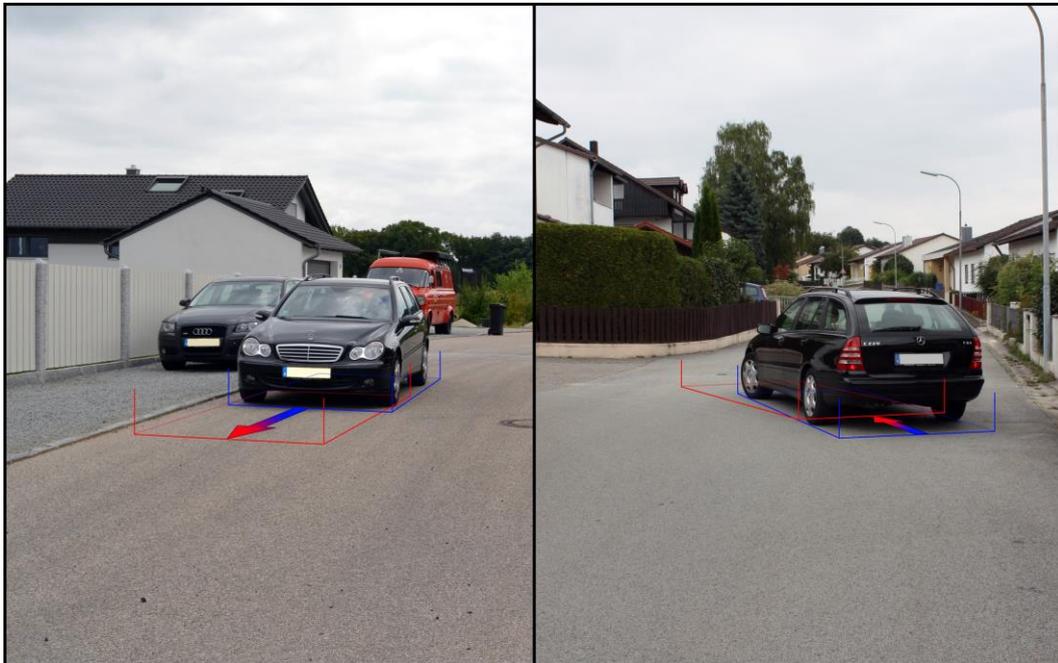


Einzeichnungsmethoden prädizierter Verkehrsteilnehmer

Bachelorarbeit



Verfasser: Maximilian Josef Wallinger
Matrikelnummer: 3617254
Ausgabedatum: 15.04.2013
Abgabedatum: 15.10.2013
Betreuer: Dipl.-Ing. Frederic Chucholowski

Danksagung

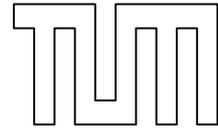
Zunächst möchte ich mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelor-Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonders gilt dieser Dank Herrn Frederic Chucholowski, der meine Arbeit und somit auch mich betreut hat. Durch seine Unterstützung, konstruktive Kritik und nicht zuletzt durch seine hilfreichen Ratschläge hat er einen großen Teil zu dieser Studienarbeit beigetragen.

Daneben gilt mein Dank dem gesamten Fahrassistenz-Team des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München. Durch die hilfreichen Anregungen und Vorschläge wurden manche Ideen erst angestoßen und Verbesserungspotential bei den Methoden aufgezeigt.

Weiter möchte ich mich bei den Versuchspersonen bedanken, die sich bereit erklärt haben an dem Probandentest teilzunehmen und somit eine gute Datenbasis für die Untersuchungen geliefert haben.

Nicht zuletzt gebührt meinen Eltern Dank, da Sie mich während des Studiums nicht nur finanziell, sondern auch moralisch unterstützt haben.



Bachelorarbeit: Einzeichnungsmethoden prädizierter Verkehrsteilnehmer

Um die bei der Teleoperation von Straßenfahrzeugen auftretenden Zeitverzögerungen in der Übertragung zu kompensieren werden die Position des eigenen Fahrzeugs und das Verkehrsgeschehen prädiziert und in das übertragene Videobild eingezeichnet. Je nach Geschwindigkeit der prädizierten Teilnehmer werden diese sich von wenigen Zentimetern bis zu einigen Metern weiter bewegt haben.

Ziel der Arbeit ist es, Methoden zur Darstellung der prädizierten Verkehrsteilnehmer zu entwickeln und auf ihre Tauglichkeit zu untersuchen. Nach Möglichkeit sollen dafür neben Eigenentwicklungen auch bestehende Methoden aus ähnlichen Anwendungsgebieten herangezogen werden. Die Implementierung der Methoden erfolgt in Matlab anhand von aufgezeichneten Messfahrten, in welchen die Videobild-daten zusammen mit den Positionen der anderen Verkehrsteilnehmer vorhanden sind. Für die Auswahl und Evaluierung der endgültigen Lösung sollen mehrere Testpersonen zum System befragt werden.

