflächen für Navigationshinweise. Die verschiedenen Anzeigeflächen sind in Abbildung 3.1 farblich hervorgehoben. Das zentrale Informationsdisplay (CID) in Grün, das Kombi-Instrument in Orange sowie das Head-up-Display (HUD) in Blau.



Abbildung 3.1.: Anzeigeflächen in aktuellen Fahrzeugen: das CID in Grün, das Kombi-Instrument in Orange und das HUD in Blau. (BMW)

### 3. Metaanzeige-konzept

---

**CID:** Die Größe und Auflösung des in der Mittelkonsole verbauten CID variieren je nach Fahrzeugart und Ausstattung. In aktuellen Premiummodellen werden 10,25 Zoll-Displays verbaut. Im CID können dem Fahrer unter anderem Informationen zum Fahrzeug selbst, der Navigation und den Entertainmentfunktionen (wie Radioempfang und Wiedergabe von Musik-CDs) angezeigt werden. Für die Navigation stellt das CID eine wesentliche Schnittstelle dar. Neben der Darstellung verschiedener Ansichten der digitalen Karte (wie beispielhaft in Abbildung 3.2 dargestellt) kann hier der Fahrer mit dem Navigationssystem interagieren und so seine Route wählen und verändern [16].



Abbildung 3.2.: Kartenansicht im aktuellen CID (BMW)

**Kombi-Instrument:** Im Kombi-Instrument werden dem Fahrer sämtliche relevanten Informationen zum aktuellen Zustand seines Fahrzeuges präsentiert. Im Allgemeinen setzt sich das Kombi-Instrument aus den folgenden Einzelanzeigen zusammen: Tachometer, Drehzahlmesser, Tankanzeige, Kilometerzähler, Temperaturanzeige, Kontrollleuchten sowie dem Fahrtrichtungsanzeiger (Blinker). Durch stetigen technologischen Fortschritt konnten die mechanischen Anzeigen durch elektronische Anzeigen ersetzt werden [137]. Bei aktuellen Fahrzeugen können die allgemein bekannten analogen Zeigerinstrumente vollständig durch programmierbare Anzeigeflächen ersetzt sein (siehe Abbildung 3.3). Mit Hilfe dieser Anzeigeflächen können dem Fahrer maßgeschneiderte Instrumentenanzeigen präsentiert werden. Dadurch können sich die Anzeigen, zum Beispiel durch Farbwechsel, an verschiedene Fahrsituationen sowie Fahrzeugmodi anpassen [16].



Abbildung 3.3.: Kombi-Instrument mit frei konfigurierbaren Anzeigeflächen (BMW)

**Head-up-Display:** Mit Hilfe des Head-up-Display (HUD) können dem Fahrer wesentliche Informationen direkt in sein Sichtfeld eingeblendet werden (siehe Abbildung 3.4). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird ein großer Schwerpunkt auf Anzeigen im HUD gelegt. Daher wurde dem Thema HUD bereits ein eigenes Kapitel in dieser Arbeit gewidmet (siehe Kapitel 2.3). Aktuelle HUDs erzeugen ein virtuelles Bild am Ende der Motorhaube für den Fahrer. Für ihn entsteht dadurch der Eindruck, als würde ein zusätzliches Display vor seinem Fahrzeug schweben. Die Informationen in dieser Anzeigefläche kann der Fahrer leichter ablesen, als zum Beispiel die Informationen im Kombi-Instrument, da die Änderung des Augenfokus durch die größere Entfernung zum virtuellen Bild geringer ist [138]. Heutige HUDs sind in der Lage, das vollständige Farbspektrum anzuzeigen. Dadurch können alle Farben für das Anzeigekonzept im HUD verwendet werden [15].



Abbildung 3.4.: Ansicht eines aktuellen Head-up-Display (BMW)

## 3.2. Unterteilung nach Perspektive und Wissensbereich

Mit Hilfe eines übergeordneten Anzeigekonzeptes sollen die verschiedenen Anzeigeflächen im Fahrzeug optimal für die jeweiligen Navigationsanzeigen genutzt werden. Dazu werden drei wesentliche Punkte durch dieses Konzept adressiert:

- Zuordnung einer Perspektive und somit einer Wissensdomäne zu den Anzeigeflächen
- Bewegung der Informationen über die Anzeigeflächen entsprechend ihrer Relevanz
- Vermeidung von Redundanzen in den angezeigten Informationen

Der erste Punkt ist die Wahl der entsprechenden Perspektive der Darstellung in den Anzeigeflächen. Durch die Verwendung von unterschiedlichen Perspektiven können dem Nutzer verschiedene Blickwinkel auf die Navigationsinformationen präsentiert werden. Die Perspektive kann über die folgenden drei Dimensionen definiert werden [139]:

- Egozentrisch und Exozentrisch
- Vertikale Entfernung zur dargestellten Information
- Rotation um die Orientierungsachse des Beobachters

Die relative Position des Augpunktes der Perspektive zu der tatsächlichen Position des Beobachters beschreibt den Grad der Egozentrik der jeweiligen Perspektive. Je mehr die Perspektive der dargestellten Information der realen Ansicht des Beobachters in der Umgebung entspricht, desto egozentrischer ist die jeweilige Perspektive.

Im Bereich der Fahrzeugnavigation entspricht eine vollständig egozentrische Perspektive der Ansicht des Fahrers. Das heißt, es werden nur Informationen angezeigt, die im direkten Sichtfeld des Fahrers liegen. Wenn die Darstellung von der egozentrischen zur exozentrischen Ansicht wechselt, wird die Position des Augpunktes der Perspektive schrittweise von der tatsächlichen Beobachterposition entfernt. Das bedeutet, die virtuelle Kamera löst sich aus den Augen des Fahrers und verschiebt sich entgegen der Blickrichtung. In der Darstellung wäre dann zunächst der Kopf des Fahrers zu sehen und anschließend auch das Fahrzeug, bis die Kamera so weit entfernt ist, dass die Anzeige vollständig exozentrisch ist [128].

Die Sicht auf die Umgebung durch einen äußeren Beobachter entspricht der exozentrischen Perspektive [7]. Beispiele für exozentrische Perspektiven sind die Vogelperspektive oder die Kartenansicht von oben. Die egozentrische Perspektive stellt Informationen aus Sicht des Benutzers dar. Je nach Navigationsaufgaben haben die unterschiedlichen Perspektiven Vor- und Nachteile.

Über die Entfernung zur relevanten Information kann bei konstanter Perspektive die Informationsdichte angepasst werden. Bei einer exozentrischen Kartendarstellung erhöht sich die Informationsdichte der Darstellung mit steigender Entfernung. Dies setzt voraus, dass keine dynamische Anpassung der dargestellten Objekte erfolgt. Aus Navigationsicht lassen sich Informationen zur Straßengeometrie und zum Aufbau verschiedener Kreuzungen mit Hilfe einer geringen Entfernung gut darstellen. Für die strategische Planung während der Navigationsaufgabe ist eine große Entfernung zur Karte hilfreicher.

Sobald die virtuelle Kamera um die Blickachse rotiert, entspricht die Orientierung des dargestellten Raumwinkels nicht mehr der des eigentlichen Beobachters. In einer egozentrischen Perspektive wäre dies wenig sinnvoll, da die Welt dann auf dem Kopf stehen würde. Allerdings kann dies bei einer exozentrischen Perspektive sinnvoll sein. Zum Beispiel, wenn eine Kartendarstellung, statt fahrtweisend, nordweisend angezeigt wird.

Darken und Peterson haben in einer Untersuchung die Auswirkung verschiedener exozentrischer Perspektiven von Karten untersucht [27]. Vor allem bei Navigationshandlungen muss der Benutzer von exozentrischen Kartenperspektiven die Informationen aus der Karte auf die reale Umgebung übertragen. Dies kann vor allem dann erschwert sein, wenn die Karte nach Norden ausgerichtet ist, sich das Fahrzeug aber nach Süden bewegt. Bei der Planung einer Navigationsaufgabe kann jedoch die Repräsentation der Karte vernachlässigt werden. Für planende Aufgaben empfehlen Darken und Peterson starr ausgerichtete Karten, und für handlungsorientierte Szenarien empfehlen sie dynamisch orientierte Karten. Ein weiterer Beleg für die Verwendung von egozentrischen Perspektiven für handlungsorientierte Navigationsszenarien kommt von Porathe. Seine Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verwendung egozentrischer Perspektiven zu besseren Leistungen bei Navigationsaufgaben führt als die Verwendung exozentrischer Perspektiven [101].

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse können die drei Wissensdomänen *Überblickswissen*, *Situationswissen* und *Handlungswissen* für Navigationsinformationen gebildet werden.

**Überblickswissen:** Überblickswissen beschreibt aus Sicht der Navigationsaufgabe Wissen über die Umgebung im größeren Umfeld. Es bildet die Basis für strategische Navigationsaufgaben, wie zum Beispiel die Routenplanung. Ein Fahrer mit sehr gutem Überblickswissen weiß, in welchem Gebiet er sich befindet, und hat detaillierte Informationen über seine aktuelle Umgebung. Für die Darstellung von Überblickswissen wird eine exozentrische Perspektive mit großer Entfernung zur aktuellen Egoposition verwendet. Überblickswissen hilft jedoch nur bedingt bei der Wegführung, der akuten Navigationsaufgabe [54].

**Handlungswissen:** Für die Wegführung benötigt der Fahrer konkretes Handlungswissen. Handlungswissen beschreibt die Art und Lage der nächsten Manöver, die zum Folgen der aktuellen Route notwendig sind. Da Handlungswissen vom Fahrer direkt in Fahraktionen umgesetzt werden muss, wird für die Darstellung eine egozentrische Perspektive verwendet. Es ist einem Fahrer möglich, rein mit Handlungswissen dem Verlauf der Route bis zu seinem Ziel zu folgen. Jedoch kann er dann sehr oft von der Manöversituation überrascht werden, da Handlungswissen nur einen begrenzten Beitrag zum Situationswissen enthält.

**Situationswissen:** Situationswissen umfasst Informationen über die aktuellen sowie die bevorstehenden Straßen- und Verkehrssituationen. Aus Navigationssicht beschreibt Situationswissen den detaillierten Aufbau des nächsten Fahrmanövers. Ähnlich dem Überblickswissen wird für die Darstellung von Situationswissen eine exozentrische Perspektive gewählt. Jedoch wird der Blickwinkel des Beobachters nicht auf die Egoposition, sondern auf den Ort der jeweiligen Situation ausgerichtet. Der Beobachter befindet sich dann in geringer Entfernung zur Situation, damit die dargestellten Informationen auf wesentliche, situationsrelevante Informationen reduziert werden. Dazu zählen im Fall einer Kreuzung unter anderem die geometrische Anordnung der Kreuzung, der Verlauf der Route durch die Kreuzungssituation, die Anzahl der hinführenden Fahrstreifen sowie die Darstellung der optimalen Fahrstreifen zum Folgen der Route. Mit Hilfe des Situationswissens kann sich der Fahrer optimal auf das bevorstehende Fahrmanöver vorbereiten.

### 3.3. Verteilung der Information über die Anzeigeorte

Für die Verteilung der Navigationsinformationen aus den genannten Wissensdomänen auf die verschiedenen Anzeigeorte im Fahrzeug werden zwei verschiedene Klassifikationen als Grundlage verwendet. Zum einen die Einteilung der Fahraufgaben und zum anderen die Kenntnis über die Bezüge in der Umgebung.

**Primäre, sekundäre und tertiäre Aufgabenklassen:** Nach Geiser können die Aufgaben für den Fahrer im Fahrzeug in drei verschiedene Klassen eingeteilt werden: primäre, sekundäre und tertiäre Aufgaben [45]. Die direkte Beeinflussung der Fahrzeugbewegung ist Bestandteil der primären Aufgaben. Der Fahrer muss stets die Position und Bewegung seines Fahrzeuges innerhalb der Umwelt und mit anderen Verkehrsteilnehmern koordinieren. Zu den sekundären Aufgaben des Fahrers zählen alle Handlungen, mit deren Hilfe der Fahrer die Sicherheit für sein eigenes Fahrzeug und andere Verkehrsteilnehmer erhöht.

### 3. Metaanzeige-konzept

---

Dazu zählen unter anderem die Bedienung des Fahrtrichtungsanzeigers sowie der Fahrzeugbeleuchtung. Die tertiären Aufgaben dienen der Informationsgewinnung, Unterhaltung sowie dem Komfort des Fahrers. Entsprechende Vertreter sind das Radio, die Klimaanlage und das Navigationssystem [45] [132].



Abbildung 3.5.: Verteilung von primären, sekundären und tertiären Aufgaben[132]

In Abbildung 3.5 ist die räumliche Aufteilung der entsprechenden Bedien- und Anzeigeelemente innerhalb des Cockpits aus Sicht des Fahrers dargestellt. Die primären Aufgaben liegen im blau markierten Bereich: Mit Hilfe der Pedale im Fußraum und des Lenkrads kann der Fahrer direkten Einfluss auf die Fahrzeugbewegung ausüben. Über die Windschutzscheibe hat er direkte Sicht auf seine Umgebung. Mit Hilfe der Bedienelemente am und in Nähe des Lenkrads kann er alle sekundären Aufgaben, wie zum Beispiel die Blinkerbedienung, ausüben. Und von der eigentlichen Fahraufgabe gelöst, finden sich im mittleren Fahrzeugbereich die Bedienelemente für Radio, Klimaanlage und Navigationssystem [132].

Unter anderem haben sich Ablaßmeier, Milicic und Tönnis umfassend mit der Einteilung der Fahraufgabe und ausgewählten Aspekten bei der Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes befasst. Daher sei an dieser Stelle für weitere Informationen auf Ihre Arbeiten verwiesen [1] [84] [131].

**Globales Bewusstsein und Lokale Führung:** Satalich unterteilt den Navigationsanteil der Fahraufgabe in globales Bewusstsein und lokale Führung [115].

Das Wissen über den Routenverlauf zum Ziel in Verbindung mit großflächiger Kenntnis über entsprechende Entfernungen und Straßen bildet das globale Bewusstsein. Somit stellt globales Bewusstsein das Äquivalent zum bereits beschriebenen Überblickswissen dar.



Die direkte Steuerung des Fahrzeuges sowie das Wissen über die unmittelbare Umgebung des Fahrzeuges entsprechen der lokalen Führung. Hierzu zählen die Einhaltung der vorgegebenen Fahrstreifen und die Wahl der entsprechenden Spuren durch den Kreuzungsbereich. Für eine gute lokale Führung benötigt der Fahrer ausreichendes Handlungswissen.

**Kombination von Wissensdomäne und Perspektive:** Aus dieser Klassifikation ergibt sich eine Verteilung der Wissensdomänen auf die verfügbaren Anzeigeorte. Diese Verteilung ist in Abbildung 3.6 dargestellt:

- Überblickswissen wird in einer exozentrischen Perspektive mit großer Entfernung im zentralen Informationsdisplay angezeigt.
- Situationswissen wird in einer egozentrischen Perspektive mit großer Entfernung im Kombi-Instrument dargestellt.
- Handlungswissen wird in einer egozentrischen Perspektive mit geringer Entfernung unmittelbar im Head-up-Display präsentiert.

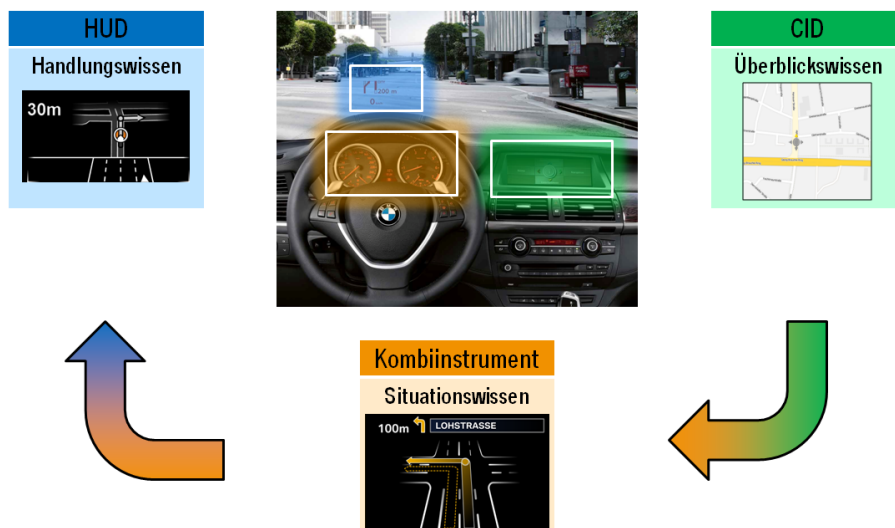


Abbildung 3.6.: Verteilung der Wissensdomänen auf die verfügbaren Anzeigeorte

Bei der Annäherung an eine Manöversituation verlagert sich die Relevanz der verschiedenen Anzeigeorte für den Fahrer. Bei großer Entfernung zum Manöver benötigt der Fahrer für die Navigationsaufgabe lediglich grobes Überblickswissen. Dieses kann er, wenn es die Fahraufgabe zulässt, durch Blickabwendung von der Straße hin zum zentralen Informationsdisplay ablesen. Wenn die Entfernung zum Manöver reduziert ist und sich der Fahrer entsprechend vorbereiten möchte, benötigt er Situationswissen. Dieses kann er durch leichte Blickabwendung direkt im Kombi-Instrument ablesen. Für die Ausführung des Manövers benötigt er Handlungswissen. Dieses entsteht dank der Darstellung im Head-up-Display direkt und mit minimaler Blickabwendung.



## 4. Softwareframework

Neben der Erstellung und Bewertung von Konzepten zur Integration von Augmented Reality in verschiedene Navigationsanwendungsfälle hat diese Arbeit den Anspruch, alle erarbeiteten Konzepte auch prototypisch umzusetzen, so dass diese Konzepte erlebbar und dadurch bewertbar werden.

In den letzten Jahren wurden innerhalb der Gruppe *Navigation- und Datendienste* in der *BMW Forschung und Technik GmbH* im Rahmen verschiedener Projekte zahlreiche Softwarekomponenten für den Einsatz im Bereich Navigation, wie zum Beispiel Zugriff auf die digitale Karte, Positionsfilter, MapMatcher und MapRenderer, entwickelt. Diese Komponenten werden mit Hilfe des OSGi-Frameworks in der BMW-internen Navigationsentwicklungsplattform CORONA (*COmponent framework for Research Of NAVigation*) zusammengefasst. Damit bildet CORONA die ideale Ausgangsbasis für die Entwicklung weiterer Navigationsfunktionen [98].

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über CORONA im Allgemeinen sowie über das verwendete OSGi-Framework und die im Projekt angewendete Basiskonfiguration. Anschließend folgt eine detaillierte Beschreibung über die neu entstandenen Komponenten.

### 4.1. Plattform- und Komponentenüberblick

Wie bereits im Grundlagenkapitel 2.2 beschrieben, besteht ein Navigationssystem aus vielen verschiedenen Funktionsbausteinen. CORONA nutzt das OSGi-Framework, um die verschiedenen Bausteine in einzelnen Komponenten kapseln zu können. Dadurch können Funktionen sehr einfach angepasst oder gar ersetzt werden. Das OSGi-Framework bietet ein Komponentenmodell mit integriertem Veröffentlichungsmechanismus für die jeweiligen Schnittstellen der einzelnen Komponenten. Jede Komponente, die Schnittstellen für andere Komponenten im System anbieten möchte, registriert diese Schnittstelle in Form eines Dienstes im System. Andere Komponenten können anschließend über diesen Dienst auf diese Komponente zugreifen. Durch die Definition der externen Schnittstellen mittels der Komponenten-Dienste können verschiedene Ausprägungen einer Funktionsimplementierung, ohne Änderungen in anderen Komponenten vornehmen zu müssen, ausgetauscht werden [141].

#### 4.1.1. Allgemeiner Aufbau der Plattform CORONA

In diesem Abschnitt werden der allgemeine Aufbau sowie die Funktionsweise der einzelnen Komponenten anhand von Beispielen auf Basis des Anwenderhandbuches von CORONA [98] beschrieben.

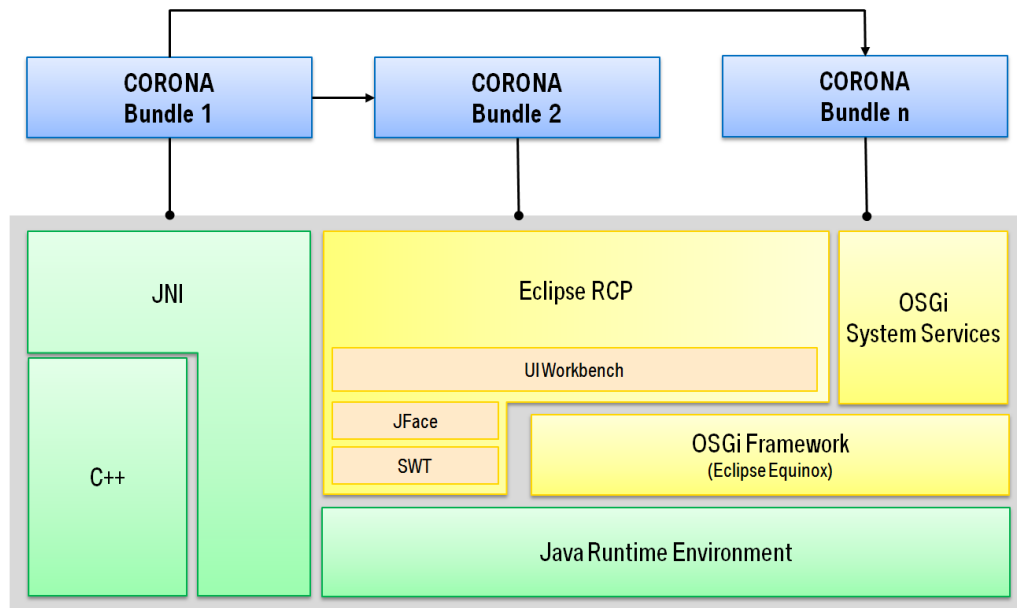


Abbildung 4.1.: Architekturübersicht CORONA als komponentenbasiertes Framework

**Architektur von CORONA:** Der allgemeine Aufbau von CORONA ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Eine Komponente kann entweder nativ implementiert sein (zum Beispiel in C oder C++) und mittels *Java Native Interface (JNI)* eine Java-Schnittstelle bereitstellen oder eine reine Java-Komponente sein. Reine Java-Komponenten basieren auf der *Java Runtime Environment (JRE)*. Komponenten mit grafischen Benutzeroberflächen basieren in CORONA auf der *Eclipse Rich Client Plattform (RCP)* [80]. Dabei bietet *Eclipse RCP* mit *JFace* und *SWT* verschiedene Möglichkeiten zum Gestalten der grafischen Benutzerschnittstellen (GUI). Sowohl Benutzerschnittstellen-Komponenten als auch Schnittstellenbeschreibungen (API) und die entsprechenden Implementierungen verwenden das *OSGi Framework* (auf Basis von *Eclipse Equinox*), um Ihre Dienste mit Hilfe der *OSGi System Services* anzubieten.

**Trennung von Implementierung und Schnittstellenbeschreibung:** Einzelne Komponenten werden in CORONA im Allgemeinen auf verschiedene OSGi-Bundles aufgeteilt:

- API: Bereitstellung von Schnittstellen und notwendigen reinen Datenklassen
- Implementierung: Eine Implementierung der entsprechenden API
- GUI: Grafische Benutzerschnittstelle für die Verwendung der Funktion der Komponenten. Diese greift nicht direkt auf die Implementierung zu, sondern verwendet ausschließlich die zugrundeliegende API.

Diese strikte Trennung zwischen Schnittstellenbeschreibung (API), Implementierung sowie Benutzerschnittstellen ermöglicht den einfachen Austausch einzelner Implementierungen und bietet so flexible Gestaltungsmöglichkeiten des Gesamtsystems [98].

### Beispiel: Umsetzung der Routenplanung

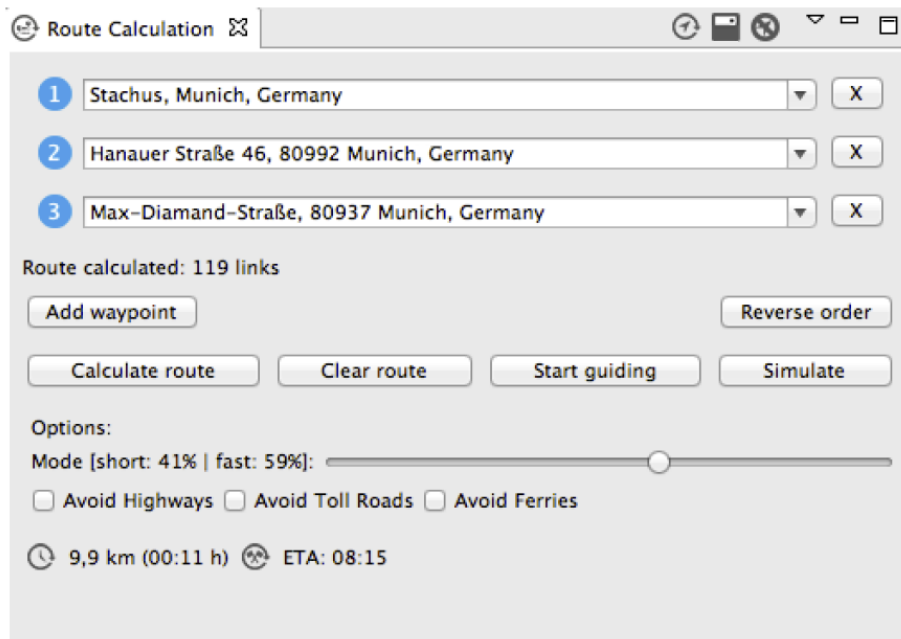


Abbildung 4.2.: Ansicht der Routenberechnung in CORONA

Am Beispiel der Routenplanungskomponente sollen diese Trennung sowie die entsprechende Umsetzung innerhalb des CORONA Frameworks dargestellt werden. Die Routenplanung bildet eine wesentliche Kernkomponente des Navigationsframeworks.

Mit Hilfe dieser Komponente können Routen zwischen beliebigen Start- und Endpunkten berechnet werden. Es können zusätzlich beliebige Via-Punkte, also Punkte über welche die Route zwischen Start- und Endpunkt verlaufen soll, angegeben werden. Einzelne Punkte werden entweder durch geografische Koordinaten oder Mittels einer Postanschrift definiert. Intern arbeitet die Routenplanung jedoch nur mit geografischen Koordinaten, die anhand von MapMatching-Verfahren auf die entsprechenden Links in der digitalen Karte (siehe Kapitel 2.2.2) abgebildet werden. Unter Verwendung von Geocoding-Verfahren werden die eingegebenen Postanschriften in die jeweiligen geografischen Koordinaten umgerechnet.

**Architektur der Routenplanungskomponente:** Der Aufbau der Routenplanung ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die grafische Benutzerschnittstelle (dargestellt in Abbildung 4.2) basiert auf der Komponente *routeplanning-eclipse-ui*. Diese Komponente erzeugt mittels SWT-Werkzeugen die dargestellte grafische Benutzerschnittstelle und implementiert die Aktionen zwischen Benutzer und Komponente. Zusätzlich greift sie über die Schnittstellen *geocoder-api* und *routeplanning-api* auf die Dienste des verwendeten Geocoders sowie der Routenplanung zu. In diesen Komponenten sind die aufrufbaren Methoden sowie die exportierten Klassen der beiden Komponenten definiert. Das heißt wenn der Benutzer eine Postanschrift eingibt, wird diese von der *routeplanning-eclipse-ui* entgegenge-

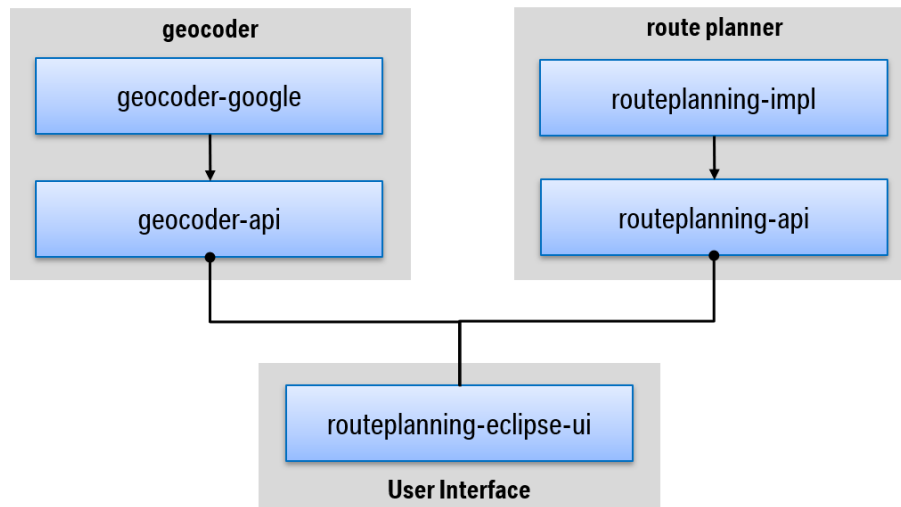


Abbildung 4.3.: Aufbau der Routenplanungskomponente: Aufteilung in modulare Funktionsblöcke mittels separater OSGi-Bundles

nommen und über entsprechende Methoden der *geocoder-api* an den aktuellen Geocoder übergeben. Die daraus resultierenden Koordinaten werden dann über entsprechende Methoden der *routeplanning-api* an die aktuell verwendete Routenplanung übergeben. Anschließend wird die Route in der Routenplanung berechnet und über die jeweiligen Dienste innerhalb des CORONA-Frameworks bereitgestellt.

**Implementierung der Schnittstellenbeschreibung:** Da eine Schnittstelle auf verschiedene Arten implementiert werden kann, wird die jeweilige Implementierung mittels Systemkonfiguration ausgewählt. In diesem Beispiel wird die Geocoding-Schnittstelle von Google verwendet. Daher ist in dieser Konfiguration die Komponente *geocoder-google* diejenige die die *geocoder-api* implementiert. Dies hat den Vorteil, dass sehr einfach zwischen verschiedenen Implementierungen gewechselt werden kann. Zum Beispiel ist es ohne großen Aufwand möglich, das Geocoding durch einen anderen Algorithmus zu realisieren. Dieser Algorithmus müsste dann in der *geocoder-alternative* implementiert werden. Zusätzlich muss die *geocoder-alternative* die entsprechende Schnittstelle *geocoder-api* implementieren. Abschließend muss in der neuen Systemkonfiguration die *geocoder-google* gegen die *geocoder-alternative* ausgetauscht werden. Da die *routeplanning-eclipse-ui* nur gegen die gleichgebliebene *geocoder-api* implementiert ist, sind in dieser Komponente keine Anpassungen notwendig.

**Flexibilität durch projektspezifische Konfigurationen:** Dieser Konfigurationsmechanismus bietet größtmögliche Flexibilität bei stark reduziertem Wartungsaufwand. Jedes Projekt kann seine eigene projektspezifische Systemkonfigurationen anlegen. Einzelne Konfigurationen können sich durch die verwendeten Einzelkomponenten sowie die Versionsstände und Parameter dieser Komponenten unterscheiden. Dadurch können zum Beispiel einzelne fahrzeugspezifische Konfigurationen angelegt werden.

Im Nachfolgenden werden die verwendete Basiskonfiguration für das Guiding-Projekt sowie die daraus resultierenden Anpassungsmöglichkeiten auf die verschiedenen Einsatzszenarien vorgestellt.

#### 4.1.2. Guiding-Konfiguration von CORONA

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Guiding-Konzepte prototypisch realisiert und anschließend bewertet. Dadurch ergeben sich entsprechende Anforderungen an die verwendete Software. Da der Schwerpunkt auf der grafischen Repräsentation von Guiding-Hinweisen in realen Verkehrssituationen liegt, das heißt, die dargestellten Anzeigen auf realen Karten- und Sensordaten basieren, wird CORONA für die Umsetzung der jeweiligen Anzeigen verwendet. In Abbildung 4.4 ist der grundlegende Aufbau der Guiding-Konfiguration dargestellt. Innerhalb CORONA existieren bereits grundlegende Navigationsfunktionen, wie der Zugriff auf die digitale Karte und Fahrzeuginformationen, Positionsbestimmung sowie Routenberechnung. Diese Komponenten können daher direkt in die Projektkonfiguration übernommen werden und bilden den Rahmen der Basiskonfiguration für das Guiding-Projekt. Lediglich die Ausprägung der einzelnen Komponenten wird teilweise an die entsprechenden Einsatzszenarien angepasst.

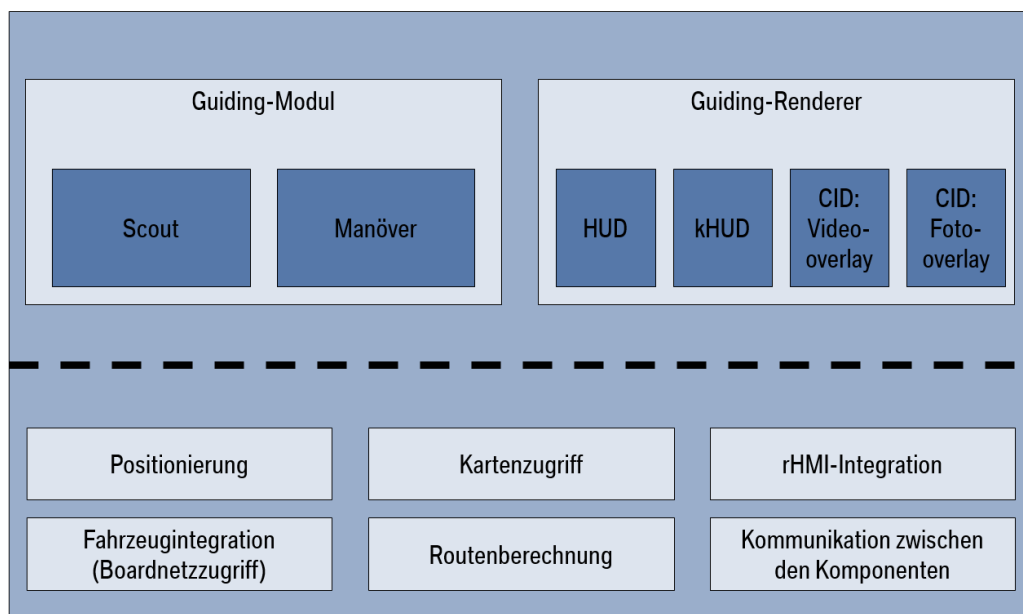


Abbildung 4.4.: Überblick über die einzelnen Komponenten im Softwareframework

**Implementierung der Wegführung:** Das Herz der Konfiguration stellen die beiden Komponenten Guiding-Modul und Guiding-Renderer dar. Innerhalb des Guiding-Moduls werden aus der gewählten Route relevante Fahrmanöver extrahiert, und während der Fahrt findet ein ständiger Abgleich der aktuellen Position mit der gewählten Route statt. Bei einem Deviat (Abweichung des Fahrzeuges von der gewählten Route) wird eine neue Routenberechnung gestartet, und bei einem Voranschreiten auf der Route wird entweder ein

neues Manöverobjekt erzeugt oder ein bereits bestehendes aktualisiert. Auf Basis dieser Manöverobjekte werden innerhalb des Guidance-Renderers entsprechende Anzeigen mit Navigationshinweisen für den Fahrer generiert.

**Basiskomponenten und Infrastruktur:** Die Guiding-Konfiguration von CORONA nutzt neben den Guiding-Komponenten noch weitere Komponenten, welche die Basis für die Funktionalität darstellen. Diese Komponenten sind nicht im Rahmen dieser Arbeit entstanden. Es gab lediglich an einigen Komponenten leichte Anpassungen für die Guiding-Konfiguration. Im unteren Teil der Abbildung 4.4 sind diese Basiskomponenten aufgeführt. Positionierung umfasst in diesem Fall die Kombination aus Koppelnavigation und Map-Matcher (siehe Abschnitt 2.2.2). Der Kartenzugriff bietet eine Schnittstelle in die digitale Navigationskarte, welche im NDS-Format vorliegt (siehe Abschnitt 2.2.1). Die rHMI-Integration ermöglicht es, Anzeigen auf dem CID zu verändern und bietet die Schnittstelle zum Fahrer. Die Fahrzeugintegration empfängt die verschiedenen Signale vom Fahrzeugnetzwerk und bereitet diese für CORONA auf. Mit Hilfe der Routenberechnung wird die Route zwischen der aktuellen Position und dem eingegebenen Zielort berechnet (siehe Abschnitt 2.2.4) - anschließend können diese Informationen vom Guiding-Modul verarbeitet werden. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten wird über das OSGi-Framework und entsprechende Schnittstellen sichergestellt.

**Implementierung und Test am Arbeitsplatz und Bewertung im Fahrzeug:** Die Anzeigen werden später im Fahrzeug bewertet. Jedoch können diese aus ergonomischen Gründen nicht im Fahrzeug entwickelt und implementiert werden. Daher muss die verwendete Konfiguration die Möglichkeit zur Entwicklung am Arbeitsplatz bieten. Durch seinen modularen Aufbau ist CORONA ideal für diese Anforderung geeignet. Entsprechende Funktionalitäten werden hinter den jeweiligen APIs gekapselt. Anschließend können beliebige Konfigurationen für den jeweiligen Verwendungszweck erstellt werden. So liefert im Versuchsträger das Fahrzeugboardnetz die entsprechenden Sensorsignale, während am Arbeitsplatz eine konfigurierbare Wiedergabekomponente die vorher aufgezeichneten Fahrzeugsignale ins System einspielt. Zusätzlich können die einzelnen grafischen Benutzerschnittstellen auf die jeweiligen Anzeigemöglichkeiten konfiguriert werden. Am Arbeitsplatz kann zum Beispiel eine beliebige Auflösung verwendet werden und im Versuchsträger muss die Auflösung an den jeweiligen Anzeigebildschirm (zum Beispiel das HUD oder CID) angepasst werden.

## 4.2. Komponenten- und Schnittstellenbeschreibung

In diesem Abschnitt werden die bereits angesprochenen Hauptkomponenten Guiding-Modul und Guiding-Renderer sowie die internen und externen Schnittstellen vorgestellt. Dadurch sollen vor allem der modulare Aufbau und die damit erreichte Flexibilität der verschiedenen Guiding-Konfigurationen anschaulich präsentiert werden.



### 4.2.1. Guiding-Modul

Das Guiding-Modul verwaltet in CORONA die aktive Route. Zu den weiteren Aufgaben dieses Moduls zählen die Analyse der Route im Hinblick auf etwaige notwendigen Navigationsmanöver (inklusive notwendiger Fahrstreifenwechsel), die Verfolgung der aktuellen Fahrzeugposition entlang der Route sowie das Anstoßen einer Neuberechnung beim erkannten Verlassen der Route.

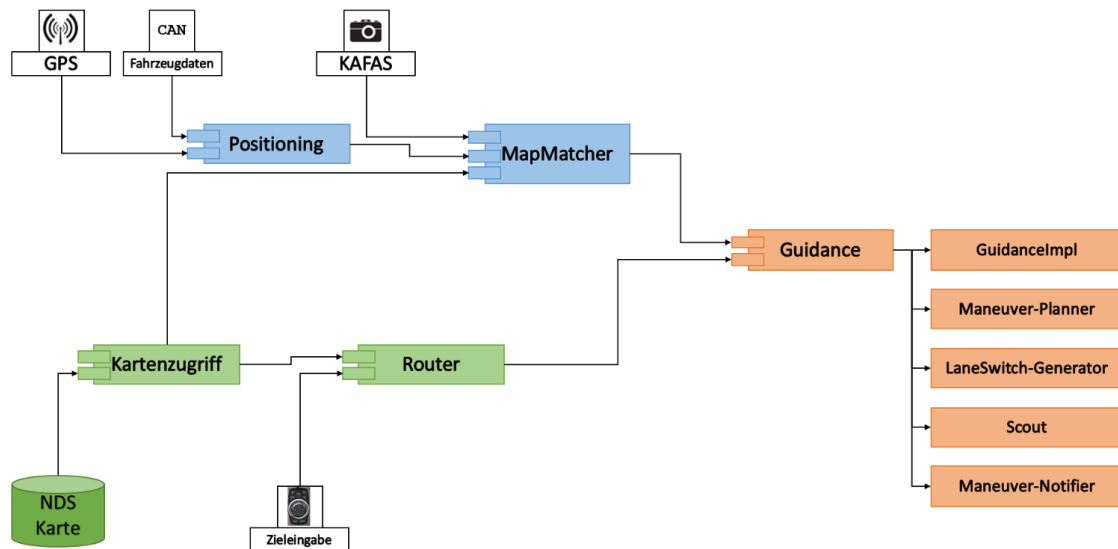


Abbildung 4.5.: Komponenten und externe Schnittstellen des Guiding-Moduls

Abbildung 4.5 zeigt den Aufbau dieses Moduls sowie die externen Schnittstellen. Die Komponenten *GuidanceImpl*, *Maneuver-Planner*, *LaneSwitch-Generator*, *Scout* und *Maneuver-Notifer* bilden das Guiding-Modul. Im Nachfolgenden werden diese fünf Komponenten detaillierter beschrieben.

**GuidanceImpl:** Die Verwaltung des Guiding-Moduls erfolgt innerhalb der Komponente *GuidanceImpl*. Die Kommunikation mit dem Routenplaner erfolgt über die Anmeldung beim vom Routenplaner bereitgestellten *RoutePlanningService*. Über diesen Dienst werden neu berechnete Routen empfangen und es kann bei Bedarf eine Neuberechnung der Route angestoßen werden. Innerhalb der Komponente *GuidanceImpl* werden die Teilkomponenten *Scout*, *Maneuver-Planner* und *Maneuver-Notifer* gestartet und angesprochen. Nach außen wird der Dienst *GuidanceService* angeboten. Mit Hilfe dieses Dienstes können andere Komponenten mit dem Guiding-Modul interagieren. Zum Funktionsumfang zählen das Abrufen und Setzen der aktiven Route im System sowie das vollständige Pausieren des Guiding-Moduls. Weiterhin können sich andere Komponenten im System über diesen Dienst als Listener registrieren und werden dann über Callback-Methoden über etwaige Aktualisierungen informiert.

**Maneuver-Planer:** Innerhalb der Komponente *Maneuver-Planer* werden einmalig sowohl nach dem Setzen als auch bei Änderung der aktiven Route alle für den Fahrer relevanten Manöver generiert.

Der Maneuverplanungs-Algorithmus kombiniert initial jeweils zwei aufeinanderfolgende Links entlang der Route zu einer möglichen Manövergruppe, da ein Manöver nur zwischen zwei Links auftreten kann. Anschließend werden nicht relevante Gruppen entfernt und zusammenhängende Gruppen innerhalb von Kreuzungsbereichen gebildet. Zum Abschluss werden die übrigen Gruppen nach Manöverart klassifiziert, und ein entsprechender Abbiegewinkel wird bestimmt. Die Basis hierfür ist ein Regelwerk, das auf JavaScript basiert und somit zur Laufzeit angepasst werden kann. In diesem Regelwerk sind neben den Regeln zum Filtern und Kombinieren der entsprechenden Gruppen auch die Intervalle für die Zuordnung des Abbiegewinkels zu einer Manöverrichtung definiert (siehe Abbildung 4.6 linke Seite).

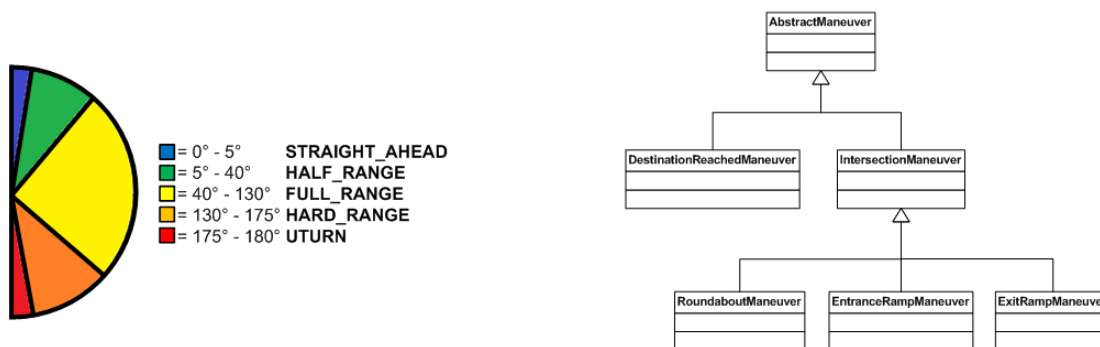


Abbildung 4.6.: Links: Darstellung der verschiedenen Abbiege-Intervalle  
Rechts: Klassenmodell der möglichen Navigationsmanöver

Die generierten Manöver werden anschließend in ein Klassenmodell mit Vererbung, dessen Aufbau in Abbildung 4.6 auf der rechten Seite dargestellt ist, eingeordnet. Es wird zwischen *IntersectionManeuver* und *DestinationReachedManeuver* unterschieden. Beide erben grundlegende Attribute von *AbstractManeuver* und bekommen dadurch eine eindeutige Position entlang der Route sowie eine Straßenzuordnung. Das Ende der aktuellen Route ist durch das *DestinationReachedManeuver* markiert. Jedes *IntersectionManeuver* sollte dem Fahrer mitgeteilt werden. Zu den wesentlichen Attributen gehören die Manöverrichtung sowie der Name der Zielstraße. Die Spezialmanöver Kreisverkehr sowie Auf- und Abfahrten erhalten durch ihre entsprechenden Klassen zusätzliche relevante Attribute, wie beispielsweise die Anzahl der Ausfahrten am Kreisverkehr.

**LaneSwitch-Generator:** Der LaneSwitch-Generator ermittelt notwendige Fahrstreifenwechsel durch stetigen Abgleich der aktuellen Fahrzeugposition mit der Route. Bei jeder Aktualisierung der Fahrzeugposition werden der aktuell befahrene Fahrstreifen mit dem vom Router berechneten idealen Fahrstreifen verglichen und der zu erwartende Fahrstreifenverlauf entlang der Route ausgehend vom aktuellen Fahrstreifen analysiert. Anschließend werden alle zukünftigen Fahrstreifenwechsel entlang der Route bereitgestellt.

Für die Erzeugung der Fahrstreifenwechsel nutzt der LaneSwitch-Generator den in Abbildung 4.7 dargestellten Algorithmus. Im Wesentlichen kann ein Wechsel des Fahrstreifens nur aus zwei verschiedenen Gründen notwendig sein:

- Abweichung vom Sollfahrstreifen: der aktuell befahrene Fahrstreifen entspricht nicht einem möglichen Fahrstreifen zum Folgen der Route.
- Routenverlauf: Der Verlauf der Route erfordert einen Fahrstreifenwechsel, wie beispielsweise den Wechsel auf eine Abbiegespur bei einem Abbiegemanöver.