Die Ausarbeitung soll die einzelnen Arbeitsschritte in übersichtlicher Form dokumentieren. Der Kandidat verpflichtet sich, die Bachelorarbeit selbstständig durchzuführen und die von ihm verwendeten wissenschaftlichen Hilfsmittel anzugeben.

Die eingereichte Arbeit verbleibt als Prüfungsunterlage im Eigentum des Lehrstuhls und darf Dritten nur unter Zustimmung des Lehrstuhlinhabers zugänglich gemacht werden.

Prof. Dr.-Ing. M. Lienkamp

Betreuer: Dipl.-Ing. F. Chucholowski

Ausgabe: 15.04.2013

Abgabe: 15.10.2013

Geheimhaltungsverpflichtung



Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen



Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Prof. Dr.-Ing.
Markus Lienkamp

Boltzmannstr. 15
85748 Garching
Germany

Tel +49.89.289.15345
Fax +49.89.289.15357
www.ftm.mw.tum.de

Sekretariat:

Gabriele Weigand
weigand@ftm.mw.tum.de

Herr/Frau: **Wallinger, Maximilian Josef**

Im Rahmen der Angebotserstellung und der Bearbeitung von Forschungs- und Entwicklungsverträgen erhält der Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München regelmäßig Zugang zu vertraulichen oder geheimen Unterlagen oder Sachverhalten industrieller Kunden, wie z.B. Technologien, heutige oder zukünftige Produkte, insbesondere Prototypen, Methoden und Verfahren, technische Spezifikationen oder auch organisatorische Sachverhalte.

Der Unterzeichner verpflichtet sich, alle derartigen Informationen und Unterlagen, die ihm während seiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik zugänglich werden, strikt vertraulich zu behandeln.

Er verpflichtet sich insbesondere

- derartige Informationen betriebsintern zum Zwecke der Diskussion nur dann zu verwenden, wenn ein ihm erteilter Auftrag dies erfordert,
- keine derartigen Informationen ohne die vorherige schriftliche Zustimmung des betreffenden Kunden an Dritte weiterzuleiten,
- keine Fotografien, Zeichnungen oder sonstige Darstellungen von Prototypen oder technischen Unterlagen hierzu anzufertigen,
- auf Anforderung des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik oder unaufgefordert spätestens bei seinem Ausscheiden aus dem Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik alle Dokumente und Datenträger, die derartige Informationen enthalten, an Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik zurückzugeben.

Die Verpflichtung zur Geheimhaltung endet nicht mit dem Ausscheiden aus dem Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, sondern bleibt 5 Jahre nach dem Zeitpunkt des Ausscheidens in vollem Umfang bestehen.

Datum: **13. Oktober 2013**

Unterschrift: _____

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

München, 13.10.2013

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Motivation und Ziel der Arbeit	1
1.3	Aufbau der Arbeit	2
2	Stand der Technik	4
2.1	Automatisierung im Straßenverkehr	4
2.2	Teleoperiertes Fahren	5
2.2.1	Umsetzung am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München	5
2.2.2	Predictive Display	7
3	Prädiktion von Fahrzeugen	10
3.1	Zusammensetzung der Latenzzeit	10
3.2	Einfluss von Latenzzeiten auf die menschliche Leistungsfähigkeit	10
3.3	Erläuterung der Notwendigkeit der Prädiktion anhand eines Beispiels	11
3.4	Umsetzung des Predictive Display Konzepts am FTM	12
4	Entwicklung von Anzeigemethoden	15
4.1	Bereits bestehende Anzeigemethoden	15
4.2	Anforderungen an eine Anzeigemethode für prädizierte Verkehrsteilnehmer.....	17
4.3	Mögliche Anzeigemethoden und deren Evaluation.....	17
5	Vergleich der Anzeigemethoden mittels einer Probandenbefragung 30	
5.1	Entwicklung eines Fragebogens	30
5.2	Zusammensetzung der Probandengruppe	32
5.3	Durchführung des Probandentests	32
5.4	Ergebnis der Probandenbefragung	36
5.4.1	Teil 1: Objektive Beurteilung	36
5.4.2	Teil 2: Subjektive Beurteilung	41
6	Diskussion der Ergebnisse	45
7	Zusammenfassung und Ausblick	47
	Abbildungsverzeichnis	i
	Tabellenverzeichnis	iii

Abkürzungsverzeichnis	iv
Literaturverzeichnis	v
Anhang.....	viii

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Fahrassistenzsysteme erlangen in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung [Win09], da sowohl die Komfort- als auch die Sicherheitsanforderungen an die Automobile der Zukunft stetig wachsen. Als Optimum der erreichbaren Assistenz wird dabei die vollständige Entbindung des Menschen von der Fahraufgabe (Autonomes Fahren) angesehen. Forschergruppen auf der ganzen Welt arbeiten bereits an solchen autonomen Systemen und erhoffen sich dadurch Verbesserungen in den Bereichen der Verkehrssicherheit, des Fahrkomforts und der Effizienz [Win09].