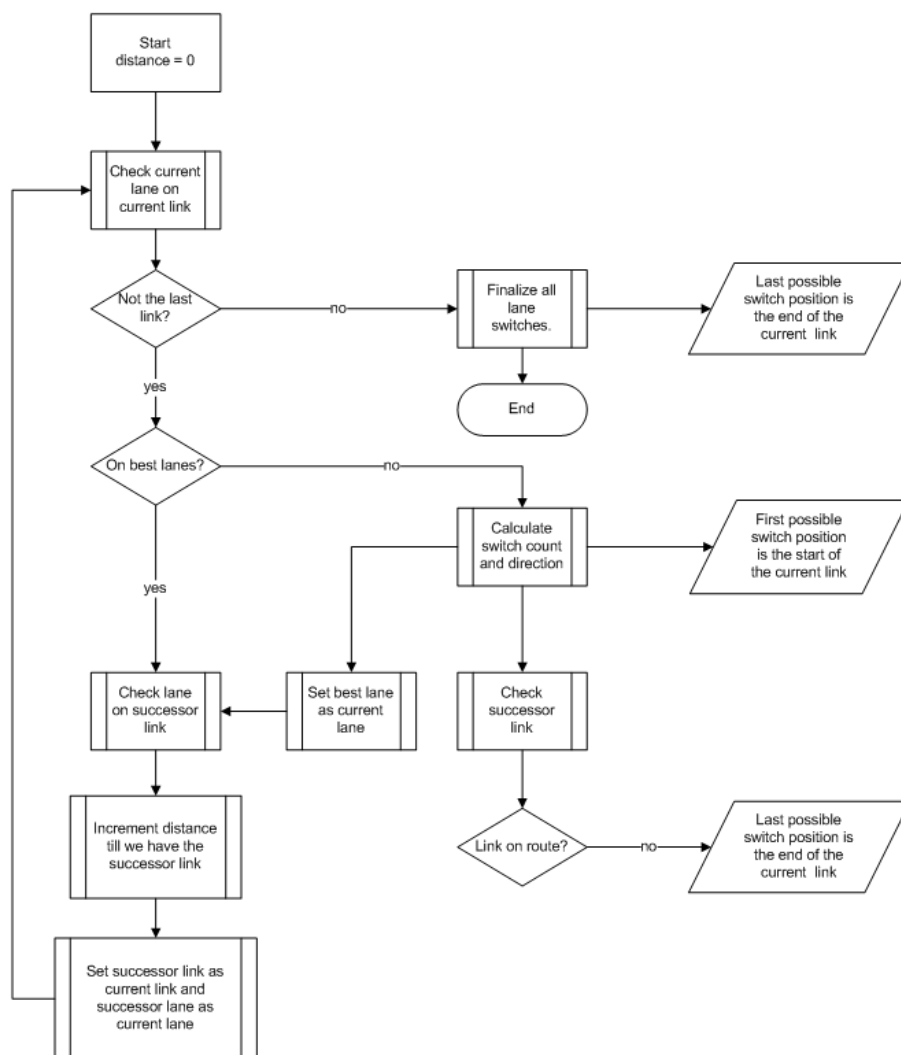


Abbildung 4.7.: Ablaufdiagramm des verwendeten Algorithmus für die Erzeugung der Fahrstreifenwechselhinweise

Sobald ein notwendiger Fahrstreifenwechsel erkannt wurde, müssen für diesen noch die folgenden Parameter ermittelt werden:

- Erste Wechsellmöglichkeit: die frühestmögliche Position entlang der Route, an welcher der Fahrstreifen gewechselt werden kann. Bei Abweichungen ist dies im Allgemeinen die Position des Fahrzeuges.
- Letzte Wechsellmöglichkeit: die letzmögliche Position entlang der Route, an welcher der Fahrstreifen gewechselt werden kann. Bei manöverbedingten Fahrstreifenwechseln ist diese im Allgemeinen der Manöverort.
- Entfernung zum Wechsel: Der Abstand zwischen aktueller Fahrzeugposition und der ersten Wechsellmöglichkeit wird mit jeder Aktualisierung der Position neu berechnet.
- Entfernung zum Dringlichkeitslevelwechsel: der Abstand zwischen aktueller Fahrzeugposition und der Stelle, an der sich das Dringlichkeitslevel des Hinweises ändert.
- Bereich: die Länge des Straßenabschnittes, die für den Fahrstreifenwechsel zur Verfügung steht. Im Allgemeinen ist dies die Entfernung zwischen der ersten und letzten Wechsellmöglichkeit.
- Anzahl: die Anzahl der zu wechselnden Fahrstreifen.
- Richtung: die Richtung, in die gewechselt werden muss (links, rechts).

Die Dringlichkeit des Fahrstreifenwechsels wird aus der Anzahl, Distanz und der Fahrzeuggeschwindigkeit abgeleitet. Mit Hilfe der Geschwindigkeit und der Distanz wird die verfügbare Reisezeit  $t$  ermittelt. Für jeden Fahrstreifenwechsel wird diese Zeit mit dem Faktor 0,75 multipliziert, um die Dringlichkeit zu erhöhen. Aus der verbleibenden Reisezeit  $t$  wird dann die entsprechende Dringlichkeit abgeleitet:

- FUTURE\_SWITCH:  $t > 48\text{ s}$
- UPCOMING\_SWITCH:  $48\text{ s} > t > 31\text{ s}$
- SWITCH:  $31\text{ s} > t > 18\text{ s}$
- NOW\_SWITCH:  $18\text{ s} > t$

Die Dringlichkeit kann von nachfolgenden Modulen, wie beispielsweise dem Guiding-Renderer, ausgewertet werden, um die Anzeigen für den Benutzer entsprechend anpassen zu können. Durch die Berechnung der Dringlichkeit an einer zentralen Stelle ist zum einen sichergestellt, dass alle nachfolgenden Module dieselbe Dringlichkeit benutzen und die Anzeigen entsprechend synchron verlaufen, und zum anderen müssen Änderungen der Parametrisierung nur an einer einzigen Stelle gepflegt werden.

**Scout:** Die Komponente *Scout* registriert sich bei den Diensten *MapMatcherService* und *JDALService*. Über diese beiden Dienste erhält sie die aktuelle Fahrzeugposition sowie Zugriff auf die digitale Karte. Der *Scout* ist verantwortlich für die Überwachung der Position entlang der aktuell gewählten Route, die Benachrichtigung beim Überfahren von sogenannten Via-Punkten entlang der Route, die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, noch auf der Route zu sein, die Erkennung des Verlassens der Route sowie die Benachrichtigung des Routenplaners über das Verlassen der gewählten Route, damit dieser eine neue Route berechnen kann.

Dazu verfolgt der *Scout* die aktuelle Position auf einer gegebenen Route nach einer zu definierenden Strategie. Die Strategie muss einen Wert für die Wahrscheinlichkeit, sich auf der Route zu befinden, liefern. Mittels eines Schwellwertes für diese Wahrscheinlichkeit wird anschließend der Zustand *on-route* geregelt.

Eine sehr einfache Strategie würde nur das Ergebnis *on-route* liefern wenn, der vom *Map-Matcher* gewählte Link Teil der Route ist. Diese Strategie wird jedoch vor allem in Kreuzungsbereichen aufgrund der Modellierung und der damit verbundenen Ungenauigkeit nicht ordnungsgemäß funktionieren. Eine bewährte Strategie akkumuliert die gefahrene Distanz entlang von Links, die nicht Bestandteil der Route sind, und liefert mit steigender Entfernung einen kleineren Konfidenzwert zurück. Dadurch führen kurzzeitige Fehler des *MapMatcher* nicht zu ungewolltem Verhalten des Guiding-Moduls.

**Maneuver-Notifer:** Auf Basis der vom *Scout* verfolgten Position auf der Route erzeugt der *Maneuver-Notifer* für anstehende Manöver ein entsprechendes Maneuver-Event. Dazu wird zunächst der Zustand des nächsten Manövers mit Hilfe eines Regelwerkes bestimmt. Dieses Regelwerk basiert ebenfalls auf JavaScript und ermöglicht dadurch ein breites Spektrum an Anpassungen während der Laufzeit. Klassische Regeln ordnen den Manövern die Zustände gemäß der aktuellen Entfernung zu. Durch die Verwendung der aktuellen Geschwindigkeit sowie der wahrscheinlichen Geschwindigkeit auf den nachfolgenden Links kann eine Zuteilung auf Basis von Zeiten erzeugt werden. Diese Zuteilung kann unter bestimmten Umständen weniger robust sein, ist jedoch für den Menschen im Allgemeinen einfacher zu verstehen.

Zum Abschluss wird das so erzeugte Maneuver-Event mit Hilfe der Callback-Methode an alle registrierten Listener im System verteilt.

### 4.2.2. Guidance-Renderer-Umgebung

Die Komponenten *DataHolder* und *Guidance-Renderer* bilden die Umgebung des *Guidance-Renderers*. Innerhalb dieser Umgebung werden sämtliche Informationen des Fahrzeuges verarbeitet und daraus entsprechende Anzeigen generiert. Die Hauptaufgabe besteht in der Darstellung verschiedener Navigationsanzeigen. Jedoch lassen sich auch andere Funktionen im Fahrzeug auf Basis entsprechender Sensoren visualisieren.

Durch das verwendete Stellvertreterprinzip und den modularen Aufbau der *Guidance-Renderer*-Komponente bietet diese Umgebung sehr viel Flexibilität und ermöglicht dadurch die schnelle Erzeugung von entsprechenden Prototypen für die anschließende Evaluierung der Konzepte im Fahrzeug.

Der Aufbau ist in Abbildung 4.8 skizziert. Innerhalb der Umgebung des *Guidance-Renderers* registriert sich der *DataHolder* bei relevanten CORONA-Komponenten, wie zum

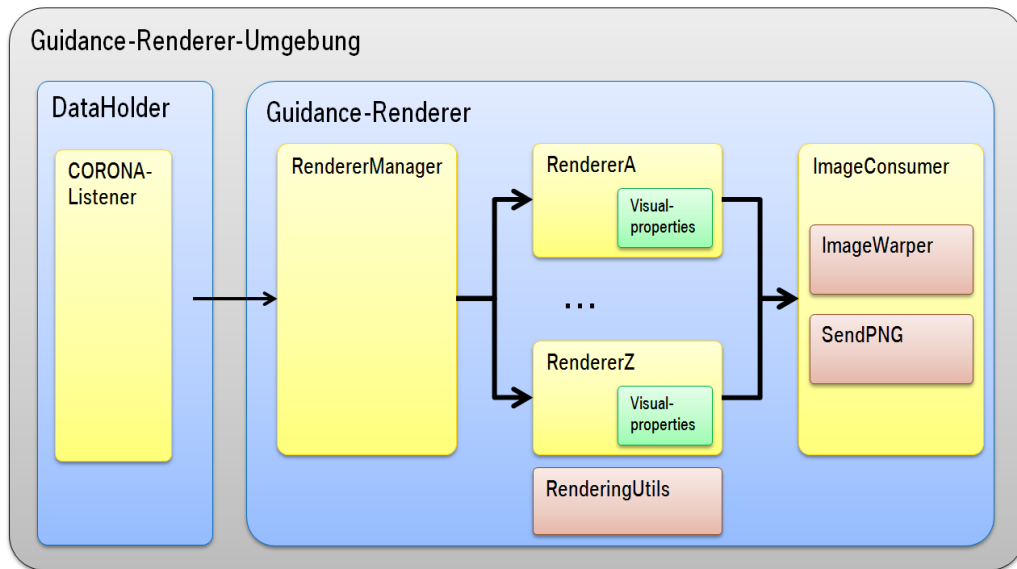


Abbildung 4.8.: Aufbau der Guidance-Renderer-Umgebung

Beispiel dem Guiding-Modul, und stellt dem Guidance-Renderer die entsprechenden Informationen in aufbereiteter Form zur Verfügung. Anschließend werden im *Guidance-Renderer* die jeweiligen Anzeigen erzeugt. Mit Hilfe der *Visual-Properties*, welche jeder *Guidance-Renderer* besitzt, kann die Erscheinung der einzelnen Anzeigen bequem zur Laufzeit konfiguriert und verändert werden. Diese Architektur bietet unter anderem folgende Vorteile:

- Ganzheitliches Framework mit klaren Schnittstellen, bereitgestellten Werkzeugen und Hilfsklassen für spätere Anzeigenentwicklung
- Einheitliche Schnittstelle zum Data Holder und damit gesicherte Bereitstellung von Sensor- und Karteninformationen für alle Renderer
- Ein verwalteter Grafikkontext, in dem alle Renderer parallel zeichnen können, für größtmögliche Flexibilität in der Konfiguration
- Vermeidung von Mehrfach-Entwicklung und Code-Duplizierung

Nachfolgend werden die Komponenten im Detail vorgestellt.

**DataHolder:** Mit Hilfe der *DataHolder*-Komponente wird der Zugriff auf andere CORONA-Komponenten für die verschiedenen Renderer-Implementierungen innerhalb der *Guidance-Renderer*-Komponenten gekapselt. Dadurch müssen aufwendige Verarbeitungen der Sensor- und Kartendaten nur einmal stattfinden, und alle Einzel-Renderer können die entsprechenden Ergebnisse nutzen.

Ein weiterer Vorteil besteht in der Vereinheitlichung der Schnittstellen. Die einzelnen Renderer innerhalb von *Guidance-Renderer* müssen nur noch gegen die Schnittstelle des

*DataHolder* implementieren. Dadurch müssen Änderungen der Schnittstellen von anderen Komponenten nur noch an einer Stelle gepflegt werden.

Der *DataHolder* stellt somit einen Zwischenspeicher für Fahrzeug- und Navigationsinformationen dar. Während einfache Signale wie Geschwindigkeit und Position nur gespeichert werden, werden im *DataHolder* auch komplexe Berechnungen durchgeführt. Zu diesen komplexen Berechnungen gehören zum einen die Interpolation der niederfrequenten Fahrzeugsensorinformationen, wie beispielsweise die GPS-Position, und zum anderen die Berechnung des zurückgelegten Weges des Fahrzeuges, die so genannte Fahrzeugtrajektorie. Die Fahrzeugtrajektorie kann anschließend von den einzelnen Renderern für die ortsfeste Platzierung von virtuellen Objekten verwendet werden.

**Guidance-Renderer:** Die Kernkomponente innerhalb der Guidance-Renderer-Umgebung stellt der *Guidance-Renderer* dar. Innerhalb dieser Komponente wird der 3D-Kontext erzeugt, verwaltet und entsprechend zur Anzeige gebracht. Um möglichst große Flexibilität bei geringem Wartungsaufwand zu realisieren, werden die einzelnen Ausprägungen der Anzeige in verschiedene Renderern aufgeteilt. Jeder Renderer ist für die Darstellung einer spezifischen Anzeige verantwortlich. Dadurch können neue Anzeigen durch Anlage und Implementierung einer neuen Klasse umgesetzt werden. Grundlegenden Funktionalität, wie beispielsweise die Verwaltung der virtuellen Kamera, werden von der abstrakten *GuidanceRenderer*-Klasse vererbt.

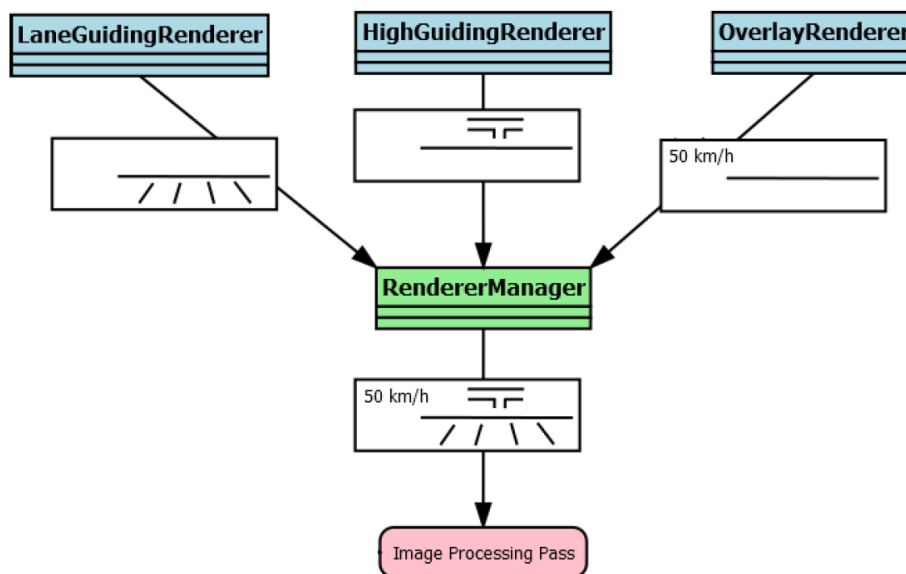


Abbildung 4.9.: Beispiel für eine Rendererkonfiguration: Zusammensetzung der dargestellten Navigationsanzeige aus Einzelkomponenten am Beispiel der klassischen Navigationsanzeigen Fahrstreifenführung, abstrakte Kreuzungsdarstellung sowie Statusanzeigen

In Abbildung 4.9 ist dieses Konzept am Beispiel der Realisierung klassischer Navigationsanzeigen dargestellt. Die fertige Navigationsanzeige wird aus den drei Einzelanzeigen

zusammengesetzt: Fahrstreifenführung vom *LaneGuidingRenderer*, abstrakte Kreuzungsansicht vom *HighGuidingRenderer* und Statusanzeigen vom *OverlayRenderer*.

Die Verwaltung und Konfiguration der jeweiligen Renderer übernimmt der *Renderer-Manager*. Bei Systemstart erzeugt der *Renderer-Manager* gemäß der Konfigurationsdatei Instanzen der gewählten Renderer und übergibt an diese anschließend die individuellen Konfigurationen in Form der *VisualProperties*.

**VisualProperties:** Mit Hilfe der *VisualProperties* kann das Erscheinungsbild der einzelnen Renderer während der Laufzeit angepasst werden. Die *VisualProperties* nutzen Strategie als Entwurfsmuster, um die verschiedenen Ausprägungen eines Erscheinungsbildes zu kapseln. Zur Persistierung wird die XML-Serialisierung von *jaxb* verwendet. Die zentrale Verwaltung der aktiven *VisualProperties* geschieht innerhalb des OSGi-Dienstes. Über diesen Dienst können die einzelnen Renderer Ihre benötigten *VisualProperties* beziehen.

Für den Anwender wird der Umgang mit den *VisualProperties* durch eine grafische Benutzerschnittstelle, wie in Abbildung 4.10 dargestellt, erleichtert. Die Werte für die entsprechenden Konfigurationsparameter können bequem über diese GUI verändert werden und müssen nicht umständlich in den einzelnen XML-Dateien angepasst werden. Die Erzeugung dieser GUI erfolgt generisch auf Basis der Java Reflections API. Dazu liest die GUI-Komponente beim Starten alle verfügbaren Parameter ein und bietet je nach verwendeten Datentypen entsprechende Eingabemöglichkeiten, wie beispielsweise ein Farbspektrum zur Veränderung von Farben oder einfache Textzeilen für die Eingabe von Textbausteinen.

Bei der Implementierung eines Renderers muss darauf geachtet werden, entsprechende Konfigurationsmöglichkeiten zu parametrisieren und mit Hilfe der *VisualProperties* zu exportieren. Als Konfigurationsparameter können die Datentypen *Boolean*, *Integer*, *Double*, *String*, *Vector* und *Color* verwendet werden. Dieser Mechanismus ermöglicht die maximale Flexibilität der einzelnen Renderer und somit auch der umgesetzten Anzeigekonzepte.

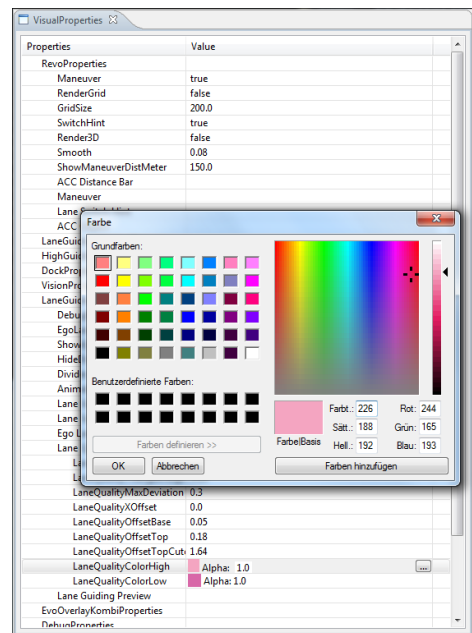


Abbildung 4.10.: VisualProperties-UI



**Teil II.**

**Neue erlebbare  
Navigationsfunktionen**



## 5. Situationsvorausschau mittels fotobasiertem AR-System

Aktuelle Navigationssysteme nutzen verschiedene Darstellungsformen, um den Fahrer auf ein kommendes Manöver vorzubereiten. Wie in Kapitel 2.2.6 beschrieben, sind die bekanntesten Formen dieser Vorausschauanzeigen die abstrahierte Darstellung des Manövers in Piktogrammdarstellung sowie die Darstellung der Kreuzungssituation in einer vereinfachten Kartendarstellung.

Datenbanken mit georeferenzierten Straßenfotos, wie beispielsweise Google StreetView, ermöglichen eine neue Form der Vorausschauanzeigen für Navigationsanwendungen: die fotobasierte Manövervorausschau. Dabei wird dem Fahrer bei Annäherung an ein Manöver ein entsprechendes Foto der Straße mit überlagerter Darstellung des Manövers präsentiert. Da dem Fahrer eine realitätsgetreue Darstellung der Kreuzung getreu seiner aktuellen Fahrsituation präsentiert wird, besteht die Möglichkeit, dass sich der Fahrer leichter auf die Kreuzungssituation einstellen und den Manöverort mit Hilfe selbst gesuchter markanter Punkte in den Fotos besser identifizieren kann.

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Kombination aus perspektivisch dargestellten Pfeilen und Fotos in Verbindung mit der Kartendarstellung eine bessere Unterstützung bei der Navigation bietet als eine reine Kartendarstellung. Für die Anwender ist es leichter, die dargestellten Pfeile und Fotos in die Umwelt zu übertragen, als die in der Kartenansicht dargestellte Information [25]. In diesem Kapitel wird untersucht, wie sich diese Erkenntnisse auf ein fotobasiertes AR-System abbilden lassen.

Im Rahmen dieser Arbeit entstand die Diplomarbeit von David Baumbach [8]. In seiner Arbeit wurden verschiedene georeferenzierte Datenbanken verglichen und ein Konzept für ein System zur fotobasierten Navigationssituationsvorausschau erarbeitet sowie prototypische umgesetzt. Anschließend wurde das System mit Hilfe einer Nutzerstudie evaluiert. Nachfolgend werden die Ergebnisse dieser Arbeit präsentiert.

### 5.1. Konzept und prototypische Umsetzung

Die Grundlage für das hier beschriebene Konzept bilden Datenbanken, die georeferenzierte Straßenfotos enthalten. Dabei können entweder bestehende Datenbanken, wie zum Beispiel Google Streetview oder Microsoft Streetside, verwendet oder mit Hilfe geeigneter Verfahren eigene Datenbanken erzeugt werden.

Diese Datenbanken enthalten Panoramabilder des Straßennetzwerkes. Bei der Annäherung an einen Manöverpunkt kann dem Fahrer mit Hilfe dieser Panoramabilder ein an die jeweilige Fahrtrichtung und Manöversituation angepasstes Foto der Kreuzungssituation präsentiert werden. Durch die Überlagerung der Fotos mit entsprechenden Navigationshinweisen, zum Beispiel in Form verschiedener Pfeildarstellungen, kann der Fahrer besser auf das bevorstehende Manöver vorbereitet werden.

In Abbildung 5.1 sind die grundlegenden Funktionsbausteine des Systems dargestellt. Mit Hilfe der digitalen Karte werden Position und Blickrichtung für das Kreuzungsbild bestimmt. Anschließend wird aus den Manöverinformationen ein entsprechender grafischer Navigationshinweis erzeugt und in das Kreuzungsbild eingebunden. Anhand der aktuellen Fahrzeugposition wird der ideale Aufschaltzeitpunkt zum Anzeigen des Vorausschaubildes bestimmt.

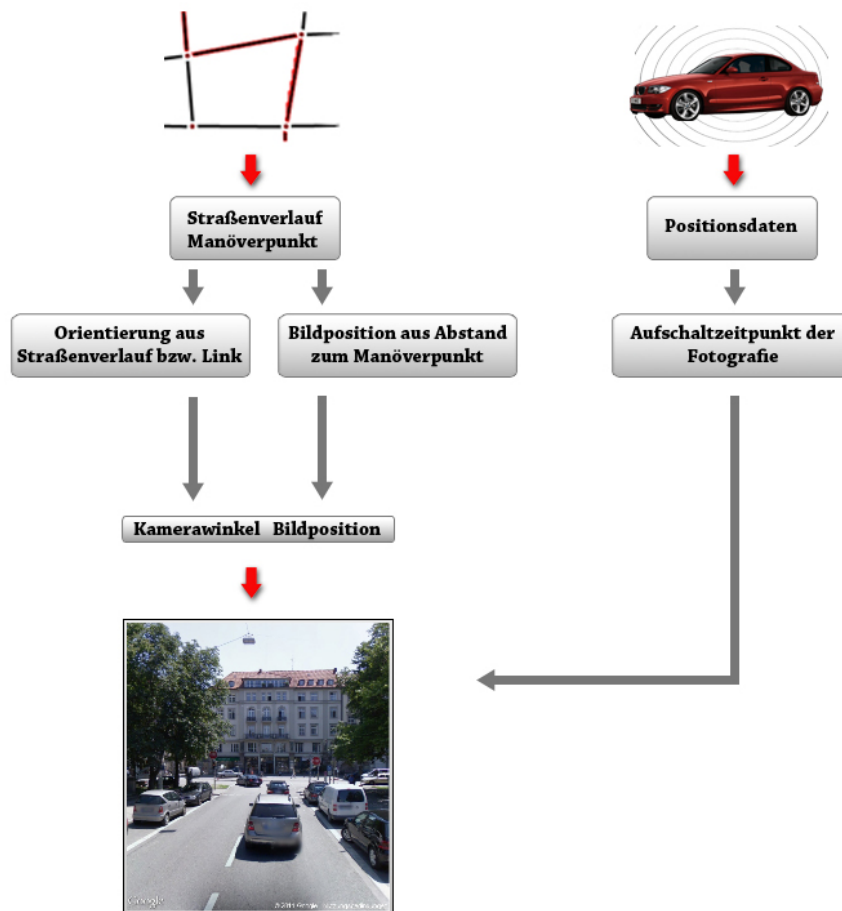


Abbildung 5.1.: Funktionsübersicht des fotobasierten AR-Vorausschausystems [8]

**Abruf des Kreuzungsbildes:** Aktuelle Datenbanken mit georeferenzierten Straßenfotos bieten dem Nutzer die Möglichkeit, Panoramabilder von beliebigen Positionen im Straßennetzwerk abzurufen. Dazu ist eine Anfrage mit entsprechender Position und Blickwinkel an die Datenbank notwendig. Da das hier beschriebene System der Vorausschau dienen soll, kann die aktuelle Fahrzeugpose nicht für die Datenbankanfrage verwendet werden. Die Position und der Blickwinkel für die Abfrage müssen mit Hilfe der aktuellen Fahrzeugposition sowie dem Verlauf der Route in der digitalen Karte ermittelt werden.

Dem System ist die Position des nächsten Manövers bekannt. Mit Hilfe der aktuellen Fahrzeugposition und des Verlaufs der Route kann die optimale Position für die Panora-

mabildanfrage bestimmt werden. Dazu läuft das System, ausgehend von der Manöverposition rückwärts, also in Richtung der Fahrzeugposition, eine bestimmte Strecke entlang der Route in der digitalen Karte ab. Die Art und Komplexität des Manövers entscheiden dabei über die Länge der Strecke, die abgelaufen wird. Zum Beispiel benötigen Anfragen für komplexere Kreuzungen eine größere Entfernung zum Manöverpunkt als einfache Abfahrten. Auf diese Art und Weise wird die Position für die Anfrage an die Datenbank bestimmt. Im Anschluss wird mit Hilfe der digitalen Karte der Vektor zwischen Manöverposition und Panoramabildposition bestimmt. Dieser Vektor beschreibt den Blickwinkel für die Datenbankanfrage.

Je nach verwendetem Datenbanksystem müssen noch zusätzliche Kameraparameter für die Bildanfrage bestimmt werden. Diese Parameter sind jedoch für die jeweiligen Datenbanksysteme konstant, da sich der Aufbau und das Verfahren, mit dem die entsprechende Panoramabilder erzeugt wurden, nicht verändern. Mögliche Kameraparameter sind die Neigung und der Zoomfaktor.

**Generierung des grafischen Navigationshinweises:** Pfeile sind die am häufigsten verwendeten Symbole für die Darstellung von Richtungsanzeigen. Daher verwendet das vorgestellte System ebenfalls Pfeile für die Visualisierung der Manöver. Nach Auswertung verschiedener Arbeiten über die Gestaltung von Pfeilen für die Verwendung als Navigationshinweise [68] [130] entstanden die in Abbildung 5.2 dargestellten Pfeile für die Präsentation der Richtungsanzeigen der einzelnen Manöver.

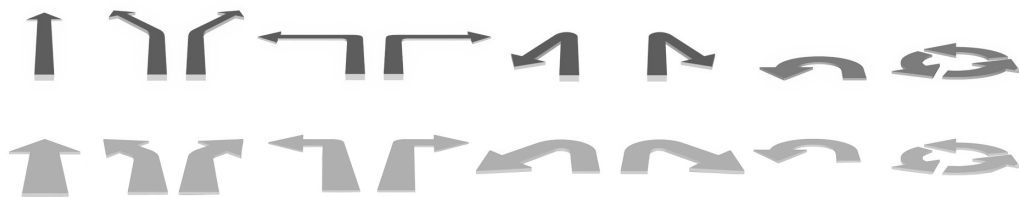


Abbildung 5.2.: Verschiedene Pfeildarstellungen des Manöverhinweises

Bei der Gestaltung der einzelne Pfeile wurde auf eine perspektivisch korrekte Darstellungsform geachtet. Die Perspektive der Pfeildarstellung entspricht dem konstanten Kameraneigungswinkel. Dadurch können die entsprechenden Fotos der Kreuzungssituation auch in verschiedenen Entfernungen mit diesen statischen Visualisierungsformen der Navigationshinweise perspektivisch korrekt und lagerichtig überlagert werden.

Die Farbe der dargestellten Navigationshinweise ist so gewählt, dass eine entsprechende Signalwirkung entsteht. Die Hinweise sollten markant wahrgenommen werden, jedoch keine Gefahr oder Warnung vermitteln. Darüber hinaus muss die gewählte Farbe auch bei hellem Untergrund einen entsprechenden Kontrast bieten. Daher wurde die Farbe Magenta gewählt. Anhand von künstlichen Schatten unter den jeweiligen Grafiken sowie einer weißen Umrandung wurde die Ablesbarkeit der Pfeile verbessert. Damit die dargestellten Pfeile keine wichtigen Informationen verdecken, werden sie halb transparent dargestellt.

Für die Position der Pfeile im Bild gibt es zwei Möglichkeiten: im unteren Bereich des

Bildes, also entlang der Straße, oder im oberen Bereich des Bildes, im Horizont. Beide Positionen bieten verschiedene Vor- und Nachteile. Abbildung 5.3 zeigt die möglichen Varianten der Pfeildarstellung für die anschließende Evaluierung.

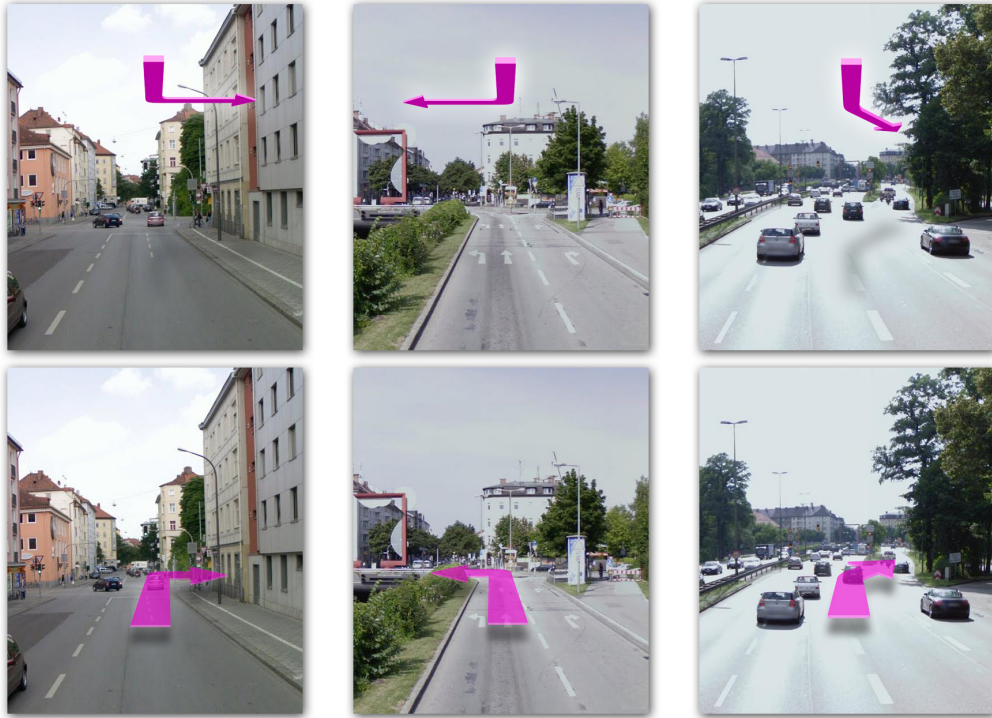


Abbildung 5.3.: Unterschiedliche Ausprägungen des Foto-AR-Systems

## 5.2. Bewertung

Mit Hilfe einer Expertenstudie wurde der umgesetzte Prototyp bewertet. Dazu wurden im Versuchsfahrzeug verschiedene Fahrten aufgezeichnet und anschließend für die Bewertung am Computer wiedergegeben. Dadurch konnten die Experten das System bewerten, ohne auf den Verkehr achten zu müssen.

**Ziel und Methode der Bewertung:** Mit Hilfe der Bewertung sollte die Eignung des entwickelten Prototypes zur fotobasierten Navigationsvorschau als zusätzliche Unterstützung im Navigationssystem analysiert werden. Dazu wurde untersucht, ob die erzeugten AR-Fotos den Navigationshinweis leichter in die Umgebung abbilden lassen. Die Bewertung fand mittels Fragebogen und einer reduzierten Variante des AttrakDiff-Tests statt [52].

Der verwendete Fragebogen ist in verschiedene Abschnitte unterteilt. Zunächst wird der gewählte Bildausschnitt der Fotografie bewertet. Anschließend folgen die Darstellung des Manöverpunktes sowie die Vorbereitung auf das Manöver. Abschließend wird der Nutzen des Systems für zukünftige Navigationssysteme analysiert.

**Aufbau und Ablauf:** Für den Ablauf der Nutzerstudie wurde im Vorfeld im Testfahrzeug eine Kamera auf dem Armaturenbrett installiert. Diese soll den Blickwinkel des Fahrers repräsentieren. In verschiedenen Testfahrten wurden die Fahrten durch verschiedene Manöversituationen anschließend gemeinsam mit den entsprechenden Ergebnissen des Systems aufgezeichnet. In Abbildung 5.4 ist die verwendete Konfiguration von CORONA zur Aufzeichnung und Wiedergabe der Fahrt für die Bewertung dargestellt.

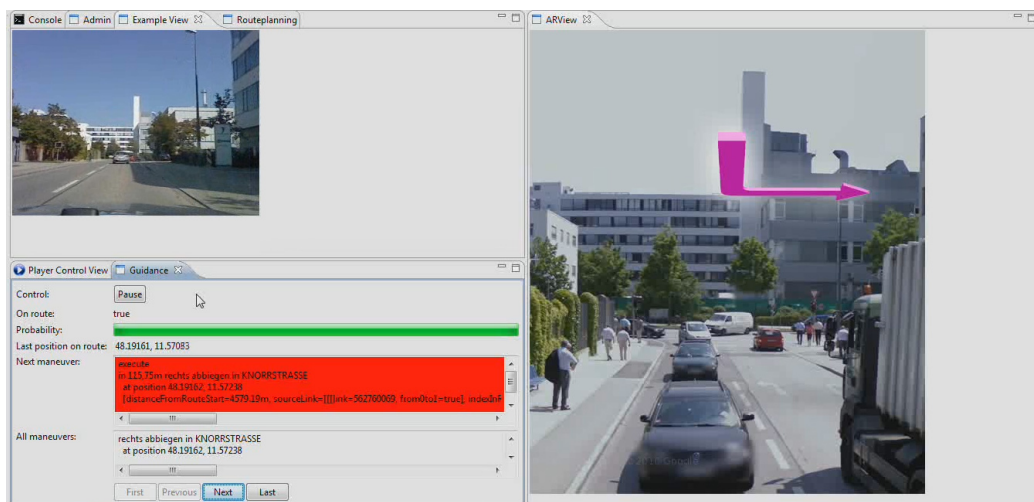


Abbildung 5.4.: Die virtuelle Fahrt aus Sicht der Experten

Nach einer kurzer Einführung wurde den Experten diese Aufzeichnung am Computer als Wiedergabe präsentiert. Dadurch erlebten alle Experten identische Manöversituationen mit identischen Ergebnissen.

Die virtuelle Fahrt wurde nach einzelnen Manövern gestoppt, so dass die entsprechenden AR-Fotos direkt bewertet werden konnten.

**Ergebnisse:** Insgesamt nahmen 12 Experten der BMW Group aus den Bereichen Mensch-Maschine-Interaktion, Anzeige- und Bedienkonzepte sowie Navigation an der Bewertung des Systems teil. Allerdings hat die Einteilung in die Arbeitsbereiche der Experten keinen Einfluss auf die Ergebnisse gezeigt.

Die Auswertung der Antworten ergibt, dass in den präsentierten AR-Fotos Bezugspunkte erkannt werden, die bei der Orientierung helfen müssten. Allerdings werden die AR-Fotos als weniger hilfreich empfunden (siehe Abbildung 5.5). Daraus lässt sich ableiten, dass zwar Bezugspunkte gefunden werden, sich diese jedoch nicht auf die Realität übertragen lassen. Eine mögliche Ursache könnte der kleine Bildausschnitt des Videos in der aufgezeichneten Fahrt sowie der AR-Fotografie sein. Darüber hinaus können auch die unkenntlich gemachten Gebäudefassaden in den Quellbildern der verwendeten Fotodatenbank das Auffinden von Orientierungspunkten erschwert haben.

Dies spiegelt auch die Verteilung der Antworten auf die Frage der Genauigkeit in der Darstellung wieder. Ein Großteil der Experten empfindet die Genauigkeit als nicht gut, wünscht sich aber eine möglichst exakte Umsetzung des AR-Fotos (siehe Abbildung 5.6). Eine mögliche Ursache dafür ist der Versatz der Perspektive im Foto zur realen Straßensicht.

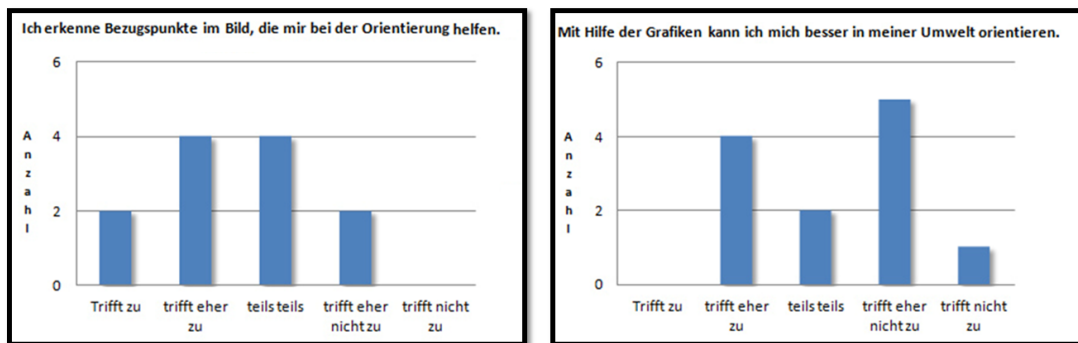


Abbildung 5.5.: Auswertung: Unterstützung bei Orientierung

situation, da ein Großteil der Straßen nur in einer Richtung befahren, allerdings parallel in alle Richtungen aufgezeichnet wird. Dadurch befindet sich die Kamera oftmals im Gegenverkehr und liefert einen verschobenen Blickwinkel auf die Kreuzung.

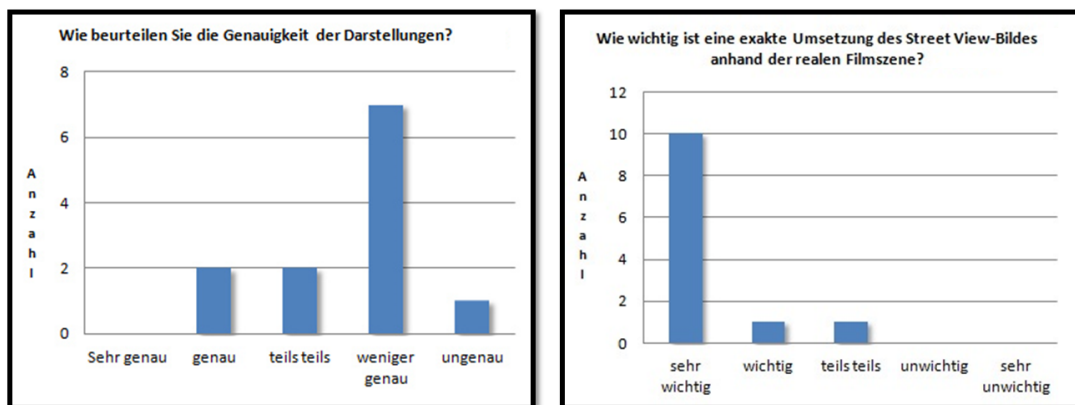


Abbildung 5.6.: Auswertung: Genauigkeit und exakte Umsetzung

Die ursprünglich angenommene Unterstützung, die das AR-Foto-System bei der Wegführung bietet, konnte nur eingeschränkt nachgewiesen werden. Nur fünf Experten konnten mit Hilfe der präsentierten Fotos den Manöverpunkt eindeutig lokalisieren (siehe Abbildung 5.7). Ähnlich verhält es sich mit der korrekten Einschätzung des bevorstehenden Manövers. Lediglich vier Experten empfanden die präsentierten AR-Fotos als hilfreich für die Einschätzung des bevorstehenden Manövers.

Wie Abbildung 5.8 erkennen lässt, wird die Unterstützung durch die präsentierten AR-Fotos bei der Vorbereitung auf das bevorstehende Manöver eher negativ bewertet. Nur ein kleiner Teil der Probanden fühlt sich durch diese Anzeigen optimal für das Manöver gewappnet. Dieser negative Trend der Bewertung setzt sich bei der Vorbereitung auf etwaige Fahrstreifenwechsel fort. Wie in Abbildung 5.8 ebenfalls zu erkennen ist, konnte kein Experte aus den präsentierten AR-Fotos einen eventuell notwendigen Fahrstreifenwechsel erkennen. Da die überlagerten Manöverpfeile lediglich auf Basis der Straßentopologie und ohne Berücksichtigung eventuell vorhandener Fahrstreifeninformationen im Bild platziert



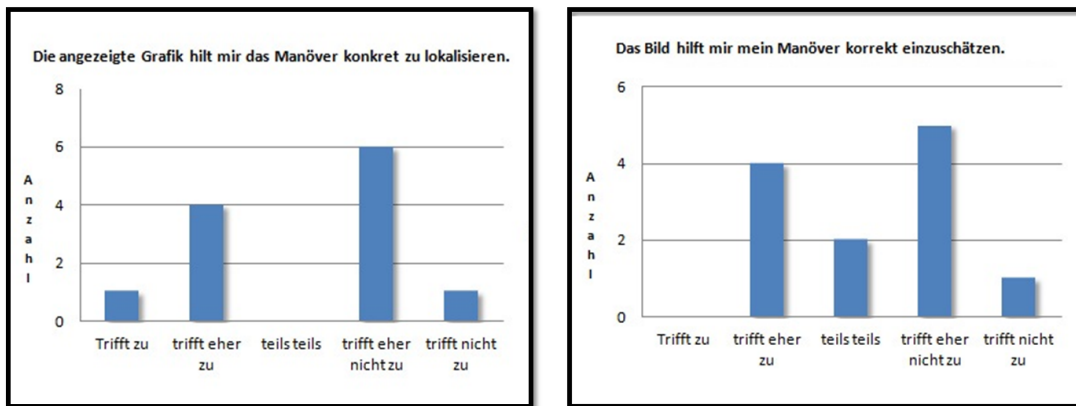


Abbildung 5.7.: Auswertung: Lokalisierung und Einschätzung des Manövers

werden, verwundert diese Bewertung nicht. Der einzige Mehrwert, den das System hier bietet, ist die Vorausschau auf die Kreuzungssituation. Der notwendige Fahrstreifen muss durch den Benutzer selber erkannt werden.

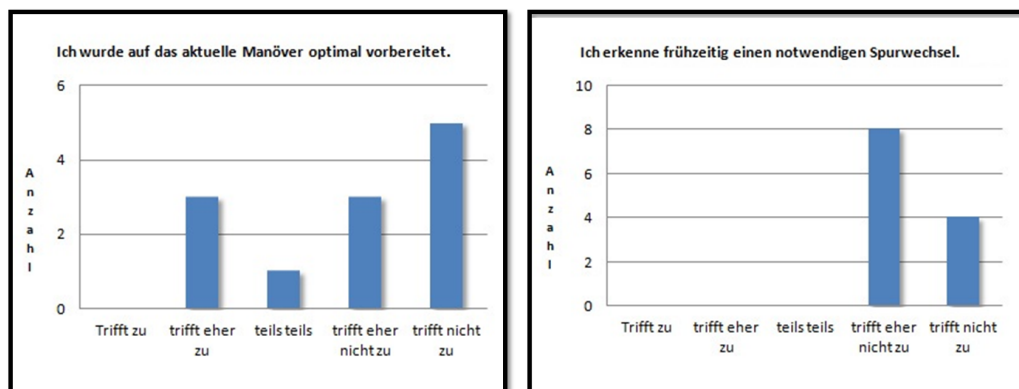


Abbildung 5.8.: Auswertung: Vorbereitung und Spurwechsel

Auch wenn das System für sich alleine keine hinreichende Unterstützung bietet, wird es als sinnvolle Ergänzung zum bestehenden Navigationssystem gesehen (siehe Abbildung 5.9). Dies lässt sich vor allem durch die gut bewertete grafische Umsetzung der Navigationshinweise stützen (siehe ebenfalls Abbildung 5.9).

Das Mini-AttrakDiff-Portfolio in Abbildung 5.10 bestätigt die bisherige Bewertung auf Basis des Fragebogens. Das System wird allgemein neutral mit einem leicht positiven Trend bewertet. Die Beurteilung der pragmatischen Qualität führt zu dem Schluss, dass das vorgestellte System seinen Zweck erfüllt und eine leichte Unterstützung bei der Wegführung liefert, allerdings keine starke Steigerung gegenüber den bekannten Systemen liefert.

Die verwendeten Pfeile für die Visualisierung der Manöverhinweise sowie die Art und Weise der kombinierten Darstellung mit dem jeweiligen Straßenfoto gefallen den Experten im Allgemeinen. Allerdings gibt es auch hier Abzüge bei der hedonischen Qualität. Dies

## 5. Situationsvorausschau mittels fotobasiertem AR-System

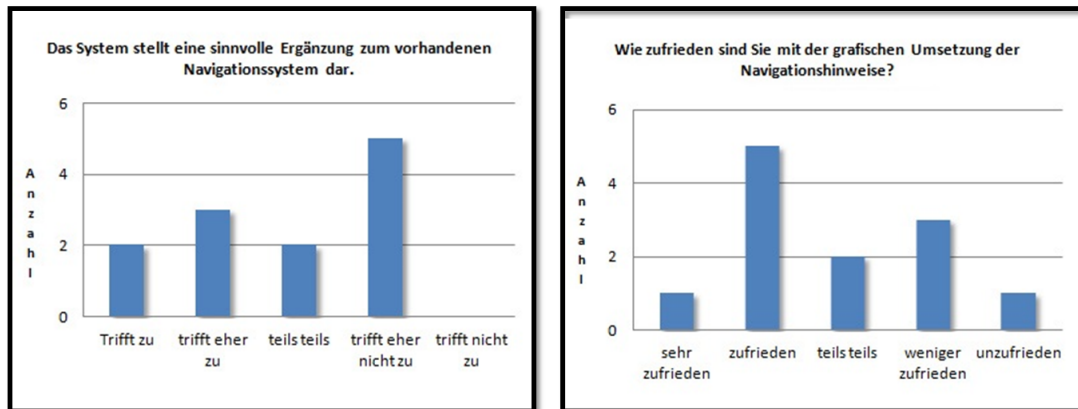


Abbildung 5.9.: Auswertung: Ergänzung und grafische Umsetzung

lässt sich vor allem auf die Qualität der verwendeten Straßenfotos zurückführen, da in den Fotos oftmals Gebäudeansichten unkenntlich waren oder die Perspektive des Fotos nicht zur Fahrsituation gepasst hat.

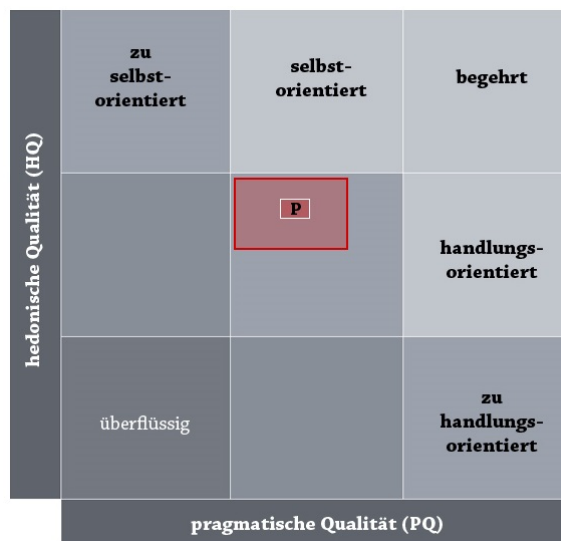


Abbildung 5.10.: AttrakDiff-Portfolio PQ / HQ für Foto-AR-System

Die große Ausdehnung des Konfidenzbereiches deutet darauf hin, dass keine absoluten Aussagen abgeleitet werden können. Dies kann auf die geringe Stichprobengröße sowie die sehr unterschiedlichen Beurteilungen des Produktes durch die Experten zurückgeführt werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die AR-Fotos bei den Experten einen insgesamt neutralen bis guten Eindruck hinterließen. Es besteht jedoch in allen Dimensionen, aber vor allem hinsichtlich der pragmatischen Qualität, noch Optimierungsbedarf.

## 6. Navigationsanweisungen mit integrierten Orientierungspunkten

Der Großteil der heutigen Navigationssysteme verwendet entfernungs-basierte Navigationshinweise, um den Benutzer zu seinem gewünschten Ziel zu führen (zum Beispiel *in 200 Meter links abbiegen*). Für viele Menschen ist es schwierig, diese abstrakten Entfernungsangaben in die reale Umgebung zu projizieren und so die genaue Lage des Manöverpunktes zu bestimmen. Aus dem gleichen Grund bevorzugen die meisten Menschen bei Wegbeschreibungen die Verwendung von Orientierungspunkten und situationsbezogene Navigationshinweise.

Im Rahmen einer weiteren Diplomarbeit wurde von Frederik Löffert ein prototypisches Navigationssystem entwickelt, welches abstrakte Entfernungsangaben in Navigationshinweisen durch die Verwendung von Orientierungspunkten ersetzt [74]. Dadurch entstehen für den Benutzer intuitivere Navigationsanweisungen (zum Beispiel *nach dem Autohaus links abbiegen*), wie sie auch ein Ortskundiger Beifahrer geben würde.

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus dieser Arbeit vorgestellt. Zunächst wird ein kurzer Überblick über Orientierungspunkte gegeben und anschließend ein entsprechendes Konzept für eine neue Form der Navigationshinweise abgeleitet. Zum Abschluss wird die Evaluierung des Konzepts mittels einer Expertenstudie vorgestellt.

### 6.1. Grundlagen Orientierungspunkte

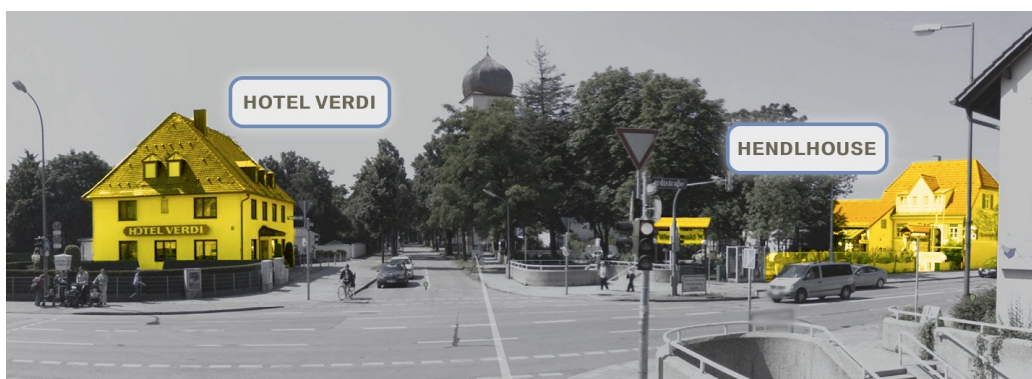


Abbildung 6.1.: Visualisierung einer Kreuzung mit freigestellten Orientierungspunkten, basierend auf einem Google Street View Foto [74]

Orientierungspunkte, auch bekannt als Landmarken, beschreiben Objekte in der Welt, welche aufgrund ihrer markanten Eigenschaften stärker wahrgenommen werden und somit besonders auffallen. Der Mensch kann diese Punkte daher besonders gut bei der Ori-

entierung benutzen und verwendet sie auch bei der Beschreibung von Wegen. Aus diesem Grund sollten sich Orientierungspunkte ebenfalls anbieten um den Ort des nächsten Manövers beschreiben zu können. Als Orientierungspunkte eignen sich im Straßenverkehr vor allem markante Gebäude entlang der Route, wie in Abbildung 6.1 skizziert, sowie entsprechende Objekte, die aufgrund ihrer Merkmale besonders auffallen.

**Allgemeine Orientierungspunkte:** Mit Hilfe seiner kognitiven Fähigkeiten kann sich der Mensch in Raum und Zeit orientieren. In der mentalen Repräsentation von geografischen und räumlichen Gegebenheiten übernehmen laut Studien aus der Psychologie und Geografie Orientierungspunkte eine wesentliche Rolle. Da sie das bildliche Gedächtnis des Menschen unterstützen, sind sie besonders für die Beschreibung von Wegen geeignet [38].

Ihren Ursprung haben Orientierungspunkte in der Seefahrt. Zunächst dienten die verschiedenen charakteristischen Eigenschaften einer Landschaft, wie beispielsweise markante Felsformationen oder besonders auffällige Baumgruppen, als Orientierungspunkte. Später wurden diese ursprünglichen Landmarken durch vom Menschen erbaute und besonders auffällige Gebäude, wie beispielsweise Leuchttürme, ergänzt.

Nach Steck und Mallot können Orientierungspunkte in zwei Kategorien unterteilt werden: lokale und globale Orientierungspunkte. Lokale Orientierungspunkte sind nur aus unmittelbarer Nähe wahrnehmbar. Allerdings stechen diese in ihrem Umfeld besonders hervor, wie beispielsweise kleinere, auffällige Gebäude oder besonders markante Vegetation. Globale Orientierungspunkte, wie beispielsweise Türme und Berge, hingegen sind über einen längeren Zeitraum sichtbar, auch wenn sich die Position des Betrachters ändert [124]. Daher eignen sich globale Orientierungspunkte vor allem für die Richtungsangabe und lokale Orientierungspunkte für die Eingrenzung des Manöverpunktes. Entscheidend für die richtige Wahl zwischen einem lokalen oder globalen Orientierungspunkt ist die Sichtbarkeit, seine Eindeutigkeit und das Hervorstechen aus seiner Umgebung [124].

Lokale Orientierungspunkte können basierend auf ihrer Position entlang der Route unterteilt werden. So können sich Orientierungspunkte in unmittelbarer Nähe eines Manöverpunktes befinden oder aber entlang der Route verteilt sein, sodass sie während der Fahrt passiert werden [76]. Für die Verwendung in manöverbasierten, richtungsabhängigen Navigationsanweisungen eignen sich vor allem die Orientierungspunkte in unmittelbarer Nähe eines Manöverpunktes. Mit Hilfe der Manöverpunkte entlang der Route kann das Vertrauen des Fahrers in die richtige Zielführung verstärkt werden.

Als lokale Orientierungspunkte eignen sich neben auffälligen Gebäuden auch Ampeln, Brücken oder die in Kapitel 2.2.1 erwähnten POIs [66].

**Orientierungspunkte in der Fahrzeugnavigation:** Studien haben gezeigt, dass die Verwendung von Orientierungspunkten in Wegbeschreibungen für den Fahrer sehr wichtig ist [23]. Die Verteilung in Abbildung 6.2 zeigt, dass lediglich Richtungsangaben noch häufiger abgefragt werden als Orientierungspunkte.

Daraus lässt sich ableiten, dass Navigationsanweisungen im Fahrzeug durch die Verwendung von Orientierungspunkten zum einen noch natürlicher gestaltet werden können und zum anderen eher den Charakter einer perfekten Wegbeschreibungen eines ortskundigen Beifahrers besitzen.

Orientierungspunkte können die Navigation erleichtern. Durch einen Bezug zu einem

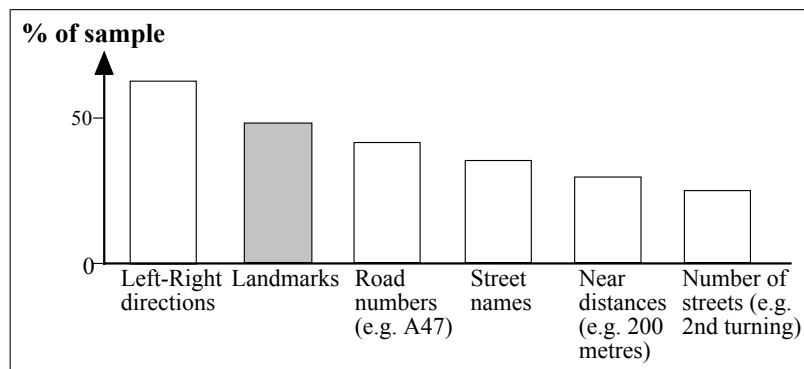


Abbildung 6.2.: Bewertung der bevorzugten Angaben in Wegbeschreibungen [74]

Orientierungspunkte können Manöver präziser beschrieben werden. Der Fahrer kann die Anweisungen besser verstehen, da Orientierungspunkte, wie bereits erwähnt, ein integraler Bestandteil der mentalen Repräsentation von geografischen und räumlichen Gegebenheiten sind. Der Fahrer wird besser auf bevorstehende Manöver vorbereitet, was die Benutzerfreundlichkeit von Navigationssystemen erhöht. Bengler et. al haben in einem Simulatorversuch gezeigt, dass Orientierungspunkte die Effektivität von Navigationssystemen in Fahrzeugen steigern. Entsprechende Anweisungen führen zu weniger Fehlern [9].

Weitere Studien belegen, dass Orientierungspunkte hervorragend für die Schritt-für-Schritt-Navigation geeignet sind - unabhängig von der visuellen oder auditiven Präsentation der Anweisungen. Allerdings gab es bislang kein entsprechendes Kartenmaterial, das über die notwendigen Orientierungspunkte verfügt, um natürlichere Navigationsanweisungen zu erzeugen. Bisherige Studien wurden entweder im Simulator durchgeführt oder mit speziell entwickelten Prototypen getestet, die extra dafür generierte Orientierungspunkte enthielten [2] [9].

**Orientierungspunkte ermitteln:** Für die Entwicklung eines Navigationssystems im Fahrzeug, welches Orientierungspunkte verwenden kann, müssen entsprechende Orientierungspunkte im Kartenmaterial hinterlegt sein.

Dazu ist es notwendig, festzustellen, welches Objekt sich als Orientierungspunkt eignet. Verschiedene Forschungsprojekte im Bereich des hochautomatisierten Fahrens beschäftigen sich mit der automatisierten Extraktion von Orientierungspunkten in Form von Gebäude-Landmarken aus existierenden Datensätzen [107], [36],[37].

Mit Hilfe von Daten aus einem Geoinformationssystem (GIS) haben Brenner und Elias Orientierungspunkte in Form von Parkanlagen, Brücken und anderen topographische Landmarken automatisiert ermittelt [19].

Durch automatisierte Landmarkenerkennung in Kombination mit Bild- und Videoaufzeichnungen zum Abgleich und zur Qualitätssicherung ist es inzwischen möglich, eine Datenbank beziehungsweise entsprechendes Kartenmaterial mit Orientierungspunkten zu erstellen.

## 6.2. Konzept und prototypische Umsetzung

Durch die Verwendung von Orientierungspunkten sollen die bisherigen abstrakten, distanzbasierten und teilweise schlecht nachvollziehbaren Navigationshinweise verbessert werden. Mit Hilfe dieser verbesserten Hinweise soll das Navigationssystem verständlicher, natürlicher und intuitiver werden. Neben der Sprachausgabe soll auch die visuelle Darstellung durch entsprechende Gestaltung verbessert werden. Nachfolgend wird beschrieben, wie die neuen Sprachansagen gestaltet werden und die überarbeitete Visualisierung aussehen soll.

**Verwendungsmöglichkeiten von Orientierungspunkten:** Da Orientierungspunkte ein grundlegender Bestandteil der kognitiven Karte des Menschen sind und so die Orientierung in Raum und Zeit unterstützen, ist es sinnvoll, diese Informationen auch in Navigationsanweisungen zu integrieren. Die gewohnte Ansage *In 250 Metern links abbiegen* sollte in der Form *Nach dem Museum links abbiegen* für die meisten Menschen einfacher umsetzbar sein.

In heutigen Navigationssystemen sind die Navigationsanweisungen im Allgemeinen distanzbasiert. Sie beschreiben, in wie vielen Metern ein entsprechendes Manöver ausgeführt werden muss. Dadurch muss der Fahrer mit Hilfe seiner räumlichen Vorstellungskraft stets die Entfernung zu einem bevorstehenden Manöver möglichst exakt einschätzen. Viele Menschen haben Schwierigkeiten, Distanzen exakt einzuschätzen, da ihnen dieses räumliche Vorstellungsvermögen fehlt. Darüber hinaus muss der Fahrer während der Fahrt seine Aufmerksamkeit noch auf weitere Tätigkeiten, wie beispielsweise die Bahnführung des Fahrzeuges und die Beobachtung und Einschätzung der anderen Verkehrsteilnehmer, richten. Dies erschwert zusätzlich die Abbildung der Entfernungsangaben in die Umgebung. Noch schwieriger wird die exakte Distanzabschätzung, wenn mehrere Abbiegemöglichkeiten in kurzen Abständen aufeinanderfolgen.

Um diese Problematik zu lösen, werden Orientierungspunkte in die Navigation und die Ansage integriert. Als Orientierungspunkte werden zum einen die weiter oben beschriebenen lokalen Orientierungspunkte verwendet, da diese durch Ihre markanten Eigenschaften besonders hervorstechen. Und zum anderen werden Ampelanlagen als besondere Orientierungspunkte verwendet, da diese bereits ein fester und herausragender Bestandteil des Straßenbildes sind und der Fahrer bereits aufgrund der Straßenverkehrsordnung auf diese achten muss.

**Verwendung von lokalen Orientierungspunkten:** Für natürliche Navigationsanweisungen mit integrierten Orientierungspunkten sind zusätzliche Informationen notwendig. Die Orientierungspunkte müssen zum Manöver in Bezug gebracht werden. Ihre Sichtbarkeit muss berücksichtigt werden. Außerdem sind Lage und Entfernung zum Manöver entscheidend. Ein Manöver wird hierz während der Manövergenerierung mit diesen Eigenschaften und dem Namen des Orientierungspunktes sowie einer Präposition, die den Ort des Manöverpunktes exakt definiert, angereichert. Während der Wegführung werden die möglichen Orientierungspunkte für die Verwendung in der Navigationsanweisung aus entsprechenden Datenbanken mit georeferenzierten, lokalen Orientierungspunkten inklusive zusätzlicher Attribute wie Sichtbarkeit und Richtungszuordnung abgefragt [92].

Je nach Manöverzustand können aus diesen Informationen entsprechende Navigationsanweisungen zusammengesetzt werden, die dem Fahrer akustisch vermittelt werden. Eine Anweisung setzt sich somit aus den folgenden Bausteinen zusammen:

In »Distanz« »Präposition« »Orientierungspunkt« »Richtungsangabe« abbiegen in »Straßenname«.

Eine konkrete Ansage könnte dann beispielsweise wie folgt lauten: *In 600 Metern hinter dem BMW Motorrad Zentrum links abbiegen in die Knorrstraße* [74].

**Verwendung von Ampelanlagen als Orientierungspunkte:** Da die meisten Routen entlang von Hauptverkehrswegen verlaufen und es an diesen Wege oft Ampelanlagen gibt, können ebenfalls Ampeln als Orientierungspunkte verwendet werden, falls keine weiteren markanten Orientierungspunkte in der Nähe des Manöverpunktes vorhanden sind. Dazu wird die Anzahl der Ampeln zwischen der aktuellen Fahrzeugposition und dem Manöverpunkt bestimmt und in der Navigationsanweisung als zusätzlicher Hinweis auf die Entfernung verwendet.

Darüber hinaus besitzen Ampeln durch ihre Position und Bedeutung im Straßenverkehr einen weiteren Vorteil gegenüber den anderen Orientierungspunkten entlang der Route. Sie sind so angebracht, dass sie jedem Fahrer sofort und bereits aus der Ferne auffallen. Und durch ihre wichtige Rolle im Straßenverkehr werden sie vom Fahrer auch unabhängig von der Navigationsaufgabe wahrgenommen.

**Generierung der Navigationsanweisungen:** Ein Manöver durchläuft bei Annäherung an den Manöverpunkt verschiedene Phasen der Dringlichkeit von informativ bis akut. In diesem Konzept wird der auditive Navigationshinweis bei jedem Phasenwechsel aktualisiert und dem Fahrer präsentiert. Dadurch wird der Fahrer vor jedem notwendigen Navigationsmanöver dreimal auf dieses hingewiesen. Dies ermöglicht ein vorausschauendes Fahren und vermittelt dem Fahrer zusätzlich ein Gefühl der Sicherheit, da er auf das bevorstehende Manöverszenario bestmöglich vorbereitet sein sollte.

Die Anzahl der Ampeln zwischen dem Manöverort und der aktuellen Position des Fahrzeugs werden ebenfalls bei jeder Änderung der Manöverphase neu berechnet und in der entsprechenden Navigationsanweisung aktualisiert. Aus der beispielhaften ersten informativen Navigationsanweisung *In 800 Metern an der dritten Ampel rechts abbiegen in die Triebstraße* wird über den Verlauf der Annäherung die akute Navigationsanweisung: *An der nächsten Ampel rechts abbiegen in die Triebstraße*.

**Überarbeitung der visuellen Navigationshinweise:** Die auditiven Navigationshinweise stehen dem Fahrer nur während der direkten Wiedergabe zur Verfügung. Daher werden neben den auditiven Hinweisen noch spezielle visuelle Hinweise generiert und dem Fahrer präsentiert. Diese visuellen Hinweise sollen den Fahrer zusätzlich unterstützen und verhindern, dass wichtige Informationen aufgrund des flüchtigen Charakters der auditiven Hinweise verloren oder vergessen werden.

Als Grundlage für die visuellen Hinweise werden die erweiterten Kreuzungsansichten aus Kapitel 5 verwendet. Die Bilder werden aus einer georeferenzierten Fotodatenbank

mit Blick auf die Kreuzung geladen und mit zusätzlichen Informationen zum Orientierungspunkt in der Nähe des Manöver angereichert.

Die Orientierungspunkte aus den auditiven Hinweisen werden in dem jeweiligen Kreuzungsbild entsprechend markiert und hervorgehoben. Dies erleichtert dem Fahrer den Abgleich zwischen der im Bild dargestellten Situation und der Realität. Darüber hinaus wird ein Teil der Aufmerksamkeit des Fahrers direkt auf die entsprechenden Orientierungspunkte im Bild gelenkt, sodass diese ebenfalls schneller in der Realität wiedergefunden werden können. All diese Maßnahmen sollten die Orientierung des Fahrers verbessern.

Abbildung 6.1 zeigt die ursprüngliche Konzeptidee. In den Fotos werden die entsprechenden Orientierungspunkte farblich hervorgehoben. Zusätzlich wird das Foto nur in schwarz-weiß und mit angepasstem Kontrast und entsprechender Helligkeit dargestellt, um den Effekt der Hervorhebung der Orientierungspunkte zu verstärken.

Weiterhin wird eine Beschriftung mit dem Namen in der direkten Nähe des Orientierungspunktes platziert. Durch das Gesetz der Nähe wird diese Anordnung von Beschriftung und Orientierungspunkt vom Menschen als Einheit wahrgenommen [53].

Über den Verlauf der Arbeit stellte sich heraus, dass die Orientierungspunkte aus der Datenbank nicht zuverlässig in den Fotos der georeferenzierten Fotodatenbanken dargestellt sind. Oft wurden die Orientierungspunkte durch andere Elemente im Foto verdeckt. Daher wurde das Konzept entsprechend angepasst.



Abbildung 6.3.: Konzeptgrafik zur Visualisierung eines Manövers mit hervorgehobenem Orientierungspunkt, basierend auf einem georeferenzierten Foto aus Google Street View [74].

Abbildung 6.3 zeigt das Ergebnis dieser Anpassung. Statt das Gebäude vollständig freizustellen und hervorzuheben, wird dessen Position im Bild berechnet und anschließend der Fokus des Betrachters mit Hilfe eines Lichtkegels darauf gelenkt. Zusätzlich deutet ein kleiner Pfeil auf die Position des Orientierungspunktes hin. Mit Hilfe einer reduzierten Sättigung des ursprünglichen Fotos bis hin zu einem Schwarz-Weiß-Effekt wird der Effekt des Lichtkegels zusätzlich verstärkt. Ferner wird durch diese Anpassung der Farben die Wahrnehmung weiterer Details im Bild, welche für die Navigationsanweisung nicht relevant sind, reduziert. Mit Hilfe einer weißen Beschriftung, welche durch einen kontrastreichen blauen Schatten zusätzlich hervorgehoben wird, wird dem Fahrer der Name des Orientierungspunktes angezeigt. Darüber hinaus wird der Richtungspfeil aus Kapitel 5 verwendet, um dem Fahrer zusätzlich die Richtung des Manövers anzuzeigen.



## 6.3. Bewertung

Das beschriebene Konzept wurde im Rahmen der Arbeit durch Frederik Löffert prototypisch umgesetzt und anschließend in einer Expertenstudie evaluiert. Mit Hilfe dieses Realversuches sollte der Mehrwert und erhoffte Nutzen für den Anwender durch natürlichere und verständlichere Navigationsanweisungen bestätigt werden. Nachfolgend werden diese Expertenstudie vorgestellt und die Ergebnisse daraus präsentiert.

**Versuchsablauf:** Nach der Begrüßung durch den Versuchsleiter wurden die Teilnehmer der Studie durch die Erläuterung des Konzeptes für das Thema sensibilisiert. Anschließend erhielten alle Teilnehmer die Aufgabe, eine vorgegebene, aber für sie unbekanntes Route anhand der präsentierten Navigationsanweisungen zu folgen. Während der Fahrt wurden mittels eines offenen, halb strukturierten Interviews die Eindrücke, Kritikpunkte und Empfehlungen der Teilnehmer ermittelt [40].

Nach Abschluss der Testfahrt wurden zum einen mit Hilfe des AttrakDiff-Fragebogens die hedonische und pragmatische Qualität des Gesamtsystems [52] und zum anderen die Sprachansagen sowie die visuellen Manöverhinweise mittels einer analytischen Bewertung in Form eines Fragebogens getrennt evaluiert. Der Fragebogen umfasst Fragen mit einer 5-stelligen Likert-Skala sowie ergänzende offenen Fragen für die Vertiefung der jeweiligen Antworten.

**Testroute und Versuchsfahrzeug:** Nach sorgfältiger Evaluierung verschiedener Routen im Münchner Norden wurde die in Abbildung 6.4 dargestellte Route für die Expertenstudie gewählt. Diese Route bietet ein ideales Verhältnis zwischen Versuchsdauer und Anzahl an Manövern mit entsprechenden Orientierungspunkten. Auf der 11,1 Kilometer langen Teststrecke befinden sich acht Kreuzungen, an denen der Abbiegevorgang an einer Ampel stattfindet, sowie die folgenden drei Orientierungspunkte: BMW Motorrad Zentrum, Restaurant Soulgarden und Einkaufszentrum REWE.

Insgesamt erhält der Fahrer an 11 von 12 Manövern eine natürliche Anweisung mit Bezug zu einer Ampel oder einem anderen Orientierungspunkt. Lediglich an einer Kreuzung beim Abbiegen in eine kleinere Seitenstraße standen keinerlei natürliche Orientierungspunkte zur Verfügung.

Als Versuchsfahrzeug wurde ein BMW der 5er-Serie verwendet. Da in diesem Versuchsträger die Anzeigen des HUD, sowohl des Kombi-Instrumentes als auch des CIDs, durch einen zusätzlich im Kofferraum verbauten Fahrzeug-PC erzeugt werden, ist für das Führen dieses Fahrzeuges eine spezielle BMW-interne Fahrausbildung notwendig. Dadurch ist der Kreis der möglichen Versuchsteilnehmer begrenzt.

**Ergebnisse:** An der Studie nahmen neun Mitarbeiter der BMW Group teil. Ihre langjährige Erfahrung im Bereich der Entwicklung von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen qualifizierte diese Mitarbeiter als Experten für die Studie. Die Versuchsteilnehmer verfügen alle über ein abgeschlossenes Studium im Bereich der Informatik, im Ingenieurwesen oder der Psychologie. Sieben Teilnehmer sind zwischen 20 und 40 Jahren alt, zwei Teilnehmer zwischen 40 und 60 Jahren. Für den Versuch standen acht männliche Teilnehmer und eine Frau zur Verfügung.

## 6. Navigationsanweisungen mit integrierten Orientierungspunkten

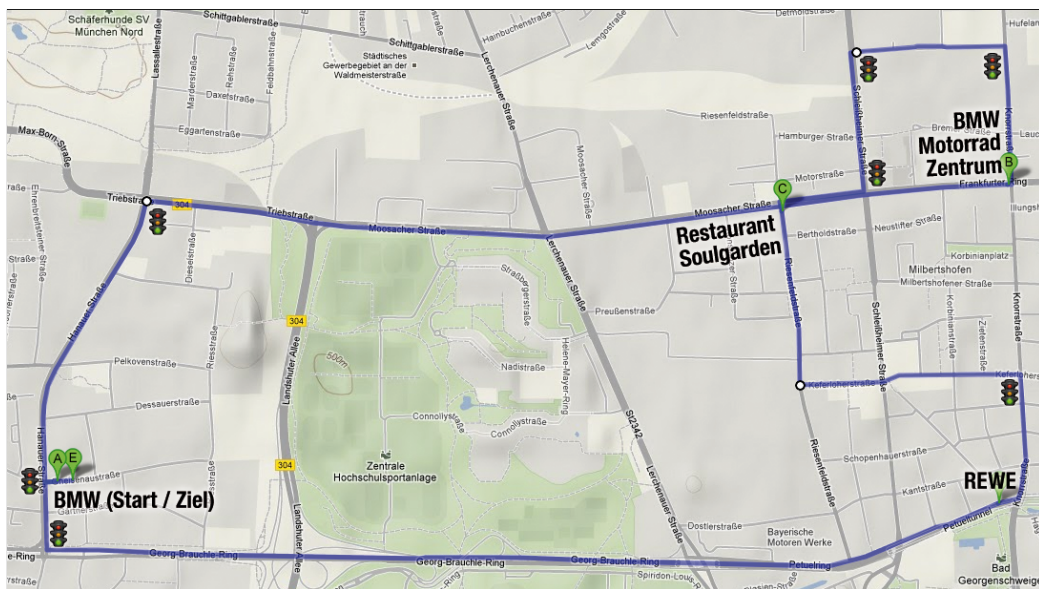


Abbildung 6.4.: Testroute mit mehreren Ampelanlagen und drei Orientierungspunkten, eingezeichnet in einer Google Maps Kartendarstellung

Die Auswertung der Interviews zeigt, dass die Redundanz in den Navigationsanweisungen reduziert werden soll. Es wird ein adaptiver Detailgrad in der Entfernungsangabe gewünscht. In den frühen Manöverphasen bei noch großer Entfernung zum Manöver ist eine metrische Entfernungsangabe sinnvoller. Bei späteren Manöverphasen sollte diese Entfernungsangabe durch den Bezug auf die jeweiligen Ampelanlagen ersetzt werden. Allerdings sollten Ampelanlagen erst dann als Orientierungspunkte verwendet werden, wenn sich nur noch zwei Ampeln zwischen aktueller Position und dem Manöverpunkt befinden. Allgemein sollten statt der lokalen Orientierungspunkte eher die Ampeln in Navigationsanweisungen verwendet werden.

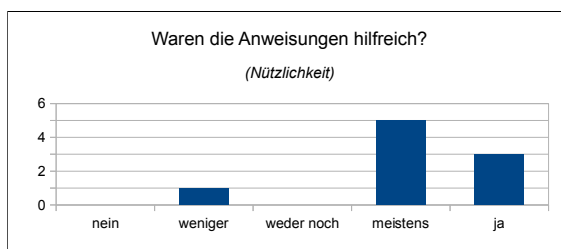


Abbildung 6.5.: Nützlichkeit

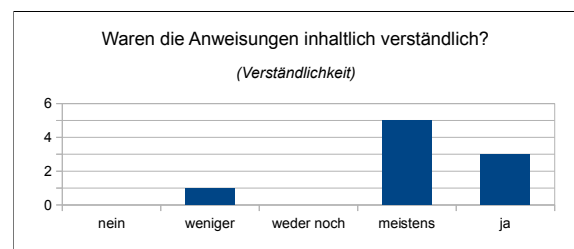


Abbildung 6.6.: Verständlichkeit

Die analytische Auswertung nach Fahrtende zeigt, dass das im Prototyp umgesetzte Konzept bei den Teilnehmern einen positiven Eindruck hinterlassen hat und die Erwartungen der Teilnehmer erfüllen konnte. Wie die Häufigkeitsverteilung der gegebenen Antworten in Abbildung 6.5 zeigt, wurden die erlebten Sprachanweisungen von den Teilnehmern als nützlich empfunden. Dies lässt sich dadurch belegen, dass die Anweisungen durch die Teilnehmer gut verstanden und in die Realität übertragen werden konnten und

somit als zusätzliche Unterstützung der Orientierung wahrgenommen wurden (siehe Abbildungen 6.6, 6.7 und 6.8).

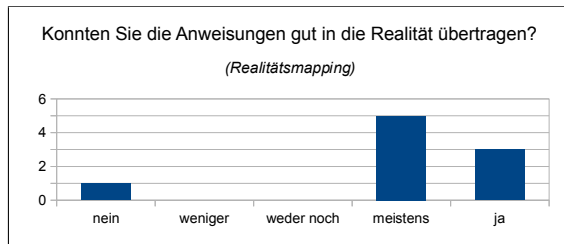


Abbildung 6.7.: Übertragbarkeit

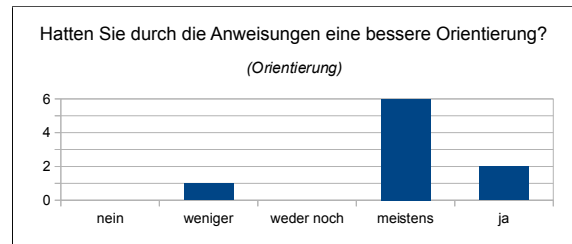


Abbildung 6.8.: Orientierung

Wie aus den Antworten hervorgeht, tragen dazu vor allem die Verwendung der Ampelanlagen in den Navigationshinweisen bei. Das Restaurant konnte von den meisten Teilnehmern in der Realität nicht wiedergefunden werden, da dieses umbenannt wurde. Dies verdeutlicht die hohe Anforderung an Korrektheit und Aktualität der entsprechenden Orientierungspunkte in der Datenbank.

Im Gegensatz zu den Sprachansagen wurde die Visualisierung der Navigationshinweise weniger positiv bewertet. Wie die Auswertung in Abbildung 6.9 und 6.10 zeigt, wurden die visuellen Hinweise übersichtlich dargestellt und die präsentierten Informationen auch verstanden, konnten darüber hinaus aber nicht überzeugen.

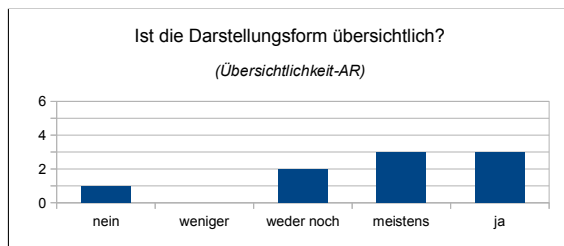


Abbildung 6.9.: Verständlichkeit

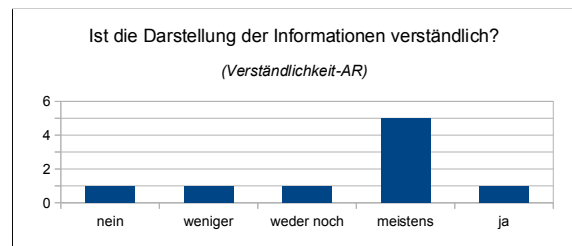


Abbildung 6.10.: Übersichtlichkeit

Die Nützlichkeit der visuellen Hinweise wurde durch die Teilnehmer nur durchschnittlich bewertet (siehe Abbildung 6.11). Und auch das Erfassen der dargestellten Hinweise ist der Mehrheit der Teilnehmer nicht möglich gewesen (siehe Abbildung 6.12). Dies kann verschiedene Ursachen haben. Viele Experten haben während der Fahrt das dargestellte Bild im CID nicht wahrgenommen, da Ihnen oft die Informationen in den Sprachansagen ausreichen, um das bevorstehende Manöver zu verstehen. Teilweise ließ jedoch auch die Fahrtätigkeit keine langen Blickabwendungen auf das CID zu und eine Erfassung der dargestellten Informationen war teilweise so schnell nicht möglich. Die bereits aus Kapitel 5 bekannte Kritik, dass die gewählten Fotos der Straßenszene nicht immer alle Details zeigen oder wesentliche Orientierungspunkte oft auch durch andere Objekte, wie beispielsweise Vegetation oder parkende Fahrzeuge, verdeckt wird, wurde ebenfalls in dieser Studie erneut genannt.

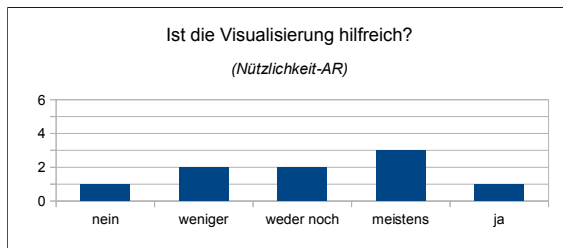


Abbildung 6.11.: Nützlichkeit

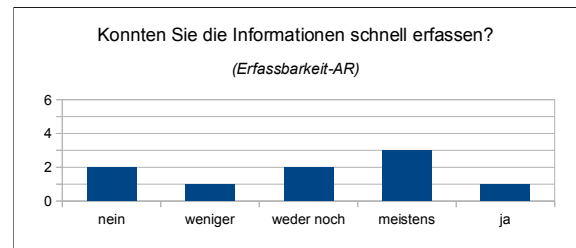


Abbildung 6.12.: Erfassbarkeit

Der AttrakDiff-Test zeigt, dass die Experten das erlebte System in Summe positiv bewerten. Alle vier Dimensionen der Wortpaare – hedonische Qualität hinsichtlich Stimulation (HQ-S) sowie Identität (HQ-I), pragmatische Qualität (PQ) und Attraktivität (ATT) – erreichen einen positiven Wert von durchschnittlich 1,014 auf der 7-stelligen Likert-Skala von -3 bis 3. Besonders das Wortpaar *schlecht - gut* im Bereich der Attraktivität sticht mit einem Mittelwert von 1,88 in Richtung *gut* hervor.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich das Konzept in der Expertenstudie bewährt hat. Vor allem die natürlichen Sprachansagen haben die Experten überzeugt. Die visuelle Darstellung der Manöver hat ähnliche Kritik erhalten, wie bereits die zugrundeliegenden AR-Fotos aus Kapitel 5. Allerdings haben die eingesetzten Methoden zur Hervorhebung der wesentlichen Orientierungspunkte im Bild, wie die Anpassung der Farbe sowie der Lichtkegel, eine bessere Wahrnehmung der wesentlichen Informationen bewirkt. Jedoch sollten die Darstellungen noch mehr auf die wesentlichen Inhalte reduziert werden. Darüber hinaus muss die zugrundeliegende Wissensbasis aktuell, vollständig und vor allem korrekt sein.

## 7. Kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der kontaktanalogen Darstellung von Navigationshinweisen im Fahrzeug. Dabei soll, wie bereits in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, beim Fahrer der Eindruck entstehen, als würden die Navigationshinweise direkt mit der Umgebung verschmelzen.

In diesem Kapitel werden die im zweiten Kapitel vorgestellten Basisanzeigeelemente (siehe Abschnitt 2.2.6) aktueller Navigationssysteme hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit mittels Augmented Reality Methoden bewertet. Anschließend wird, losgelöst von technischen Rahmenbedingungen, ein Anzeigekonzept für die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen erarbeitet. Dieses Konzept soll zum einen die Möglichkeiten der Kontaktanalogie bestmöglich ausnutzen und zum anderen neben der Straßenführung auch eine aktive Fahrstreifenführung realisieren.

Wie in Abschnitt 2.3.2 gezeigt, hat der realisierbare Sichtwinkel der HUD-Komponente direkte Auswirkung auf die Größe des virtuellen Bildes, welches vom Betrachter wahrgenommen wird. Aus diesem Grund wird als nächstes die Auswirkung der Größe des virtuellen Bildes auf das Anzeigekonzept betrachtet. Aus diesen Überlegungen werden erste Anforderungen an die spätere prototypische Realisierung abgeleitet.

Anschließend wird dieses Anzeigekonzept mittels des bereits beschriebenen Softwareframeworks (siehe Kapitel 4) prototypisch sowohl im Fahrsimulator als auch im Versuchsfahrzeug umgesetzt. Mit Hilfe dieser Prototypen kann das Anzeigekonzept erstmal erlebt und dadurch bewertet werden.

Es wurden mehrere Versuche mit unterschiedlichen Fragestellungen im Versuchsträger sowie im Fahrsimulator durchgeführt. Diese Versuche dienen vor allem der Bewertung des Konzeptes sowie der technischen Umsetzbarkeit im Fahrzeug. Die Ergebnisse dieser Versuche stellen abschließend die Grundlage für eine weitere Überarbeitung des Anzeigekonzeptes dar. Ziel dieser Überarbeitung ist die Anpassung des Konzeptes an zusätzliche Anforderungen, die erst durch die prototypische Realisierung bemerkt wurden.

### 7.1. Anzeigekonzept

An dieser Stelle wird ein Anzeigekonzept erarbeitet, welches zum einen die Möglichkeiten eines großflächigen, kontaktanalogen Head-Up Displays vollständig ausnutzt und zum anderen mittels aktuell verfügbaren Umgebungssensoren sowie Informationen in der digitalen Karte prototypisch realisierbar ist.

Dazu werden zunächst bewährte Basiselemente klassischer Navigationsanzeigekonzepte hinsichtlich des Einsatzpotentials verschiedener Augmented Reality (AR) Visualisierungsformen bewertet. Mit Hilfe dieser Erkenntnisse wird anschließend ein entsprechendes Anzeigekonzept erarbeitet, welches die Möglichkeiten der AR unter Betrachtung der

Rahmenbedingungen des Fahrzeugeinsatzes vollständig ausnutzt. Dabei werden keine technologischen Begrenzungen der Anzeigentechnologie beachtet. Im Gegenteil, im Anschluss an die Konzeptentwicklung werden, ausgehend vom Anzeigekonzept, die Anforderungen an die Anzeigetechnologie abgeleitet.

### 7.1.1. Augmented Reality-Einsatzmöglichkeiten in der Wegführung

Dieser Abschnitt analysiert die Einsatzmöglichkeiten von Augmented Reality-Anzeigen als Ergänzung beziehungsweise Austausch der klassischen Anzeigeelemente der Wegführung (siehe Abschnitt 2.2.6). Nicht jedes klassische Element kann durch den Einsatz von AR verbessert werden. Jedoch gibt es auch Elemente, die sehr stark durch den Einsatz von AR profitieren.

Da AR-Anzeigen typischerweise direkt mit der Umgebung interagieren und dadurch in der Regel sehr nah am Ort der eigentlichen Information dargestellt werden, eignet sich der Einsatz von AR vor allem in den letzten Manöverphasen, wenn die Entfernung zum Manöverort schon sehr gering ist. Bei einer größeren Entfernung zum Manöverort kann vor allem der richtungsweisende Charakter von AR als zusätzliche Orientierungsunterstützung verwendet werden. Nachfolgend werden die einzelnen Anzeigeelemente detailliert betrachtet und bewertet.

**Route-Direction-Arrow:** In der Guiding-Stufe *Notify* profitiert hauptsächlich der Route-Direction-Arrow durch den Einsatz von AR. Statt des klassischen 2D-Pfeils des Route-Direction-Arrows (RDA) könnte ein vor dem Fahrzeug schwebender 3D-Pfeil in die Richtung des Routenverlaufs zeigen (siehe Abbildung 7.1). Dadurch kann der Fahrer stets den groben Routenverlauf erahnen und sich im Fall von Gabelungen frühzeitig korrekt orientieren. Zusätzlich zeigt dieser 3D-Pfeil den nächsten Ein

stiegspunkt in die gewählte Route, falls sich das Fahrzeug außerhalb des Straßengraphens, zum Beispiel auf einem größeren Parkplatz, befindet. Die Vorteile der AR-Variante gegenüber des klassischen 2D-Pfeils sind die geringere mentale Belastung sowie die größere realisierbare Informationsdichte der Darstellung durch unterschiedliche Farben oder räumliche Ausdehnungen des Pfeils. Die technischen Anforderungen an die verwendete HUD-Technologie sind eher gering einzuschätzen. Der darstellbare Blickwinkel beeinflusst die Lage und Größe des 3D-Pfeils im Raum. Dieser 3D-Pfeil kann als perspektivische Darstellung bereits in klassischen HUDs umgesetzt werden. Jedoch verliert das angezeigte Element an 3D-Eindruck, falls nur rein monokulare Tiefenwahrungskriterien verwendet werden. Dennoch sollte die dargestellte Raumrichtung für den Fahrer deutlich erkennbar sein. Der Vorteil des kontaktanalogen HUDs liegt in der vergrößerten Entfernung zum virtuellen Bild. Dadurch ist es ohne Fokussierungsaufwand möglich, den dargestellten 3D-Pfeil und die Fahrszene wahrzunehmen.

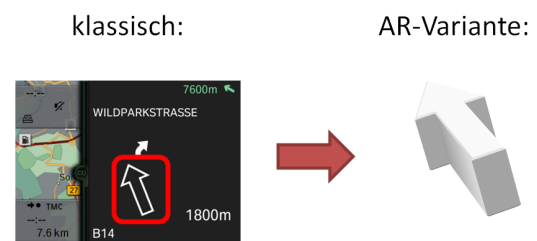


Abbildung 7.1.: RDA-Darstellungsformen

**Entfernung zum Manöver:** In klassischen Anzeigekonzepten für Wegführung wird die Entfernung zum nächsten Manöver in der Regel in Textform angegeben und oft zusätzlich mit Hilfe einer visuellen Metapher dargestellt. Jedoch haben viele Menschen Probleme, die exakte Entfernungsangabe in Metern in die reale Umgebung abzubilden. Dadurch kommt es häufig zu Irritationen beim Benutzer ("Ist diese oder die nächsten Kreuzung gemeint?"). Daher wird oft noch eine abstrakte Symbolik zur Verdeutlichung der Entfernung verwendet (zum Beispiel ein sich füllender Balken - siehe Kapitel 2.2.6). Diese Metapher kann in ähnlicher Form auch in einer AR-Variante verwendet werden, indem eine virtuelle Verbindungslinie zwischen dem eigenen Fahrzeug und dem Manöverpunkt gespannt wird. Dadurch sieht der Fahrer zum einen optisch die Richtung des Manöverpunktes (ähnlich dem RDA) und kann zum anderen anhand der Gummibandmetapher der Verbindungslinie die Entfernung direkt ablesen. Je weiter der Manöverpunkt entfernt ist, desto dünner wird die Verbindungslinie dargestellt. Dadurch kann erneut die darstellbare Informationsdichte erhöht werden, da in einem Element sowohl Richtung als auch Entfernung dargestellt werden können. Jedoch stellt diese Art der Darstellung größere Anforderungen an die verwendete Displaytechnologie. Es wird eine große Entfernung zum virtuellen Bild für die gleichzeitige Wahrnehmung der Verbindungslinie und der Fahrscene benötigt. Der darstellbare Blickwinkel beschränkt die räumliche Ausdehnung der Verbindungslinie. Ein zu kleiner Blickwinkel kann zu frühzeitigem virtuellen *Abschneiden* der Verbindungslinie führen. Weiterhin sollte das dargestellte Bild oberhalb des Horizontes liegen, um Verdeckungen vermeiden zu können.