Allerdings wird es wohl noch Jahrzehnte dauern bis autonome Serienfahrzeuge auf deutschen Straßen unterwegs sind [Die11]. So zumindest lautet die vorherrschende Meinung bei den Forschern, da noch viele technische [Ber08, S. 260 ff] und auch rechtliche Fragen [Lut12] ungeklärt sind.

Autonom agierende Systeme „haben zwar gegenüber dem Menschen Vorteile hinsichtlich der Reaktionszeit, der Zuverlässigkeit und bei der parallelen Verarbeitung großer Datenmengen“ [Die11], weisen aber Schwächen bei der Entscheidungsfindung in komplexen Situationen wie dem innerstädtischen Verkehr auf. Ein menschlicher Fahrer kann dabei auf einen großen Erfahrungsschatz zurückgreifen und damit das Verkehrsgeschehen antizipieren.

Um diesen Problemen zu begegnen, kann als Übergangstechnologie das teleoperierte Fahren genutzt werden. Hierbei behält der Mensch als Operator die Kontrolle über das Fahrzeug. Auch die Einbindung von teleoperierten Fahrzeugen in den öffentlichen Nahverkehr und die Nutzung dadurch entstehender neuer Mobilitätskonzepte ist ein denkbare Szenario [Can09].

Zwar sind auch teleoperierte Fahrzeuge „nach gegenwärtiger Rechtslage unzulässig, weisen jedoch weniger Konfliktbereiche mit der Rechtsordnung auf als autonome Fahrzeuge“ [Lut12].

1.2 Motivation und Ziel der Arbeit

Der Trend zur Urbanisierung und sogenannten „Megacitys“ bringt eine Reihe an negativen Begleiterscheinungen mit sich; Beispiele hierfür sind Verkehrsstaus, Parkplatzknappheit sowie steigende Belastung der Menschen und der Umwelt durch Lärm- und Schadstoffemissionen [Can09], [Par02, S. 826]. Diese Entwicklungen verlangen nach neuen, integrierten Mobilitätskonzepten für den urbanen Sektor. Das Auto ist dabei nicht mehr als privates Individualverkehrsmittel zu sehen, sondern soll mit in den öffentlichen Nahverkehr integriert werden. In Verbindung mit der Nutzung von alternativen Antrieben kann somit ein großer Schritt in Richtung nachhaltige Mobilität gemacht werden [Can09].

Um das Auto in solche Mobilitätskonzepte einzubinden, muss dem Benutzer zunächst ein freies Fahrzeug möglichst schnell und einfach zugänglich gemacht werden. Dieses sollte dann am Ende der Fahrt an einem beliebigen Ort (innerhalb des Geschäftsgebietes) wieder abgestellt werden können.

Die Umsetzung solcher Mobilitätskonzepte, zum Beispiel in Form von Carsharing-Angeboten, bringt allerdings logistische Probleme mit sich. Die Fahrzeuge müssen regelmäßig im Geschäftsgebiet verteilt, gewartet und betankt beziehungsweise geladen werden. Hier bietet die teleoperierte Fahrzeugführung Möglichkeiten, diesen Herausforderungen zu entgegnen. So könnte zum Beispiel ein Operator dem Kunden ein Fahrzeug zum gewünschten Ort liefern und es am Ende der Fahrt an einem geeigneten Parkplatz wieder abstellen. Auch die Umsetzung von Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge könnte einfacher gestaltet werden, da nicht benötigte Fahrzeuge zu einer zentralen Ladestation gesteuert werden könnten [Gna12].

Es bieten sich also weite Einsatzfelder für teleoperierte Fahrzeuge. Jedoch bringt dieser Ansatz auch viele Probleme mit sich. So muss ein Fahrer viele Informationen aus seiner Umgebung wahrnehmen, um ein Fahrzeug sicher führen zu können. An der Informationsaufnahme ist hauptsächlich das Auge und mit wesentlich geringem Anteil das Ohr beteiligt [Jür01, S. 17]. Daher zeichnen mehrere Kameras die Umgebung des Fahrzeugs auf und übermitteln die Daten per Funkverbindung an den Arbeitsplatz des Operators. Dabei führen Bandbreite-Beschränkungen und Paketlaufzeiten zu einer nicht vernachlässigbaren Zeitverzögerung bei der Übertragung der Daten [Die11]. Um den Einfluss dieser Zeitverzögerung auf den Operator so gering wie möglich zu halten und ihn bei der Antizipation des Verkehrsgeschehens zu unterstützen, soll das Verhalten der Verkehrsteilnehmer prädiziert und in das übertragene Videobild eingezeichnet werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn der Arbeit wird das autonome Fahren als Optimum der erreichbaren Assistenz eingeführt und Schwierigkeiten bei dessen Umsetzung erläutert. Als Ansatz zur Lösung dieser Probleme wird das teleoperierte Fahren genannt und es werden weitere Einsatzmöglichkeiten der Teleoperation vorgestellt. Es wird auch auf die Problematik der Zeitverzögerung bei der Videobildübertragung eingegangen.

Anschließend wird ein Überblick über den Stand der Technik von Fahrassistenzsystemen, der Teleoperation von Straßenfahrzeugen und vom Einsatz von Predictive Displays bei der Prädiktion von Telerobotern gegeben. Dabei wird auch die Umsetzung eines teleoperierten Straßenfahrzeugs am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik (FTM) der TU München erläutert.

Im Kapitel 3 wird der Einfluss von Zeitverzögerungen auf die menschliche Leistungsfähigkeit beleuchtet und die Notwendigkeit einer Prädiktion der Verkehrsteilnehmer anhand eines Beispiels erläutert. Daraufhin wird die Umsetzung

des Predictive Display Konzepts am FTM und die Strategie zur Entwicklung der Anzeigemethoden vorgestellt.

Einen Überblick über bereits bestehende Visualisierungen von Predictive Displays gibt Kapitel 4. Auch die Anforderungen an eine Anzeigemethode für prädizierte Verkehrsteilnehmer werden in diesem Kapitel definiert. Im Anschluss werden einige mögliche Einzeichnungsmethoden vorgestellt, hinsichtlich der zuvor definierten Kriterien evaluiert und eine Auswahl zur weiteren Beurteilung mittels eines Probandentests getroffen.

Im fünften Kapitel wird zunächst die Entwicklung eines Fragebogens zur Durchführung des Probandentest beschrieben. Die Zusammensetzung der Probandengruppe, die Durchführung des Tests und die erzielten Ergebnisse werden dargestellt.

Die Diskussion der Ergebnisse aus der Probandenstudie erfolgt im sechsten Kapitel. Darüber hinaus werden hier, aufbauend auf neuen, durch den Probandentest gewonnenen Erkenntnissen, Verbesserungsvorschläge aufgezeigt.

Das letzte Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung der Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf mögliche Optimierungen der entwickelten Anzeigemethoden.