**Fahrstreifenführung:** Für die Fahrstreifenführung wird in klassischen Anzeigekonzepten eine abstrakte Darstellung der Fahrstreifensituation verwendet. (siehe Kapitel 2.2.6). Mittels AR, insbesondere kontaktanalogen Anzeigen, kann dem Fahrer der optimale Fahrstreifen jedoch direkt angezeigt werden. Dazu können ebenfalls verschiedene Metaphern verwendet werden. Einerseits kann der optimale Fahrstreifen durch Nachzeichnen der Fahrspurmarkierungen angezeigt werden. Alternativ können ein Fahrschlauch (siehe Abbildung 7.2) in Form von virtuellen Schienen auf der Straße oder virtuellen Kabeln oberhalb der Straße zum direkten Folgen angezeigt werden [88] [77]. Die Darstellung des optimalen Weges kann auch in Form einer Brotkrummen Spur erfolgen [123]. Vorteil dieser Darstellungsvariante ist das direkte Erkennen des optimalen Fahrstreifens. Der Fahrer kann sich nach Bedarf entsprechend einordnen und bekommt zusätzlich eine Bestätigung für die korrekte Fahrstreifenwahl. Diese Art der Darstellung ist ebenfalls sehr stark durch die verfügbare Displaytechnologie begrenzt.

**Manövervorhinweis:** Der Manövervorhinweis gibt Fahrern in klassischen Anzeigekonzepten bereits im Vorfeld einen visuellen Anhaltspunkt für das nächste Manöver (siehe Kapitel 2.2.6). Dabei wird eine künstlich erzeugte Abbildung des realen Straßenschildes angezeigt. Der Fahrer kann so die Hinweise im Navigationssystem einfach mit der realen Fahrsituation abgleichen. Dieser Abgleich könnte mittels AR erleichtert werden. Dazu könnte das System dem Fahrer relevante Hinweisschilder mittels Rahmen beziehungsweise Einfärbung direkt hervorheben. Der Fahrer erhält so eine direkte Rückmeldung über den Verlauf der aktuellen Route in der realen Welt, und zusätzlich kann dadurch das Überblickswissen in unbekanntem Gebieten durch gezielte Hervorhebung verbessert

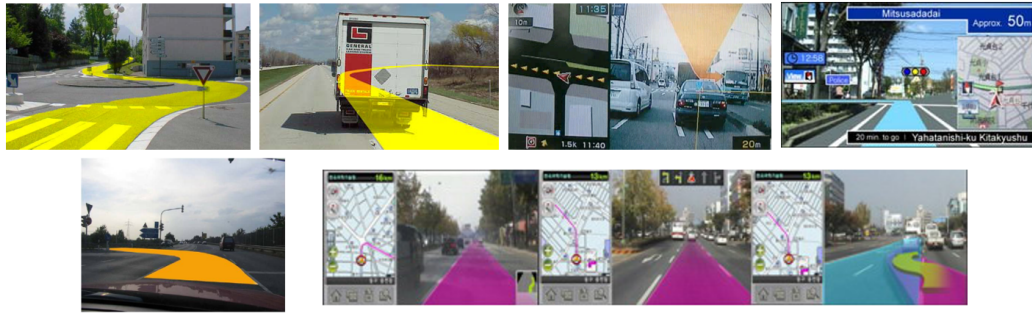


Abbildung 7.2.: Mittels Fahrschlauch dargestellter Routenverlauf [88][96][142][100]

werden. Diese Hervorhebung stellt jedoch sehr große Anforderungen an die verfügbare Umgebungssensorik. Da die genaue Schildposition nur mittels Sensoren, wie beispielsweise eines Kamerasystems, erkannt werden kann. Zusätzlich müsste sich der darstellbare Bereich des HUD oberhalb des Horizontes befinden.

**Manöver und Manöverpunkt:** Für die Darstellung des Manövers sowie des Manöverpunktes hat sich in klassischen Anzeige Konzepten die Kombination aus Karten- und Pfeildarstellung bewährt (siehe Kapitel 2.2.6). Für die AR-Variante kann für die Manöverdarstellung, wie bereits für die Fahrstreifenführung, die Fahrschlauchvisualisierung verwendet werden [88] [96] [142] [100]. Jedoch zeigt diese dem Fahrer lediglich den Verlauf der Route an (siehe Abbildung 7.2). Eine Hervorhebung der für die Navigationsaufgabe relevanten Fahrmanöver ist damit nicht implizit gegeben.

Narzt et al. schlägt für diese Hervorhebung die Darstellung eines virtuellen Vorderfahrzeuges vor. Dieses kann vor entsprechenden Manövern mittels Blinkersignale auf das jeweilige Manöver aufmerksam machen und durch sein virtuelles Abbiegen das auszuführende Fahrmanöver direkt andeuten. Weiterhin könnte solch ein virtuelles Vorderfahrzeug zur Anpassung der Geschwindigkeit durch virtuelle Brems- und Beschleunigungsvorgänge verwendet werden [88]. Jedoch birgt ein solches Vorderfahrzeug auch Risiken. Der Fahrer könnte zu starkes Vertrauen in dieses bekommen und diesem ohne Beachtung der aktuellen Verkehrssituation folgen. Dies kann zu Kollisionen beim Fahrstreifenwechsel sowie Rotlichtfahrten führen.

Alternativ eignet sich für die Hervorhebung der relevanten Fahrmanöver der Einsatz der bereits bekannten Pfeilmeter [135] [69] [119]. Jedoch kann mittels AR der angezeigte Manöverpfeil direkt auf dem jeweiligen Manöverpunkt platziert werden (siehe Abbildung 7.3). Dadurch kann der Fahrer sowohl den Manöverort als auch das jeweilige Fahrmanöver direkt erkennen und ausführen.



Abbildung 7.3.: Manövervisualisierung mittels Pfeildarstellung [135] [69] [119]



Klein hat verschiedene Formen der Pfeildarstellung und die damit verbundene Wahrnehmung der Anzeige untersucht. Pfeile mit markanter Perspektivendarstellung haben gute Ergebnisse geliefert. Diese kann durch stark ausgeprägte Kanten, Beleuchtungseffekte sowie die Verwendung entsprechender Umrandungen erzeugt werden [69].

### 7.1.2. Anzeigekonzept für kontaktanaloge Navigationsdarstellung

Die Bewertung der Verwendungsmöglichkeiten von Augmented Reality für bestehende Basiselemente klassischer Navigationsanzeigen stellt die Grundlage für die Entwicklung eines Anzeigekonzeptes für die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen dar.

Dieses Anzeigekonzept soll neben der idealen Ausnutzung von kontaktanalogen Elementen zusätzlich einen Paradigmenwechsel im Bereich Wegführung hervorbringen. Klassische Navigationssysteme führen den Fahrer auf Straßenebene zu seinem Ziel - dem Fahrer wird mitgeteilt an welcher Kreuzung er in welche Straße abbiegen muss. Teilweise bieten bestehende Systeme noch eine abstrakte Darstellung der Fahrstreifensituation unmittelbar vor der Kreuzung. Jedoch wird der Fahrer nicht aktiv auf den optimalen Fahrstreifen geführt. Diese aktive Fahrstreifenführung soll ein zentraler Bestandteil des neuen Anzeigekonzeptes werden.

Bei der Erarbeitung des Anzeigekonzeptes werden technische Rahmenbedingungen aktueller Anzeigetechnologien nicht beachtet. Es wird angenommen, dass eine Anzeigetechnologie existiert, welche die Darstellung von Informationen entlang des aktuell befahrenen als auch entlang der beiden benachbarten Fahrstreifen ermöglicht.



Abbildung 7.4.: Ablauf und Zusammenhang der verschiedenen Manöverphasen

Die klassischen Manöverphasen *Unnotify*, *Notify*, *Prepare* und *Execute* (siehe Abschnitt 2.2.5) wurden beibehalten. Zusätzlich wird die Spurführungsphase *Lane Guiding* eingeführt. Diese Spurführungsphase ist keine eigenständige Phase, sondern fester Bestandteil der Manöverphasen *Prepare* und *Execute*. Zusätzlich kann bei Bedarf bereits in den Phasen *Unnotify* und *Notify* die Spurführungsphase aktiviert werden. Dies geschieht, sobald das System erkennt, dass der Fahrer die geplante Route verlassen würde, wenn er den Fahrstreifen nicht wechselt. Die korrekte Einordnung in den optimalen Fahrstreifen stellt für das Konzept kein eigenständiges Manöver dar. In Abbildung 7.4 ist der Ablauf der einzelnen Manöverphasen bei entsprechender Annäherung grafisch dargestellt. Die Entfernungsangabe bildet ein wesentliches Element in der Navigation und wird daher in jeder Navigationsphase gleichbleibend dargestellt und bis zum Ende der Route angezeigt. Nachfolgend werden die dargestellten Elemente sowie deren Verhalten in den jeweiligen Manöverphasen beschrieben.

**Unnotify:** Durch die große Entfernung zum Manöver besteht für den Fahrer in der Phase *Unnotify* kein Handlungsbedarf. Dies wird ihm durch die Darstellung der Entfernungsanzeige und des Geradeauspfeils angezeigt. Zusätzlich wird der Pfeil leicht verblasst dargestellt, um die Navigationshinweise noch stärker aus der Aufmerksamkeit des Fahrers zu ziehen. In dieser Phase werden keine AR-Anzeigen verwendet. Die dargestellten Elemente ähneln sehr stark den klassischen Navigationsanzeigen in dieser Phase.

Jedoch könnte ein Fahrstreifenwechsel notwendig werden, falls der Fahrer ansonsten die gewählte Route verlassen würde. In diesem Fall springen die Anzeigen in die entsprechende Phase. Und dem Fahrer werden Fahrstreifenwechselhinweise präsentiert. Das Verhalten sowie die Darstellung dieser Hinweise werden später in der Phase *Prepare* beschrieben.

**Notify:** Sobald sich der Fahrer einem Manöver nähert, wird er zunächst auf dieses bevorstehende Manöver hingewiesen. Dazu wird ihm, analog zu klassischen Ansätzen, ein akustischer Hinweis präsentiert. Zusätzlich wird, anstelle des ausgefärbten Geradeauspfeils aus *Unnotify*, eine Piktogrammdarstellung des Manövers präsentiert. Durch den damit verbundenen Farbwechsel von Grau zu Weiß wird zusätzlich die Aufmerksamkeit des Fahrers kurzzeitig auf die Piktogrammdarstellung gelenkt. Es werden ebenfalls keine AR-Elemente in dieser Phase verwendet. Allerdings wird der Fahrer bereits mit Hilfe von Dreieckssymbolen auf bevorstehende Fahrstreifenwechsel hingewiesen. Ein frühzeitiger Wechsel in die aktive Spurführungsphase ist ebenfalls möglich, sollte ein Fahrstreifenwechsel zum weiteren Folgen der Route akut notwendig sein. In Abbildung 7.5 findet sich ein Beispiel für die Darstellung während der Phase *Notify*: in 250 Metern muss nach rechts abgelenkt werden, und bis zum Manöverpunkt muss noch zweimal der Fahrstreifen nach rechts gewechselt werden.



Abbildung 7.5.: Abstrakte Darstellung während der Phasen *Unnotify* bis *Prepare*

**Prepare:** Der Beginn der Phase *Prepare* ist verbunden mit der Spurführungsphase. Der Fahrer wird auf das bevorstehende Manöver vorbereitet, indem er auf den optimalen Fahrstreifen geführt wird beziehungsweise einen Hinweis bekommt sich bereits auf dem optimalen Fahrstreifen zu befinden, damit er diesen nicht wieder verlässt.

Da es neben den kontaktanalogen Anzeigen im zukünftigen HUD auch weiterhin Informationen in entweder klassischer Textform oder abstrakter Form geben wird, der Fahrer nicht ständig nach kontaktanalogen Informationen suchen soll und es trotz der erweiterten Anzeigefläche nicht möglich sein wird, an allen Orten kontaktanaloge Hinweise darzustellen, werden alle benötigten Fahrstreifenwechsel mit Hilfe abstrakter Symbole in der

2D-HUD-Ebene eingeleitet. Diese Symbole deuten in die jeweilige Richtung des notwendigen Fahrstreifenwechsels (siehe Abbildung 7.5). Sollte der optimale Fahrstreifen nicht im darstellbaren Bereich liegen, dienen diese abstrakten Fahrstreifenwechselsymbole als zusätzlicher Richtungsimpuls für den Fahrer.

Sobald die realen Markierungen des optimalen Fahrstreifens im darstellbaren Bereich des HUDs sind, wandelt sich das abstrakte Fahrstreifenwechselsymbol in die Markierung dieses Fahrstreifens. Dazu wachsen aus dem dargestellten Symbol die beiden Fahrstreifenränder links und rechts - ausgehend vom Symbol hin zum Horizont (siehe Abbildung 7.6). Diese kurzzeitige Animation bezweckt zum einen die gewünschte Aufmerksamkeitsbindung, um den optimalen Fahrstreifen für den Fahrer deutlich hervorzuheben. Zum anderen dient sie dem kontrollierten Übergang der Anzeigen von der klassischen abstrakten Darstellung hin zur kontaktanalogen Darstellung.

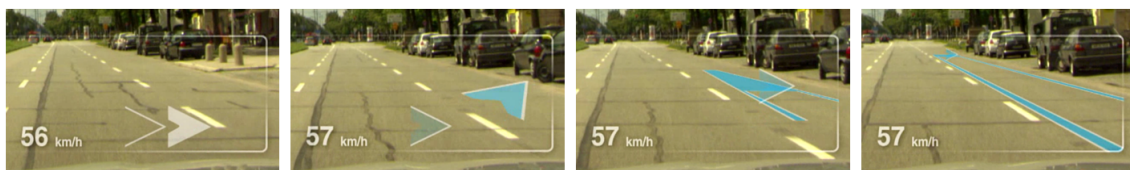


Abbildung 7.6.: Aufbau der kontaktanalogen Fahrstreifenführung

Sollten mehrere Fahrstreifenwechsel notwendig sein, wird dies durch eine entsprechende Vervielfältigung der angezeigten Symbole sowie Fahrstreifenmarkierung angezeigt. Dem Fahrer werden in diesem Fall so viele Fahrstreifenwechselsymbole angezeigt wie Fahrstreifenwechsel notwendig sind (siehe Abbildung 7.5 und 7.6). Während der Übergangsanimation von der abstrakten hin zur kontaktanalogen Darstellung wachsen, wie beschrieben, die Fahrstreifenmarkierung aus dem Symbol. Zusätzlich wandern die Symbole für die weiteren benötigten Fahrstreifenwechsel aus der abstrakten in die kontaktanaloge Darstellung und positionieren sich an den realen Orten der entsprechenden Fahrstreifenwechsel (siehe Abbildung 7.6). Der Fahrer kann anschließend, falls benötigt, entsprechende Fahrstreifenwechsel durchführen und der Darstellung des Fahrstreifenverlaufs bis hin zum Manöver folgen.

Die Metapher der nachgezeichneten Fahrstreifenmarkierung wird gewählt, da in der Regel die Bedeutung von Fahrstreifen im Vorfeld von Kreuzungen bekannt ist und dadurch diese Art der Darstellung für den Fahrer einen logischen und direkten Hinweis auf den für ihn optimalen Fahrstreifen bietet. Zusätzlich soll so die Gefahr der Überdeckung anderer Verkehrsteilnehmer durch die kontaktanalogen Anzeigen minimiert werden, da sich andere Verkehrsteilnehmer in der Regel innerhalb der Fahrstreifen bewegen.

**Execute:** Am Ort des Manövers, zum Beispiel der entsprechenden Kreuzung, wird dem Fahrer ein Manöverimpuls präsentiert. Dieser Impuls zeigt in die Richtung des weiteren Verlaufs der Route und baut sich in einer kurzen Animation schrittweise aus den beiden Fahrstreifenmarkierungen links und rechts auf (siehe Abbildung 7.7). Diese Dynamik vermittelt dem Fahrer die zeitliche Nähe des Manövers und lenkt gleichzeitig seine Aufmerksamkeit auf den Ort des Manövers. Der Fahrer kann anhand der Lage, Form und Orientierung des Impulses direkt Manöverort sowie Richtung ablesen.

## 7. Kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen

---



Abbildung 7.7.: Aufbau des Manöverimpulses aus den Fahrstreifenmarkierungen bei Kreuzungsannäherung

Aufgrund der beschränkten Größe des abbildbaren kontaktanalogen Bereiches ist es nicht möglich, entlang des dargestellten Manövers zu fahren, also den dargestellten Manöverimpuls zu befahren. Außerdem soll der Fahrer nicht dazu animiert werden, seine Aufmerksamkeit auf einen Bereich unmittelbar vor seinem Fahrzeug zu lenken, sondern auf den entsprechenden Vorausschaubereich. Daher verwandelt sich der Manöverimpuls bei Annäherung an die Kreuzung in eine Pfeilsymbolik, welche das Manöver abstrakt beschreibt. Dieses Piktogramm wandert anschließend in einer kurzen, aber deutlichen Animation aus der Umgebung zurück in die 2D-HUD-Ebene (siehe Abbildung 7.8).

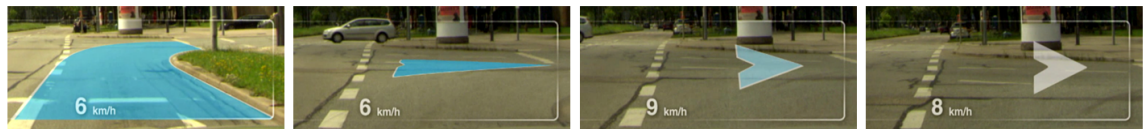


Abbildung 7.8.: Animierter Abbau der kontaktanalogen Darstellung des Manöverimpulses und Wechsel zur abstrakten Darstellung

**Zusammenfassung:** Das vorgestellte Anzeigekonzept für die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen besteht aus den folgenden vier Elementen:

- symbolischer Fahrstreifenwechselhinweis (siehe Abbildung 7.5)
- kontaktanaloge Fahrstreifenmarkierung (siehe Abbildung 7.6)
- kontaktanaloger Manöverimpuls (siehe Abbildung 7.7)
- symbolische Manöverdarstellung (siehe Abbildung 7.8)

Zwischen den Elementen werden entsprechende Animationen verwendet, um bewusst kurzzeitig die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die jeweilige Veränderung der Manöversituation zu lenken.

Die kontaktanaloge Darstellung wird also nur benutzt, während der Fahrer auf das Manöver vorbereitet wird, und zur Darstellung des Manövers sowie des Ortes unmittelbar vor der Ausführung des Manövers. Nachdem dem Fahrer Ort und Art des Manövers mitgeteilt wurden, wird die kontaktanaloge Darstellung in umgekehrter Weise aufgehoben, wie sie entstanden ist.

## 7.2. Protoypische Umsetzung der kontaktanalogen Navigationsanzeigen

Neben dem reibungslosen Zusammenspiel der einzelnen Komponenten im Gesamtsystem müssen die Informationen für den Fahrer in der richtigen Art und Weise angezeigt werden. Da die Anzeigen im direkten Sichtfeld des Fahrers platziert werden und augenscheinlich mit der realen Umwelt interagieren, müssen die Information unaufdringlich, aber dennoch eindeutig und intuitiv verständlich dargestellt werden.

Video- und Fotomontagen können den Entwicklungsprozess des Anzeigekonzeptes in den ersten Phasen sehr gut unterstützen. Allerdings lassen sich mit ihnen keine Aussagen hinsichtlich des Zusammenspiels im Gesamtsystem und der Wirkung der Anzeigen auf die verschiedenen Fahrer treffen. Daher muss das erarbeitete Anzeigekonzept für eine anschließende Bewertung prototypisch umgesetzt werden.

Dabei stellt die Kontaktanalogie aufgrund ihrer bisher außergewöhnlichen Form der Anzeige neuartige Anforderungen an die prototypische Realisierung. Die verfügbare Fläche für Anzeigen muss gegenüber klassischen Anzeigen deutlich vergrößert und an einer anderen Stelle im Raum platziert werden (siehe Kapitel 2.3.2).

Die erste Umsetzung des Konzeptes erfolgte innerhalb der Fahrsimulatoren der BMW Group. Mit dieser kostengünstigen Implementierung lassen sich die Anzeigekonzepte in der vollständig kontrollierten Welt das erste Mal erleben. Mit Hilfe einer neu erarbeiteten Werkzeugkette konnte die CORONA-Umgebung mit der Fahrsimulation gekoppelt werden. Dadurch konnten unter identischen Bedingungen die verschiedenen Varianten des Anzeigekonzeptes dargestellt und mit zahlreichen Probanden überprüft werden.

Nach erfolgreichen Untersuchungen im Simulator werden die Anzeigekonzepte auch in Prototypen auf der Straße erprobt. Die Ergebnisse aus der Simulation werden auf das Versuchsfahrzeug übertragen, weiter verfeinert und im Realverkehr untersucht. Dort müssen die entwickelten Konzepte ihre Alltagstauglichkeit unter Beweis stellen. Beide Testumgebungen sind für verlässliche und valide Erkenntnisse zu den Anzeigen unverzichtbar, um maximalen Nutzen und Sicherheit für den Fahrer aus der neuen kontaktanalogen Anzeigetechnologie zu erzielen.

### 7.2.1. Anforderung an Bildgröße und -lage

Die Anforderungsanalyse basiert auf dem erarbeiteten Anzeigekonzept. Wesentliche Merkmale dieses Konzeptes sind die Markierung des optimalen Fahrstreifens sowie die Darstellung des Manöverimpulses. Zusätzlich sollen die Anzeigen so früh wie möglich und so lange wie möglich in vielen Fahrsituationen optimal dargestellt werden können.

Der verfügbare Blickwinkel des verwendeten HUD bestimmt die Möglichkeiten zur Markierung des optimalen Fahrstreifens. Bei gerader Ausrichtung des Fahrzeuges innerhalb des Fahrstreifens kann der mögliche Darstellungsbereich auf der Straße mittels einfacherer geometrischer Berechnungen, wie in Abbildung 7.9 aufgezeigt, bestimmt werden.

Mit Hilfe der Anzahl  $n$  der zu überdeckenden Fahrstreifen sowie der Breite der Fahrstreifen  $B_{\text{Fahrstreifen}}$  kann die benötigte Breite  $B$  berechnet werden.

$$B = (n - 1) \cdot B_{\text{Fahrstreifen}} + 0,5 \cdot B_{\text{Fahrstreifen}}$$

## 7. Kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen

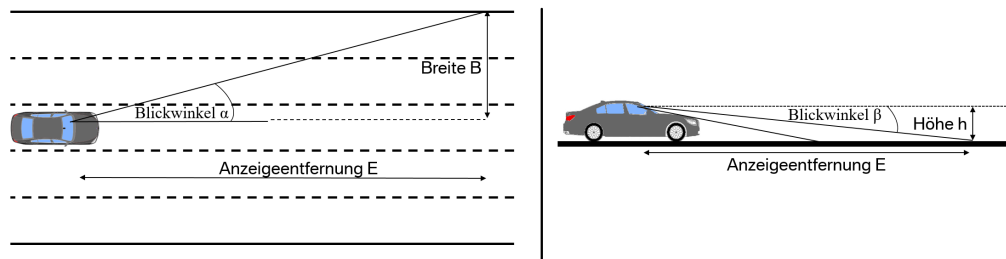


Abbildung 7.9.: Berechnung des horizontalen und vertikalen Blickwinkels

Aus der benötigten Breite  $B$  und der gewünschten Anzeigentfernung  $E$  kann mittels Arkustangens der benötigte horizontale Blickwinkel  $\alpha$  berechnet werden.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{B}{E}\right)$$

Mit der gleichen Abbildungsvorschrift kann der vertikale Blickwinkel  $\beta$  in Abhängigkeit der Länge des darstellbaren Bereichs  $E$  und der Verbauhöhe  $h$  des HUD berechnet werden.

$$\beta = \arctan\left(\frac{h}{E}\right)$$

Gemäß der Richtlinien für die Anlage von Straßen kennzeichnet ein Fahrstreifen die verfügbare Fläche für die Fahrt eines Fahrzeuges in eine Richtung. Die Breite der Fahrstreifen auf deutschen Straßen muss zwischen 2,75 m und 3,75 m betragen und ist abhängig von den vorhandenen Platzverhältnissen sowie den angenommenen Geschwindigkeiten entlang der Straße [41]. Daher wird für die Berechnung des vertikalen Blickwinkels eine Breite der Fahrstreifen von 3,50 m zugrundegelegt. Da zu beiden Seiten dieselbe Anzahl an Fahrstreifen überdeckt werden soll, muss der berechnete Winkel noch verdoppelt werden.

Entfernung ----- Fahrstreifen- anzahl	500m	400m	300m	200m	100m	50m	25m	12.5m
2	1,20°	1,50°	2,01°	3,01°	6,01°	11,99°	23,72°	45,56°
3	2,01°	2,51°	3,34°	5,01°	10,00°	19,85°	38,58°	69,98°
4	2,81°	3,51°	4,68°	7,01°	13,97°	27,53°	52,21°	88,84°
5	3,61°	4,51°	6,01°	9,01°	17,90°	34,67°	64,42°	103,13°
	Unbedingt benötigt			Sollte realisierbar sein			Nicht benötigt	

Abbildung 7.10.: Übersicht über benötigte horizontale Blickwinkel in Abhängigkeit von Fahrstreifenanzahl und Anzeigentfernung

In der Übersicht 7.10 sind die abdeckbaren Bereiche entlang der Straße in Fahrtrichtung dargestellt. Um 100 m vor dem Fahrzeug Informationen entlang des eigenen sowie des

unmittelbar benachbarten Fahrstreifens anzeigen zu können, wird ein horizontaler Blickwinkel von  $6,01^\circ$  benötigt. Sollen bereits in 50 m vor dem Fahrzeug noch Informationen entlang des übernächsten Fahrstreifens angezeigt werden wird ein horizontaler Blickwinkel von  $11,99^\circ$  benötigt.

Anzeige von / bis	500m	400m	300m	200m	100m	50m	25m
400m	0,04°						
300m	0,11°	0,07°					
200m	0,25°	0,21°	0,14°				
100m	0,67°	0,63°	0,56°	0,42°			
50m	1,48°	1,44°	1,37°	1,23°	0,81°		
25m	3,01°	2,97°	2,90°	2,75°	2,34°	1,53°	
12.5m	5,73°	5,69°	5,62°	5,48°	5,06°	4,25°	2,73°
5m	11,92°	11,88°	11,81°	11,67°	11,25°	10,44°	8,91°
	Unbedingt benötigt		Sollte realisierbar sein			Nicht benötigt	

Abbildung 7.11.: Übersicht über vertikal darstellbares Blickfeld in Grad bei ebener Strecke in Abhängigkeit von Höhe und gewünschter Anzeigentfernung

In Abbildung 7.11 sind die notwendigen vertikalen Blickwinkel für Anzeigen im Bereich von 5 m bis 500 m vor dem Fahrzeug dargestellt. Für die Berechnung wurde die Oberkante des Bildes auf 500 m gelegt, also ein Lockdown-Winkel von  $1,7^\circ$  angenommen. Bei dieser Bildlage wird für Darstellungen im Bereich von 12,5 m bis 500 m ein vertikaler Blickwinkel von  $5,73^\circ$  benötigt.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich für den ersten Prototyp ein geforderter Raumwinkel der Anzeige von  $5^\circ$  vertikal mal  $20^\circ$  horizontal. Damit die Auflösung der Anzeige oberhalb des Auflösungsvermögens des menschlichen Auges von einer Bogenminute liegt und somit der Betrachter die einzelnen Pixel nicht erkennen kann, muss die Anzeige bei diesem Raumwinkel mindestens 1200 mal 300 Pixel besitzen [50].

### 7.2.2. Auswirkung reduzierter Anzeigefläche und Blickwinkel

Basierend auf dem Stand der Technik und der Anforderungsanalyse zur benötigten Bildgröße des HUD für den Prototyp ergibt sich ein Konflikt. Aktuelle HUD können einen Raumwinkel von ungefähr  $5^\circ$  mal  $2^\circ$  abdecken. Das bedeutet, mit dem gewünschten Raumwinkel von  $20^\circ$  mal  $5^\circ$  verzehnfacht sich die Größe des HUD. Selbst für eine prototypische Realisierung stellt dies eine enorme Herausforderung dar.

**Auswahl der HUD-Größen für Vergleich:** Daher soll in diesem Abschnitt die Auswirkung einer reduzierten Anzeigefläche auf die Umsetzung des beschriebenen Konzeptes analysiert werden. Dafür wird visuell betrachtet, wie sich das vorgeschlagene Anzeige-

konzept in verschiedenen HUD-Größen in Form von verschiedenen Blickwinkeln dargestellt. In Abbildung 7.12 sind die verschiedenen HUD-Größen dargestellt. In Blau die Wunsch-Größe von  $20^\circ \times 5^\circ$  als Referenz. In Rot eine Zwischengröße von  $12,5^\circ \times 4^\circ$  und in Grün die klassische Bildgröße der nächsten HUD-Generation von  $8^\circ \times 3^\circ$ .



Abbildung 7.12.: Überlagerung mit verschiedenen HUD-Größen:  
 $20^\circ \times 5^\circ$  in Blau,  $12,5^\circ \times 4^\circ$  in Rot und  $8^\circ \times 3^\circ$  in Grün

**Darstellung in klassischer HUD-Größe:** Wenn das Anzeigekonzept in der klassischen Größe betrachtet wird (siehe Abbildung 7.13), fällt auf, dass die kontaktanalogen Informationen nur sehr weit entfernt gut dargestellt werden können. Dadurch müssen die verschiedenen Animationen zum Wechsel zwischen den einzelnen Phasen deutlich früher beziehungsweise in größerer Entfernung angezeigt werden. Um dies zu realisieren wird stets ein längerer Fahrtweg für entsprechende Fahrstreifenwechsel benötigt. Kurzfristige Fahrstreifenwechsel oder der Wechsel auf sehr kurze Abbiegefahrbahnen lassen sich dann nicht mehr darstellen.



Abbildung 7.13.: Anzeigekonzept mit Überlagerung der klassischen Bildgröße

Während des Fahrstreifenwechsels wandern die angezeigten Fahrstreifenmarkierungen sehr oft aus dem darstellbaren Anzeigebereich. Während der Annäherung an den Manöverpunkt befinden sich fast nie beide Markierungen des optimalen Fahrstreifens gleichzeitig im darstellbaren Bereich. Dadurch springt die Markierung ständig zwischen linkem und rechtem Fahrstreifenrand. In Summe wirkt die gesamte Anzeige dadurch sehr unruhig und nervös.

Während der letzten Phase füllt der dargestellte Manöverimpuls fast vollständig die verfügbare Anzeigefläche aus. Dadurch ist die durch den Impuls übertragene Informa-



tion über das Manöver nicht erkennbar und der Impuls reduziert sich auf einen letzten zeitlichen Hinweis, jedoch ohne Angabe von Ort und Richtung des Manövers.

Die klassische HUD-Größe ist definitiv zu klein für eine kontaktanaloge Darstellung. Wenn nur die klassische HUD-Größe verfügbar ist, muss sich die Anzeige auf die bekannte symbolische und abstrakte Darstellung reduzieren.

**Darstellung in Zwischen-Größe:** Wie in Abbildung 7.14 zu erkennen ist, hat die Zwischen-Größe ähnliche Probleme mit der Darstellung des Anzeigekonzeptes wie die klassische Größe, aber erzeugt, bereits ruhigere Anzeigen. Wie bei der klassischen Größe müssten die verschiedenen Wechselanimationen früher beginnen und benötigten dadurch ebenfalls größere Entfernungen für die Darstellung.



Abbildung 7.14.: Anzeigekonzept mit Überlagerung der mittleren Bildgröße

Allerdings befinden sich bei der Zwischen-Größe bereits beide Markierungen des optimalen Fahrstreifens teilweise gleichzeitig im darstellbaren Bereich, sodass diese entsprechend hervorgehoben werden können. Jedoch müsste die Anzeige weit entfernt beginnen und ist auch nur für begrenzte Zeit vollständig sichtbar.

Während der Fahrstreifenwechsel und Annäherung an das Manöver wandern die Markierungen teilweise aus dem darstellbaren Bereich - dadurch kann eine konsequente Markierung des optimalen Fahrstreifens nicht gewährleistet werden.

Der dargestellte Manöverimpuls ist weiterhin zu groß für die verfügbare Anzeigegröße. Allerdings ist er deutlicher zu erkennen als in der klassischen Größe.

Mit einigen Anpassungen und Einschränkungen am Anzeigekonzept ließen sich mit der Zwischen-Größe bereits erste kontaktanaloge Navigationsanzeigen realisieren. Allerdings würden diese nicht das vollständige Potential der kontaktanalogen Darstellung entfalten können und ließen sich auch nicht überall verwenden.

**Zusammenfassender Vergleich:** In Abbildung 7.15 sind nochmal alle drei Varianten nebeneinander dargestellt. Die angesprochenen Kritikpunkte sind hier klar erkennbar.

Wie das dargestellte Beispiel zeigt, liegen in der klassischen Bildgröße die Markierungen oft außerhalb des darstellbaren Bereichs des HUD. Durch die deutlich kleinere Bildgröße haben die dargestellten Anzeigen sehr viele Dynamik, da die Markierungen im Randbereich sehr oft zwischen sichtbar und nicht sichtbar wechseln. Die klassische Bildgröße ist für das vorgeschlagene Anzeigekonzept deutlich zu klein.

Mit der in Rot dargestellten Zwischen-Größe hingegen wäre das Anzeigekonzept umsetzbar, allerdings müsste das Konzept mit verschiedenen Anpassungen an die kleinere Anzeigegröße angepasst werden. So müssten die Anzeigen in deutlich größeren Entfernungen dargestellt werden um, im sichtbaren Bereich zu sein. Trotzdem würden vereinzelt Markierungen den darstellbaren Bereich verlassen. Durch die verkleinerten Anzeigen



Abbildung 7.15.: Vergleich der Darstellung in den verschiedenen Bildgrößen

und die starke Dynamik im Randbereich wird das Erlebnis für den Kunden verringert. Die Zwischen-Größe stellt somit keine alternative Umsetzungsmöglichkeit dar.

In der in Blau dargestellten, gewünschten Größe ließe sich das vorgestellte Anzeigekonzept umsetzen. Die Ränder des eigenen sowie der beiden benachbarten Fahrstreifen sind ab einer Entfernung von 25m vor dem Fahrzeug die meiste Zeit im Darstellungsbereich. Dies erlaubt eine ideale Markierung des optimalen Fahrstreifens im Vorausschaubereich des Fahrers.

**Nickwinkelausgleich und Anzeigen im Randbereich:** Diese Überlegungen bezüglich der notwendigen Bildgröße beruhen ausschließlich auf dem vorgestellten Anzeigekonzept und betrachten weder die Verkleinerung des verfügbaren Bildes aufgrund von Nickbewegungen des Fahrzeuges noch die Effekte, die mit Anzeigen im Randbereich auftreten.

Während der Fahrt ändert sich aufgrund der Nickbewegungen des Fahrzeuges die Lage des virtuellen Bildes. Der darstellbare Bereich verschiebt sich bei Bremsvorgängen nach unten in Richtung Straße und wandert bei Beschleunigungsvorgängen nach oben in Richtung Horizont. Damit die dargestellten Anzeigen für den Betrachter weiterhin gefühlt mit der Umgebung verschmelzen und ortsfest platziert sind, müssen die Bewegungen des darstellbaren Bereichs ausgeglichen werden, da sonst der Effekt der kontaktanalogen Darstellung verschwinden würde. Dieser Ausgleich kann sowohl mechanisch als auch digital erfolgen. Der mechanische Ausgleich stellt eine weitere Anforderung an das HUD dar. So müssten die Spiegel beweglich montiert sein und dazu sehr fein und sehr schnell verkippt werden können. Da dies den bereits anspruchsvollen Aufbau der Komponente zusätzlich erschwert, sollte der Ausgleich mit Hilfe der Software digital erfolgen. Allerdings bedeutet ein Ausgleich in der Software, dass der darstellbare Bereich durch die Nickbewegungen des Fahrzeuges zusätzlich verkleinert wird, da die Anzeigen nach oben oder unten geschoben werden müssen. Diese Verkleinerung muss bei der Auslegung der HUD-Komponente ebenfalls betrachtet werden und spricht für eine eher größere Ausdehnung in vertikaler Richtung.

Unabhängig von der verfügbaren Bildgröße wird es stets Anzeigeelemente geben, welche den darstellbaren Bereich verlassen oder betreten und somit für den Betrachter plötzlich auftauchen oder verschwinden. Um für den Betrachter ein möglichst gutes Erlebnis zu erzeugen, müssen Anzeigen im Rand besonders betrachtet und behandelt werden. Eine große Herausforderung besteht darin, dem Betrachter die Größe des darstellbaren Bereiches und somit der Lage des virtuellen Bildrandes zu verdeutlichen, da ein HUD durch seine technische Realisierung, im Gegensatz zu klassischen Anzeigeflächen, keine sichtbaren Ränder besitzt. Eine Möglichkeit, den Rand für den Betrachter sichtbar zu gestalten,

ist die Verwendung eines dezenten Schattens im Randbereich. Allerdings wäre dieser jederzeit zu sehen und bliebe aufgrund der Lage auch stets im Blickfeld des Betrachters. Eine bessere Alternative stellt die Verwendung eines Linseneffekts am Rand dar. Dadurch werden Anzeigen im Randbereich verzerrt dargestellt und der Benutzer kann sich in Ruhe damit vertraut machen. Beide Varianten benötigten zusätzlichen Platz im Randbereich des darstellbaren Bildes und verkleinern dadurch zusätzlich den verfügbaren Darstellungsbe- reich des HUD.

Aufgrund dieser Erkenntnisse muss die ursprüngliche Größe des verfügbaren Darstel- lungsbereichs des HUD von  $20^\circ$  mal  $5^\circ$  weiterhin als feste Anforderung an mögliche pro- typische Umsetzungen bestehen bleiben.

### 7.2.3. Prototypaufbau für Versuche in der Fahrsimulation

Neben der Erprobung der kontaktanalogen Anzeigen im Straßenverkehr mit realen Ver- suchsfahrzeugen bietet die Fahrsimulation eine gute Möglichkeit, einzelne Fragestellun- gen zu beleuchten und eine entsprechende Absicherung der Funktionen zu erreichen. Um in der Fahrsimulation einen möglichst realistischen Eindruck der Anzeigen zu bekom- men, wurde das kontaktanaloge Head-up-Display simuliert. Die Anforderungen hierfür sind ein sehr helles, kontrastreiches virtuelles Bild in der gleichen Entfernung wie die Leinwand. Für die Anwendung im Simulator ist es wichtig, dass die Bildentfernung des HUD nicht größer ist als die Projektionsentfernung der simulierten Fahrzeugumgebung, da der Fahrer die Bilder sonst nicht gleichzeitig fokussieren kann und die Anzeigen so nicht mit der Simulation verschmelzen würden. Darüber hinaus haben einfache Versuche mit erzeugten virtuellen Bildern, deren Projektionsentfernung verändert wurde, im Vor- feld gezeigt, dass zu große Unterschiede zwischen Bild- und Leinwandentfernung beim Betrachter zu Augen- und Kopfschmerzen sowie vermehrt zu Übelkeit führen können.

**Aufbau mit Sitzkiste, Plasmamonitor und Kombiner-Scheibe:** Der Aufbau erfolgte mit einer Kombiner-Scheibe, einem teiltransparenten Spiegel und einem 50" Plasmamonitor, wie in Abbildung 7.16 dargestellt. Mit Hilfe der Kombiner-Scheibe auf der Motorhaube der Sitzkiste wurde das dargestellte Bild des Monitors auf dem Dach der Sitzkiste auf die Leinwand der Fahrsimulation gespiegelt.

Der Monitor erscheint so als Spiegelbild auf der Leinwand. Die exakte Überlagerung des Monitorbildes mit der Simulation erfolgt über den Winkel der Kombiner-Scheibe und des Monitors sowie die exakte Positionierung der Elemente im angezeigten Bild. Um die benötigte Helligkeit des Spiegelbildes zu erreichen, wurde eine Scheibe mit 30 % Verspie- gelung gewählt. Diese erzeugt zugleich ein helles Bild des HUDs bei nur leichter Verdun- kelung des projizierten Simulatorbildes.

Durch diesen Aufbau konnte ein HUD mit ca.  $5^\circ$  vertikalem und ca.  $20^\circ$  horizontalem Öffnungswinkel problemlos dargestellt werden.

**Kopplung zwischen Fahrsimulation und CORONA:** Für die Erzeugung der Anzeigen wurde die in Kapitel 4 beschriebene Guiding-Konfiguration von CORONA verwendet. Dazu wurde eine Schnittstelle auf Basis des TCP/IP-Protokolls implementiert, mit deren Hilfe das System der Fahrsimulation mit CORONA gekoppelt werden kann.



Abbildung 7.16.: Versuchsaufbau im statischen Fahrsimulator mit Sitzkiste

Abbildung 7.17 stellt die Kopplung zwischen CORONA und der Fahrsimulation schematisch dar. Die Umgebung des Fahrsimulators besteht aus den beiden Teilen Simulation und Grafik. Die Grafik-Komponente erzeugt mittels verschiedener virtueller Kameras mehrere hochauflösende Bilder der Fahrzeugumgebung. Diese Bilder werden via verschiedener DVI-Kanäle an die einzelnen Projektoren im Simulator verteilt und anschließend auf die Leinwände projiziert.

Neben der Grafik benötigt die Fahrsimulation noch die Simulations-Komponente. In dieser werden unter anderem die Physik, die Umgebung sowie der Fremdverkehr berechnet. Für die Kopplung berechnet die Simulation ebenfalls virtuelle Fahrzeugsensoren, wie beispielsweise ein GPS-Signal oder die Fahrstreifenenerkennung des kamerabasierten Fahrerassistenzsystems (KAFAS). Diese Sensoren werden über eine dafür definierte TCP/IP-Schnittstelle an die CORONA-Umgebung übertragen.

In CORONA nimmt eine Komponente diese TCP/IP-Schnittstelle entgegen und bietet auf Basis der Signale aus der Simulation entsprechende Sensordienste an. Dank dieser Komponente können die weiteren CORONA-Komponenten auf die gleiche Art und Weise betrieben werden, ohne zwischen dem Betrieb in der Simulation oder dem Fahrzeug unterscheiden zu müssen. Lediglich die Karte muss noch angepasst werden, damit diese zur Simulation passt. Anschließend werden die empfangenen Fahrzeugsignale auf diese Karte abgebildet und es erfolgt der Abgleich mit der Route. Basierend auf der Entfernung zum nächsten Manöver werden entsprechende Anzeigen generiert und mittels VGA auf den Plasmabildschirm übertragen.

Mit Hilfe von CORONA werden sowohl kontaktanaloge als auch klassische Navigationsanzeigen erzeugt. Diese Anzeigen werden mit Hilfe des oben beschriebenen HUD-

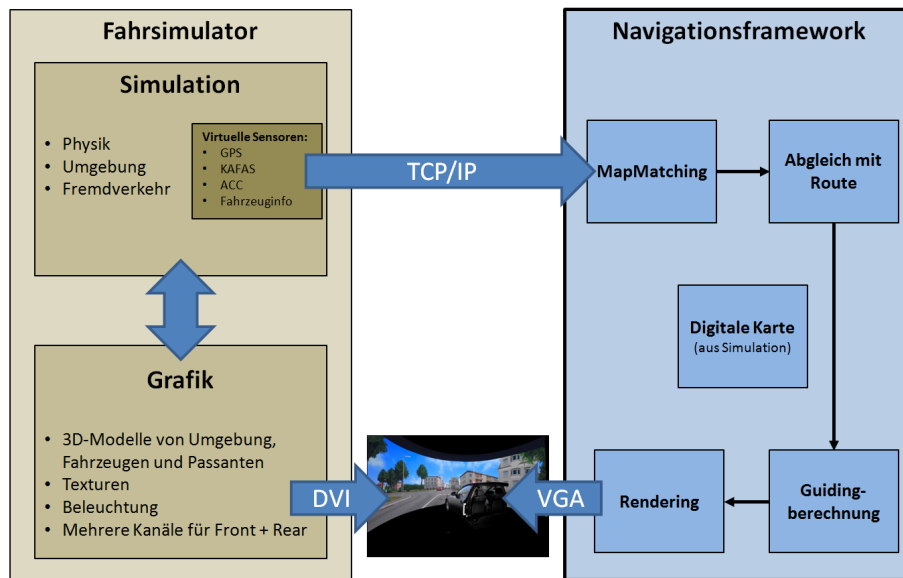


Abbildung 7.17.: Darstellung der Kopplung von Fahrsimulation und CORONA

Aufbaus im Fahr Simulator zur Anzeige gebracht und können dadurch von Probanden erlebt und anschließend bewertet werden.

#### 7.2.4. Aufbau des Versuchsträgers für Versuche auf der Straße

Neben der Bewertung im Fahr Simulator sollen die Anzeigen auch im Realfahrzeug erprobt werden können. Jedoch stellt die Erprobung von kontaktanalogen Anzeigen im Realfahrzeug eine große Herausforderung an die Entwickler sowie die verwendete Technologie dar. Jedoch können diese Erprobungen auch wertvolle und wichtige Erkenntnisse für die nachfolgenden Entwicklungsphasen liefern. Zu diesem Zweck wurde ein spezielles Versuchsfahrzeug aufgebaut.

**Versuchsfahrzeug mit stehendem virtuellen Bild:** Für das Versuchsfahrzeug wurde gemeinsam mit der Firma Johnson Controls (JCI) ein HUD-Prototyp entwickelt, welcher ein stehendes virtuelles Bild in 16m Entfernung erzeugt. Wie bereits im Kapitel 2.3.2 beschrieben, wird diese große Entfernung zum virtuellen Bild benötigt, um beim Betrachter den Eindruck der Kontaktanalogie zu erzeugen. Für den Versuchsträger wurde die Variante stehendes virtuelles Bild gewählt, da bei einem liegenden virtuellen Bild die Darstellung von Text sowie zweidimensionalen Abbildungen, wie zum Beispiel eine Kartendarstellung, aufgrund der unterschiedlichen Fokuspunkte zu unangenehmen Nebenwirkungen beim Betrachter führen können.

**Anforderungen an Prototypen-HUD:** Wie bereits beschrieben, muss das verfügbare Blickfeld für Darstellungen aufgrund der Anforderung, Anzeigen entlang des aktuell befahrenen Fahrstreifens sowie der beiden benachbarten Fahrstreifen abbilden zu können, sehr

groß werden. Neben der großen Entfernung zum virtuellen Bild ist dies die Hauptanforderung an das Prototypen-HUD. Das realisierte HUD erfüllt diese Anforderung mit einem darstellbaren Blickfeld von  $18,5^\circ$  in der horizontalen und  $4,7^\circ$  in der vertikalen Richtung. Durch den gewählten Lockdown-Winkel von  $1,5^\circ$  können Informationen entlang des eigenen sowie der beiden benachbarten Fahrstreifen in einem Bereich von 10 m bis 150 m vor dem Fahrzeug dargestellt werden.