2 Stand der Technik

2.1 Automatisierung im Straßenverkehr

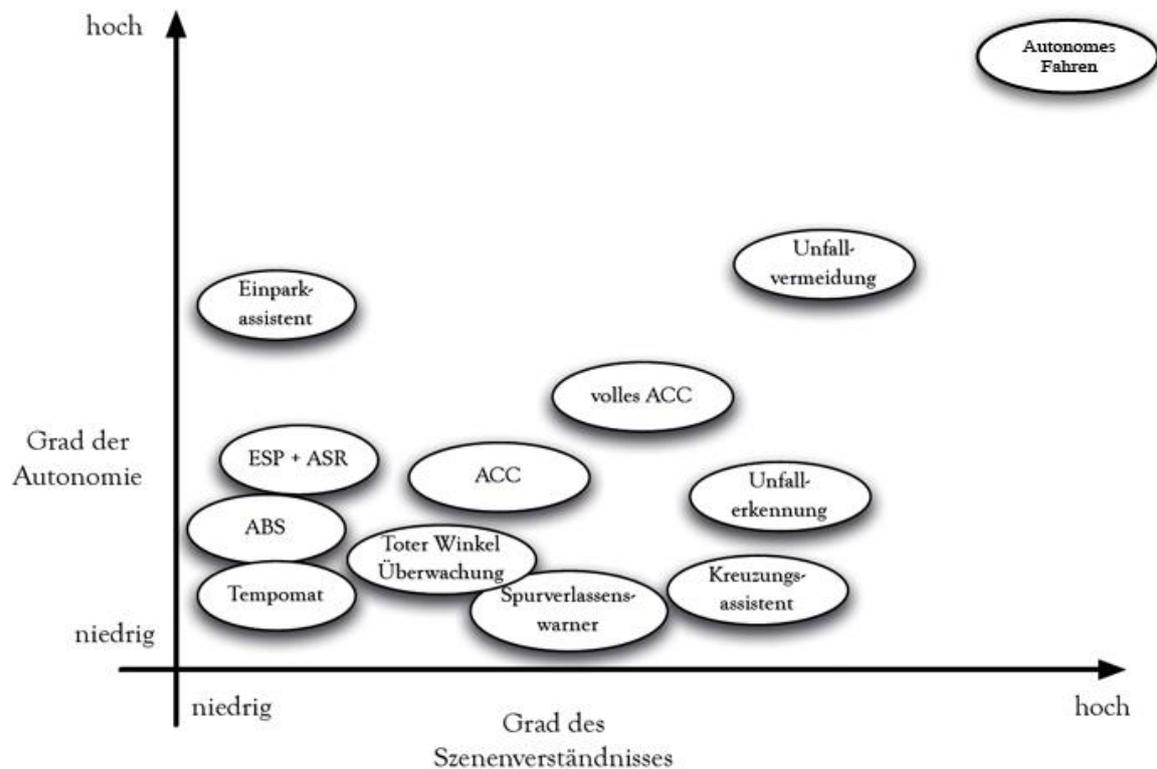


Abbildung 2.1: Klassifizierung von Fahrerassistenzsystemen nach dem Grad der Autonomie und dem Grad des erforderlichen Verständnisses des Fahrzeugumfeldes nach [Vac09, S. 2]

Im Laufe der letzten Jahre wurde die Automatisierung des Fahrens im Straßenverkehr durch den vermehrten Einsatz von Fahrerassistenzsystemen (FAS) immer weiter vorangetrieben [Win09, S. 1]. Zu Beginn dieser Entwicklungen stand eine Teilautomatisierung des Fahrens in weniger komplexen Verkehrsszenarien wie zum Beispiel der Autobahnfahrt. Dabei wurde zunächst die automatische Längsführung (ACC), also die automatische Regelung des Abstands zum vorrausfahrenden Fahrzeug, für den gesamten Geschwindigkeitsbereich umgesetzt [Win09, S. 478 f]. Die automatische Querführung, also das Halten der eigenen Fahrspur, ist erst seit kurzer Zeit im Einsatz [Win09, S. 554]. Auf diese Weise soll eine Automatisierung der Kolonnenfahrt erreicht werden.

Fast alle der in Abbildung 2.1 aufgeführten Systeme sind bei den großen OEMs bereits in Serie [Vac09, S. 2]. So findet man Abstands- und Spurhalteassistenten für Überlandfahrten bereits in vielen Ober- und mittlerweile auch in einigen Mittelklassefahrzeugen.

Eine Steigerung des (teil-)automatisierten Fahrens stellt das autonome Fahren, das heißt das vollautomatisierte Fahren ohne Eingreifen des Fahrers, dar. 2005 gewann das Forschungsfahrzeug „Stanley“ der Stanford University die zweite

„DARPA Grand Challenge“, bei der insgesamt fünf der 23 gestarteten Fahrzeuge das Ziel erreichten [Thr06, S. 662]. 2007 fand erstmals die „DARPA Urban Challenge“ statt, bei der, anders als bei den vorhergegangenen Wettbewerben, ein Parcours in einer urbanen Umgebung zurückgelegt werden musste. Die Testfahrzeuge sollten sich dabei an die geltenden Verkehrsregeln halten, die Verkehrssituationen richtig interpretieren und mit dynamischen Objekten adäquat interagieren [Ber08, S. 260]. Auch bei diesem Wettbewerb zeigte sich, dass im Bereich des autonomen Fahrens noch viel Forschungsarbeit geleistet werden muss. So erreichten von den anfänglich über hundert Teams nur elf das Finale, obwohl die Szenarien in der „DARPA Urban Challenge“ im Vergleich zu realen Fahrsituationen in Städten schon stark vereinfacht wurden. Es mussten weder Fußgänger noch Radfahrer erkannt werden und die Fahrten fanden tagsüber bei gutem Wetter statt. Zwar gelang es einigen wenigen Teilnehmern über die gesamte Wettkampfzeit robust und sicher zu fahren [Ber08Ebd., S. 260], allerdings gab es selbst unter diesen vereinfachten Bedingungen Verstöße gegen die Straßenverkehrsordnung und sogar Zusammenstöße [Wik13].

Vor allem die Automatisierung des Fahrens in komplexen Verkehrssituationen wie im innerstädtischen Bereich ist nur schwer realisierbar. Das sich ständig und schnell ändernde Umfeld, die dynamische Interaktion mit den anderen Verkehrsteilnehmern und das Beachten von statischen und dynamischen Verkehrszeichen erfordern ein Szeneverständnis, welches „weit über die Fähigkeiten der heutigen maschinellen Wahrnehmung hinausgeht“ [Die11].

Am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München (FTM) wird deshalb ein Konzept zur Teleoperation von Straßenfahrzeugen entwickelt. Dieses soll im Folgenden in den Grundzügen dargestellt werden.

2.2 Teleoperiertes Fahren

2.2.1 Umsetzung am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München

Das Konzept für die Umsetzung des teleoperierten Fahrens am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München kann nach Winfield [Win00, S. 149] in drei charakteristische Elemente unterteilt werden:

- Den Operator-Arbeitsplatz,
- die Kommunikationsverbindung und
- den Roboter [Die11] (in diesem Fall das Versuchsfahrzeug).

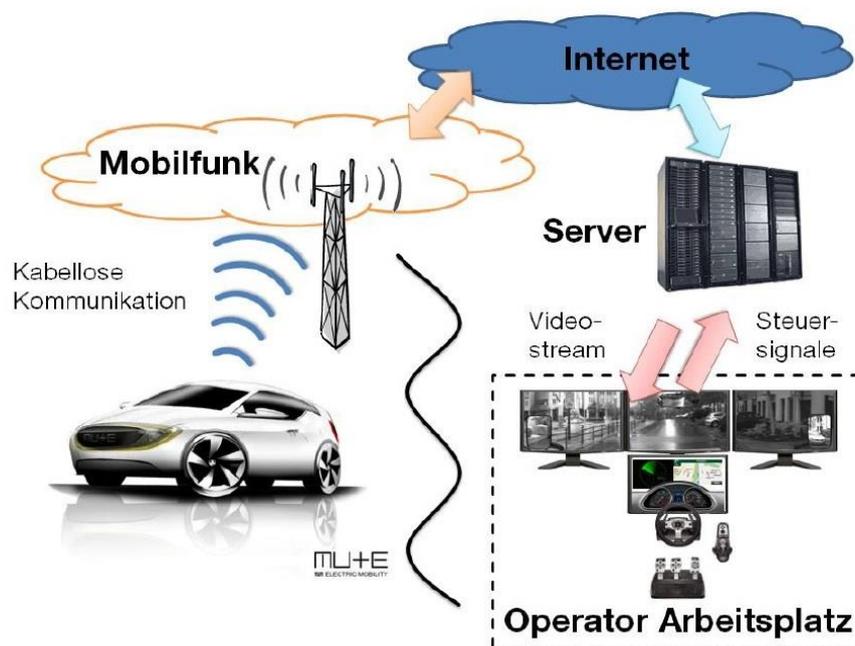


Abbildung 2.2: Basiskonzept des FTM Lehrstuhls zum teleoperierten Fahren [Die11]

Im Rahmen dieser Arbeit soll dabei nur auf die Kommunikationsverbindung und das Kamera- und Sensorsystem eingegangen werden, da diese die wesentlichen Bestandteile für die Bereitstellung des Videobildes und der für die Prädiktion benötigten Daten darstellen.

Die Umgebung des Versuchsfahrzeugs wird von drei Lasersensoren, einem Langstrecken Radarsensors und insgesamt acht Kameras erfasst [Gna13]. Fünf dieser Kameras liefern eine 200-Grad-Sicht nach vorne. Die restlichen drei sind an den Außenspiegeln angebracht beziehungsweise liefern das Bild für die Rückfahrkamera. Das Videobild wird anschließend vom Car-PC encodiert und mittels Funkverbindung zum Operator-Arbeitsplatz übertragen. Als Kommunikationsstruktur wird eine Car-2-Server-Kommunikation verwendet. Das Fahrzeug übermittelt dabei Video- und Sensordaten an den Server und empfängt die Steuersignale des Operators. Auf dem Server werden schließlich die Daten der Umfeldsensorik aufbereitet und daraus die Positionsdaten der erkannten Objekte berechnet. Diese werden dann dem Operator zusammen mit dem Videobild zur Verfügung gestellt. Aufgrund des hohen Datenaufkommens und von Problemen bei der Fahrzeugführung bei zu hohen Totzeiten muss dabei auf eine stationäre W-LAN-Verbindung oder auf Mobilfunknetzte der neueren Generation zurückgegriffen werden [Die11].

Da stationäre W-LAN-Verbindungen für eine Anwendung in der Automobiltechnik wegen der zu geringen Reichweite nur sehr eingeschränkt nutzbar sind, bietet es sich an, auf bestehende Mobilfunktechnologien zurückzugreifen. In Deutschland bieten sich dafür Mobilfunknetzte der dritten Generation (3G) und, sofern verfügbar, 4G-Netze an. Abbildung 2.3 zeigt gemessene Latenzzeiten während einer Messfahrt mit einem 3G-Netz. Dabei handelt es sich um die Zeit, die für die Übertragung

der Steuerbefehle und des Videobildes benötigt wird, und beinhaltet keine Verarbeitungszeiten auf dem Car-PC oder dem Server.