Die Anzahl der dargestellten Pixel pro Grad Blickwinkel liegt oberhalb der Auflösungs-möglichkeit des menschlichen Auges und stellt somit keine Begrenzung dar. Da die Versuchsfahrten mit dem Fahrzeug fast ausschließlich tagsüber stattfinden, muss die erreichbare Helligkeit des Displays ebenfalls sehr hoch sein. Mit einer maximalen Helligkeit von  $15,000 \text{ cd/m}^2$  beim Betrachter ist das Display ausreichend hell für Versuchsfahrten am Tag bei direkter Sonneneinstrahlung.

**Integration des HUD-Prototyps:** Um all diese Anforderungen zu erfüllen, wurde das HUD für das Versuchsfahrzeug sehr groß und stellt damit enorme Anforderungen an den verfügbaren Bauraum im Versuchsträger. Aus diesem Grund und der deutlich steileren Einbaulage der Frontscheibe wurde ein BMW X3 (BMW-interne Modellbezeichnung BMW F25) als Versuchsträger gewählt. In diesem Fahrzeug konnte das HUD der Firma JCI mit einigen Modifizierungen im Bereich der Instrumententafel auf Fahrerseite verbaut werden.

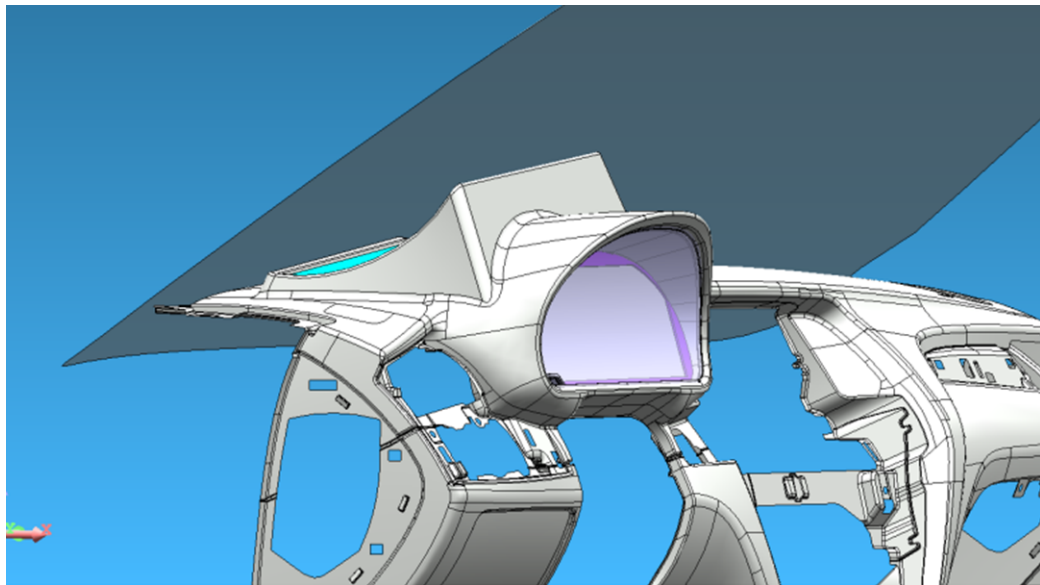


Abbildung 7.18.: Konstruktionsskizze zeigt Integration des HUD-Prototyps

Abbildung 7.18 zeigt eine erste Konstruktionsskizze des HUD-Prototyps. Um den notwendigen Halt des HUD zu gewährleisten, wurde eine spezielle Trägerkonstruktion am vorderen Querträger angebracht. Das bestehende HUD sowie die Lüftungskanäle auf Fahrerseite mussten entfernt werden. Die Elektronik des Kombi-Instruments wurde in das Handschuhfach verlegt und das Designfrontend durch ein flaches Display ersetzt. Ein Teil der Abdeckung der Instrumententafel musste entfernt und durch eine speziell angefertigte

neue Abdeckung ersetzt werden. Der fertige Versuchsträger ist durch diese Veränderungen deutlich als Versuchsträger zu erkennen. Aufgrund der guten Integration und der speziell angepassten Abdeckung stört das prototypische HUD den Fahrer nicht bei seiner Fahraufgabe, und nach kurzer Eingewöhnung werden die durchgeführten Veränderungen nicht mehr negativ wahrgenommen.



Abbildung 7.19.: Blick in den Fahrerraum des Versuchsträger *PaCo*

Abbildung 7.19 zeigt ein Blick in den *PaCo* getauften Versuchsträger. Der Name ist abgeleitet vom Projektname Panorama Cockpit. Hinter dem Lenkrad sind zum einen das getauschte Display für die Anzeigen im Kombi als auch das kontaktanaloge HUD zu sehen. Die Temperaturanzeige im linken Lüftungskanal wird verwendet, um die Temperatur im HUD-Bereich während des Betriebs überwachen zu können. Links neben dem Innenspiegel ist der Helligkeitssensor für die Ansteuerung der Lichtquelle verbaut. Die Lichtquelle wird auf die äußeren Lichtverhältnisse angepasst, um ein gut erkennbares Bild zu erzeugen. Hinter dem Schalthebel in der Mittelkonsole befinden sich sowohl die Knöpfe zum Umschalten der Anzeigen als auch der verbaute Notaus.

Der Blick des Fahrers auf die Anzeigefläche des HUD-Prototyps ist in Abbildung 7.20 dargestellt. Die Verzeichnung des dargestellten Testbildes wird für die Versuche durch entsprechende Module im CORONA-Framework ausgeglichen. Die Darstellung verdeutlicht sehr gut die Leuchtfähigkeit des Prototyps. Bei maximaler Beleuchtung können Objekte hinter dem virtuellen Bild nur noch schwer erkannt werden. Aus diesem Grund erhielt jeder Fahrer eine spezielle Einweisung in den Versuchsträger.

**Integration der CORONA-Plattform:** Neben der Displaytechnologie müssen auch die dargestellten Anzeigen korrekt sein. Die Pose der virtuellen Objekte muss stets mit der

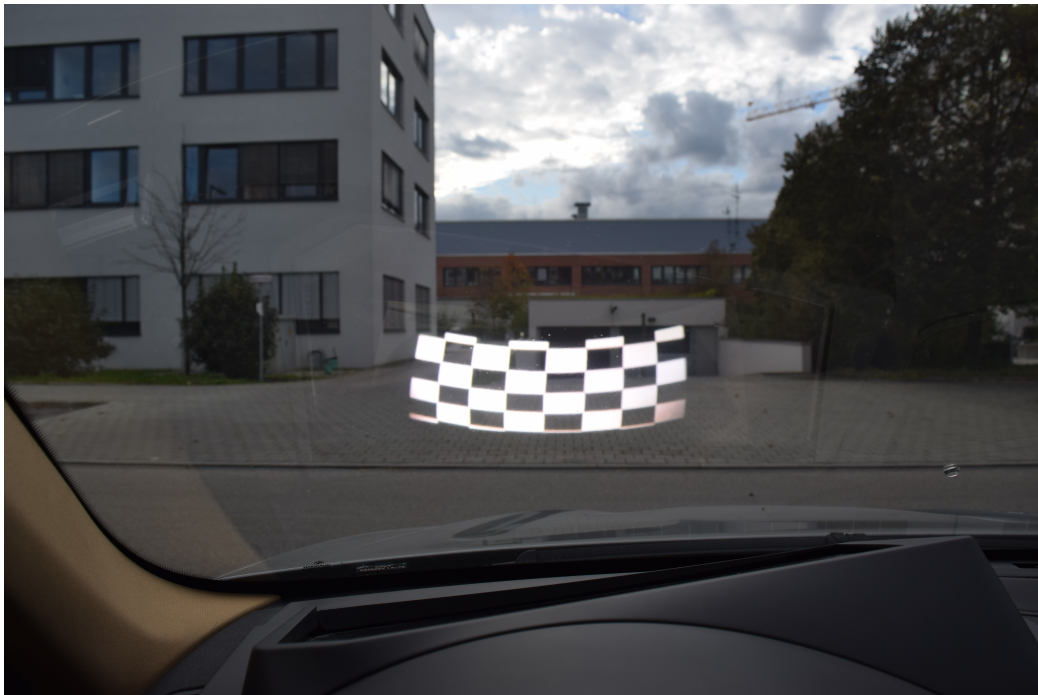


Abbildung 7.20.: Blick durch das HUD im Versuchsträger *PaCo*

Realität übereinstimmen. Denn sobald die Einblendungen nicht zur Realität passen, kann der informative Mehrwert sehr schnell zu einer Ablenkung für den Fahrer werden. Deswegen wird ein genaues und stets aktualisiertes Umgebungsmodell mit möglichst geringen Latenzzeiten benötigt. Im verwendeten Versuchsträger wird das Umgebungsmodell auf Basis von Odometriewerten des Fahrzeuges, Daten aus der digitalen Navigationskarte sowie Informationen aus einer Frontkamera erzeugt. Für die Realisierung wird das im dritten Kapitel beschriebene Softwareframework CORONA verwendet.

Die notwendige Hardware für die Integration wird im Kofferraum des Versuchsträger verbaut. Abbildung 7.21 zeigt einen Blick in den Kofferraum des Versuchsträgers. Die Plattform für die einzelnen Komponenten wird fest mit dem Fahrzeug verschraubt. Auf dieser Plattform befinden sich eine Autobox für die Berechnung des Nickwinkelausgleiches, zwei Fahrzeug-PCs für die Ansteuerung der Anzeigen des Kombi-Instrumentes und der Anzeigen im HUD und CID, Anschlußmöglichkeiten an die verschiedenen Fahrzeugnetzwerke, die sogenannten CANs, ein GPS-Empfänger sowie Infrastrukturkomponenten wie Stromverteiler, Displaykonverter, LAN-Switch und WLAN-Router. Über die CANs können die PCs die Serien-Signale des Fahrzeuges empfangen und verarbeiten.

CORONA läuft dabei auf dem PC, welcher mit dem CID und dem HUD-Prototyp verbunden ist, da in CORONA die entsprechenden Anzeigen erzeugt werden. Die Anzeigen für das Kombi-Instrument werden auf dem anderen PC mit Hilfe des SOLID/Unity Frameworks der Firma Usaneers GmbH erzeugt.





Abbildung 7.21.: Blick auf die CORONA-Plattform im Kofferraum des „PaCo“.

### 7.2.5. Interaktive Generierung der AR-Navigationsanzeigen

Für die Erzeugung der AR-Navigationsanzeigen werden die zum Teil bereits in Kapitel 4 beschriebenen CORONA Dienste für die Manövergenerierung, die Auswertung des kamerabasierten Fahrerassistenzsystems sowie die Abfrage der Fahrzeugodometrie verwendet. Die Aufbereitung der Information erfolgt im *DataHolder*, während die Anzeigen im *Guiding-Renderer* erzeugt werden. Nachfolgend wird der in Abbildung 7.22 dargestellte Ablauf zur Erstellung der kontaktanalogen Anzeigen beschrieben.

**Auswertung der Manöverinformation:** Der *DataHolder* registriert sich als Abnehmer beim *ManeuverNotifier* und erhält daraufhin bei jeder Aktualisierung der Fahrzeugposition eine überarbeitete Liste mit *ManeuverEvents*. Jedes dieser Events beschreibt ein Manöver entlang der Route. Die gesamte Navigation findet dabei im globalen GPS Koordinatensystem statt, daher muss die Position des Manöverortes extrahiert und in ein lokales Fahrzeugkoordinatensystem transformiert werden. Dies geschieht mittels einfacher Mercatorprojektion (siehe Abschnitt 2.2.3). Aus dem Fahrstreifenwechselhinweis werden neben Entfernung und Dringlichkeit noch die Richtung und Anzahl extrahiert. Diese Werte müssen nicht weiter aufbereitet werden, da sie direkt vom *Guiding-Renderer* verarbeitet werden können.

**Auswertung der Fahrstreifenerkennung:** Die Signale des kamerabasierten Fahrerassistenzsystems werden verwendet, um den aktuell befahrenen Fahrstreifen zu ermitteln (siehe Abschnitt 2.2.2). Diese Signale enthalten ebenfalls eine Beschreibung der erkannten Fahrstreifenmarkierung zur linken und rechten Seite. Diese Beschreibung liegt in Form

## 7. Kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen

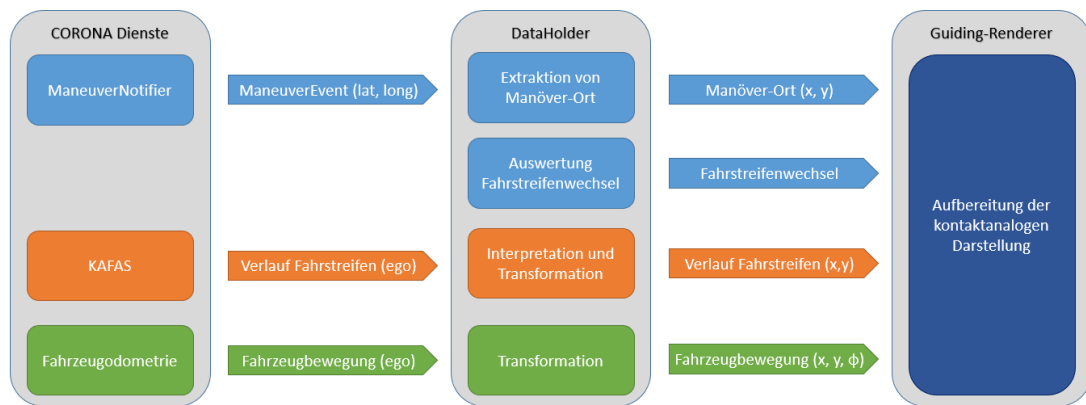


Abbildung 7.22.: Überblick über den allgemeinen Ablauf zu Erstellung kontaktanaloger Navigationsanzeigen in CORONA

von Querablage, Richtung und Krümmung vor. Aus diesen Werten wird im *DataHolder* eine entsprechende Kurve erzeugt und diese anschließend in Fahrtrichtung abgetastet. Die so erzeugten Punktpaare beschreiben den Verlauf der jeweiligen Fahrstreifenmarkierung in  $x,y$  - Koordinaten im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem.

**Positionierung der Objekte auf Basis der Fahrzeugbahnkurve:** Die korrekte Positionierung der erzeugten Objekte im virtuellen Raum relativ zur eigenen Fahrzeugbewegung ist Grundvoraussetzung für eine gute Wahrnehmung der kontaktanalogen Darstellung. Der *DataHolder* verwendet ein Einspurmodell mit konstanter Drehrate und Beschleunigung (siehe CTRA in Abschnitt 2.2.2). Dabei liest der *DataHolder* die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  in m/s, die Querschleunigung  $a$  in  $\text{m/s}^2$  und die Gierrate  $\gamma$  in  $^\circ/\text{s}$  mit einer Zykluszeit von 20 ms ein und verarbeitet diese anschließend.

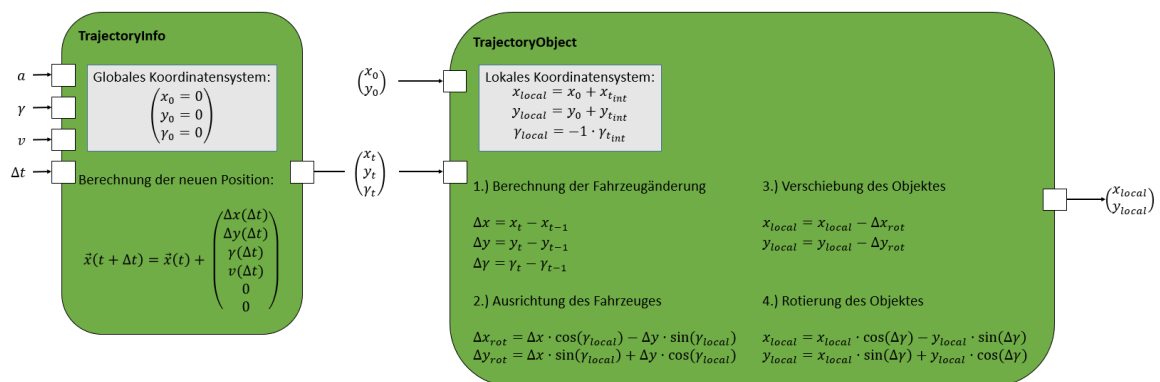


Abbildung 7.23.: Implementierung des Einspurmodells und der Positionierung kontaktanaloger Objekte relativ zur Fahrzeugbewegung

Dazu verwendet der *DataHolder* die zwei Klassen *TrajectoryInfo* und *TrajectoryObject*, deren Implementierung und Zusammenspiel in Abbildung 7.23 dargestellt sind. Die Klas-

se *TrajectoryInfo* kapselt die Implementierung des Einspurmodells. Dabei finden alle Berechnungen in einem globalen Koordinatensystem statt, dessen Ursprung zu Beginn der Laufzeit auf die aktuelle Fahrzeugpose gesetzt wird. Auf Basis der zyklisch abgefragten Eigenbewegungsdaten des Fahrzeuges wird kontinuierlich die zurückgelegte Bahnkurve des Fahrzeuges berechnet und bereitgestellt.

Mit Hilfe der Klasse *TrajectoryObject* können beliebig erzeugte Objekte vor dem Fahrzeug auf Basis der berechneten Bahnkurve korrekt im virtuellen Raum platziert werden. Dabei wird für jedes Objekt ein eigenes lokales Koordinatensystem erzeugt. Dieses wird durch die Initialposition  $(x_0, y_0)$  des Objektes relativ zum Fahrzeug sowie den zum Initialisierungszeitpunkt  $t_{init}$  gültigen Bahnkurvenpunkt  $(x_{init}, y_{init})$  und den zugehörigen Gierwinkel  $(\gamma_{init})$  definiert.

Bei jeder Fahrzeugbewegung und der damit verbundenen Änderung der Bahnkurve müssen auf die so erzeugten Objekte die folgenden vier Operationen ausgeführt werden:

- Berechnung der Positions- und Winkeländerung zum letzten Bahnkurvenpunkt
- Ausrichtung des ermittelten Positionsänderungsvektors auf neuen Fahrzeugwinkel
- Verschiebung der lokalen Position des Objektes um ausgerichteten Änderungsvektor
- Ausrichtung der verschobenen lokalen Position nach neuem Fahrzeugwinkel

**Verarbeitung im Guiding-Renderer:** Der *Guiding-Renderer* fragt zu Beginn jedes Taktes alle anliegenden Schnittstellen nach neuen Werten für die entsprechenden Signale. Zu diesem Zeitpunkt hat der *Guiding-Renderer* alle benötigten Informationen über die zukünftigen Navigationshinweise, den Straßenverlauf vor dem Fahrzeug sowie die Fahrzeugbewegung. Je nach gewünschter Anzeige werden diese Informationen dann verarbeitet. Auf Basis der Manöverinformation kann bereits ein einfacher Navigationshinweis in Textform erzeugt werden. Für den kontaktanalogen Fahrstreifenwechselhinweis werden zusätzlich noch die Informationen der Fahrstreifenerkennung benötigt. Und für die Darstellung des kontaktanalogen Abbiegehinweises bedarf es zusätzlich der Informationen über die Bewegung des Fahrzeuges.

## 7.3. Versuch im Fahrsimulator: Potentialanalyse

Mit Hilfe einer Probandenstudie soll in der kontrollierten Umgebung des Fahrsimulators das Potential der kontaktanalogen Darstellung von Navigationshinweisen gegenüber der klassischen Form der Darstellung ermittelt werden.

Die Teile der hier beschriebenen Studie wurden bereits 2012 auf der 5. VDI Fachtagung *Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik* vorgestellt [64].

### 7.3.1. Versuchsbeschreibung und -aufbau

Für diese Probandenstudie wird der bereits in Abschnitt 7.2.3 beschriebene Aufbau im statischen Fahrsimulator der BMW Group verwendet. Nachfolgend werden der allgemeine Ablauf der Studie sowie die beiden getesteten Darstellungsvarianten beschrieben.

**Versuchsablauf:** Jeder Proband erhielt nach der Begrüßung eine kurze Einweisung in den Fahrsimulator und konnte sich mit Hilfe einer kurzen Einföhrungsfahrt an den Fahrsimulator gewöhnen. Diese Fahrt fand im gleichen Großstadtszenario statt, welches später auch für die Versuchsfahrten verwendet wurde. Jedoch wurden die Anzeigen im HUD für diese Fahrt deaktiviert.

Nachdem sich der Proband an den Fahrsimulator gewöhnt hatte, wurde das HUD aktiviert und der eigentliche Versuch gestartet. Die Probanden hatten die Aufgabe, in vier kurzen Testfahrten den im Vorfeld nicht erklärten Navigationsanzeigen zu folgen. Nach jeder dieser kurzen Testfahrten mit steigender Komplexität wurden die jeweiligen Anzeigen mit Hilfe eines Fragebogens durch die Probanden bewertet.

Im Anschluss an die Testfahrten wurden die Probanden zu den gesehene Anzeigen befragt. Sie wurden gebeten, eine gekürzte Version des AttrakDiff-Fragebogens [52] auszufüllen, mit ihren eigenen Worten das Gesehene zu beschreiben sowie positiv als auch negativ aufgefallene Beobachtungen zu nennen. Nach dieser Befragung wurde der Versuch mit vertauschtem Anzeigekonzept wiederholt (*within subjects design*). Dabei wurde in jedem Versuchsdurchlauf die Reihenfolge der benutzten Anzeigekonzepte permutiert. Am Ende der zweiten Befragung wurden die Probanden nach ihrem präferierten Konzept für die abschließende Testfahrt befragt.

Unabhängig von der Antwort erlebte jeder Proband die kontaktanalogen Anzeigen. Diese abschließende freie Testfahrt wurde genutzt, um weitere Erkenntnisse über das verwendete Anzeigekonzept für die kontaktanaloge Navigationsdarstellung zu gewinnen. Dazu wurden die Probanden ermutigt, laut zu denken. Zusätzlich wurde gezielt die Meinung der Probanden hinsichtlich der einzelnen Elemente abgefragt.



Abbildung 7.24.: Elemente der *klassischen* Variante: Piktogramm, Fahrstreifenführung, abstrakte Kartendarstellung

**Darstellungsvarianten:** Im Versuch wurden zwei verschiedene Konzepte zur Darstellung von Navigationshinweisen verwendet. Die Variante *klassisch* entspricht aktuellen Navigationsanzeigen in Serienfahrzeugen (siehe Kapitel 2.2.6) und besteht aus drei Elementen, die je nach Entfernung zum jeweiligen Manöver aktiv werden:

- einer abstrakten Manöverdarstellung als Piktogramm mit Angabe der Entfernung zum Manöver (siehe Abbildung 7.24 links)
- einer statischen Fahrstreifenempfehlung (siehe Abbildung 7.24 Mitte)
- sowie einer abstrakten Kartendarstellung des Manövers (siehe Abbildung 7.24 rechts)

Im Versuch diente diese Variante als Referenzkonzept. Jedoch wurden die Probanden darüber nicht informiert.



Abbildung 7.25.: Elemente der *visionären* Variante: abstrakte Manöverdarstellung, Fahrstreifenführung, kontaktanaloger Manöverimpuls

Die *visionäre* Variante entspricht dem bereits beschriebenen Anzeigekonzept für die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen. Dabei stellt die Kontaktanalogie den grundlegenden Unterschied der beiden Varianten dar. Im Wesentlichen bestehen die Anzeigen aus den folgenden drei Grundelementen:

- abstrakte Darstellung des Manövers als Piktogramm mit Entfernungsangabe als Vorausschauinformation (siehe Abbildung 7.25 links)
- Fahrstreifenführung, jedoch im Gegensatz zur *klassischen* Variante aktiv und kontaktanalog auf der Straße dargestellt (siehe Abbildung 7.25 Mitte)
- kontaktanaloger Manöverimpuls, welcher den Ort und die Richtung des jeweiligen Manövers verdeutlicht (siehe Abbildung 7.25 rechts).

#### 7.3.2. Auswertung

Am Versuch nahmen 27 Probanden (22 Männer, 5 Frauen) teil. Das Durchschnittsalter der Probanden lag bei 34 Jahren ( $\sigma = 9,7$ ). In den Abbildungen 7.26 bis 7.31 sind die Ergebnisse aufgeteilt nach Gesamtversuch und entsprechend der Reihenfolge der erlebten Darstellungsvarianten präsentiert. Dadurch können Rückschlüsse auf die Bewertung mit und ohne Vergleichsmöglichkeit der Probanden gezogen werden.

Die *klassische* Variante wurde von den Probanden positiv bewertet. Dies war zu erwarten, da diese Darstellungsvariante von bereits etablierten Konzepten abgeleitet ist. Sie stellt somit eine faire Referenzvariante dar.

Die *visionäre* Variante wurde durchweg etwas positiver bewertet. Im Gegensatz zur *klassischen* Variante wurde die *visionäre* Variante unabhängig von der Reihenfolge der gesehenen Anzeigen positiv bewertet. Die *klassische* Variante wurde schlechter bewertet, wenn die Probanden zuerst die *visionäre* Variante gesehen und somit einen Vergleich hatten.

**Vorbereitung auf Abbiegemanöver:** Mit der ersten Frage sollten die Probanden beurteilen, wie gut sie durch die Navigationsanzeigen auf das bevorstehende Manöver vorbereitet wurden.

In Abbildung 7.26 sind die Ergebnisse in Box-Plot-Diagrammen aufbereitet. Der grüne Punkt stellt den arithmetischen Mittelwert dar. Die dunkel- und hellgrauen Balken zeigen die Verteilung der Antworten innerhalb des 25 %-, 50 %- und 75 %-Perzentils an.

Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Probanden durch die *visionäre* Variante besser auf das bevorstehende Manöver vorbereitet gefühlt haben als durch die *klassische* Variante.

## 7. Kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen

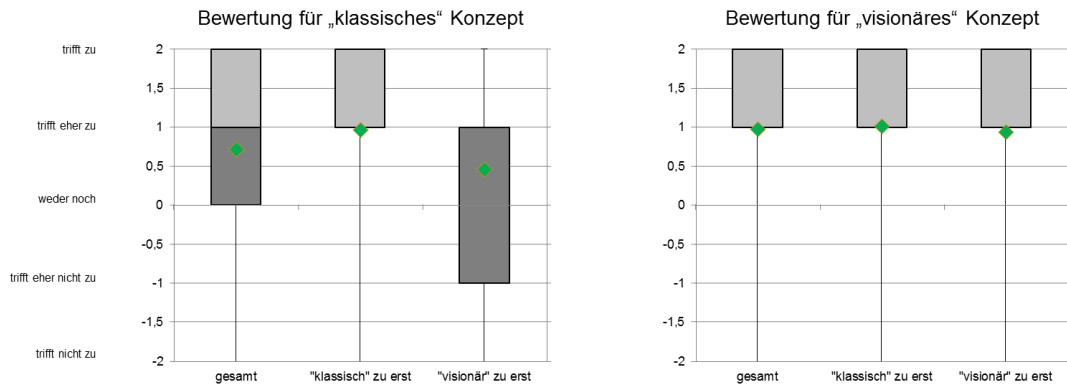


Abbildung 7.26.: Auswertung: Die Anzeigen haben optimal auf das Manöver vorbereitet

Die *klassische* Variante bereitete ebenfalls gut auf das Manöver vor, jedoch zeigte diese Variante eine deutliche Schwäche, wenn die Probanden zuvor die *visionäre* Variante gesehen hatten.

**Vorbereitung auf Fahrstreifenwechsel:** Als Nächstes wurden die Probanden zur Vorbereitung auf notwendige Fahrstreifenwechsel befragt. In Abbildung 7.27 ist zu erkennen, dass sowohl die *klassische* als auch die *visionäre* Variante eine relativ gute Vorbereitung bieten. Hier zeigt sich, dass die Probanden vor allem den aktiven Charakter des Fahrstreifenwechselhinweises nützlich finden.



Abbildung 7.27.: Auswertung: Die Anzeigen haben optimal auf Fahrstreifenwechsel vorbereitet

Jedoch zeigt sich auch hier erneut, dass die Probanden im direkten Vergleich die *visionäre* Variante bevorzugen. Allerdings liegt der Mittelwert der Beurteilung für die *visionäre* Variante deutlich unter den Erwartungen. Vor der Versuchsdurchführung wurde angenommen, dass vor allem die kontaktanaloge Markierung des optimalen Fahrstreifens einen deutlich Mehrwert darstellt.

**Unterstützung beim Abbiegevorgang:** Während die erste Frage die Vorbereitung auf das bevorstehende Manöver abgeprüft hat, wurde mit der dritten Fragen die Unterstützung während des eigentlichen Abbiegevorgangs erfragt.

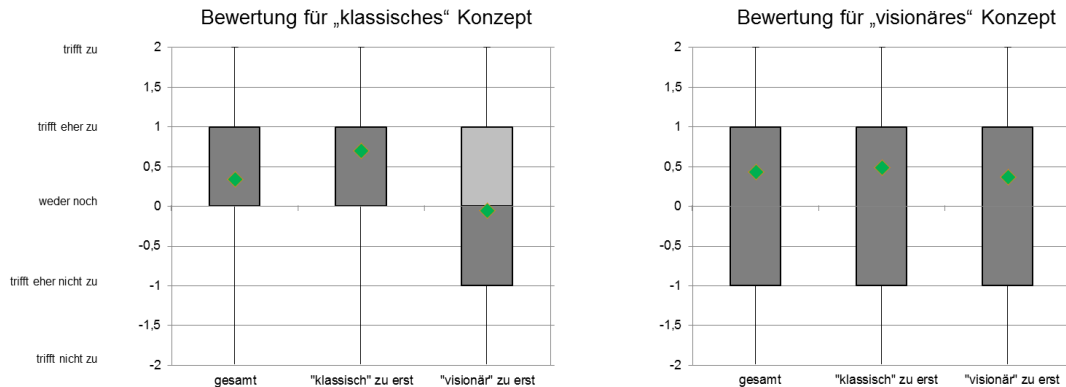


Abbildung 7.28.: Auswertung: Die Anzeigen haben optimal beim Abbiegevorgang unterstützt

Anhand der Auswertung (siehe Abbildung 7.28) zeigt sich, dass beide Varianten die Probanden beim Abbiegevorgang teilweise unterstützt haben. Allerdings wurden nur die wenigsten Probanden optimal unterstützt.

Bei dieser Frage fällt vor allem die teilweise negative Bewertung der *visionären* Variante auf. Die Ursache dafür könnte der verfrühte beziehungsweise nicht deutliche Abbau der Kontaktanalogie sein. Die meisten Probanden haben sich einen befahrbaren Manöverimpuls gewünscht (siehe subjektive Auswertung der Probanden) und hatten teilweise innerhalb der Kreuzung das Gefühl, die Navigationsanzeigen würden fehlen.

**Bezug der Anzeigen zur Umwelt:** Die beiden letzten Fragen haben den Zusammenhang der Anzeigen mit der Umwelt abgefragt. Zum einen wurde überprüft, wie leicht die Probanden die gesehenen Navigationsanzeigen in die Umwelt übertragen konnten, und zum anderen wurden die Probanden zum Grad der Übereinstimmung der dargestellten Anzeigen mit der Umwelt befragt.

Wie in Abbildung 7.29 zu sehen ist, konnten die kontaktanalogen Anzeigen deutlich leichter in die Umwelt übertragen werden. Hier zeigt sich der große Vorteil der Kontaktanalogie: Die Anzeigen erscheinen genau dort, wo die Information liegt.

Jedoch konnten die abstrakten Darstellungen der *klassischen* Variante ebenfalls gut in die Umwelt übertragen werden. Aber vor allem im direkten Vergleich zeigt sich, dass die *klassische* Variante deutlich schlechter bewertet wird als die *visionäre* Variante.

In Abbildung 7.30 zeigen sich leichte Schwächen der Kontaktanalogie. Die Probanden konnten die Anzeigen leicht in die Umwelt übertragen, empfanden aber teilweise keine gute Übereinstimmung der Anzeigen mit der Umwelt. Hier werden später vor allem kleine Fehler in der Darstellung und fehlerhafte Anzeigen innerhalb des komplexen Kreuzungsbereichs als Ursache genannt.

Die *klassische* Variante verzeiht aufgrund der Abstraktionsebene in der Darstellung kleinere Ungenauigkeiten deutlich besser als die *visionäre* Variante.

## 7. Kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen

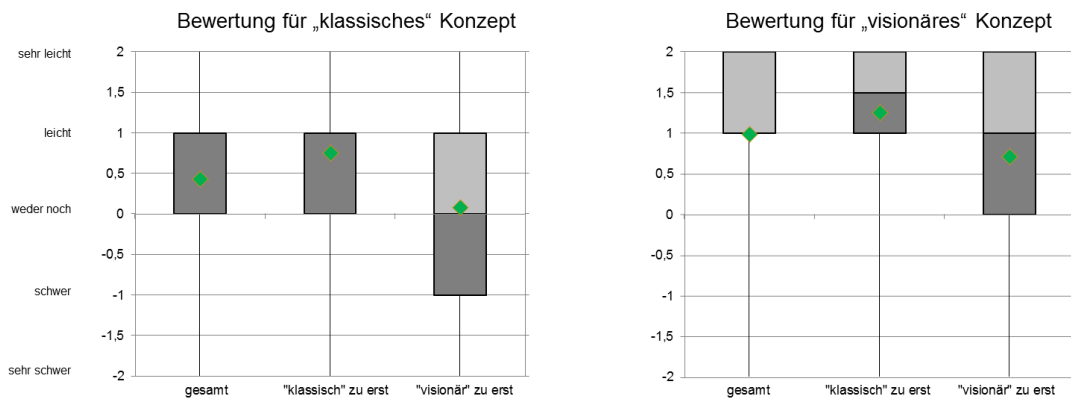


Abbildung 7.29.: Auswertung: Die Anzeigen konnten in die Umwelt übertragen werden

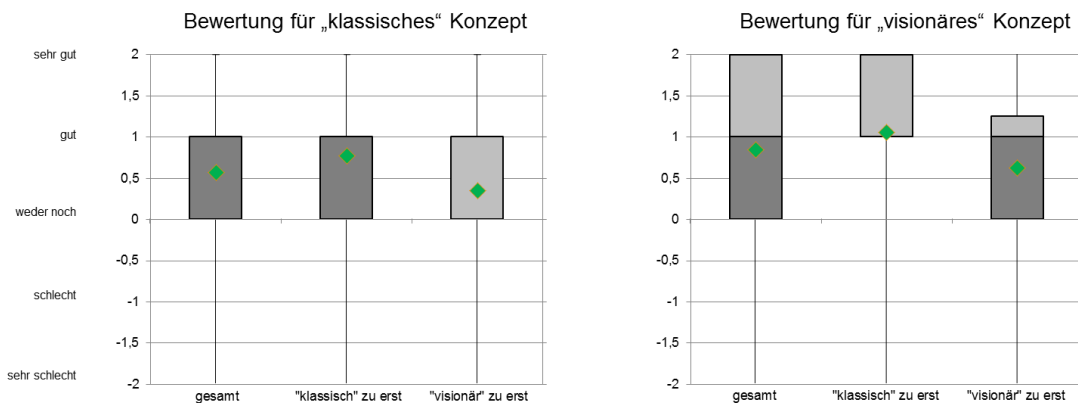


Abbildung 7.30.: Auswertung: Die Anzeigen stimmen mit der Umwelt überein

**Wunsche-Konzept für Abschlussfahrt:** Nach den beiden Testdurchläufen wurden die Probanden gefragt, welches der beiden Konzepte sie bei der Abschlussfahrt verwenden möchten. Ein Großteil der Probanden (21 von 27) wählten das *visionäre* Konzept. Nur drei Probanden haben sich die *klassische* Variante für die letzte Fahrt gewünscht. Weitere drei Probanden konnten sich nicht direkt entscheiden und haben ihre Wahl an Bedingungen geknüpft. In unbekanntem Gebieten, für den Versuch und aus Neuheitsgründen würden sie die *visionäre* Variante wählen, jedoch in bekannten Gebieten, im Realfahrzeug oder aus sachlicher Sicht würden sie sich für die *klassische* Variante entscheiden.

**Mini-AttrakDiff-Test:** Die in Abbildung 7.31 dargestellte Auswertung des Mini-AttrakDiff-Test zeigt, dass die Probanden der *visionären* Variante mehr pragmatische und hedonische Qualität zuordnen. Das *visionäre* Konzept weckt bei den Probanden mehr Begehrlichkeit und erzeugt ein besseres Fahrerlebnis.

Da die bisherige Auswertung einen starken Einfluss der Reihenfolge der Varianten aufweist, wurden die Ergebnisse des Mini-AttrakDiffs aufgeteilt - zum einen in die Bewertung der Probanden, die eine Vergleichsvariante zuvor gesehen hatten, und zum anderen in die Bewertung der Probanden, die keine Vergleichsvariante gesehen hatten.



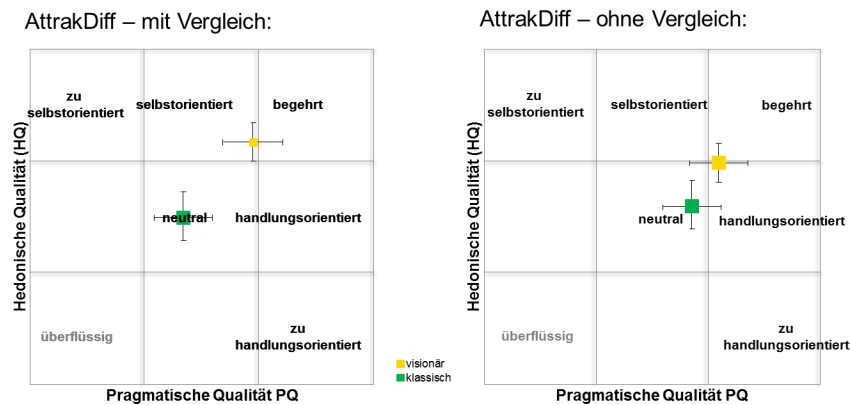


Abbildung 7.31.: Auswertung des Mini-AttrakDiff-Tests

Dabei zeigte sich, dass die *klassische* Variante in Bezug auf die hedonische Qualität nahezu konstant bleibt, jedoch die pragmatische Qualität deutlich abfällt, wenn die Probanden das *visionäre* Konzept zum Vergleich gesehen hatten.

Die Bewertung der *visionären* Variante verändert sich deutlich weniger, jedoch in beiden Dimensionen. Dabei profitiert die hedonische Qualität von der Vergleichsmöglichkeit, jedoch zu Lasten der pragmatischen Qualität.

**Subjektive Bewertung der Probanden:** Das letzte Bewertungskriterium waren die Aussagen der Probanden über die jeweiligen Varianten. Ein Großteil (20 von 27) der Probanden hat die Markierung des optimalen Fahrstreifens auf der Fahrbahn gelobt. Das kontaktanaloge Prinzip der Darstellung ist ebenfalls oft (14 von 27) positiv aufgefallen.

Bei der Visualisierung des Manövers gehen die Aussagen auseinander. Zum Teil (8 von 27) wurde die Manövervisualisierung gelobt. Jedoch haben sich elf Probanden während des Abbiegevorgangs verlassen gefühlt. Sie wollten den Manöverimpuls länger sehen beziehungsweise sogar über die Kreuzung zu befahren.

Die Animationen zwischen den einzelnen Anzeigeelementen wurden (8 von 27) kritisiert, jedoch auch teilweise (5 von 27) gelobt. Die Anzeigen der *visionären* Variante wurden als *intuitiv* beschrieben, allerdings sahen einige Probanden die Gefahr, dass im Realfahrzeug die exakte Übereinstimmung fehlen oder es gar zu Systemausfällen kommen könnte.

**Fazit:** In dieser Studie konnte die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen dank des umgesetzten Softwareframeworks und des Prototypenaufbaus im Fahrsimulator zum ersten Mal interaktiv erlebt werden. Für die meisten Probanden stellte dies eine intensive und zugleich sehr interessante Erfahrung dar. Nach dem Versuch äußerten sich alle Probanden positiv über das Erlebnis.

Darüber hinaus hat die Studie eine der ersten Annahmen dieser Arbeit bestätigt: die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen kann nicht nur die Navigationsaufgabe erleichtern sie weckt bei den Probanden auch mehr Begehrlichkeit als die klassische Darstellungsvariante.

Zusätzlich ist aufgefallen, dass die kontaktanaloge Variante keine Fehler in der Darstellung verzeiht. Jeder Fehler führt direkt zu einer Verschlechterung des Kundenerlebnisses.

## 7.4. Versuch im Fahrsimulator: Fehlertoleranz

Nachdem der erste Versuch im Fahrsimulator ein frühes Indiz für den negativen Einfluss von systemspezifischen Fehlern auf das wahrgenommene Kundenerlebnis bezüglich der kontaktanalogen Darstellung von Navigationshinweisen gegeben hat, wurde in einem zweiten Versuch die spezifische Toleranz der Probanden hinsichtlich ausgewählter Fehlerquellen im Gesamtsystem analysiert.

Weiterhin sollten Erkenntnisse über den Einfluss der gewählten Darstellungsvariante auf die Fehlertoleranz der Probanden gesammelt werden. Daher wurden von den Probanden zwei verschiedene Konzepte zur Fahrstreifenmarkierung bewertet.

Mit Hilfe dieser Ergebnisse konnte im Anschluss die Anforderungen an die Einzelkomponenten des Gesamtsystems für ein bestmögliches Kundenerlebnis genauer formuliert werden. Vor allem die Anforderungen hinsichtlich der Erkennungsqualität der Fahrstreifenmarkierungen sowie der zulässigen Latenzen im Gesamtsystem waren zu diesem Zeitpunkt noch unklar. Daher wurden diese Punkte in diesem Versuch gezielt adressiert.

### 7.4.1. Versuchsbeschreibung und -aufbau

**Versuchsaufbau:** Für diesen Versuch wurde erneut der bereits beschriebene Aufbau im statischen Fahrsimulator verwendet. Da bei diesem Versuch jedoch die Toleranz der Probanden bezüglich ausgewählter Störeinflüsse im Gesamtsystem betrachtet werden sollte, wurde das Simulationsszenario geändert.

Aufgrund der Fragestellung mussten die Probanden mehrmals beschleunigen und abbremsen sowie zahlreiche Fahrstreifenwechsel absolvieren. Da diese Fahrmanöver eine starke Belastung für einen Großteil der Versuchsteilnehmer darstellen und verstärkt zur Simulatorkrankheit führen können, wurde das Großstadtszenario aus dem ersten Versuch gegen ein Autobahnszenario getauscht [39]. Durch diesen Wechsel wurden weitere unnötige Belastungen für die Probanden in Form von Abbiegesituationen vermieden.

**Darstellungsvarianten:** Ein wesentliches Grundelement im erarbeiteten Anzeigekonzept für kontaktanaloge Navigationshinweise ist die direkte Markierung des optimalen Fahrstreifens für den Fahrer. Jedoch wurde im ersten Versuch (siehe Abschnitt 7.3) häufig die Übereinstimmung der Anzeigen mit der Umwelt kritisiert. Daher werden in diesem Versuch zwei verschiedene Konzepte zur Markierung von Fahrstreifen bewertet:

- das Konzept *Fahrstreifen*: Nachzeichnung der real vorhandenen Fahrstreifenmarkierung durch virtuelle Markierungen (siehe Abbildung 7.32 links)
- das Konzept *Balken*: Markierung durch virtuellen Balken in der Mitte des Fahrstreifens (siehe Abbildung 7.32 rechts)

Durch die Trennung der virtuellen Anzeige von realen Markierungen soll es dem Probanden schwerer fallen, die Übereinstimmung der Anzeige mit der Umwelt zu bewerten. Dadurch sollen sie toleranter gegenüber Fehlern werden. Allerdings könnte die veränderte Metapher für die Fahrstreifenmarkierung zu Verwirrung und Abstrichen in der Wertigkeit der Anzeige führen.



Konzept: „Fahrstreifen“  
Markierung entlang der Fahrbahnmarkierung



Konzept: „Balken“  
Markierung in der Mitte des Fahrstreifens

Abbildung 7.32.: Darstellungsvarianten *Fahrstreifen* und *Balken*

**Versuchsablauf:** Wie bereits im ersten Versuch erhielten die Probanden nach der Begrüßung eine kurze Einweisung in den Fahrsimulator und konnten sich anschließend in einer zehn-minütigen Eingewöhnungsfahrt mit dem Fahrsimulator vertraut machen. Diese Eingewöhnungsfahrt fand im selben Autobahnzenario statt, welches auch später für die eigentliche Versuchsdurchführung verwendet wurde.

Nach dieser Einführungsfahrt wurden allgemeine Angaben zur Person mittels Fragebogen abgefragt, und anschließend wurden den Probanden die Thematik des Versuchs sowie die Hintergründe zur kontaktanalogen Darstellung erläutert. Da die Probanden während des Versuchs die erlebten Anzeigen nach den Kriterien Wertigkeit und Nützlichkeit bewerten sollten, wurden ihnen noch vor Beginn des Versuches diese Bewertungsdimensionen anhand eines Beispiels erläutert. Die Anzeigen sollten mit einem Restaurantbesuch verglichen werden: Gutes Essen und Sättigungsgefühl entsprechen der Nützlichkeit, und das Ambiente sowie die Darbietung der Speisen repräsentieren die Wertigkeit.

Anschließend wurden die eigentlichen Versuchsfahrten gestartet. Eine Hälfte der Probanden evaluierte das Konzept *Fahrstreifen*, und die andere Hälfte bewertete das Konzept *Balken* (*between subjects design*). Die Reihenfolge der dargestellten Fehlerbilder wurde zwischen den einzelnen Probanden permutiert, um Reihenfolgeneffekte ausschließen zu können. Jedoch erlebte jeder Proband jedes Fehlerbild. Dabei wurde die Anzeige mit dem jeweiligen Fehlerbild von den Probanden hinsichtlich ihrer Nützlichkeit und Wertigkeit mit Hilfe einer 7-stufigen Skala (*sehr wertig, wertig, eher wertig, gerade noch wertig, eher nicht wertig, nicht wertig* beziehungsweise *sehr nützlich, nützlich, eher nützlich, gerade noch nützlich, eher nicht nützlich, nicht nützlich*) bewertet.