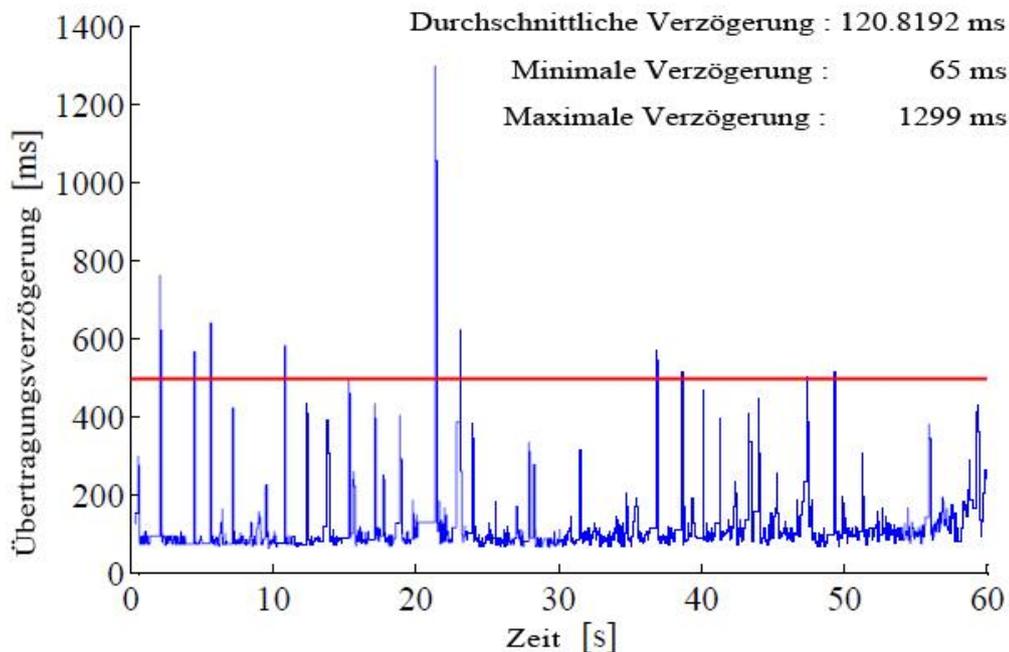


Abbildung 2.3: Übertragungsverzögerungen während einer Messfahrt mit einem 3G-Netz nach [Gna13]

Im Durchschnitt ergibt sich zwar nur eine Verzögerung von rund 121 ms, jedoch variiert diese sehr stark mit der Netzwerkauslastung. Eine solch hohe Varianz der Latenzzeit führt zum Ruckeln des Videobildes und erschwert es dem Operator seine aktuelle Geschwindigkeit richtig einzuschätzen. Um dem entgegenzuwirken, werden die Videodaten gepuffert und dem Operator schließlich mit einer konstanten Übertragungsverzögerung von 500 ms zur Verfügung gestellt [Chu13a].

Ein möglicher Ansatz, die Auswirkungen der Latenzzeit-Problematik auf den Fahrer zu reduzieren beziehungsweise ganz zu eliminieren, ist die Manipulation der vom Teleoperator empfangenen Daten. Dies kann, wie es auch am FTM umgesetzt ist, durch die Verwendung eines sogenannten Predictive Displays geschehen.

2.2.2 Predictive Display

Beim Einsatz eines Predictive Displays wird die Position des betrachteten Objektes und der Umgebung in einer Simulationsumgebung abgebildet und einige Zeitschritte in die Zukunft extrapoliert [She93]. Diese errechneten Positionsänderungen werden dann dem Operator grafisch dargestellt. Alternativ besteht auch die Möglichkeit diese Informationen dem Operator auf haptischem Wege zur Verfügung zu stellen. Diese Methode ist unter dem Namen *Force Feedback* bekannt [Kot92, S. 239 f]. Im Rahmen dieser Arbeit soll jedoch nur auf die visuelle Darstellung einer Prädiktion eingegangen werden.

Der positive Einfluss von Predictive Displays auf die Leistungsfähigkeit des Operators kann für viele Einsatzgebiete gezeigt werden. Bei teleoperierten Weltraumfahrzeugen erreichten laut [Mat96, S. 71 ff] Operatoren, die im Simulator einen Parcours auf mondähnlichem Gelände absolvierten mussten, durch den Einsatz eines Predictive Display viel bessere Zeiten und es wurde eine signifikante Abnahme an Fahrfehlern festgestellt. Auch bei der Teleoperation von Straßenfahrzeugen kann die Qualität der Fahrzeugführung durch den Einsatz von Predictive Displays erhöht werden. So konnten die Operatoren im Simulator einen Parcours mit Spurwechseln, engen Kurven und Slalomfahrten schneller durchfahren und die vorgegebene Spur besser halten. Die Abweichung von der vorgegebenen Spur konnte um rund 26% reduziert werden und die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit lag im Schnitt knapp 12% über der ohne Prädiktion. Auch die mentale Belastung des Operators konnte durch das Predictive Display gemindert werden [Dav10, S. 591 ff]. Ähnliche Ergebnisse konnten auch bei Versuchen am FTM erzielt werden. Hierbei konnte ebenfalls gezeigt werden, dass durch die Verwendung von Predictive Displays sowohl die Fahrfehler und die mentale Belastung des Operators, als auch die Zeit zum bewältigen der Aufgabenstellung abnehmen [Chu13b].