Die folgenden drei Ursachen für eine fehlerhafte kontaktanaloge Darstellung der Anzeigen wurden bewertet:

- **Qualität der Fahrstreifenerkennung:** Einen wesentlichen Einfluss auf das Kundenerlebnis stellt die Qualität der Fahrstreifenerkennung dar. Für die korrekte Visualisierung (vor allem bei der Markierung von Fahrstreifen) muss das System die realen Fahrstreifenmarkierungen erkennen. Im Realfahrzeug können dafür verschiedene Frontraumüberwachungssysteme, wie beispielsweise Kamera oder LIDAR, verwenden

det werden. Allerdings funktionieren diese Systeme nicht in jeder Situation vollständig. Vor allem langsame Geschwindigkeiten, schlechte Fahrbahnmarkierungen und dichter Verkehr können diese Systeme negativ beeinträchtigen. Innerhalb der Fahrsimulation hingegen ist die genaue Lage der einzelnen Fahrstreifenmarkierungen bekannt. Daher wird eine fehlerhafte Erkennung durch eine variable Verschiebung der realen Markierung erzeugt. Die Probanden erleben dabei, wie in Abbildung 7.33 dargestellt, Verschiebungen von 0 % bis 20 %.

- Latenz im Nickwinkelausgleich: Systembedingt werden kontaktanaloge Anzeigen fahrzeugfest, das heißt relativ zum Fahrzeug, dargestellt. Dadurch ändert sich die Lage der virtuellen Anzeigefläche im Raum, wenn sich das Fahrzeug bewegt. Sehr deutlich wird diese Bewegung, wenn das Fahrzeug aufgrund von Brems- und Beschleunigungsvorgängen Nickbewegungen durchführt. Bei diesen Nickbewegungen verschiebt sich das dargestellte Bild für den Betrachter relativ zum Horizont. Um den Eindruck der Kontaktanalogie aufrecht zu erhalten, muss das Gesamtsystem diese Nickbewegungen erkennen und in der Anzeige entsprechend kompensieren. Allerdings ist dieser Prozess aufgrund von Trägheit im Sensor, Signallaufzeiten sowie Berechnungszeiten im Algorithmus latenzbehaftet. Für den Versuch werden diese Latenzzeiten künstlich um 0 ms bis 210 ms vergrößert.
- Gesamtsystemlatenz: Neben den Latenzen im Nickwinkelausgleich unterliegt das Gesamtsystem zahlreichen weiteren Latenzen, zum Beispiel durch Verarbeitungszeit in Sensoren, Bildwiederholrate im HUD, Berechnungszeiten und Signallaufzeiten. Daher wird neben den Nickwinkelausgleichlatenzen zusätzlich die Latenz des gesamten Systems künstlich um 0 ms bis 210 ms vergrößert.



Abbildung 7.33.: Auswirkung einer fehlerhaften Fahrstreifenenerkennung auf die Darstellungsvarianten *Fahrstreifen* und *Balken*

Für die Qualität der Fahrstreifenenerkennung wurde eine prozentuale Abweichung in der Erkennung dargestellt. Dabei wurde dieser Wert zwischen 0 % und 20 % variiert. Den Probanden wurde zu Beginn gesagt, welches Fehlerbild sie sehen, und ihnen wurden beide Maximalausprägungen vorgeführt. Anschließend sollten sie frei der Autobahn folgen und die entsprechenden Anzeigen hinsichtlich ihrer Wertigkeit und Nützlichkeit bewerten. Dabei erlebten sie jede einzelne Ausprägung zweimal. Allerdings wurde die Reihenfolge der Ausprägungen ständig permutiert, um erneut Reihenfolgeneffekte ausschließen zu können.

Die Latenz im Nickwinkelausgleich wurde ebenfalls an einem Beispiel demonstriert. Bis zu diesem Zeitpunkt war der Nickwinkelausgleich aktiviert und nicht künstlich verzögert. Daher wurde er zuerst deaktiviert und anschließend wieder aktiviert und stark verzögert, um den Probanden die Spannweite dieses Fehlers zu demonstrieren. Damit die Probanden den Fehler wahrnehmen, bekamen sie eine Aufforderung zum komfortablen Bremsen von 120 km/h auf 20 km/h und sollten anschließend wieder auf 120 km/h beschleunigen. Es wurde bewusst nicht bis zum Stillstand des Fahrzeuges gebremst, um die Auswirkungen der Simulationskrankheit zu reduzieren. Anschließend sollten die Probanden der Autobahn weiter folgen, das Fahrzeug jedoch ständig mittels dieses kombinierten Brems- und anschließenden Beschleunigungsmanövers zu Nickbewegungen anregen. Für die Bewertung wurde der Nickwinkelausgleich künstlich verzögert. Die Verzögerungszeit wurde permutiert und jeder Proband erlebte jede Verzögerungszeit zweimal.

Die schwierigste Bewertung stellte die Latenz des Gesamtsystems dar. Hier wurde den Probanden ebenfalls die Minimal- und Maximalausprägung vorab demonstriert. Zu diesem Zweck erhielten die Probanden die Aufforderung den Fahrstreifen möglichst realistisch nach links beziehungsweise rechts zu wechseln. Für die Bewertung wurden die Probanden zu häufigen Fahrstreifenwechsel ermutigt. Wie auch bei den anderen Fehlerbildern wurde jede Ausprägung zwei Mal in verschiedenen Reihenfolgen durch die Probanden bewertet.

#### 7.4.2. Auswertung

Am Versuch nahmen insgesamt 46 Personen teil. Diese wurden auf zwei Gruppen zu je 23 Teilnehmern aufgeteilt. Sechs Probanden mussten den Versuch vorzeitig abbrechen. Die zahlreichen Beschleunigungsvorgänge sowie Fahrstreifenwechsel haben verstärkt zur Simulationskrankheit geführt [39]. Dadurch reduzierte sich die Stichprobe für die Bewertung der beiden Darstellungsvarianten auf 21 Personen für das Konzept *Fahrstreifen* und 19 Personen für das Konzept *Balken*.

In den Abbildungen 7.34 bis 7.39 sind die Ergebnisse der Probandenbewertung in zusammengefügt Box-Plot-Diagrammen dargestellt. Es gibt ein Diagramm je Fehlerursache und Bewertungskriterium. Innerhalb der einzelnen Diagramme sind entlang der Abszisse die Fehlerausprägungen und entlang der Ordinate die Bewertungen aufgetragen. Für die leichtere Erkennung wurde der Hintergrund entsprechend den Bewertungsclassen eingefärbt. Innerhalb des grünen Bereiches liegen die akzeptablen Bewertungen aus Sicht der Funktionsauslegung. Der gelbe Bereich stellt einen Übergangsbereich dar. Und Bewertungen innerhalb des roten Bereiches sind nicht akzeptabel.

Nachfolgend werden die Einzelergebnisse je Fehlerursache detailliert betrachtet.

**Qualität der Fahrstreifenerkennung:** Das stetige Abfallen der Bewertung (siehe Abbildung 7.34 und 7.35) zeigt, dass die Probanden den Fehler wahrnehmen und ein Ansteigen des Fehlers zu einer schlechteren Bewertung führt. Allerdings fällt sowohl die Wertigkeit als auch die Nützlichkeit beim Konzept *Fahrstreifen* schneller ab als beim Konzept *Balken*. Dies untermauert die Annahme, dass die vereinfachte Möglichkeit des Abgleichs zwischen virtueller Markierung und realer Fahrbahnmarkierung eine höhere Anforderung an die Qualität der Umwelterkennung und die damit verbundene Korrektheit der Anzeigen stellt. Das Konzept *Balken* verzeiht hinsichtlich der Wertigkeit eine fehlerhafte Erkennung

## 7. Kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen

bis zu 7,5 %, wohingegen das Konzept *Fahrstreifen* Fehler nur bis zu einer Abweichung von 4,5 % toleriert. Für die Probanden war es deutlich schwerer, Abweichungen zu erkennen wenn nur die Mitte des Fahrstreifens markiert wurde und nicht die realen Fahrstreifenbegrenzungen.

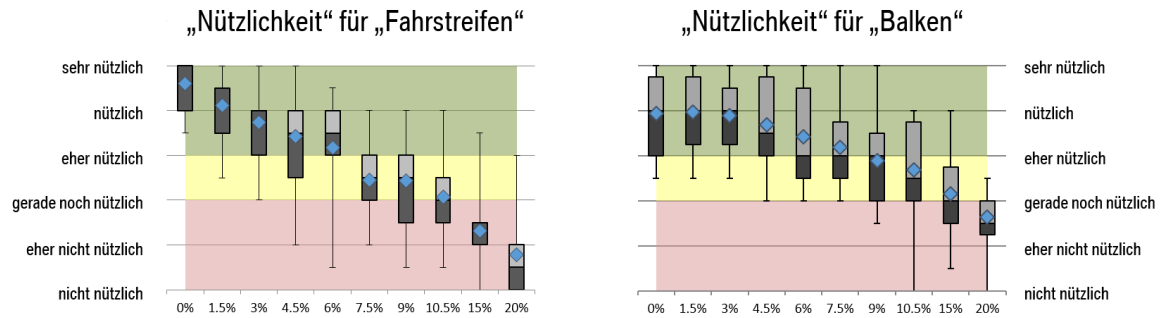


Abbildung 7.34.: Auswirkung einer fehlerhaften Fahrstreifenerkennung auf die wahrgenommene Nützlichkeit für beide Darstellungsvarianten

Nützlichkeit und Wertigkeit werden für beide Konzepte sehr ähnlich bewertet. Allerdings nimmt die Bewertung der Nützlichkeit mit zunehmendem Fehler deutlich langsamer ab als die Bewertung der Wertigkeit. Dies lässt die Grundannahme zu, dass Fehler hinsichtlich des Nutzens eines Systems eher toleriert werden als für seine Wertigkeit. Nur ein System ohne Fehler wird als wertig wahrgenommen.

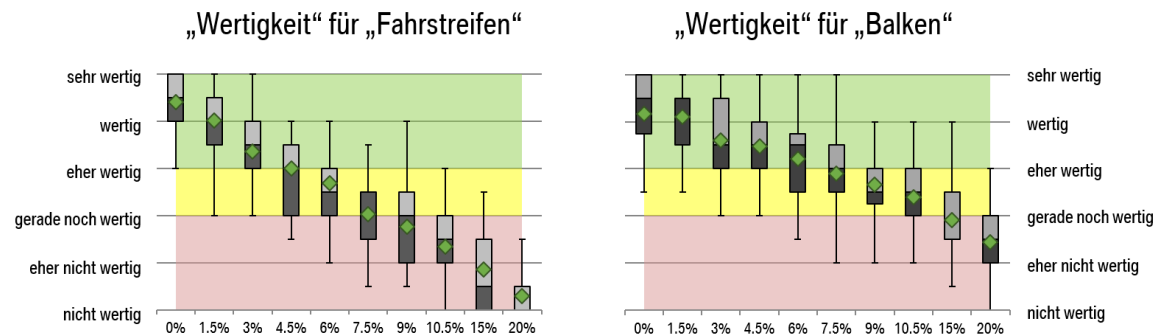


Abbildung 7.35.: Auswirkung einer fehlerhaften Fahrstreifenerkennung auf die wahrgenommene Wertigkeit für beide Darstellungsvarianten

Das Konzept *Fahrstreifen* wird bei der Nützlichkeit mit geringem Fehler deutlich besser bewertet als das Konzept *Balken* (*sehr nützlich* gegenüber *nützlich*). Die Aussagen der Probanden während des Versuchs erklären diese Bewertung. Bei einem fehlerlosen System konnten die Probanden den virtuellen Fahrstreifenmarkierungen eher eine Bedeutung zuzuordnen als dem Balken in der Mitte des Fahrstreifens. Allerdings wurden die Fahrstreifen mit zunehmendem Fehler deutlich schlechter bewertet, da der Balken trotz fehlerhafter Erkennung weiterhin in der Mitte des Fahrstreifens lag.

**Latenz im Nickwinkelausgleich:** Wie in den Abbildungen 7.36 und 7.37 zu sehen ist, haben die Probanden die zunehmende künstliche Verzögerung des Nickwinkelausgleiches wahrgenommen und negativ bewertet. Wie bereits bei der Bewertung der Qualität der Fahrstreifenerkennung, zeigt auch beim Nickwinkelausgleich das Konzept *Fahrstreifen* bessere Bewertungen hinsichtlich Nützlichkeit und Wertigkeit im fehlerfreien Fall. Jedoch fällt die Bewertung für das Konzept *Balken* bei zunehmendem Fehler etwas geringer ab. Auch im Hinblick auf zusätzliche Latenzzeiten im Nickwinkelausgleich ist das Konzept *Balken* leicht toleranter als das Konzept *Fahrstreifen*.

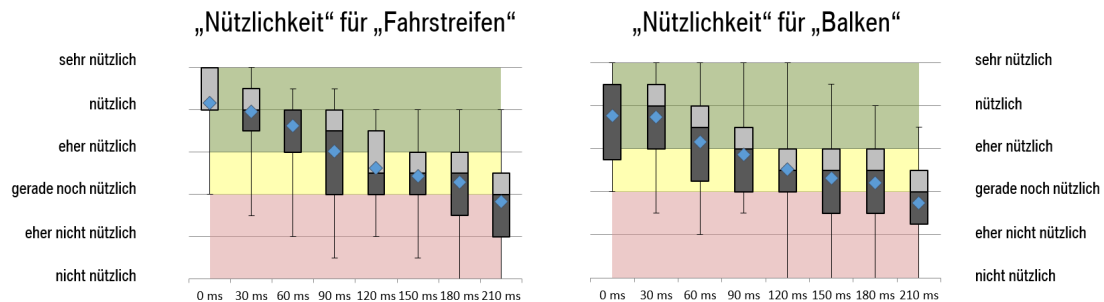


Abbildung 7.36.: Auswirkung eines verzögerten Nickwinkelausgleiches auf die wahrgenommene Nützlichkeit für beide Darstellungsvarianten

Hinsichtlich der Nützlichkeit ist für das Konzept *Fahrstreifen* eine Latenzzeit im Nickwinkelausgleich von 30 ms akzeptabel. Die Mehrheit der Probanden bewertet in diesen Fällen das Konzept noch mit *nützlich*. Das Konzept *Balken* wird nur im fehlerfreien Fall noch als *nützlich* bewertet. Sobald zusätzliche Latenzzeiten im Nickwinkelausgleich auftreten, wird das Konzept von den Probanden nur noch maximal mit *eher nützlich* bewertet. Dies liegt vermutlich an der im Vergleich zum Konzept *Fahrstreifen* größeren, flächenhaften Ausdehnung der Anzeigen. Dadurch wurden die künstlichen Latenzzeiten im Nickwinkelausgleich deutlicher von den Probanden wahrgenommen. Zusätzlich liegt der Balken in der Mitte des Fahrstreifens und somit direkt im Sichtfeld des Probanden. Die durch den künstlich verzögerten Nickwinkelausgleich entstandene Unruhe in den Anzeigen wird dadurch markanter wahrgenommen als beim Konzept *Fahrstreifen*.

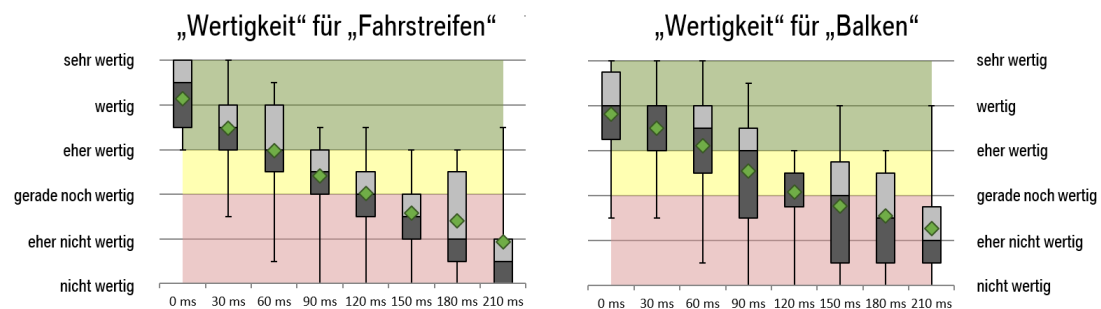


Abbildung 7.37.: Auswirkung eines verzögerten Nickwinkelausgleiches auf die wahrgenommene Wertigkeit für beide Darstellungsvarianten

**Gesamtsystemlatenz:** Die Bewertung der Gesamtsystemlatenzzeit zeigt ähnliche Ergebnisse wie bereits die Latenz im Nickwinkelausgleich. In den Abbildungen 7.38 und 7.39 sind die Einzelergebnisse grafisch dargestellt. Erneut erreicht das Konzept *Fahrstreifen* im fehlerfreien Fall bessere Bewertung als das Konzept *Balken*. Allerdings zeigt das Konzept *Balken* eine leicht erhöhte Toleranz gegenüber zunehmenden Fehlergrößen.

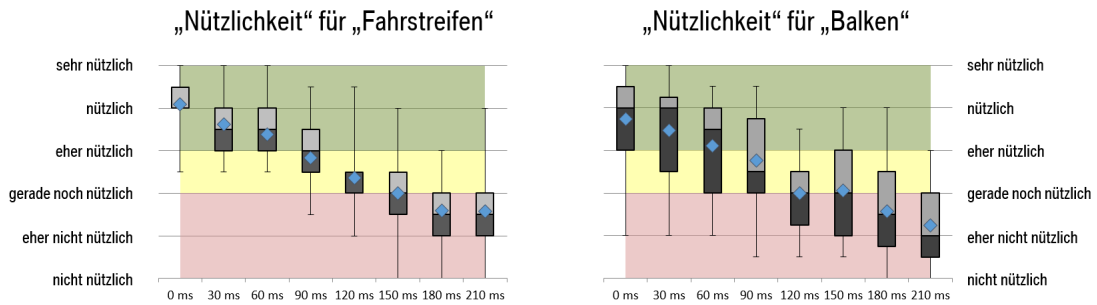


Abbildung 7.38.: Auswirkung verschiedener Latenzen im Gesamtsystem auf die wahrgenommene Nützlichkeit für beide Darstellungsvarianten

Allerdings wird hinsichtlich der Nützlichkeit nur das Konzept *Fahrstreifen* vom Großteil der Probanden im fehlerfreien Fall als *nützlich* bewertet. Das Konzept *Balken* wird vom Großteil der Probanden im fehlerfreien Fall nur als *eher nützlich* bewertet. Wenn eine Bewertung von mindestens *eher nützlich* aus Kundensicht gefordert wird, dann kann der Konzept *Fahrstreifen* bis zu einer Latenzzeit im Gesamtsystem von 60 ms verwendet werden. Das Konzept *Balken* allerdings nur bis zu einer Latenzzeit von 30 ms.

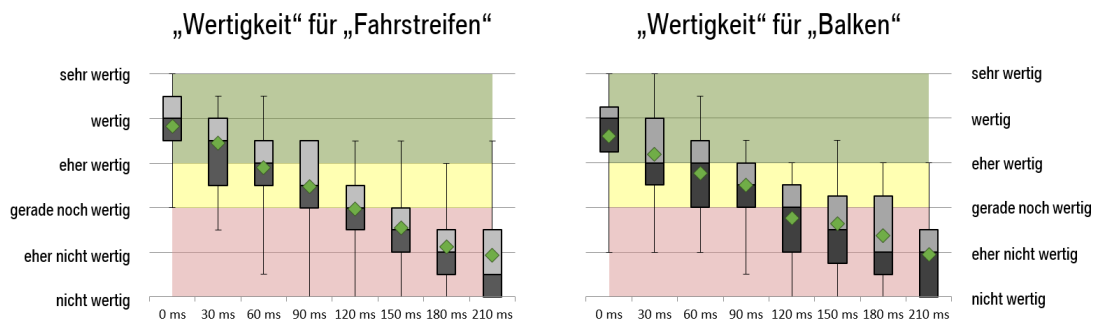


Abbildung 7.39.: Auswirkung verschiedener Latenzen im Gesamtsystem auf die wahrgenommene Wertigkeit für beide Darstellungsvarianten

Damit beide Anzeigen als wertig empfunden werden, darf keinerlei Latenz im Gesamtsystem auftreten. Im Gegensatz zu den bisherigen Fehlerfällen zeigt bei der Gesamtsystemlatenz das Konzept *Fahrstreifen* eine bessere Toleranz gegenüber kleineren Fehlern. Für Latenzen im Gesamtsystem von bis zu 60 ms wird das Konzept *Fahrstreifen* noch als *wertig* empfunden. Das Konzept *Balken* erlaubt hingegen nur eine maximale Latenz im Gesamtsystem von 30 ms, um noch als *wertig* empfunden zu werden. Die größere Fehlertoleranz des Konzeptes *Balken* zeigt daher bei einer Systemauslegung keinen großen Vorteil, da eine Bewertung von weniger als *eher nützlich* oder *eher wertig* nicht erstrebenswert ist.



**Fazit:** Diese Nutzerstudie hat deutlich gezeigt, dass die kontaktanaloge Darstellung im Head-Up-Display nahezu keine Toleranz gegenüber verschiedenen Fehlerquellen hat. Vor allem nicht-ausgeglichene Systemlatenzen führen direkt zu einem deutlich schlechterem Erlebnis.

Bei der Systemauslegung können kleinere Fehler mit einer veränderten Darstellungsvariante verdeckt werden. Die getestete Alternativdarstellung *Balken* zeigte sich bezüglich Wertigkeit und Nützlichkeit robuster gegenüber fehlerhaften Eingangssignalen. Der erschwerte Abgleich zwischen Realität und Anzeige, wenn diese nicht versucht, die Realität exakt zu überdecken, könnte eine mögliche Ursache dafür sein.

Für die Auslegung der kontaktanalogen Navigationsanzeigen ergeben sich, basierend auf diesem Versuch, folgende Anforderungen an das Gesamtsystem, um als wertig und nützlich eingestuft zu werden: Das Kamerasystem muss den geometrischen Verlauf der vorhandenen Fahrstreifenmarkierung sehr gut erkennen und modellieren. Die erkannten Fahrstreifenmarkierungen dürfen maximal um 3% von der Realität abweichen. Die verschiedenen Eingangssignale müssen nahezu frei von Latenzzeiten sein. Vor allem bei Fahrzeugbewegungen mindern vorhandene Latenzzeiten sofort den Eindruck der kontaktanalogen Darstellung. Daher müssen alle Latenzzeiten in Summe kleiner 60 ms sein.

Darüber hinaus hat der Versuch erneut gezeigt, dass sich die Probanden im Fahrsimulator sehr stark auf die Anzeige konzentrieren. Die Fahraufgabe wird zur Nebenaufgabe. Kleinste Fehler werden sofort entdeckt und als störend empfunden.

## 7.5. Nutzerstudie im Versuchsträger: Nickwinkelausgleich

In den Versuchen im Fahrsimulator wurden erste wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich der kontaktanalogen Darstellung von Navigationsanzeigen gewonnen. Allerdings haben beide Versuche deutlich gezeigt, dass die Kontaktanalogie eine hohe Anforderung an das Gesamtsystem stellt, damit dem Fahrer ein wertiges Erlebnis präsentiert werden kann.

Ein wesentlicher Störeinfluss auf die erlebte Qualität der Anzeigen stellen die Fahrzeugbewegung dar. Diese konnte in einer reinen visuellen Form auch im Fahrsimulator nachgestellt werden. Jedoch fehlten sämtliche physikalischen Rückmeldungen für den Probanden im statischen Fahrsimulator. Deshalb wurden die kontaktanalogen Anzeigen mit Hilfe eines Prototyps in einem Versuchsträger auch im Fahrzeug erlebbar gemacht.

### 7.5.1. Versuchsbeschreibung und -aufbau

In diesem Versuch sollte die Qualität des technisch erreichbaren Nickwinkelausgleiches analysiert werden. Dazu wurden drei verschiedene Algorithmen implementiert und anschließend in einer Probandenstudie bewertet. Zusätzlich sollten mit diesem Versuch erste Erkenntnisse hinsichtlich des entwickelten prototypischen kontaktanalogen Head-Up-Displays gewonnen werden.

Dieser Versuch wurde auf dem BMW-eigenen Testgelände in Aschheim durchgeführt, da dieser Versuch für fast alle Probanden den Erstkontakt mit kontaktanalogen Darstellungen im Fahrzeug markierte und es nur begrenzt Informationen hinsichtlich der Wirkung dieser Anzeigen auf das Fahrverhalten gibt. Nachfolgend werden das Testgelände sowie

die Teststrecke beschrieben, der Versuchsablauf dargestellt und zum Abschluss die untersuchten Varianten des Nickwinkelausgleichs präsentiert.

**Schnellfahrbahn M1 auf BMW Messgelände Aschheim:** Das Messgelände bei Aschheim nimmt eine Fläche von 67 ha ein und verfügt über ca. 35 km Messstrecken. Es existieren verschiedene Fahrbahnen mit verschiedenen Beschaffenheiten, um eine Vielzahl von Fahrversuchen im Rahmen der Erprobung und Absicherung durchführen zu können. Im Einzelnen gibt es eine Schnellfahrbahn, eine Sonderfahrbahn, den Handlingkurs, eine Kreisplatte sowie eine Parkmanöverassistentzfläche. Für den hier beschriebenen Versuch wurde die Schnellfahrbahn M1 (siehe rote Markierung in Abbildung 7.40) verwendet.

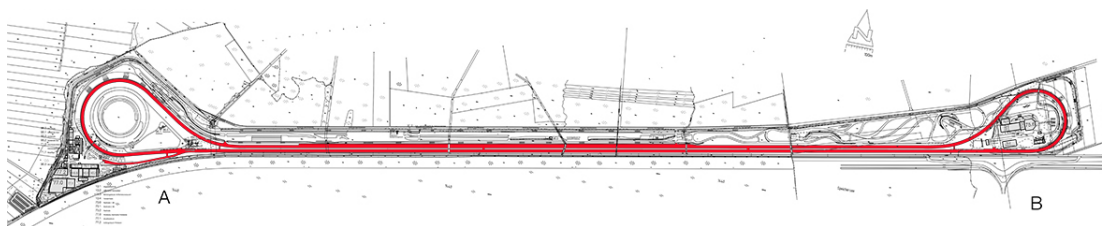


Abbildung 7.40.: Schnellfahrbahn M1 am BMW Testgelände in Aschheim

Die Schnellfahrbahn M1 stellt eine autobahnähnliche Straße als Rundkurs mit einer Gesamtlänge von 7,78 km dar. Der Rundkurs beginnt auf der 3,2 km langen Südgerade und führt über die Ostschleife auf die parallel verlaufende 2,8 km lange Nordgerade und wird am Ende über die Westschleife wieder auf die Südgerade geführt. Die Querneigung beträgt in den Kehren 7 % und an den Einfahrten 3 %. Die Strecke besitzt zwei Fahrstreifen mit je 3,75 m Breite auf der linken Seite und in der Mitte sowie einen weiteren Fahrstreifen mit 3,25 m Breite auf der rechten Seite. Für den Fahrbetrieb müssen gemäß Vorschrift des Messgeländes der linke und mittlere Fahrstreifen verwendet werden. Die Mindestgeschwindigkeit von 60 km/h muss stets eingehalten werden. Abbildung 7.41 zeigt den Blick auf die beiden Geraden von der Westschleife aus.



Abbildung 7.41.: Blick auf die Schnellfahrbahn M1 am BMW Testgelände Aschheim

**Versuchsablauf:** Als Erstes wurden die Probanden durch den Versuchsleiter am Testgelände in Empfang genommen und begrüßt. Die Probanden erhielten eine kurze Einweisung in das Projekt, um den Versuch besser einordnen zu können. Anschließend wurde das Versuchsfahrzeug vorgestellt. Dabei wurde vor allem auf die baulichen Veränderungen und die damit verbundenen Besonderheiten aufmerksam gemacht. Im Anschluß nahmen die Probanden im Versuchsfahrzeug Platz und wurden aufgefordert, das Fahrzeug auf sich entsprechend einzustellen (insbesondere Sitz- und Lenkradposition). Zum Abschluss der Begrüßung und Einleitung wurden vom Versuchsleiter nochmals die wichtigsten Informationen und Regelungen der Teststrecke M1 wiederholt.

Als Nächstes folgte eine circa zehn-minütige Eingewöhnungsfahrt über zwei Runden. In der ersten Runde wurden alle Anzeigen deaktiviert, und die Probanden sollten sich mit dem Versuchsfahrzeug sowie dem Streckenverlauf vertraut machen. Im Anschluss wurden in der zweiten Runde die kontaktanalogen Anzeigen aktiviert. Für den Versuch wurde, wie bereits im zweiten Versuch im Fahrsimulator, die Markierung der Fahrstreifenbegrenzung verwendet (siehe Kapitel 7.4). Abbildung 7.42 zeigt einen Blick auf die verwendeten Anzeigen aus Sicht des Probanden - jedoch nicht auf dem Testgelände, da dort zum Zeitpunkt des Versuches keine Fotos aufgenommen werden durften. Mit Hilfe der CORONA Umgebung wurden die vom KAFAS-System erkannten Fahrstreifeninformationen kontaktanalog visualisiert und so die real vorhandenen Fahrstreifenmarkierungen künstlich überlagert.



Abbildung 7.42.: Künstliche Überlagerung der Fahrstreifenmarkierungen auf Basis der Kamera-Erkennung als Testdarstellung

Direkt im Anschluss an die Eingewöhnungsfahrt fand die circa 30-minütige Versuchsfahrt statt. Es wurden insgesamt sechs Runden auf der M1 gefahren. Dabei wurden die Anzeigen jeweils nur auf den geraden Teilstücken aktiviert. Der Proband sollte auf diesen Stücken mehrmalige Brems- und Beschleunigungsvorgänge ausführen und dabei das Verhalten der Anzeige beobachten. Während der Kurven wurden die Anzeigen deaktiviert, und der Proband musste mit Hilfe einer sechsstufigen Skala (*sehr gut, gut, eher gut, gerade noch gut, eher nicht gut, nicht gut*) die erlebten Anzeigen hinsichtlich des Nickwinkelausgleichs bewerten.

Es wurden insgesamt vier verschiedene Varianten des Nickwinkelausgleichs im Versuchsfahrzeug implementiert und während des Versuchs verwendet. Entlang einer Geraden wurde jeweils eine Variante aktiviert. Während der Kurven wurde die Anzeige deaktiviert und die Variante gewechselt. Jeder Proband erlebte und bewertete jede Variante dreimal. Daher mussten die Geradenstücke 12 mal befahren werden. Es wurden daher mindestens sechs volle Runden für den Versuch absolviert. Die Reihenfolge der erlebten Varianten wurde zwischen den Probanden permutiert, um entsprechende Reihenfolgeneffekte ausschließen zu können. Für die Durchführung des gesamten Versuchs wurden pro Proband 45 Minuten benötigt.

Nach dem Versuch wurde von den Probanden noch der Eindruck der erlebten kontaktanalogen Anzeigen abgefragt, um einen ersten Überblick über die Wirkung von kontaktanalogen Anzeigen im realen Fahrzeug zu erhalten.

**Varianten des Nickwinkelausgleichs:** Neben der Variante *Kein Nickwinkelausgleich* wurden für den Versuch auch drei verschiedene Abwandlungen zur Berechnung des Nickwinkels und des entsprechenden Nickwinkelausgleichs (NWA) verwendet. Die Algorithmen wurden von Kollegen mit dem Arbeitsschwerpunkt *Dynamischen Lichtfunktionen* für diesen Versuch zur Verfügung gestellt. Nachfolgend werden diese Varianten beschrieben:

- **Kein NWA:** Es findet kein Nickwinkelausgleich statt und die Anzeigen bewegen sich mit den Nickbewegungen des Fahrzeuges mit.
- **NWA über Höhenstandssensoren (ungefiltert):** Der Nickwinkel wird auf Basis der Höhenstandssensoren an der vorderen und hinteren Achse des Fahrzeuges berechnet. Dadurch können neben Brems- und Beschleunigungsbewegungen auch Bodenwellen erkannt und ausgeglichen werden.
- **NWA über Höhenstandssensoren (gefiltert):** Ebenfalls Berechnung des Nickwinkels auf Basis der Höhenstandssensoren, jedoch mit Filterung der Ergebnisse. Dadurch wird der Ausgleich stabiler, zeigt allerdings ein gedämpftes Ansprechverhalten.
- **Dynamische Nickwinkelberechnung aus Längsbeschleunigung:** Ableitung des Nickwinkels aus der Geschwindigkeit des Fahrzeuges. Änderungen des Nickwinkels aufgrund von Brems- und Beschleunigungsbewegungen werden erkannt und ausgeglichen. Jedoch können Bodenunebenheiten nicht erkannt und ausgeglichen werden.

Die Algorithmen wurden in MathWorks Simulink [79] modelliert und anschließend auf zwei dSPACE AutoBoxen installiert. Beide AutoBoxen wurden neben der CORONA-Plattform im Versuchsfahrzeug integriert. Die Kommunikation zwischen Fahrzeug, den AutoBoxen und CORONA erfolgte über CAN. Auf diese Weise kann während des Versuchs innerhalb des CORONA-Frameworks mittels Konfigurationsparameter zwischen den verschiedenen Varianten des Nickwinkelausgleichs gewechselt werden.

**Einflussfaktoren für die Bewertung:** Zum Abschluss seien noch die Einflussfaktoren auf die Bewertung erwähnt, welche zu leicht unterschiedlichen Erlebnissen der einzelnen Probanden geführt haben können. Über den gesamten Versuchszeitraum gab es unterschiedliche Wetterbedingungen. Diese haben einen Einfluss auf die Fahrstreifenenerkennung. Bei

Regen oder direkter Sonneneinstrahlung lässt die Qualität der erkannten Fahrstreifenmarkierungen nach. Darüber hinaus hat jeder Proband ein anderes Brems- und Beschleunigungsverhalten, was zu unterschiedlichen Nickbewegungen führt. Bei leichten Nickbewegungen fällt ein fehlender NWA weniger stark auf. Der verwendete Prototyp weist aufgrund der gewählten Architektur und Implementierung bereits eine gewisse Latenz auf. Diese Latenz wird sich gleichmäßig negativ auf alle Varianten auswirken.

### 7.5.2. Auswertung

Am Versuch nahmen insgesamt 36 Probanden teil, 4 (11 %) Frauen und 32 (89 %) Männer. Das Alter der Probanden verteilte sich wie folgt: acht Probanden zwischen 18 und 29 Jahren, dreizehn Probanden zwischen 30 und 39, zehn Probanden zwischen 40 und 49 Jahren sowie fünf Probanden mit 50 Jahren und älter. Der Versuch wurde im Zeitraum vom 20. August 2012 bis zum 30. August 2012 durchgeführt. Da der Versuch auf dem Testgelände von BMW stattfand und der Besitz des BMW-internen Führerscheins B1 notwendige Voraussetzung war, waren alle Probanden Angestellte der BMW Group, jedoch verteilt auf die verschiedensten Bereiche der BMW Group.

**Quantitative Auswertung mittels Fragebogen:** In Abbildung 7.43 sind die Bewertungen der Probanden für die verschiedenen Varianten des Nickwinkelausgleiches als Box-Plot-Diagramme dargestellt. Die beste Bewertung erhielt die Variante, welche den Nickwinkel dynamisch aus der Längsbeschleunigung berechnet. Die Versuche im Fahr Simulator haben gezeigt, dass der Nickwinkel ausgeglichen werden muss - dies bestätigt die schlechte Bewertung der Variante, bei der dies nicht geschah. Die beiden Varianten, welche den Nickwinkel aus den Höhenstandssensoren ableiten, landen im Mittelfeld, wobei die ungefilterte Variante leicht besser bewertet wurde.

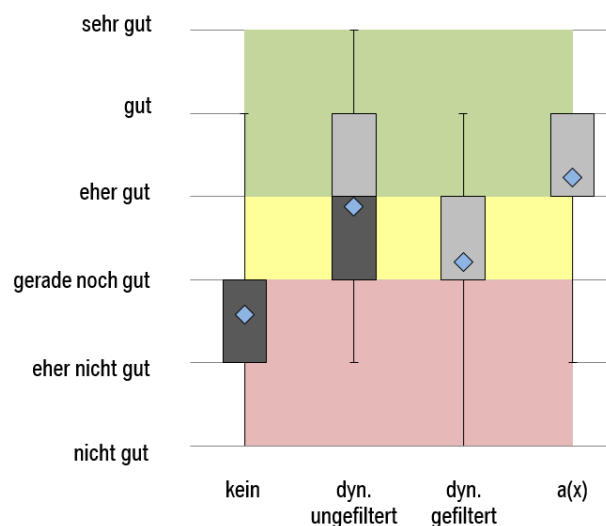


Abbildung 7.43.: Bewertung der verschiedenen Varianten des Nickwinkelausgleichs

**Subjektive Beurteilung Kein NWA:** Der fehlende Nickwinkelausgleich wird als unruhig und träge beschrieben. Die Probanden waren durch fehlerhafte Darstellung der Anzeige verwirrt. Vor allem die Tatsache, dass die dargestellten Linien bei Fahrzeugbewegungen in Richtung Himmel gedeutet haben, war störend für die Probanden. Jedoch gab es auch Probanden, für die der fehlende Nickwinkelausgleich erwartungskonform war. Vor allem wurde deutlich, dass ein Nickwinkelausgleich so umgesetzt werden muss, dass er nicht auffällt. Dies bestätigt sich in Aussagen der Probanden zum fehlenden Nickwinkelausgleich, wonach das Erlebnis ohne Sprünge in der Darstellung angenehmer sei, auch wenn die Linien nicht getroffen würden.

**Subjektive Beurteilung NWA über Höhenstandssensoren (ungefiltert):** Der ungefilterte NWA über die Höhenstandssensoren wird oft als *gut* beschrieben. Als Begründung dafür wurden der Ausgleich beim Bremsen und Beschleunigen sowie die schnelle Regelung genannt. Dadurch befinden sich die Anzeigen fast immer in guter Übereinstimmung mit den vorhandenen Fahrbahnmarkierungen. Jedoch wünschten sich die Probanden oft noch ein wenig mehr Ausgleich. Darüber hinaus ist der Ausgleich für viele Probanden zu nervös und zu wackelig. Insgesamt wurde angemerkt, dass die Anzeigen mit diesem NWA zu sehr schwingen und dadurch hektisch wirken. Für manche Probanden haben die Anzeigen so sehr gewackelt, dass sie in Kombination mit dem Überschwingerverhalten der Regelung „seekrank“ wurden.

**Subjektive Beurteilung NWA über Höhenstandssensoren (gefiltert):** Beim gefilterten NWA über die Höhenstandssensoren wird vor allem der Ausgleich beim Bremsen gelobt. Dennoch gab es viel Kritik. Es wird sehr oft die Verzögerung im Ausgleich als Negativpunkt genannt. Auch wird das teils sprunghafte Verhalten der Anzeige kritisiert. Einige Probanden meinten sogar, dass die Anzeige nur auf das Bremspedal reagiert.

**Subjektive Beurteilung NWA über Dynamische Nickwinkelberechnung:** Der NWA über Dynamische Nickwinkelberechnung wird im Allgemeinen gelobt: „Bleibt gut in der Spur“, „wackelt nicht“, „Anzeigen liegen gut“ und „Fährt sich gut“. Ein Proband hat es folgendermaßen zusammengefasst: „Nicht nervös und regelt mit geringer Latenz, ist sehr schnell.“ Jedoch ist den Probanden auch aufgefallen, dass die Nickbewegungen des Fahrzeuges aufgrund von Bodenunebenheiten nicht ausgeglichen wurden. Ferner haben mehrere Probanden die erhöhte Latenz kritisiert. Und nur bei diesem NWA wurde die beschränkte Anzeigengröße angesprochen: „Anzeige wird beim Bremsen kürzer.“

**Subjektive Bewertung der kontaktanalogen Anzeigen:** Nach der Fahrt wurden die Probanden noch gebeten, kontaktanaloge Anzeigen allgemein zu bewerten. Hierbei spiegeln die getätigten Aussagen die bereits bekannten Annahmen wieder. Es wird immer wieder gesagt, dass die Funktion sehr gut ist. Teilweise wird von „Schlüsseltechnologie“ und „Erste Neuerung nach Erfindung des Autos“ gesprochen. Jedoch spiegelt sich in den Aussagen auch wieder, dass die Funktion richtig umgesetzt sein muss, um wertig zu wirken. Ein Proband hat dies mit seiner Aussage sehr schön zusammengefasst: „Kontaktanaloge Anzeigen sind gut, müssen aber schlicht, durchdacht und intuitiv sein, Verdeckung muss

realistisch sein“. Es wurde teilweise angemerkt, dass die kontaktanalogen Anzeigen eine gewisse Eingewöhnung benötigen, da es zunächst ungewohnt sei etwas Virtuelles im Blickfeld zu haben.

**Fazit:** Der durchgeführte Versuch im Realfahrzeug hat bestätigt, was die beiden Versuche im Fahrsimulator bereits angedeutet haben. Für wertige kontaktanaloge Anzeigen im Fahrzeug ist ein guter Ausgleich der Fahrzeugbewegungen notwendig. Alle drei Varianten des NWA wurden besser bewertet als der fehlende NWA.

Jedoch wurde auch nochmal deutlich, dass an diesen Ausgleich entsprechende Anforderungen gestellt sind. Damit ein NWA als wertig empfunden wird, muss dieser präzise, schnell und gleichmässig sein. Jede Form von Latenz oder Schwingung wird als störend empfunden.

Insgesamt wurde die Variante des NWA auf Basis der dynamischen Nickwinkelberechnung aus der Längsbeschleunigung von den Probanden am besten bewertet, auch wenn diese nur die Brems- und Beschleunigungsbewegungen des Fahrzeuges ausgeglichen hat. Jedoch war dieser Ausgleich sehr präzise und nur mit geringer Latenz behaftet.

## 7.6. Expertenstudie im Versuchsfahrzeug: Konzeptbewertung

Mit Hilfe der in Abschnitt 7.3 beschriebenen Probandenstudie wurde in der kontrollierten und vollständig beherrschbaren Umgebung des Fahrsimulators das Potential der kontaktanalogen Darstellung von Navigationshinweisen gegenüber der klassischen Form der Darstellung analysiert und bewertet.

Mit Hilfe des oben beschriebenen Versuchsträgers kann diese Fragestellung erneut, jedoch in realen Verkehrssituationen und auf Basis realer Sensoren und verfügbaren Kartenmaterials überprüft werden. Zusätzlich wird der Reifegrad des aufgebauten Versuchsträgers mit Hilfe dieser Expertenstudie bewertet. Die Inhalte dieser Expertenbewertung wurden 2013 auf dem VDI-Wissensforum *Fahrer im 21. Jahrhundert* vorgestellt [61].

### 7.6.1. Versuchsbeschreibung und -aufbau

Da zum Zeitpunkt der Durchführung der Studie das Ablenkungspotential der kontaktanalogen Darstellung von Navigationshinweisen noch nicht hinreichend untersucht war und der Versuch aufgrund der Fragestellung im öffentlichen Straßenverkehr mit anderen Verkehrsteilnehmern stattfinden musste, wurde der Versuch hinsichtlich der Teilnehmer angepasst. Alle Teilnehmer waren Experten der BMW Group aus den Bereichen Navigation, HUD-Entwicklung sowie Anzeige- und Bedienkonzepte. Dadurch konnte den Teilnehmern zum einen ein gewisses Maß an Abstraktionsfähigkeit zugestanden werden und zum anderen haben alle Teilnehmer eine spezielle Fahrausbildung zur Vorbereitung auf Fahrten mit Versuchsfahrzeugen absolviert.

**Versuchsablauf:** Jeder Experte erhielt nach der Begrüßung eine Einweisung in das Versuchsfahrzeug und wurde über die fahrzeugspezifischen Vorsichtsmaßnahmen während der Versuchsfahrt belehrt. Anschließend konnten sich die Experten während einer Eingewöhnungsfahrt an das Fahrzeug und die Anzeigen im kontaktanalogen HUD gewöhnen.





gezielt nach positiven wie auch negativen Eindrücken gefragt. Zusätzlich sollten von den Experten die erlebten Elemente beschrieben werden, um sicherzustellen, dass alle Elemente wahrgenommen und richtig interpretiert wurden.

Nach den jeweiligen Fahrten wurden die Anzeigen durch die Experten mit Hilfe vorbereiteter Fragebögen sowie einer gekürzten Version des AttrakDiff-Fragebogens[52] bewertet. Abschließend wurden erneut positive sowie negative Anmerkungen zu den erlebten Anzeigen abgefragt und diskutiert. Nach dieser Befragung wurde der Versuch mit vertauschtem Anzeige-konzept wiederholt (*within subjects design*). Dabei wurde in jedem Versuchsdurchlauf die Reihenfolge der benutzten Anzeige-konzepte permutiert, um Reihenfolgeeffekte bei der Versuchsbewertung ausschließen zu können.

**Darstellungsvarianten:** Für den Versuch wurden zwei verschiedene Konzepte zur Darstellung von Navigationshinweisen verwendet. Die *klassische* Variante ist an aktuelle und bereits in Serienfahrzeugen verfügbare Navigationsanzeigen angelehnt und besteht aus drei Elementen, die je nach Entfernung zum jeweiligen Manöver und somit der aktuellen Guiding-Stufe dargestellt werden:

- einer abstrakten Manöverdarstellung in Piktogrammform sowie der Angabe der Entfernung bis zum Manöverort während der Guiding-Stufen *Notify*, *Prepare* und *Execute*
- einer statischen Fahrstreifenempfehlung, dargestellt durch Visualisierung der aktuell verfügbaren Fahrstreifen, sowie der Markierung des optimalen Fahrstreifens während der Guiding-Stufen *Prepare* und *Execute* und bei Bedarf (wenn der Fahrer einen Fahrstreifen befährt, welcher die Route verlässt)
- sowie einer Kartendarstellung der Umgebung des Manöverpunktes mit eingezeichnetem Manöververlauf sowie der aktuellen Fahrzeugposition in der Guiding-Stufe *Execute*

Im Versuch diente diese Variante als Referenzkonzept. Jedoch wurden die Experten darüber nicht informiert.

Die *visionäre* Variante entspricht dem bereits beschriebenen Anzeige-konzept für die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen (siehe 7.1). Dabei stellt die Kontaktanalogie den wesentlichen Unterschied der beiden Varianten dar. Grundelemente der *klassischen* Varianten finden sich jedoch auch in der *visionären* Variante wieder:

- Gleiche abstrakte Darstellung des Manövers mit Entfernungsangabe wie auch in der *klassischen* Variante als Vorausschauinformation während der Guiding-Stufen *Notify*, *Prepare* und *Execute*
- eine Fahrstreifenführung, jedoch im Gegensatz zur *klassischen* Variante aktiv und kontaktanalog. Dem Fahrer wird der jeweils optimale Fahrstreifen während der Guiding-Stufen *Prepare* und *Execute* und bei Bedarf direkt auf der Straße markiert
- ein kontaktanaloger Manöverimpuls, der Ort und Richtung des Manövers in der Guiding-Stufe *Execute* verdeutlicht

### 7.6.2. Auswertung

Die Ergebnisse der Studie basieren auf den Aussagen von 16 Experten der BMW Group (15 Männer, 1 Frau) aus den Bereichen Navigation, HUD und Anzeige- und Bedienkonzepte. Das Durchschnittsalter der Experten lag bei 36 Jahren ( $\sigma = 8,5$ ). Die Antworten auf die einzelnen Fragen des Fragebogens werden zum einen über alle Experten gemittelt. Zum anderen werden die Antworten entsprechend der Reihenfolge der gesehenen Anzeigekonzepte getrennt ermittelt. Dadurch kann die Reaktion der Experten nach dem Erstkontakt mit den Anzeigen beziehungsweise nachdem Sie eine Vergleichsoption hatten, bewertet werden. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf die Auswirkung der Reihenfolge.

**Quantitative Auswertung mittels Fragebogen:** Die Verteilung der Antwortmöglichkeiten auf die Frage: "Durch die Anzeigen habe ich mich gut auf die Abbiegemanöver vorbereitet gefühlt" (siehe Abbildung 7.46) zeigt einen Nachteil der *visionären* Variante auf. Denn durch die Kontaktanalogie können Informationen nur im direkten Sichtbereich angezeigt werden - die Kreuzung muss also bereits im Blickfeld des Fahrers liegen. Dadurch fehlt einem Großteil der Experten die notwendige Vorausschauinformation. Die *klassische* Variante stellt mittels der frühzeitigen Anzeige der abstrakten Kartendarstellung ausreichend Vorausschauinformationen zur Verfügung und ermöglicht dadurch bereits eine Vorbereitung auf das zukünftige Manöver, ohne dass dieses im Blickfeld liegt.

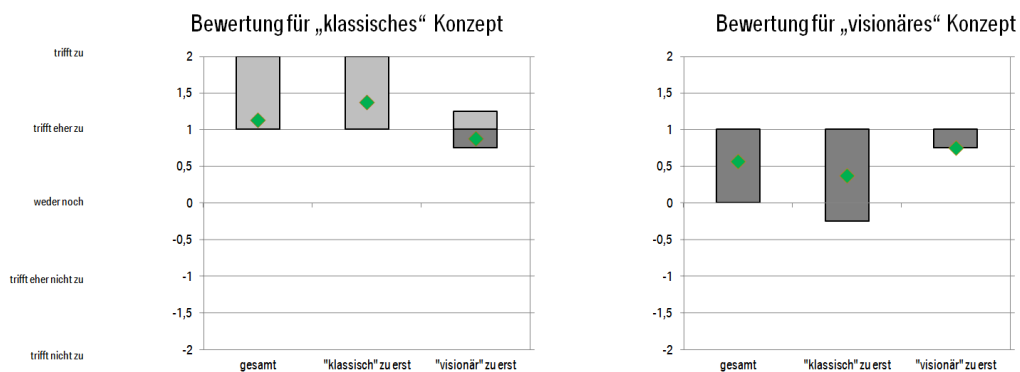


Abbildung 7.46.: Auswertung: Die Anzeigen bereiten auf das Manöver vor

Die Verteilung der Antworten auf die weiteren Fragen verdeutlichen einen weiteren Nachteil der kontaktanalogen Darstellung. Die *visionäre* Variante wurde im gesamten Vergleich zur *klassischen* Variante durchweg schlechter bewertet (siehe Abbildung 7.47 bis 7.49). Diese Antworten spiegeln die hohen Anforderungen der Kontaktanalogie an das Gesamtsystem wieder. Der verfügbare, sehr große Anzeigebereich benötigt auch sehr korrekte Umgebungssensoren. Für den Prototyp wurden dazu bereits im Fahrzeug verfügbare Sensoren verwendet. Durch die Art der Anzeige werden jedoch sämtliche Mängel der Umgebungssensoren direkt mitgeteilt. Leichte Abweichungen zwischen Realität und Anzeige werden sofort negativ bewertet. Dies spiegelt sich auch später in der subjektiven Bewertung der Probanden sowie im Mini-AttrackDiff-Test wieder.

Die Reihenfolge der Darstellungen hat dabei keinen Einfluss auf den Vergleich zwischen

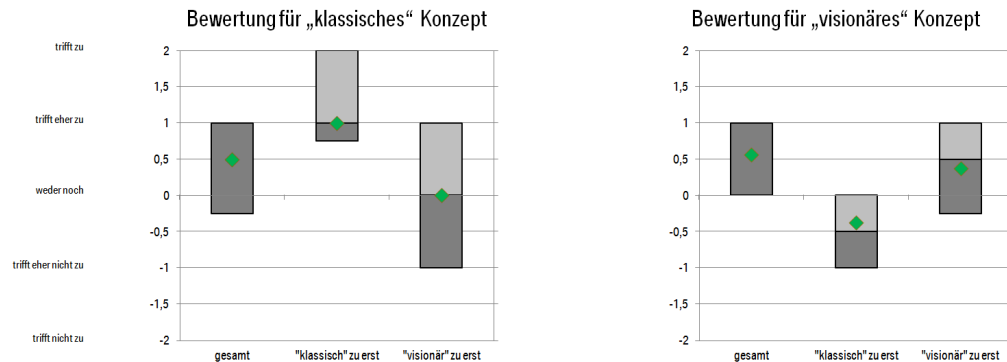


Abbildung 7.47.: Auswertung: Die Anzeigen bereiten auf Fahrstreifenwechsel vor

den beiden Konzepten. Es findet lediglich eine Verschiebung der Beurteilung beider Varianten statt. Wenn die Experten die *klassische* Variante vor der *visionären* Variante sahen, dann wurde die kontaktanaloge Variante schlechter bewertet. Auch im Erstkontakt wird die *visionäre* Variante nicht besser bewertet als die *klassische* Variante im Erstkontakt.

Wie Abbildung 7.47 und Abbildung 7.48 zeigen bietet die umgesetzte Variante der kontaktanalogen Darstellung im Versuchsträger auch keine bessere Unterstützung beim Fahrstreifenwechsel und dem eigentlichen Abbiegevorgang. Der Vorteil der direkten Markierung des optimalen Fahrstreifens wurde durch die Schwächen der Sensorik und Verarbeitung zerstört.

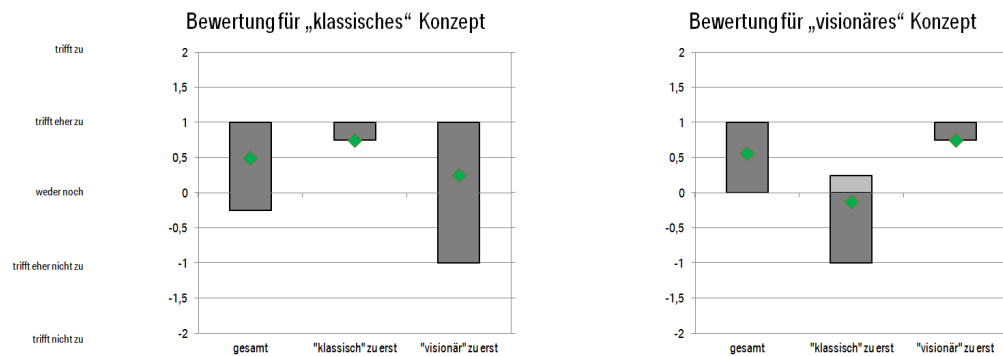


Abbildung 7.48.: Auswertung: Die Anzeigen unterstützen beim Abbiegevorgang

Dies zeigen auch die Antworten auf die Frage zur Übertragbarkeit der Anzeigen, wie Abbildung 7.49 zeigt. Es fiel den Probanden leichter, die abstrakten Darstellungen in die Umgebung zur übertragen, als den Abgleich zwischen der kontaktanalogen Darstellung und der Umgebung herzustellen.

**Mini-AttrakDiff-Test:** Die Auswertung des Mini-AttrakDiff (siehe Abbildung 7.50) zeigt, dass die Experten der *visionären* Variante im Vergleich zur *klassischen* Variante eine deutlich höhere hedonische Qualität, jedoch ein geringere pragmatische Qualität zuordnen.

## 7. Kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen

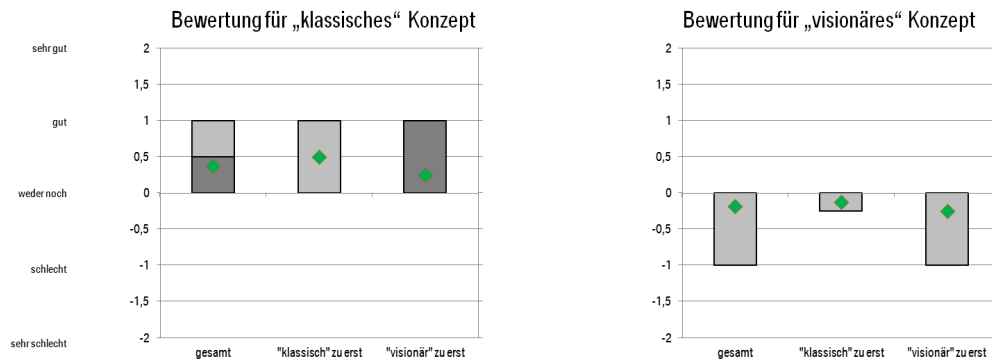


Abbildung 7.49.: Auswertung: Die dargestellten Informationen lassen sich in die Umwelt übertragen

Die kontaktanaloge Darstellungsform weckt bei den Probanden somit mehr Begehrlichkeit als die *klassische* Darstellungsform. Die technische Umsetzung zeigt jedoch aufgrund der fehlerhaften Kartendaten und unzureichenden Umgebungssensoren Mängel auf. Diese Mängel sind bei der *klassischen* Variante nicht wahrnehmbar. Da die Mängel teilweise zu Verwirrung führen können, unterstützt beim aktuellen Reifegrad des Prototyps die *klassische* Variante besser bei der Navigationsaufgabe.

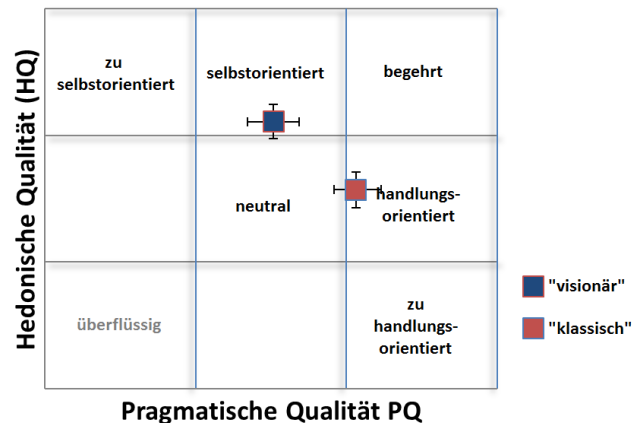


Abbildung 7.50.: Auswertung des Mini-AttrakDiff-Tests während der Expertenstudie

**Subjektive Beurteilung:** Die subjektive Beurteilung der Experten stellt das letzte Bewertungskriterium dar. Die einzelnen positiven und negativen Anmerkungen wurden klassifiziert und nach der Anzahl der Nennung sortiert. Während im Simulator die Markierung des optimalen Fahrstreifens gelobt wurde (siehe Abschnitt 7.3), wird die Markierung im umgesetzten Prototyp stark kritisiert. Für einen Großteil der Experten (13 von 16) führt die Markierung des optimalen Fahrstreifens aufgrund der ungenauen Umgebungsinformationen zu unruhigen Anzeigen mit einem zu hohem Dynamikanteil. Die gewählte Darstellungsvariante der Fahrstreifenmarkierung gibt in dieser Form direkte Rückmeldung

über die Erkennungsqualität der verwendeten Frontkamera. Dieser Effekt wird durch den frühen Aufschaltzeitpunkt der Fahrstreifenführung verstärkt (6 von 16).

Die Art der Darstellung des Manöverimpulses wird teilweise kritisiert. Einige Experten (7 von 16) sehen in der großen, flächigen Ausdehnung des "Fahrteppichs" vor allem bei geringer Umgebungsbeleuchtung eine mögliche Blendungsgefahr. Der Großteil der Experten (13 von 16) lobte jedoch auch den Manöverimpuls und dessen gute perspektivische Darstellung, welche dadurch den Tiefeneindruck beim Betrachter verstärkt. Zusätzlich sind dadurch der Ort und die Richtung des nächsten Manövers sehr gut erkennbar. Das Zusammenspiel der einzelnen Elemente sowie die Auflösung der kontaktanalogen Darstellung wurden ebenfalls positiv bewertet (5 von 16).

Trotz leichter Verwirrungen bezüglich der Bedeutung der Fahrstreifenführung und des Fahrstreifenwechselhinweises (6 von 16) wurden die Metapher der Fahrstreifenführung sowie der aktive Handlungscharakter der kontaktanalogen Hinweise gelobt (7 von 16).

**Fazit:** Der abschließende Versuch im Realfahrzeug hat deutlich gezeigt, dass die Stärke der kontaktanalogen Darstellung zugleich die größte Schwäche der kontaktanalogen Darstellung ist. Durch die Art der Darstellung werden Fehler im Gesamtsystem, wie beispielsweise bei der digitalen Karte oder den Umgebungssensoren, sofort und direkt negativ für den Benutzer sichtbar. Dadurch beeinträchtigen bereits kleinste Fehler maßgeblich das wahrgenommene Erlebnis des Fahrers.

Die Anzeigen wurden trotz der erwähnten Einschränkungen in der prototypischen Umsetzung im Versuchsträger positiv hinsichtlich der hedonischen Qualität bewertet. Dies untermauert das vorhandene Potential der kontaktanalogen Darstellung von Navigationsanzeigen.

Darüber hinaus wurden die Anzeigen auch mit den angesprochenen Schwächen in der Umsetzung nicht wesentlich schlechter bewertet. In einigen Fragestellungen wurde die umgesetzte *visionäre* Darstellungsvariante vor allem im Erstkontakt ähnlich gut bewertet wie die *klassische* Darstellungsvariante, welche bereits im Verlauf der Entwicklungsjahre mehrfach optimiert wurde und somit den bestmöglichen Stand der Technik darstellt.

## 7.7. Zusammenfassende Konzeptbewertung und Machbarkeitsaussage

Alle durchgeführten Versuche bestätigen die getroffene Annahme, dass die Verwendung der kontaktanalogen Darstellung ein großes Potential für die Verbesserung der bisherigen visuellen Navigationshinweise besitzt. Sowohl im Fahrsimulator als auch im Realfahrzeug wurde dieses Potential stets von den Probanden wahrgenommen und genannt.

Jedoch wurde bereits im ersten Versuch deutlich, dass die kontaktanaloge Darstellung eine hohe Anforderung an das Gesamtsystem stellt, um ein entsprechend wertiges Erlebnis für den Fahrer zu erschaffen. Bereits eine leichte Abweichung zwischen Darstellung und Realität führt zu einer ablehnenden Haltung der Probanden gegenüber dieser neuen Art der Darstellung.

Im zweiten Versuch wurden die notwendigen Anforderungen für ein wertiges Gesamtsystem näher eingegrenzt. Die Umgebung, vor allem die Begrenzung der Fahrstreifen, muss sehr gut erkennbar sein. Die maximale Abweichung darf 3 % nicht überschreiten.

Da zudem bei der gewählten technischen Realisierung der kontaktanalogen Anzeigen ebendiese nur fahrzeugfest, aber nicht weltfest platziert werden, müssen Abweichungen aufgrund der Fahrzeugeigenbewegungen gut erkannt und ausgeglichen werden. Zudem muss die gesamte Verarbeitung aller Informationen sehr schnell sein. Die Probanden haben lediglich eine Latenzzeit in der Anzeige toleriert, die kleiner 60 ms ist.

Diese Anforderungen konnten im dritten Versuch, dem ersten Versuch im Realfahrzeug, bestätigt werden. Vor allem die Nickbewegungen des Fahrzeuges müssen für ein gutes Erlebnis ausgeglichen werden. Von den getesteten Varianten wurde der Nickwinkelausgleich auf Basis der dynamischen Nickwinkelberechnung aus der Längsbeschleunigung von den Probanden am besten bewertet. Dieses Verfahren ist sehr schnell und präzise, da es nur die Brems- und Beschleunigungsbewegungen des Fahrzeuges ausgleicht. Jedoch wurde der fehlende Ausgleich der Nickbewegungen aufgrund von Bodenunebenheiten von den Probanden nicht bemerkt.

Der große technische Hub, der für die Übertragung der Anzeigen vom Fahr Simulator auf den Prototyp im Versuchsträger notwendig war, hat sich gelohnt. Denn einerseits konnten dadurch auch Versuche im Fahrzeug stattfinden und die Anzeigen in realen Straßensituationen erlebt werden, und andererseits hat die Auswertung der Expertenstudie deutliche Unterschiede hinsichtlich der Bewertung von kontaktanalogen Navigationsanzeigen offenbart. Im ersten durchgeführten Versuch im Fahr Simulator wurde die kontaktanaloge Variante deutlich besser bewertet, als die klassische Vergleichsvariante. Während im vierten Versuch im Versuchsträger die prototypische Realisierung der kontaktanalogen Darstellung wegen der systembedingten Schwächen nur noch auf gleicher Höhe mit der klassischen Vergleichsvariante bewertet wurde.

Ein Vergleich der Mini-AttrackDiff-Test-Ergebnisse zwischen der Potentialanalyse im Fahr Simulator sowie der Konzeptbewertung im Versuchsträger gibt mehr Einblick in die unterschiedliche Bewertung, die sich im Fahr Simulator und Realfahrzeug ergeben hat. Die kontaktanaloge Variante zeigt sowohl im Fahr Simulator als auch im Versuchsträger eine sehr hohe hedonische Qualität. Allerdings nimmt die pragmatische Qualität auf dem Weg vom Fahr Simulator zum Versuchsträger deutlich ab. Hier zeigen sich erneut die harten Anforderungen an die Umsetzung einer guten kontaktanalogen Darstellung deutlich im Fahrzeug. In der Fahr Simulation gibt es perfekte Sensoren und Kartendaten mit nahezu keinerlei Latenzzeiten, während im Versuchsträger die Sensoren schlechtere Ergebnisse liefern, die Kartendaten ungenauer sind und das Gesamtsystem mit Latenzzeiten kämpfen muss.

Jedoch haben die beiden Versuche im Realfahrzeug gezeigt, dass es zumindest prototypisch möglich ist, auf Basis aktueller Fahrzeugsensoren und digitalen Kartendaten, ein entsprechendes kontaktanaloges Erlebnis für den Fahrer zu erzeugen.

### 7.8. Anzeigekonzept 2.0

Das verwendete Anzeigekonzept spielt eine wesentliche Rolle bei der Überwindung der aufgezeigten technischen Hürden. Für die kontaktanaloge Darstellung wird ein Anzeigekonzept benötigt, welches zum einen die Stärken der Darstellungsform, wie die intuitive Darstellung von Entfernungen und Richtungen, ausspielt, und zum anderen die Schwächen, wie die fehlerbehafteten Umgebungsinformationen und störenden Fahrzeug-

eigenbewegungen, verschleiert.

Nachfolgend wird beschrieben, wie das vorgestellte Anzeigekonzept überarbeitet werden kann, um mit der gleichen Realisierung ein besseres kontaktanaloges Navigationserlebnis für den Fahrer zu erschaffen.

### 7.8.1. Schwächen der ursprünglichen Implementierung

Die durchgeführten Versuche im Fahrsimulator und Versuchsträger haben Schwächen in der ersten Umsetzung der kontaktanalogen Navigationsanzeigen offenbart. Der Prototyp zeigte aufgrund der Ungenauigkeit der Kartendaten, der Positionsbestimmung des Fahrzeuges sowie der Fahrzeugeigenbewegungen oft Defizite bei der exakten Überlagerung der Realität mit den Anzeigen. Dieser Effekt wird vor allem dann verstärkt, wenn die virtuellen Elemente an reale Objekte angrenzen oder diese gänzlich überlagern, da diese dann direkt unterbewusst miteinander verglichen werden.

Ein weiterer Kritikpunkt, der in den Studien aufgedeckt wurde, ist die Langzeitwirkung dauerhafter, kontaktanaloger Anzeigen. Da der Prototyp vor allem Begehrlichkeit wecken und bereits auf den ersten Blick begeistern sollte, wurden die kontaktanalogen Anzeigen dauerhaft angezeigt, sobald das Fahrzeug den entsprechenden Abstand zum Manöver unterschritten hatte. Beim Erstkontakt mit kontaktanalogen Anzeigen bekräftigt dies den gewünschten Effekt und führt zu Begeisterung. Bei längerer Nutzung werden diese dauerhaften Anzeigen allerdings schnell als störend wahrgenommen, da sie teilweise andere Verkehrsteilnehmer überdecken, stellenweise unruhig wirken und unterbewusst die Aufmerksamkeit zu lange auf sich ziehen.

Da der aufgebauten Prototyp auf dem Prinzip des stehenden virtuellen Bildes basiert, konnte der 3D-Eindruck nur mit Hilfe monokularer Tiefenkriterien erzeugt werden. Dadurch war es stellenweise schwer, die kontaktanalogen Elemente von den gleichzeitig dargestellten Piktogrammen, Entfernungs- und Geschwindigkeitsangaben zu unterscheiden. Die dargestellten Elemente in der 2D Bildebene wurden als kontaktanaloge Elemente in entsprechender Entfernung vor dem Fahrzeug wahrgenommen.

Zusammenfassend können die folgenden Punkte als Hauptkritikpunkte für das Erlebnis identifiziert werden:

- Unterscheidung zwischen klassischen und kontaktanalogen Elementen
- Fehlerhafte Überdeckung der realen Objekte mit virtuellen Elementen
- Dauerhafte Anzeigen der kontaktanalogen Objekte

### 7.8.2. Überarbeitung des Anzeigekonzepts

Das überarbeitete Anzeigekonzept 2.0 verwendet die gleichen Navigationselemente. Es basiert weiterhin auf einer Manöveranzeige in Piktogramform, einem animierten Übergang in die kontaktanaloge Darstellung, einer visuellen kontaktanalogen Hervorhebung des optimalen Fahrstreifen, einem kontaktanalogen Manöverimpuls am Manöverort sowie einer animierten Auflösung der kontaktanalogen Darstellung. Allerdings werden diese Elemente entsprechend verändert und angepasst, um die oben genannten Kritikpunkte zu adressieren. Kritikpunkt zwei und drei aus der obigen Liste werden mit verschiedenen

## 7. Kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen

---

Veränderungen entkräftet. Statt kontinuierlicher Anzeigen wird mit kurzen Impulsen gearbeitet. Darüber hinaus werden keine realen Markierungen nachgezeichnet. Stattdessen liegen die Anzeigen in der Mitte des Fahrstreifens. Dadurch verzeiht das System mehr Fehler.

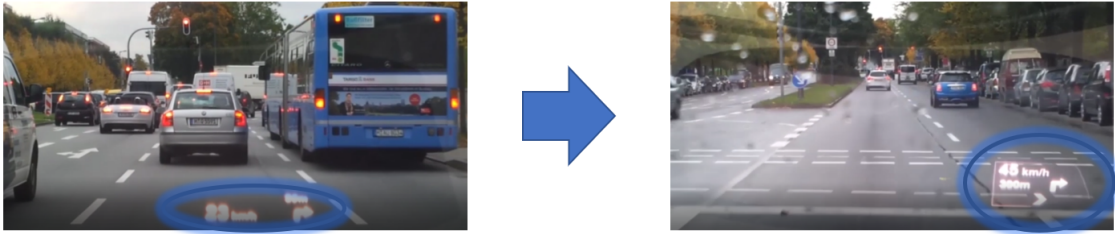


Abbildung 7.51.: Klassische nicht-kontaktanaloge Elemente wandern in neues Dock

**Dock für klassische Anzeigeelemente:** Mit dem in Abbildung 7.51 dargestellten Dock wird ein Sammelplatz für alle nicht-kontaktanalogen Elemente geschaffen und der erste Kritikpunkt adressiert. Dieses Dock ist durch die Einfärbung des Hintergrundes sowie die klare Außenkante deutlich als virtuelle aber doch klassische Anzeigefläche vor dem Fahrzeug zu erkennen. Alle klassischen Elemente im HUD, wie die aktuelle Geschwindigkeit, die Entfernungsangabe zum Manöver, der Manövervorhinweis sowie Fahrstreifenwechselhinweise als Piktogramme, finden in diesem Dock ihren Platz. Wie bereits im ursprünglichen Anzeigekonzept verwandeln sich die klassischen Anzeigeelemente mittels Animation in ihre kontaktanaloge Variante. Allerdings beginnt diese Animation bereits innerhalb des Docks. Die klassischen Elemente blinken kurz auf und verlassen anschließend das Dock, bevor sie sich in ihre kontaktanaloge Form verwandeln. Dies unterstützt zusätzlich die klare Trennung zwischen den beiden Anzeigeformen.



Abbildung 7.52.: Animationsbeispiel des überarbeiteten Fahrstreifenwechselhinweises

**Fahrstreifenwechselhinweis als kurzer Impuls:** Abbildung 7.52 zeigt den Ablauf des überarbeiteten Fahrstreifenwechselhinweises. Im Gegensatz zum ursprünglichen Konzept wird nicht mehr der Rand des optimalen Fahrstreifens markiert. Stattdessen läuft ein kurzer Impuls entlang der Mitte des optimalen Fahrstreifens. Diese Veränderung bietet mehrere Vorteile. Der neue Fahrstreifenwechselhinweis wirkt durch die Animation dynamischer und zieht dadurch nochmals kurzfristig die Aufmerksamkeit gezielt auf den optimalen Fahrstreifen. Die Animation verläuft in der Mitte des Fahrstreifens. Dadurch findet kein automatischer Abgleich mit den realen Fahrstreifenmarkierungen mehr statt und es



werden größere Abweichungen in der Verortung des Fahrstreifens durch den Benutzer toleriert. Die Anzeigen sind nur sehr kurz aktiv. Der eigentlich Impuls dauert eine Sekunde, und zwischen zwei Impulsen befinden sich zwei Sekunden Pause in der Darstellung. Durch die Animation weckt die Anzeige weiterhin Begeisterung, aber durch die kurze Darstellungszeit und die Pause dazwischen ermüdet die Anzeige nicht im langfristigen Betrieb. Als letztes Element wird mit der farblichen Gestaltung des Impulses gearbeitet. Solange der Impuls einen Hinweis darstellt, ist er blau eingefärbt. Sobald der Fahrer den Fahrstreifen gewechselt hat, gibt es zur Bestätigung nochmals einen letzten Impuls, der nun in Grün eingefärbt ist und über den eigenen Fahrstreifen nach vorne läuft.



Abbildung 7.53.: Überarbeitung des Manöverimpuls



Abbildung 7.54.: Animierter Übergang von Manöverimpuls zu Richtungspfeil

**Freigestellter Manöverimpuls:** Auch der Manöverimpuls wird, wie in Abbildung 7.53 und 7.54 dargestellt, überarbeitet. Da nicht mehr die Ränder des optimalen Fahrstreifens nachgezeichnet werden, startet die Aufbauanimation des Manöverimpulses nun in der Mitte des Fahrstreifens. Zunächst wird aus der Mitte des Fahrstreifens ein Rechteck über bis zu 65 % der Fahrstreifenbreite aufgespannt. Dadurch wird, wie schon beim Manöverimpuls, der automatische Abgleich mit den realen Fahrstreifenmarkierungen verhindert. Danach wächst aus diesem Rechteck der eigentliche Manöverimpuls in einer stark abstrahierten Pfeilform. Dabei zeigt die Spitze des Pfeils in Richtung des Manövers und gibt dem Fahrer die notwendige Orientierung, in welche Richtung er fahren muss. Sobald das eigene Fahrzeug den erzeugten Manöverimpuls befahren hat, wird der kontaktanaloge Manöverimpuls, wie in Abbildung 7.54 dargestellt, abgebaut und in einen Richtungspfeil verwandelt. Dabei verschwindet der Manöverimpuls und es entsteht ein liegender Richtungspfeil, der anschließend nach oben geklappt wird und in die entsprechende Abbiegerichtung zeigt.



## **Teil III.**

# **Zusammenfassung und Ausblick**



## 8. Zusammenfassung und Ausblick

Neben der überaus spannenden und herausfordernden Analyse der kontaktanalogen Darstellung von Navigationshinweisen im realen Straßenverkehr wurden im Rahmen dieser Arbeit noch zahlreiche weitere Erkenntnisse im Bereich der Wegführung erlangt. Die Basis für all diese Erkenntnisse und Prototypen stellt das in Kapitel 4 vorgestellte Softwareframework CORONA dar. Sämtliche, für die Wegführung notwendige Komponenten wurden im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe von CORONA erarbeitet und umgesetzt.

All dies diente dem Ziel der Evaluierung der kontaktanalogen Darstellung von Navigationshinweisen. Um die Ergebnisse in den Kontext der aktuellen Entwicklungstätigkeiten bei der BMW Group im Bereich Navigation, Anzeige- und Bedienkonzepte sowie Anzeigetechnologien zu setzen, basiert die prototypische Umsetzung auf Sensoren, Navigationsdaten sowie Anzeigetechnologien, welche in heutigen Fahrzeugen bereits verfügbar sind.

Trotz dieser bewussten Einschränkung konnte ein Prototyp erarbeitet werden, mit welchem die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen in realen Straßensituationen interaktiv erlebbar gemacht wurde. Das heißt, mit Hilfe des Prototyps kann diese neue Form der Darstellung an beliebigen Orten mit den verschiedensten Straßensituationen erlebt und getestet werden.

Mit Hilfe von Testfahrten und durchgeführten Expertenstudien konnten die Schwachstellen des ursprünglichen Anzeigekonzeptes für die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen identifiziert werden. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse während der Bearbeitung konnte ein neue Version des Anzeigekonzeptes abgeleitet werden, welche bewusst diese Schwachstellen adressiert und entsprechende Lösungsmöglichkeiten anbietet.

Nachfolgend werden die Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt. Zum Abschluss der Arbeit werden im Ausblick zum einen Empfehlungen für weitere Arbeiten, basierend auf Erkenntnissen dieser Arbeit, gegeben und zum anderen weitere technologische Felder angesprochen, welche ebenfalls einen Beitrag zur Verbesserung des hier vorgestellten Erlebnisses der kontaktanalogen Navigationsanweisungen leisten könnten.

### 8.1. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde zunächst ein Überblick über den aktuellen Stand der Technik in den Bereichen Augmented Reality, Fahrzeugnavigation sowie Head-up-Display Technologie präsentiert, da diese die Grundlage für den Kern der Arbeit darstellen.

## Grundlagen Augmented Reality

Mit Augmented Reality (AR) kann eine neue Form der Mensch-Maschine-Interaktion realisiert werden, welche sich durch seinen Charakter von Virtual Reality abgrenzt und dadurch auch für den Einsatz im Fahrzeug geeignet sein sollte. Im Wesentlichen basiert ein AR-System auf den Komponenten Tracking, AR-Software und Anzeigesystem.

Für die Realisierung eines unmittelbaren AR-Systems im Fahrzeug können Head Mounted Displays und Head-up-Displays verwendet werden. Im Falle der videobasierten Augmented Reality, der Überlagerung eines Videobildes, können das zentrale Informationsdisplay sowie das Kombidisplay als weitere Anzeigorte verwendet werden. Zum Zeitpunkt der Erstellung sind bereits einige AR-Anwendungen im Fahrzeug bekannt. Alle diese Arbeiten zeigen deutlichen Forschungscharakter oder beschränken sich auf die Form der Video-AR.

Diese Arbeit hat den Schwerpunkt auf die Umsetzung eines AR-Systems mit Hilfe eines Head-up-Displays sowie aktuell vorhandener Kartendaten und Sensorsysteme gelegt. In Kapitel 2.1 wurden sowohl die Grundlagen der Augmented Reality beschrieben, als auch bekannte Beispiele im automobilen Umfeld vorgestellt.

## Grundlagen Navigation

Die Navigation stellt mit der Kombination aus Positionsbestimmung, Routenberechnung und Zielführung einen weiteren Kern dieser Arbeit da. Der aktuelle Stand der Technik im Bereich Navigation wurde in Kapitel 2.2 zusammengefasst und präsentiert.

**Digitale Karte** Die Grundlage für alle Navigationsfunktionen ist die digitale Karte, in welcher das Straßennetzwerk in Form eines Graphen mit Knoten und Kanten abgebildet wird. Für die Umsetzung der beschriebenen Prototypen in dieser Arbeit wurde auf eine Navigationskarte im NDS-Format zurückgegriffen. Das NDS-Format ist ein standardisiertes Format für Navigationskarten welches von verschiedenen Anbietern von digitalen Karten, Systemkomponenten und Fahrzeugen verwendet wird. Um die neue Art der Wegführung in Form der aktiven Fahrstreifenführung realisieren zu können, wurde auf die erweiterten Fahrstreifeninformationen zurückgegriffen.

**Verwendete Koordinatensysteme** Desweiteren wurden die verschiedenen Koordinatensysteme vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden. Mit Hilfe des Fahrzeugkoordinatensystems kann die lokale Bewegung des Fahrzeuges verfolgt werden. Darüber hinaus liefern die Sensoren des Fahrzeuges ihre Signale ebenfalls im Fahrzeugkoordinatensystem. Für digitale Karten wird in der Regel ein globales Koordinatensystem mit Längen- und Breitengraden verwendet. Dieses teilt die Erdoberfläche analog zu einer Kugeloberfläche in gleichmäßig verteilte Streifen ein, welche durch die Angabe Ihrer Gradzahl adressiert werden können. Diese ellipsoidischen Koordinaten der Kugeloberfläche können mit Hilfe einer Projektion in die Ebene abgebildet werden. Dies erlaubt die Verwendung von kartesischen Berechnungsmethoden. Eine weitverbreitete Methode dieser Transformation stellt die *Mercator-Projektion* dar.

**Positionsbestimmung** Damit die Karte für Navigationsanwendungen verwendet werden kann, muss die aktuelle Fahrzeugposition in der Karte abgebildet werden. Dazu muss zum einen die Position des Fahrzeuges bestimmt und diese Position zum anderen in die Karte übertragen werden. Für die Positionsbestimmung sind verschiedene Verfahren bekannt. Im Allgemeinen wird eine Kombination dieser verwendet um ihre jeweiligen Nachteile ausgleichen zu können.

Das bekannteste Verfahren zur Positionsbestimmung des Fahrzeuges stellt das Global Positioning System (GPS) dar. GPS basiert auf der Signallaufzeitmessung zwischen dem GPS-Empfänger im Fahrzeug und verschiedenen Satelliten im Weltraum. Da die Position dieser Satelliten bekannt ist, kann die Position des Fahrzeuges anschließend durch Triangulation bestimmt werden. Da GPS aufgrund von Signal-Abschattung in Tunneln und Häuserschluchten nicht verfügbar ist, wird es oft gemeinsam mit der Koppelnavigation verbunden. Die Koppelnavigation basiert auf der Integration des zurückgelegten Weges des Fahrzeuges, der sogenannten Trajektorie. Der zurückgelegte Weg lässt sich dabei mit Hilfe spezieller Sensoren und Fahrzeugbewegungsmodellen bestimmen.

Die Abbildung der bestimmten Fahrzeugposition in der digitalen Karte wird als Map-Matching bezeichnet. Das Ergebnis des Map-Matching-Schritts ist die abgebildete Position innerhalb der digitalen Karte in Form einer ausgewählten Kante im Straßengraphen sowie der Entfernung vom Startpunkt dieser Kante.

**Routenberechnung und Wegführung** Die Routenberechnung bestimmt im Anschluss einen möglichen Pfad innerhalb des Straßengraphen zwischen der aktuellen Position und dem eingegebenen Ziel. Dabei können verschiedene Verfahren verwendet werden, welche unterschiedliche Kriterien betrachten können. Im Rahmen dieser Arbeit diente die Route nur als Grundlage für die anschließende Bestimmung der notwendigen Manöver und musste daher keine besonderen Anforderungen erfüllen. Daher wurde der weit verbreitete *A\*-Algorithmus* verwendet.

Mit Hilfe der Wegführung wird der Fahrer zum Abschluss entlang der bestimmten Route zu seinem Ziel geführt. Dazu werden zunächst die notwendigen Manöver entlang der Route bestimmt. Jedes Manöver ist definiert durch seinen Typ, den Aufschaltzeitpunkt und die zugehörige Manöverphase. Basierend auf der Manöverphase werden dem Fahrer verschiedene Navigationshinweise in unterschiedlichen Ausprägungen und mit variierenden Dringlichkeiten präsentiert. Die verschiedenen grafischen Elemente der einzelnen Manöverphasen wurden am Beispiel eines aktuellen Navigationssystems vorgestellt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurden diese klassischen Elemente hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit mittels Augmented Reality analysiert.

### **Grundlagen Head-up-Display**

Seit 2003 bietet BMW Fahrzeuge mit Head-up-Display an. Allerdings ist die verfügbare Anzeigengröße in aktuellen HUD-System noch begrenzt. Daher können dem Fahrer gegenwärtig nur die notwendigsten Informationen im HUD dargestellt werden. Zu diesen Informationen gehören beispielsweise die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit, Warnmeldungen, Rückmeldungen der verbauten Fahrerassistenzsysteme sowie abstrahierte Wegführungsanzeigen.

In Kapitel 2.3 wurde dazu ein Überblick über die zugrundeliegende Technologie im Bereich der klassischen Strahlenoptik sowie im allgemeinen Aufbau der HUD-Komponente präsentiert. Darüber hinaus wurden die optischen Eigenschaften und Effekte des HUD beschrieben.

Aktuell wird an einem nächsten Meilenstein im Bereich der Head-up-Display Technologie gearbeitet: dem kontaktanalogen Head-up-Display. Beim kontaktanalogen Head-up-Display wird beim Betrachter der Eindruck geweckt als würden Anzeigen und Umgebung verschmelzen. Dadurch ist es möglich, Navigationshinweise dort zu platzieren, wo sie benötigt werden: direkt auf der Straße (siehe Abbildung 1.3 und 2.44).

Es existieren verschiedene Realisierungsformen von kontaktanalogen HUD-Systemen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die drei Varianten *stehendes* Bild, *liegendes* Bild und *stereoskopische* Darstellung vorgestellt. Für den umgesetzten Prototyp wurde die Variante *stehendes virtuelles* Bild unter Ausnutzung monokularer Tiefenkriterien gewählt.

### **Anzeigeorte im Fahrzeug und übergeordnetes Anzeigekonzept**

Neben dem HUD stehen zwei weitere Anzeigeflächen im Fahrzeug zur Verfügung: das zentrale Informationsdisplay sowie das Kombi-Instrument (siehe Abbildung 3.1). Dabei werden das zentrale Informationsdisplay hauptsächlich für Infotainmentanwendungen und das Kombi-Instrument als traditionelle primäre Anzeigefläche für die Darstellung von Informationen zum Fahrzeug und für die Fahraufgabe benutzt. Im HUD werden dem Fahrer auf abstrahierte Art und Weise alle notwendigen Informationen für die Fahr- und Navigationsaufgabe präsentiert.

Damit die verschiedenen Anzeigefläche optimal genutzt werden können, wurde im Rahmen dieser Arbeit, angelehnt an die Verteilung der primären, sekundären und tertiären Aufgaben im Fahrzeug sowie die räumliche Aufteilung der Anzeigen im Fahrzeuginnenraum, ein übergeordnetes Anzeigekonzept für die Darstellung von Navigationshinweisen erarbeitet. In diesem Konzept wandern die Informationen gemäß ihrer Wissensdomäne vom zentralen Informationsdisplay über das Kombi-Instrument hin zum HUD. Die später vorgestellten Konzepte setzen den Schwerpunkt dabei auf die Präsentation des Handlungswissens, also der direkten Hinweise des Navigationssystems an den Fahrer, sodass dieser sein Ziel erreichen kann.

### **Softwareframework für prototypische Implementierung**

Diese Arbeit hatte den Anspruch, alle erarbeiteten und vorgestellten Konzepte auch im Fahrzeug zu realisieren und erproben. Für die Umsetzung im Fahrzeug wurde das *Component framework for Research Of Navigation* oder kurz CORONA verwendet. CORONA entstand in der Gruppe *Navigation- und Datendienste* der *BMW Forschung und Technik GmbH*.

Bei CORONA handelt es sich um eine auf *OSGi* und *RCP* basierte Entwicklungsumgebung und Plattform zur Realisierung von Navigationsfunktionen. Die bereits verfügbaren Komponenten, welche die Basisfunktionen der Navigation realisieren, stellen den Vorteil von CORONA dar. Dadurch ist es nicht notwendig, erneut den Kartenzugriff, die Routenberechnung oder die Positionierung zu implementieren.

Im Rahmen dieser Arbeit mussten daher lediglich die beiden Komponenten *Guiding-Renderer* und *Guiding-Modul* implementiert und entsprechend angepasst werden.



Das *Guiding-Modul* ist für die Extraktion der relevanten Fahrmanöver auf Basis der aktiven Route sowie für den Abgleich der aktuellen Position mit dem Verlauf der Route verantwortlich. Im *Guidance-Renderer* ist die Erzeugung der visuellen Navigationshinweise sowie die auf die Position abgestimmte Präsentation dieser Hinweise an den Fahrer implementiert.

Die Reife und Qualität dieser beiden Komponenten ist so gut, dass diese nicht nur für die Realisierung und Evaluierung der Anzeigekonzepte dieser Arbeit verwendet wurden, sie wurden auch benutzt, um mögliche klassische Anzeigekonzepte für aktuelle Serienfahrzeuge - wie beispielsweise die Navigationsdarstellung im HUD und CID der aktuellen 7er und 5er BMW Modelle - im Vorfeld zu erleben, bewerten und anzupassen.

### **Anzeigekonzept I: ein fotobasiertes AR-Navigationssystem**

Im Rahmen einer Abschlussarbeit wurde ein fotobasiertes AR-Navigationssystem analysiert, umgesetzt und bewertet. Dieses System erzeugt abstrakte, visuelle Navigationshinweise in Piktogrammform, basierend auf den zukünftigen Fahrmanövern. Darüber hinaus werden von entsprechenden Datenbanken Fotos der jeweiligen Verkehrssituation abgerufen. Abschließend wird dem Fahrer zum jeweiligen Zeitpunkt eine Überlagerung der Fotos mit den Navigationshinweisen präsentiert.

Im Vorfeld der Umsetzung wurden die verfügbaren Datenbanken für georeferenzierte Fotos analysiert. Für die Umsetzung fiel die Wahl auf die Datenbank von Google Streetview. Es wurden verschiedene Verfahren zur Auswahl und Verwendung des richtigen Fotos, Bildausschnittes und der Perspektive analysiert. Die Umsetzung verwendete für die Darstellung der Verkehrssituation Fotos in einer Vogelperspektive. In einer weiteren Voranalyse wurden die verschiedenen Verfahren zur Erzeugung von Navigationshinweisen in Piktogrammform sowie deren Platzierung im Bild analysiert. Durch die Verwendung von räumlichen Pfeildarstellungen im oberen Bereich des Bildes konnte zum einen eine gute Erkennbarkeit des Manövers erreicht werden und zum anderen wurde der dargestellte Pfeil nicht direkt mit der Umgebung abgeglichen. Kleinere Abweichungen zwischen der abgebildeten Straßensituation im Foto und dem räumlichen Verlauf des Pfeils konnten dadurch verschleiert werden.

Das umgesetzte Konzept wurde zum Abschluss in einer Expertenstudie mittels Fragebogen und AttrakDiff-Test bewertet. Die Auswertung der Fragebogen hat ergeben, dass es möglich ist, Bezugspunkte für die Orientierung in den dargestellten Fotos zu erkennen. Jedoch konnte der Mehrwert durch die Überlagerung dieser Fotos mit den Navigationshinweisen nicht bestätigt werden. Nur ein kleiner Teil der Probanden hat sich durch dieses System besser vorbereitet gefühlt. Etwaige Fahrstreifenwechsel konnten nicht anhand der präsentierten Anzeigen abgeleitet werden.

Eine ähnliche Bewertung zeigt auch die Auswertung des AttrakDiff-Tests. Das System wird allgemein neutral mit einem leicht positiven Trend bewertet. Die Beurteilung der pragmatischen Qualität spiegelt die Tatsache wieder, dass das vorgestellte System seinen Zweck erfüllt und eine leichte Unterstützung bei der Wegführung bietet. Das System hat vor allem im Bereich der pragmatischen Qualität Verbesserungspotential.

### **Anzeigekonzept II: Verwendung von Orientierungspunkten in Navigationsanweisungen**

In einer weiteren Abschlussarbeit wurde analysiert, ob sich bestehende Navigationsanweisungen durch die Verwendung von Orientierungspunkten verbessern lassen können und ob solch ein System bereits mit heutigen Kartendaten umsetzbar ist.

Zunächst wurden die verfügbaren Quellen von Orientierungspunkten analysiert und anschließend in den bestehenden Prototyp integriert. Zum einen wurden die bestehenden fotobasierten AR-Navigationsanzeigen um diese Orientierungspunkte erweitert. Und zum anderen wurden die Entfernungsangaben durch die Verwendung der Orientierungspunkte natürlicher gestaltet.

Zum Abschluss wurde der entsprechend erweiterte Prototyp mit Hilfe einer Expertenstudie evaluiert. Analog zur Bewertung des ersten Konzeptes wurden ebenfalls Fragebogen und MiniAttrakDiff-Test verwendet. Die Auswertung der Fragebogen hat gezeigt, dass die Navigationsanweisungen durch die Kombination der hervorgehobenen Orientierungspunkte in den Fotos mit den natürlicheren Sprachansagen verständlicher und eindeutiger wurden. Dadurch kann dieses System dazu beitragen, die Fehlinterpretationen der Navigationshinweise durch den Benutzer zu reduzieren.

Die hohen Erwartungen an die Umsetzung im Prototyp wurden überwiegend erfüllt. Vor allem die Integration von Ampelanlagen in die Navigationsanweisungen hat zu einer positiven Bewertung des Systems geführt.

### **Anzeigekonzept III: Kontaktanaloge Darstellung der Navigationshinweise**

Der Schwerpunkt dieser Arbeit lag auf der kontaktanalogen Darstellung von Navigationshinweisen. Dazu wurden zunächst die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten von Augmented Reality in der Wegführung analysiert. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde anschließend ein Anzeigekonzept für die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen erarbeitet.

Dieses Anzeigekonzept verwendet symbolische Fahrstreifenwechselhinweise, kontaktanaloge Markierungen des optimalen Fahrstreifens, kontaktanaloge Manöverdarstellung am Manöverort und eine symbolische Abbildung des Manövers, sowie entsprechende Animationen als Übergänge zwischen den einzelnen Hinweisen und Darstellungsformen.

**Umsetzung im Fahrsimulator und Versuchsfahrzeug mit CORONA** Wie bereits die anderen beiden Anzeigekonzepte, wurde auch das kontaktanaloge Konzept mit Hilfe von CORONA realisiert. Für die spätere Evaluierung wurde sowohl eine Umsetzung im Fahrsimulator als auch im Versuchsträger geschaffen. Im Vorfeld dieser Umsetzung wurden die Anforderungen an Größe und Lage des virtuellen Bildes mit Hilfe theoretischer Betrachtungen und Reflektion am Anzeigekonzept analysiert.

Die Realisierung im Versuchsträger war aufgrund der Anforderungen sehr zeitaufwendig. Es musste ein spezieller HUD-Prototyp gemäß den Anforderungen konstruiert und aufgebaut werden. Für den späteren Einbau in einen Versuchsträger musste dieser entsprechend vorbereitet werden. Diese Zeit wurde genutzt, um das kontaktanaloge Anzeigekonzept mit Hilfe der CORONA Umgebung zum einen umzusetzen und CORONA zum anderen an den Fahrsimulator anzubinden.

**Potentialanalyse im Fahrsimulator** Mit Hilfe dieser Anbindung konnte das umgesetzte Konzept zum ersten Mal in der virtuellen Welt des Fahrsimulators erlebt und bewertet werden. In einem ersten Versuch sollte das Potential der neuen kontaktanalogen Navigationsanzeigen untersucht werden. An diesem Versuch nahmen 27 Probanden teil. Die Probanden mussten verschiedene Navigationsmanöver in einer virtuellen Großstadt mit Hilfe zwei verschiedener Navigationsanzeigen meistern: zum einen der vorgestellten kontaktanalogen Variante (siehe Abbildung 7.25) und zum anderen einer klassischen Variante, angelehnt an aktuelle Navigationsanzeigen im Fahrzeug (siehe Abbildung 7.24). Um Reihenfolgeeffekte ausschließen zu können, erlebte eine Hälfte der Probanden die klassischen Anzeige zuerst und die andere Hälfte die kontaktanaloge Variante zuerst.

Mit Hilfe von Fragebögen, einem AttrakDiff-Test sowie der Auswertung der Probandenaussagen während der Fahrt wurden die beiden Konzepte bewertet. Die Auswertung ergab, dass beide Varianten von den Probanden positiv bewertet wurden. Die klassische Variante stellt somit eine faire Vergleichsvariante dar. Jedoch wurde die kontaktanaloge Variante stets positiver bewertet. Vor allem die Probanden, welche die kontaktanaloge Variante zuerst erlebt haben, haben die klassische Variante schlechter bewertet.

Die Probanden haben sich mit der kontaktanalogen Variante besser auf das Manöver und etwaige Fahrstreifenwechsel vorbereitet gefühlt. Beim Abbiegevorgang wurde die kontaktanaloge Variante leicht schlechter bewertet. Hier haben sich die Probanden einen befahrbaren Manöverimpuls gewünscht.

Der Versuch hat gezeigt, dass der Bezug zur Umwelt für die kontaktanalogen Anzeigen zugleich Fluch und Segen ist. Zum einen stellt er einen großen Vorteil dar: Die Probanden konnten die kontaktanalogen Anzeigen deutlich leichter in ihre Umgebung abbilden. Zum anderen den Probanden sind bereits kleine Abweichungen zwischen der Anzeige und der Umgebung negativ aufgefallen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit diesem Versuch das Potential der kontaktanalogen Navigationsanzeigen gegenüber den klassischen Navigationsanzeigen nachgewiesen werden konnte. Die meisten Probanden hatten in diesem Versuch zum ersten Mal Kontakt mit kontaktanalogen Anzeigen. Dies wurde durchweg als intensiv und sehr interessant beschrieben. Darüber hinaus wurde die Annahme bestätigt, dass kontaktanaloge Anzeigen durch Fehler in der Darstellung deutlich stärker negativ beeinträchtigt werden als klassische Anzeigen.

**Fehlertoleranz im Fahrsimulator** In einem zweiten Versuch mit demselben Aufbau im Fahrsimulator wurde die spezifische Toleranz der Probanden gegenüber einer fehlerhaften kontaktanalogen Darstellung analysiert. Dabei wurden eine fehlerhafte Fahrstreifenerkennung, sowie Latenzen im Nickwinkelausgleich und im Gesamtsystem als mögliche Ursachen für die fehlerhafte Darstellung getrennt betrachtet. Mit Hilfe dieses Versuches sollten die Anforderungen an ein System für die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen erarbeitet werden.

Neben den verschiedenen Fehlerursachen wurden zwei verschiedene Konzepte zur Markierung des Fahrstreifens bewertet: zum einen die Nachzeichnung der vorhandenen Fahrbahnmarkierungen und zum anderen die Markierung anhand eines Balkens in der Mitte des Fahrstreifens (siehe Abbildung 7.32). Daher wurden die 46 Probanden in zwei Gruppen aufgeteilt. Jede Gruppe bewertete unabhängig eine der beiden Anzeigekonzepte.

Während des Versuchs fuhren die Teilnehmer entlang eines Autobahnszenarios und sollten mehrfach den Fahrstreifen wechseln und zusätzlich beschleunigen und verzögern. Währenddessen wurden die verschiedenen Fehlerursachen in unterschiedlicher Ausprägung aufgeschaltet und die Probanden sollten die Anzeigen anhand der Kriterien *Nützlichkeit* und *Wertigkeit* bewerten.

Dieser Versuch hat gezeigt, dass die Kontaktanalogie fast keine Toleranz gegenüber fehlerhaften Darstellungen besitzt. Die Auswertung ergab, dass sowohl Nützlichkeit als auch Wertigkeit mit steigendem Fehler linear abnehmen. Dabei ist zu beobachten, dass der Anstieg beim Konzept *Balken* deutlich flacher verläuft, das Konzept also insgesamt mehr Fehler in der Darstellung verzeiht. Jedoch wird der Nutzen des Konzepts *Balken* insgesamt leicht schlechter bewertet und nur das Konzept *Fahrstreifen* im fehlerfreien Fall als wirklich nützlich bewertet.

Der Versuch hat gezeigt, dass das Gesamtsystem eine geometrische Abweichung der Fahrstreifenerkennung kleiner 3 % sowie Gesamtsystemlatenzzeiten kleiner 60 ms besitzen muss, um noch als nützlich und wertig empfunden zu werden.

Darüber hinaus hat der Versuch erneut gezeigt, dass sich die Probanden im Fahrsimulator sehr stark auf die Anzeige konzentrieren. Die Fahraufgabe wird zur Nebenaufgabe. Kleinste Fehler werden sofort entdeckt und als störend empfunden. Aus diesem Grund sollten die beiden letzten Versuche im Realfahrzeug stattfinden.

**Nickwinkelausgleich im Versuchsträger** Der dritte durchgeführte Versuch hatte das Ziel, die erreichbare Qualität des Nickwinkelausgleiches im Versuchsträger zu analysieren. Dazu wurden drei verschiedene Algorithmen zum Nickwinkelausgleich (gefilterte und ungefilterte Berechnung aus den Höhenstandssensoren des Fahrzeuges sowie die Ableitung der Längsbeschleunigung) implementiert und anschließend in einer Probandenstudie auf dem BMW Testgelände in Aschheim bewertet.

An dem Versuch nahmen insgesamt 36 Probanden teil. Die Probanden sahen während des Versuchs eine kontaktanaloge Darstellung der linken und rechten Fahrstreifenmarkierung (siehe Abbildung 7.42). Auf den beiden Geraden der Schnellfahrbahn M1 sollten die Probanden das System, analog zum zweiten Versuch im Fahrsimulator, mittels Brems- und Beschleunigungsvorgängen austesten und anhand einer sechsstufigen Skala bewerten.

Der Versuch hat die Ergebnisse der beiden Versuche im Fahrsimulator bestätigt. Die Variante ohne Nickwinkelausgleich wurde deutlich schlechter bewertet als die drei Varianten mit Nickwinkelausgleich. Allerdings wurde nur die dynamische Berechnung des Nickwinkels, basierend auf der Längsbeschleunigung des Fahrzeuges, gut bewertet. Vermutlich sind die Präzision und die geringe Latenz dieses Ausgleichs dafür verantwortlich. Allerdings lassen sich mit diesem Verfahren keine Nickwinkel basierend auf Straßenunebenheiten ausgleichen.

**Konzeptbewertung im Versuchsfahrzeug** Der letzte Versuch dieser Arbeit diente der Konzeptbewertung im Versuchsfahrzeug. Da der vorangegangene Versuch im Versuchsfahrzeug auf dem Testgelände gezeigt hat, dass die großflächige kontaktanaloge Darstellung ein erhöhtes Ablenkungsrisiko besitzt, wurden für den Versuch auf öffentlichen Straßen nur Experten der BMW Group mit entsprechender Fahrausbildung für Versuchsfahrzeuge zugelassen.

Die Experten erlebten während des Versuchs dieselben Anzeigekonzepte wie bereits im ersten Versuch im Fahrsimulator, allerdings nun in realen Verkehrssituationen und auf Basis der verfügbaren Fahrzeugsensoren sowie von Kartenmaterial. Der Versuch fand auf einem Rundkurs im Münchner Norden (siehe Abbildung 7.45) statt. Nach den Fahrten beurteilten die Experten die erlebten Anzeigen mittels Fragebogen und Mini-AttrakDiff-Test.

Dieser abschließende Versuch im Versuchsfahrzeug hat gezeigt, dass die Stärke der kontaktanalogen Darstellung zugleich ihre größte Schwäche ist. Die Auswertung der Fragebögen hat gezeigt, dass die Experten die erlebten kontaktanalogen Darstellungen deutlich abstrafte. Die kontaktanalogen Anzeigen boten im Vergleich zu den klassischen Anzeigen nur gleichermaßen gute beziehungsweise leicht schlechtere Unterstützung bei den Navigationsaufgaben. Die realisierte Qualität der Anzeigen im Prototyp erschwerte zudem die Übertragung der dargestellten Information in die Umwelt.

Allerdings hat der Mini-AttrakDiff-Test erneut gezeigt, dass die kontaktanalogen Anzeigen, auch in der realisierten Ausprägung im Versuchsträger eine deutlich bessere hedonische Qualität liefern. Die Anzeigen wissen zu begeistern und wecken eine gewisse Begehrlichkeit. Lediglich die Schwächen in der Umsetzung führen zu einer verringerten pragmatischen Qualität.

**Zusammenfassende Konzeptbewertung und Anzeigekonzept 2.0** Zusammenfassend lässt sich sagen, dass alle durchgeführten Versuche das Potential der kontaktanalogen Anzeigen gegenüber klassischen Anzeigen unterstrichen haben. Allerdings hat dieses Potential seinen Preis: extrem hohe Anforderungen an das Gesamtsystem. Die Position des Fahrzeuges muss exakt bestimmt werden, der Verlauf der Fahrbahn vor dem Fahrzeug muss sehr genau bekannt sein, die Fahrzeugbewegungen müssen in der Anzeige exakt ausgeglichen werden und das gesamte System darf nahezu keine Latenzzeiten besitzen.

Der Aufbau des Versuchsträgers sowie die durchgeführten Studien im realen Fahrzeug haben diese technischen Hürden deutlich aufgezeigt. Dennoch war es möglich, ein kontaktanalogen Navigationserlebnis für alle Fahrer des Versuchsträgers zu erschaffen. Mit Hilfe der Erkenntnisse der durchgeführten Versuche konnte das Anzeigekonzept ein weiteres Mal überarbeitet werden. Das überarbeitete Anzeigekonzept verschleiert die technischen Schwächen in der Umsetzung.

Das überarbeitete Anzeigekonzept 2.0 verwendet dieselben Navigationselemente: Piktogramme, animierter Übergang in Kontaktanalogie, Markierung des optimalen Fahrstreifens, Manöverimpuls und animierte Auflösung der Kontaktanalogie. Allerdings wurden die kontaktanalogen Elemente optimiert. Statt mit kontinuierlichen Anzeigen wird mit kurzen Impulsen gearbeitet. Darüber hinaus werden keine realen Markierungen nachgezeichnet. Stattdessen liegen die Anzeigen in der Mitte des Fahrstreifens. Dadurch sollte das System mehr Fehler verzeihen und somit ein besseres Erlebnis für den Fahrer erschaffen können.

## 8.2. Ausblick

Aus verschiedenen Gründen konnte das vorgestellte Anzeigenkonzept 2.0 nicht im Rahmen einer Studie analysiert und bewertet werden. Es wurde lediglich umgesetzt und stich-

probenartig im Versuchsträger getestet. Eine detaillierte Analyse des überarbeiteten Anzeigekonzeptes mittels einer Experten- oder Probandenstudie wäre ein guter Einstieg in eine mögliche Folgearbeit. Ein Vergleich des erzielten Ergebnisses mit dem Ergebnis des letzten Versuches dieser Arbeit - Konzeptbewertung im Versuchsfahrzeug - könnte die Wirksamkeit der Veränderung messbar machen.

**Alternative Anzeigemöglichkeiten** Wie diese Arbeit gezeigt hat, besitzt die kontaktanaloge Darstellung von Navigationshinweisen ein großes Potential für zukünftige Fahrzeuggenerationen. Allerdings liegen noch mehrere technischen Hürden auf dem Weg bis zu einer möglichen Markteinführung in der hier vorgestellten Form. Die Physik sowie die aktuelle HUD-Technologie stellen noch hohe Anforderungen an den notwendigen Bauraum für die Umsetzung und Integration eines HUD in ein Serienfahrzeug. Die baulichen Veränderungen an der Instrumententafel für die Integration des benutzten Prototypen-HUD lassen sich mit aktuellen Anforderungen an die Innenraumgestaltung des Fahrzeuges nicht vereinbaren. Dies birgt weiteres Potential für zukünftige Arbeiten. Zum einen kann an der HUD-Komponente geforscht werden, um diese mit Hilfe neuer Technologien zu verkleinern, und zum anderen können Alternativen zum HUD, wie beispielsweise die Verwendung von AR-Brillen im Fahrzeug, untersucht werden. BMW arbeitet mit der MINI Augmented Vision bereits an der Verwendung solch einer AR-Brille im Fahrzeug [85].

**Navigation auf Nachfrage** Mit der Foto-AR und der natürlicheren Gestaltung der akustischen Navigationsanweisungen existieren noch weitere Ausbaustufen von Augmented Reality vor der eigentlichen kontaktanalogen Variante. Auch hier können noch Verbesserungen vorgenommen werden. So zeigte die Auswertung der Navigationsanweisungen mit integrierten Orientierungspunkten, dass die Sprachansagen zu häufig ertönen. Hier könnte eine interaktivere Kommunikation zwischen Fahrer und Navigationsanwendung, zum Beispiel mittels Navigation auf Nachfrage, ein vielversprechender Ansatz sein, der entsprechend analysiert werden müsste.

**Verbesserte Orientierungspunkte** Ein weiterer Kritikpunkt am Konzept, das mit Orientierungspunkten arbeitet, sind die Qualität sowie die Anzahl der vorhandenen Orientierungspunkte in den verfügbaren Datenbanken. Daher könnte es lohnenswert sein, die vorhandene automatisierte Erkennung von Landmarken zu verbessern. Mögliche Ansätze hierzu liefern die Forschungsgebiete der Bilderkennung sowie der landmarkengestützten Navigation von automatisierten Luft- und Bodenfahrzeugen - beispielsweise von unbemannten Flugdrohnen.

**Freistellung der Orientierungspunkte** Um Visualisierungen analog der überzeichneten Konzeptskizze in Abbildung 6.1 realisieren zu können, werden weitere Fortschritte im Bereich der Bilderkennung benötigt. Der vorgestellte Prototyp in dieser Arbeit hat nicht den eigentlichen Orientierungspunkt im Bild, sondern einen Bildausschnitt, der den Orientierungspunkt beinhalten müsste, durch farbliche Veränderung hervorgehoben. Um direkt den Orientierungspunkt im Bild freistellen zu können, muss dieser mittels Bilderkennung eigenständig oder mit Hilfe weiterer Informationen aus der Datenbank erkannt werden.

Diese erweiterte Form der Freistellung könnte wertigere und nützlichere Visualisierungsformen ermöglichen.

**Anpassung der Navigationspfeile** Neben der Freistellung von Orientierungspunkten kann die automatisierte Erkennung und Interpretation der dargestellten Straßensituation das vorgestellte Konzept der Foto-AR verbessern. Wenn die dargestellte Straßensituation im verwendeten Hintergrundfoto bekannt ist, können die Navigationspfeile an diese Situation angepasst werden. Das heißt, die Pfeile könnten mit perspektivisch korrektem Bezug zur Straße dargestellt werden. Dies könnte einen der genannten Kritikpunkte des umgesetzten Foto-AR-Navigationssystems beseitigen.

**Vorteile durch hoch-automatisiertes Fahren** Ein weiteres Innovationsfeld, an dem intensiv gearbeitet wird, ist das hoch-automatisierte Fahren (HAF). HAF zeichnet sich durch eine Übergabe der Verantwortung vom Fahrer an das Fahrzeug aus. Das heißt, das Fahrzeug fährt und der Fahrer muss das System nicht mehr überwachen. Das System muss so gut sein, dass es notwendige Übernahmen durch den Fahrer frühzeitig erkennt und dem Fahrer somit genug Zeit zur Übernahme einräumen kann.

Damit solch ein System im Fahrzeug erlebbar ist, benötigt das Fahrzeug im Vergleich zu aktuellen Fahrzeugen deutlich mehr und bessere Umfoldsensoren. Die Sensoren müssen in der Lage sein, das gesamte Fahrzeugumfeld zu erfassen. Dazu gehören neben den aktiven Verkehrsteilnehmern auch passive Objekte, wie beispielsweise die Fahrstreifenmarkierungen und Randbebauung. All diese Informationen werden im Umfeldmodell des Fahrzeuges fusioniert und verwaltet. Die Integration eines solch detaillierten Umfeldmodells in das hier vorgeschlagene System zur Erzeugung der kontaktanalogen Navigationsanweisungen sollte das realisierbare Kundenerlebnis deutlich verbessern. Denn wenn die Position aller Verkehrsteilnehmer vor dem Fahrzeug bekannt ist, könnten die Anzeigen auf diese entsprechend reagieren. Ferner werden die Fahrbahnmarkierungen und Objekte am Fahrbahnrand deutlich exakter erkannt. Dadurch wäre es wieder möglich, die Anzeigen besser im Bild zu verorten, sodass für den Fahrer der Effekt der Kontaktanalogie deutlich markanter wird.

**Hochgenaue Karte** Die hochgenaue Karte ist ein weiteres Produkt, welches im Rahmen der Entwicklungstätigkeiten im Bereich des hoch-automatisierten Fahrens entstanden ist. Die digitalen Karten, die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt und verwendet wurden, enthalten lediglich ein Straßenmodell mit erweiterten Fahrstreifeninformationen (siehe Kapitel 2.2.1). Die hochgenaue Karte enthält neben diesem Straßenmodell noch zusätzliche Schichten, wie beispielsweise ein HD-Fahrstreifenmodell sowie ein HD-Lokalisierungsmodell. Das HD-Fahrstreifenmodell enthält sehr genaue Fahrstreifeninformationen. Dazu zählen unter anderem exakte Geometrien und Klassifizierungen der Fahrstreifenbegrenzungen und -markierungen sowie die genaue Topologie der Fahrstreifen. Der Kartenanbieter HERE Technologies spricht von erreichbaren relativen Genauigkeiten seiner Geometrien im Bereich von 20 cm [126]. Neben dem HD-Fahrstreifenmodell kann sich das Fahrzeug mit Hilfe der Inhalte des HD-Lokalisierungsmodell sehr exakt innerhalb dieser hochgenauen Karten lokalisieren.

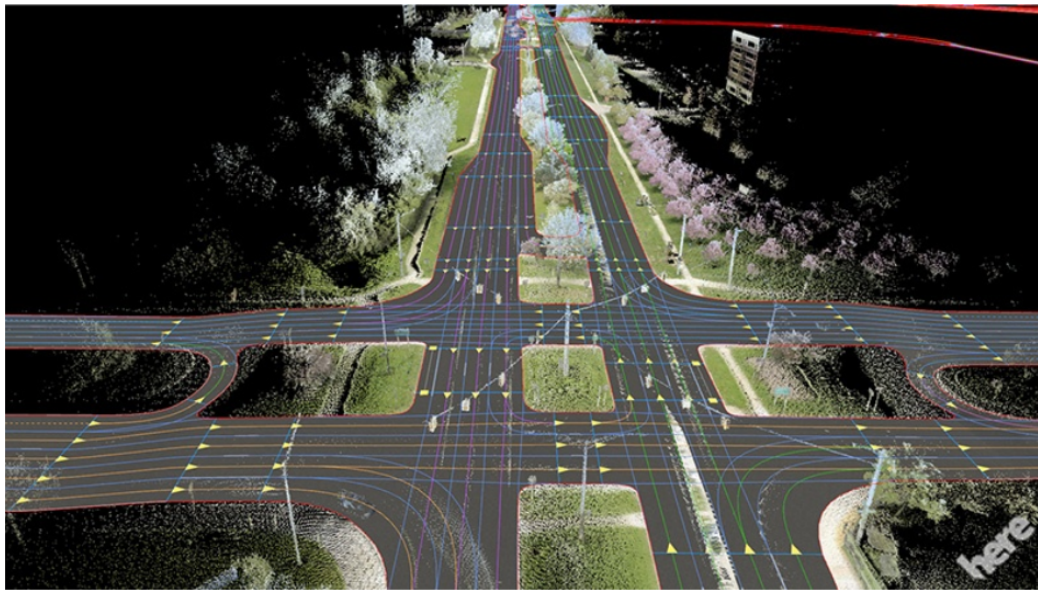


Abbildung 8.1.: Kreuzungsdarstellung in der hochgenauen Karte von HERE[104]

In Abbildung 8.1 ist exemplarisch die Modellierung einer Kreuzungssituation innerhalb der hochgenauen Karten dargestellt. In Hinblick auf die Modellierung der Kreuzungen sind deutliche Unterschiede zu den in dieser Arbeit verwendeten Karten zu erkennen (siehe Abschnitt 2.2.1 und Abbildung 2.21). Die hochgenaue Karte enthält deutlich mehr Informationen als nur den groben Verlauf der Route durch die Kreuzung sowie die Anzahl der Fahrstreifen entlang dieser Route. Es sind die vollständigen geometrischen Maße sowie die Topologie aller Fahrstreifen enthalten. Im Gegensatz zu den klassischen Karten werden auch wirklich alle befahrbaren Bereiche der Straße modelliert. Es kann nicht mehr vorkommen, dass einzelne Fahrstreifen, wie beispielsweise sehr kurze Abbiegefahrstreifen, in der Karte fehlen.

Die hochgenaue Karte sollte in Kombination mit der hochgenauen Lokalisierung einen erheblichen Beitrag zur Realisierung einer wertigen kontaktanalogen Darstellung im Fahrzeug leisten können. Neben der Erzeugung passgenauer Anzeigen können alle Bereiche der Navigation verbessert werden. Die Route kann deutlich genauer entlang einzelner Fahrstreifen berechnet werden. Die Abbildung des Fahrzeuges in die digitale Karte unterliegt weniger Mehrdeutigkeiten. Die notwendigen Manöver können exakter berechnet werden. All diese Verbesserungen sollten in zukünftigen Arbeiten im Bereich der Augmented Reality in der Fahrzeugnavigation verwendet werden.



# Literaturverzeichnis

- [1] M. ABLASSMEIER: *Multimodales, kontextadaptives Informationsmanagement im Automobil*. Dissertation, Technische Universität München, 2009.
- [2] H. ALM, L. NILSSON, S. JAERMARK, J. SVELID und U. HENNINGS: *Effects of Landmark Presentation on Driver Performance and Uncertainty in a Navigation Task - A Field Study*. Techn. Ber., Swedish Road and Traffic Research Institute, 1992.
- [3] T. ALT: *Augmented Reality in der Produktion*. Dissertation, Universität Magdeburg, 2002.
- [4] D. ANGUELOV, C. DULONG, D. FILIP, C. FRUEH, S. LAFON, R. LYON, A. OGALE, L. VINCENT und J. WEAVER: *Google street view: Capturing the world at street level*. *Computer*, S. 32–38, 2010.
- [5] A. J. ARETZ und C. D. WICKENS: *The mental rotation of map displays*. *Human performance*, S. 303–328, 1992.
- [6] R. T. AZUMA: *A Survey of Augmented Reality*. In: *Teleoperators and Virtual Environments*, S. 355–385, 1997.
- [7] R. BACKES: *Räumliche Navigation nach C.D. Wickens*. GRIN Verlag, 2004.
- [8] D. BAUMBACH: *Entwicklung und Implementierung eines fotobasierten AR-Navigationssystems*. Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2012.
- [9] K. BENGLER, R. HALLER und A. ZIMMER: *Experimental optimisation of route guidance information using context information*. In: *First World Congress on Applications of Transport and Intelligent Vehicle Highway Systems*, S. 1758–1765, 1994.
- [10] U. BERGMEIER: *Kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem*. Dissertation, Technische Universität München, 2009.
- [11] O. BIMBER und R. RASKAR: *Spatial augmented reality: merging real and virtual worlds*. CRC Press, 2005.
- [12] BITKOM: *Studie Automobil – ITK im Auto und Elektromobilität*. Techn. Ber., Bitkom, 2011.
- [13] S. BLACKMAN und R. POPOLI: *Design and analysis of modern tracking systems*. Radar Library, 1999.
- [14] T. BLUM, V. KLEEBERGER, C. BICHLMEIER und N. NAVAB: *miracle: An augmented reality magic mirror system for anatomy education*. In: *IEEE Virtual Reality Workshops (VRW) 2012*, S. 115–116, 2012.

- [15] J. BLUME, R. MAYER und F. SCHMIDT: *Head Up Display mit vollfarbigen, grafischen Bildinhalten als ergonomische Fahrerinformationssysteme*. VDI-Berichte Nr. 1646 - Elektronik im Kraftfahrzeug, 2001.
- [16] BMW GROUP: *Die neue BMW 7er Reihe*. Pressemitteilung, 2015. Online erhältlich unter <http://www.presseportal.de/pm/28255/3043882>; abgerufen am 5. Januar 2016.
- [17] M. BÖHM, J. PFISTER und S. DREHER: *Anforderungen an Fahrzeugpositionierung und Karten-Referenzierung in kooperativen Systemen*. In: *Positionierung und Navigation (POS-NAV) 2007 Tagungsband*, 2007.
- [18] M. BORN: *Optik*. Springer-Verlag, 1933.
- [19] C. BRENNER und B. ELIAS: *Extracting Landmarks for Car Navigation Systems Using Existing GIS Databases and Laser Scanning*. *Cartography*, S. 131–136, 2003.
- [20] P. BREUSS-SCHNEEWEIS: *Wikitude drive: Never take your eyes off the road again*, 2010.
- [21] H. BUBB: *Einrichtung zur optischen Anzeige eines veränderlichen Sicherheitsabstandes eines Fahrzeuges*. "Patentschrift DE 2633067 C2", 1978.
- [22] J. R. BURLEY und J. A. LARUSSA: *Full-color wide field-of-view holographic helmet-mounted display for pilot/vehicle interface development and human factors studies*. In: *SPIE Technical Symposium on Optics, Electro-Optics, and Sensors*, S. 9–15, 1990.
- [23] G. BURNETT: *Turn right at the Traffic Lights': The Requirement for Landmarks in Vehicle Navigation Systems*. *Journal of Navigation*, S. 499–510, 2000.
- [24] J. CARMIGNIANI, B. FURHT, M. ANISETTI, P. CERAVOLO, E. DAMIANI und M. IVKOVIC: *Augmented reality technologies, systems and applications*. *Multimedia Tools and Applications*, S. 341–377, 2011.
- [25] L. CHITTARO und S. BURIGAT: *Augmenting audio messages with visual directions in mobile guides: an evaluation of three approaches*. In: *International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, 2005.
- [26] C. J. COLOMBOS und A. P. HIGGINS: *The international law of the sea*. Longmans London, 1967.
- [27] R. DARKEN und B. PETERSON: *Spatial orientation, wayfinding, and representation*. *Handbook of virtual environments*, S. 493–518, 2002.
- [28] DEUTSCHER VERKEHRSSICHERHEITSRAT E.V.: *Weniger Unfälle Mehr Sicherheit - Was leisten Fahrerassistenzsysteme?.* DVR-Jahresbericht 2010, 2010.
- [29] E. W. DIJKSTRA: *A note on two problems in connexion with graphs*. *Numerische Mathematik*, S. 269–271, 1959.
- [30] H. DODEL und D. HÄUPLER: *Die Satellitennavigation*. Springer-Verlag, 2010.

- [31] A. DOLCE, J. NASMAN und B. CUTLER: *ARmy: A study of multi-user interaction in spatially augmented games*. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW) 2012*, S. 43–50, 2012.
- [32] J. DU, M. BARTH und D. PARK: *Next-Generation Automated Vehicle Location Systems: Positioning at the Lane Level*. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, S. 48–57, 2008.
- [33] I. ECKEL: *Particle Filters for Airborne Tracking and Lane-Level Map-Matching of Vehicles*. Dissertation, Technische Universität München, 2015.
- [34] P. EISERT, J. RURAINSKY und P. FECHTELER: *Virtual mirror: Real-time tracking of shoes in augmented reality environments*. In: *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP) 2007*, S. II–557, 2007.
- [35] A. EL-RABBANY: *Introduction to GPS: the global positioning system*. Artech House, 2002.
- [36] B. ELIAS: *Extracting Landmarks with Data Mining Methods*. In: *Conference on Spatial Information Theory*, S. 375–389, 2003.
- [37] B. ELIAS und C. BRENNER: *Automatic Generation and Application of Landmarks in Navigation Data Sets*. In: *11th International Symposium on Spatial Data Handling*, S. 469–480, 2004.
- [38] G. EVANS, M. A. SKORPANICH, T. GÄRLING, K. J. BRYANT und B. BRESOLIN: *The effects of pathway configuration, landmarks and stress on environmental cognition*. *Journal of Environmental Psychology*, S. 323–335, 1984.
- [39] D. L. FISHER, M. RIZZO, J. CAIRD und J. D. LEE: *Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology*. CRC Press, 2011.
- [40] U. FLICK, E. V. KARDORFF und I. STEINKE: *Qualitative Forschung: Ein Handbuch*. Rowohlt, 2005.
- [41] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN: *FGSV 295: Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS) Teil: Querschnitte (RAS-Q)*. Richtlinie, 1996.
- [42] W. FRIEDRICH, D. JAHN und L. SCHMIDT: *ARVIKA-Augmented Reality for Development, Production and Service..* In: *IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Bd. 2002, S. 3–4, 2002.
- [43] GARTNER: *Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies*, Letzter Zugriff: 10.03.2018. <http://gartner.com/smarterwithgartner/>.
- [44] P. GEELEN und M. MATTU: *Navigationsvorrichtung mit Kamerainformation*. "Patentschrift DE 20 2005 021 607", 2006.
- [45] G. GEISER: *Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug*. *ATZ. Automobiltechnische Zeitschrift*, S. 77–84, 1985.

- [46] E. GOLDSTEIN: *Wahrnehmungspsychologie: eine Einführung; Dt. Übers. hrsg. von Manfred Ritter*. Spectrum Verlag, 1997.
- [47] P. GREEN: *In-vehicle information: Design of driver interfaces for route guidance*. In: *75th Transportation Research Board Annual Meeting*, 1996.
- [48] H. GROSS, W. SINGER, M. TOTZECK, F. BLECHINGER, B. ACHTNER, B. DÖRBAND und H. MÜLLER: *Handbook of optical systems*. Wiley Online Library, 2005.
- [49] H. HAFERKORN: *Optik: physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*. John Wiley & Sons, 2008.
- [50] P. HARRY: *Lexikon der Optik*, 2003.
- [51] P. E. HART, N. J. NILSSON und B. RAPHAEL: *A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths*. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, S. 100–107, 1968.
- [52] M. HASSENZAHL, M. BURMESTER und F. KOLLER: *AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität*. In: *Mensch & Computer 2003 Interaktion in Bewegung*, S. 187–196. Springer-Verlag, 2003.
- [53] A. M. HEINECKE: *Mensch-Computer-Interaktion, Basiswissen für Entwickler und Gestalter*. Springer-Verlag, 2012.
- [54] J. G. HOLLANDS und C. D. WICKENS: *Engineering psychology and human performance*, 1999.
- [55] INTELLIGENT TRANSPORT SYSTEMS: *ISO 14825 – Geographic Data Files (GDF) – GDF5.0*. Standard, International Organization for Standardization, 2011.
- [56] B. ISRAEL: *Potenziale eines kontaktanalogen Head-up Displays für den Serieneinsatz*. Dissertation, Technische Universität München, 2013.
- [57] B. ISRAEL, M. SEITZ, B. SENNER und H. BUBB: *Kontaktanaloge Anzeigen für ACC – im Zielkonflikt zwischen Stimulation und Ablenkung*. In: *4. Tagung Fahrerassistenz*, 2010.
- [58] A. JANSEN: *Erhöhung der Positionierungsgenauigkeit bei der Fahrzeugnavigations mittels Map-Matching*. Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2008.
- [59] A. JANSEN: *Verfahren zur Positionsermittlung für ein Kraftfahrzeug*. "Patentschrift DE 10 2010 007 091", 2010.
- [60] A. JANSEN: *Verfahren zur Ausgabe von grafischen Fahrhinweisen*. "Patentschrift DE 10 2011 006 347", 2011.
- [61] A. JANSEN: *Augmented Reality Navigation in zukünftigen Head-Up Displays: Prototypische kontaktanaloge Navigationsdarstellung im Versuchsfahrzeug*. VDI-Berichte Nr. 2205 - Der Fahrer im 21. Jahrhundert, 2013.
- [62] A. JANSEN: *Darstellung einer Straßenumgebung für Fahrmanöver eines Fahrzeugs*. "Patentschrift DE 10 2013 212 968", 2013.

- [63] A. JANSEN: *Verknüpfung von Navigations- und Sicherheitshinweisen in einem Fahrzeug*. "Patentschrift DE 10 2013 205 393", 2013.
- [64] A. JANSEN, B. ISRAEL und W. SPIESSL: *Augmented Reality Navigation in zukünftigen Head-Up Displays: Prototypenaufbau und erste Bewertung mittels Probandenstudie*. VDI-Berichte Nr. 2154 - Optische Technologien in der Fahrzeugtechnik, 2012.
- [65] A. JANSEN, W. SPIESSL und G. FRANZ: *Besser als die Wirklichkeit: Reale und virtuelle Welt verschmelzen zu einer neuartigen Fahrerlebniswelt*. *Elektronik automotive* 12/2011, S. 38–42, 2011.
- [66] S. KAPLAN: *Adaption, structure and knowledge*. In: *Environmental Knowing theories research and methods*, S. 32–45. Dowden, Hutchinson and Ross Inc., 1976.
- [67] D. KIMURA: *The asymmetry of the human brain*. *Scientific American*, 1973.
- [68] L. KLEIN: *Presentation Concepts for Conformal Navigation Systems*. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2008.
- [69] L. KLEIN: *Presentation Concepts for Conformal Navigation Systems*. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2008.
- [70] D. A. KÖHNE und D. M. WÖSSNER: *GPS Informationen*, Letzter Zugriff: 12.03.2014. <http://www.kowoma.de/gps>.
- [71] H. A. KOJI NAKAMURA und N. KAWAHARA: *Windshield Display for Active Safety*. In: *FISITA World Automotive Congress 2006*, 2006.
- [72] A. LINDEN und J. FENN: *Understanding Gartners hype cycles*. *Strategic Analysis Report* No R-20-1971, 2003.
- [73] Y.-C. LIU und M.-H. WEN: *Comparison of head-up display (HUD) vs. head-down display (HDD): driving performance of commercial vehicle operators in Taiwan*. *International Journal of Human-Computer Studies*, S. 679–697, 2004.
- [74] F. LÖFFERT: *Fahrzeugnavigation auf Basis von Orientierungspunkten*. Diplomarbeit, Technische Universität München, 2012.
- [75] A. LORKE: *Die Mercator-Projektion - was genau versteht man darunter?*, 2012.
- [76] K. L. LOVELACE, M. HEGARTY und D. R. MONTELLO: *Elements of Good Route Directions in Familiar and Unfamiliar Environments*. *Spatial Information Theory: Cognitive and Computational Foundations of Geographic Information Science: International Conference COSIT '99*, S. 65–82, 1999.
- [77] MAKING VIRTUAL SOLID - CALIFORNIA, LLC: *Follow the Virtual Cable*, Letzter Zugriff: 21.03.2016. <http://www.mvs.net/>.
- [78] W. MANSFELD: *Satellitenortung und Navigation*. Vieweg + Teubner, 2010.
- [79] MATHWORKS: *Simulation and Model-Based Design*, Letzter Zugriff: 19.02.2017. <https://de.mathworks.com/products/simulink.html>.

- [80] J. MCAFFER, J.-M. LEMIEUX und C. ANISZCZYK: *Eclipse rich client platform*. Addison-Wesley Professional, 2010.
- [81] K. MEHLHORN: *Data structures and algorithms 1: Sorting and searching*. Springer-Verlag, 2013.
- [82] A. MEROTH: *Akustik und Audiotechnik*. In: *Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug*, S. 7–77. Springer-Verlag, 2008.
- [83] P. MILGRAM: *Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum*. Techn. Ber., ATR Communication Systems Research Laboratories, 1994.
- [84] N. MILICIC et al.: *Sichere und ergonomische Nutzung von Head-Up Displays im Fahrzeug*. Dissertation, Technische Universität München, 2010.
- [85] MINI CORPORATE COMMUNICATIONS: *MINI Augmented Vision*. Techn. Ber., BMW Group, 2015.
- [86] T. MIYAMOTO, I. KITAHARA, Y. KAMEDA und Y. OHTA: *Floating virtual mirrors: visualization of the scene behind a vehicle*. In: *Advances in Artificial Reality and Tele-Existence*, S. 302–313. Springer-Verlag, 2006.
- [87] D. MIZELL: *Boeings wire bundle assembly project*. Fundamentals of wearable computers and augmented reality, 2001.
- [88] W. NARZT, G. POMBERGER, A. FERSCHA, D. KOLB, R. MÜLLER, J. WIEGHARDT, H. HÖRTNER und C. LINDINGER: *Augmented reality navigation systems*. Universal Access in the Information Society, S. 177–187, 2006.
- [89] NAVIGATION DATA STANDARD: *The NDS Standard*, Letzter Zugriff: 10.03.2018. <http://www.nds-association.org/the-nds-standard/>.
- [90] NAVTEQ: *NAVTEQs NAVSTREETS Street Data Reference Manual v3.1*. Techn. Ber., NAVTEQ, 2009.
- [91] NAVTEQ: *GDF 3.0 - Reference Manual v38.0*. Techn. Ber., NAVTEQ, 2011.
- [92] NAVTEQ: *Natural Guidance Product Workshop*. Techn. Ber., NAVTEQ, 2011.
- [93] NAVTEQ: *RDF 6.2 - Reference Guide 11.02*. Techn. Ber., NAVTEQ, 2011.
- [94] A. NEUMANN: *Simulationsbasierte Messtechnik zur Prüfung von Head-up Displays*. Dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [95] F. PANKRATZ: *Tracking für Augmented Reality Anwendungen auf Mobiltelefonen*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2009.
- [96] K. S. PARK, I. H. CHO, G. B. HONG, T.-J. NAM, J. PARK, S. I. CHO und I.-H. JOO: *Disposition of information entities and adequate level of information presentation in an in-car augmented reality navigation system*. In: *Human Interface and the Management of Information. Interacting in Information Environments*, S. 1098–1108. Springer-Verlag, 2007.

- 
- [97] T. PASENAU, T. SAUER und J. EBELING: *Aktive Geschwindigkeitsregelung mit Stop&Go-Funktion: im BMW 5er und 6er*. ATZ. Automobiltechnische Zeitschrift, S. 900–909, 2007.
- [98] M. PFATTNER: *CORONA - Developer's Cookbook*. Techn. Ber., BMW Group Research and Technology, 2013.
- [99] PHYORA: *AugSatNav - Augmented Reality Navigation System*, Letzter Zugriff: 12.03.2014. <http://phyora.com/augsatnav.html>.
- [100] T. POITSCHKE, M. ABLASSMEIER, G. RIGOLL, S. BARDINS, S. KOHLBECHER und E. SCHNEIDER: *Contact-analog information representation in an automotive head-up display*. In: *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Eye tracking research & applications*, S. 119–122, 2008.
- [101] T. PORATHE: *Measuring effective map design for route guidance An experiment comparing electronic map display principles*. Information Design Journal, S. 190–201, 2008.
- [102] M. QUDDUS: *High integrity map matching algorithms for advanced transport telematics applications*. PhD Thesis, Imperial College London, 2006.
- [103] M. QUDDUS, W. OCHIENG und R. NOLAND: *Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions*. Transportation Research Part C, S. 312–328, 2007.
- [104] D. RABEL: *How HERE HD Live Map paved the way for autonomous cars in 2016*. Techn. Ber., HERE Technologies, 2016.
- [105] S. RAFF: *Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of the art*. Computers & Operations Research, S. 63–211, 1983.
- [106] J. RAIMO: *NAVTEQ Lane Guidance: Extended Lane and Lane Markings*. Techn. Ber., NAVTEQ, 2009.
- [107] M. RAUBAL und S. WINTER: *Enriching Wayfinding Instructions with Local Landmarks*. Geographic information science, S. 243–259, 2002.
- [108] K. REIF: *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg + Teubner, 2010.
- [109] H. ROSCH: *Augmented Reality, eine Übersicht*. Techn. Ber., Technische Universität Ilmenau, 1999.
- [110] P. G. ROSENGARTEN und C. B. STÜRMER: *Premium Power: Das Geheimnis des Erfolgs von Mercedes-Benz, BMW, Porsche und Audi*. Wiley-VCH Verlag, 2005.
- [111] ROUTE 66 SWITZERLAND GMBH: *Es ist so einfach zu verfolgen*, Letzter Zugriff: 05.01.2016. <http://tw2.ro.66.com/DE/produkte/mehr-dazu/follow-me/>.
- [112] H. RÜHMANN: *Schnittstellen in Mensch-Maschinen-Systemen*. In: *Lehrbuch der Ergonomie*, S. 561. Carl Hanser Verlag, 1993.

- [113] K. U. SABINE SEIDEL: *Infoblatt Das Gradnetz der Erde*, 2014.
- [114] P. SANTOS, H. GRAF, T. FLEISCH und A. STORK: *3D interactive augmented reality in early stages of product design*. In: *10th Conference on Human-Computer Interaction (HCI) 2003*, S. 1203–1207, 2003.
- [115] G. A. SATALICH: *Navigation and wayfinding in virtual reality: Finding the proper tools and cues to enhance navigational awareness*. Masterarbeit, University of Washington, 1995.
- [116] A. SATO, I. KITAHARA, Y. KAMEDA und Y. OHTA: *Visual navigation system on windshied head-up display*. In: *13th World Congress on Intelligent Transportation Systems*, 2006.
- [117] G. SCHILDT: *Satellitennavigation*. Lyk Informationstechnik, 2008.
- [118] T. SCHILLING: *Augmented Reality in der Produktentstehung*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2007.
- [119] M. SCHNEID: *Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug*. Dissertation, Technische Universität München, 2009.
- [120] R. SCHUBERT, E. RICHTER und G. WANIELIK: *Comparison and evaluation of advanced motion models for vehicle tracking*. In: *11th IEEE International Conference on Information Fusion*, S. 1–6, 2008.
- [121] U. SEIFFERT: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Springer-Verlag, 2005.
- [122] C. SIMON: *Straßenumfeldmodellierung durch Fusion und Interpretation von Sensordaten zur spurgenauen Positionierung des Fahrzeugs*. Dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [123] K. SOMMER: *Eine experimentelle Untersuchung zur Darstellung kontaktanaloger Navigationshinweise im HUD*. Diplomarbeit, Universität Regensburg, 2006.
- [124] S. D. STECK und H. A. MALLOT: *The Role of Global and Local Landmarks in Virtual Environment Navigation*. *Presence Teleoperators Virtual Environments*, S. 69–83, 2000.
- [125] M. SYMIETZ: *Echtzeitbasierte Generierung und Verlegung von Leitungsobjekten in einem digitalen Fahrzeugmodell mit einem Virtual-Reality-System*. Dissertation, Universität Bielefeld, 2000.
- [126] H. TECHNOLOGIES: *HERE HD Live Map Technical Paper*. Techn. Ber., HERE Technologies, 2017.
- [127] B. H. THOMAS: *A survey of visual, mixed, and augmented reality gaming*. *Computers in Entertainment (CIE)*, S. 3, 2012.
- [128] L. C. THOMAS und C. D. WICKENS: *Immersion and battlefield visualization: Frame of reference effects on navigation tasks and cognitive tunneling*. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, S. 153–157, 1999.



- 
- [129] S. TIMPF: *Abstraction, levels of detail, and hierarchies in map series*. In: *International Conference on Spatial Information Theory*, S. 125–139, 1999.
- [130] S. TÖNNIES: *Zielführung in der Fahrzeug-Navigation mittels Mixed Reality*. Diplomarbeit, Universität Hannover, 2006.
- [131] M. TÖNNIS: *Towards automotive augmented reality*. Dissertation, Technische Universität München, 2008.
- [132] M. TONNIS, V. BROY und G. KLINKER: *A survey of challenges related to the design of 3d user interfaces for car drivers*. In: *IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI) 2006*, S. 127–134. IEEE, 2006.
- [133] M. TÖNNIS, M. PLAVŠIĆ und G. KLINKER: *Survey and Classification of Head-Up Display Presentation Principles*. In: *Proceedings of the International Ergonomics Association (IEA)*, 2009.
- [134] J. TÜMLER: *Untersuchungen zu nutzerbezogenen und technischen Aspekten beim Langzeiteinsatz mobiler Augmented Reality Systeme in industriellen Anwendungen*. Dissertation, Universität Magdeburg, 2009.
- [135] S. VACEK, S. BERGMANN, U. MOHR und R. DILLMANN: *Fusing image features and navigation system data for augmenting guiding information displays*. In: *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems 2006*, S. 323–328, 2006.
- [136] A. VOLLMER: *Mehr Sicherheit für (fast) alle*. *Automobil Elektronik* 3/2012, S. 18–23, 2012.
- [137] U. WAGNER, H. ANGERMÜLLER, R. AMANN, P. GRIMM, T. HENNIG und M. SCHOLZE: *Die Instrumentenkombination im neuen 7er BMW: Anzeigephilosophie und Technik*. VDI-Berichte Nr. 1646 - Elektronik im Kraftfahrzeug, 2001.
- [138] D. J. WEINTRAUB und M. ENSING: *Human factors issues in head-up display design: The book of HUD*. Techn. Ber., University of Dayton Research Institute, 1992.
- [139] C. D. WICKENS: *Frames of reference for navigation*. *Cognitive regulation of performance: Interaction of theory and application*, S. 113–144, 1999.
- [140] H. WINNER, S. HAKULI und G. WOLF: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer-Verlag, 2009.
- [141] G. WÜTHERICH, N. HARTMANN, B. KOLB und M. LÜBKEN: *Die OSGI Service Platform-Eine Einführung mit Eclipse Equinox*. dpunkt Verlag, 2008.
- [142] Y. YAMAGUCHI, T. NAKAGAWA, K. AKAHO, M. HONDA, H. KATO und S. NISHIDA: *AR-Navi: an in-vehicle navigation system using video-based augmented reality technology*. In: *Human Interface and the Management of Information. Interacting in Information Environments*, S. 1139–1147. Springer-Verlag, 2007.
- [143] Y. ZHAO: *Vehicle Location and Navigation Systems*. Artech House, 1997.