Diese Art der Prädiktion wird bereits bei der Steuerung von Industrierobotern [Den03] und von unbemannten Weltraum- [Kro96], [Mat96, S. 71], Unterwasser- [Ver78, S. 238 ff] und Luftfahrzeugen [Thu00, S. 212 ff] erfolgreich eingesetzt. Dabei wird allerdings nur das Verhalten des Roboters selbst prädiziert und keine Positionsänderung des Umfelds betrachtet, da dieses meist als statisch anzunehmen ist.

Weitere Einsatzgebiete von Predictive Displays sind die Navigation von großen Schiffen [Sul06], die Flugsicherung [End99, S. 51 ff] und visuelle Landehilfen für Piloten [She93]. Auch hier wird, mit Ausnahme der Flugsicherung, nur die Bewegung des zu betrachtenden Objekts prädiziert. Hierbei kann, wie in Abbildung 2.4 ersichtlich, die vorausberechnete Flugroute in der Vogelperspektive am Radarschirm angezeigt und dadurch bei drohenden Kollisionen frühzeitig eingegriffen werden. Da es sich dabei allerdings nicht um ein teleoperiertes System handelt, besteht keine Notwendigkeit ein Videobild vom Flugobjekt zu übertragen, geschweige denn die prädizierten Positionsänderungen darin einzuzeichnen.

Es lässt sich also erkennen, dass Defizite bei der Visualisierung von prädizierten Verkehrsteilnehmern bei teleoperierten Systemen bestehen.

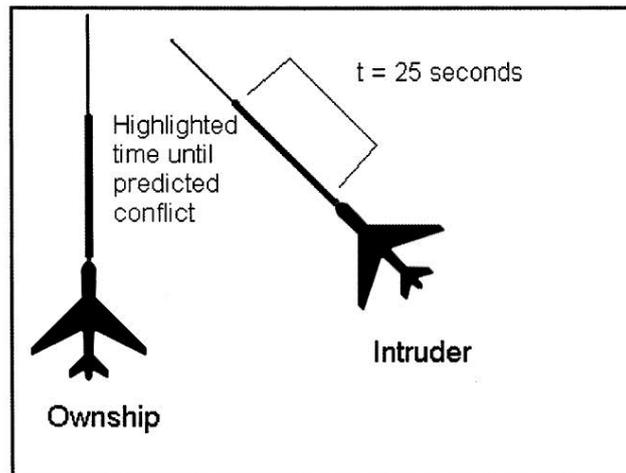


Abbildung 2.4: Visualisierung eines vorausberechneten Konflikts bei der Flugsicherung [Wic00, S. 106]

3 Prädiktion von Fahrzeugen

3.1 Zusammensetzung der Latenzzeit

Wie bereits erwähnt ergeben sich durch die Verwendung von Mobilfunknetzen technisch bedingte Zeitverzögerungen bei der Übertragung der Signale. Zusätzlich nimmt der Operator an seinem Arbeitsplatz die durch die Datenverarbeitung auf dem Car-PC und dem Server bedingte Verzögerung wahr. Zusammen ergibt das die sogenannte Round Trip Time, also die Zeit zwischen dem Senden des Steuerbefehls und der Visualisierung der Reaktion durch den Teleoperator [Pon08, S. 60]. Die im Folgenden erwähnten maximalen Zeitverzögerungen beziehen sich dabei auf eben diese Round Trip Time.

3.2 Einfluss von Latenzzeiten auf die menschliche Leistungsfähigkeit

Der Einfluss von Latenzzeiten auf die menschliche Leistungsfähigkeit wurde bereits in mehreren Studien ausgiebig untersucht [Dav10, S. 590], [Chu13b]. Pongrac stellt zusammenfassend fest, dass eine Zeitverzögerung schon ab bereits unter 50 ms vom Operator wahrgenommen, jedoch erst ab 100 bis 200 ms mit Hinblick auf die Aufgabenleistung ersichtlich wird [Pon08, S. 190]. Bei höheren Zeitverzögerungen zeigt sich eine starke Leistungsreduktion (Abbildung 3.1).

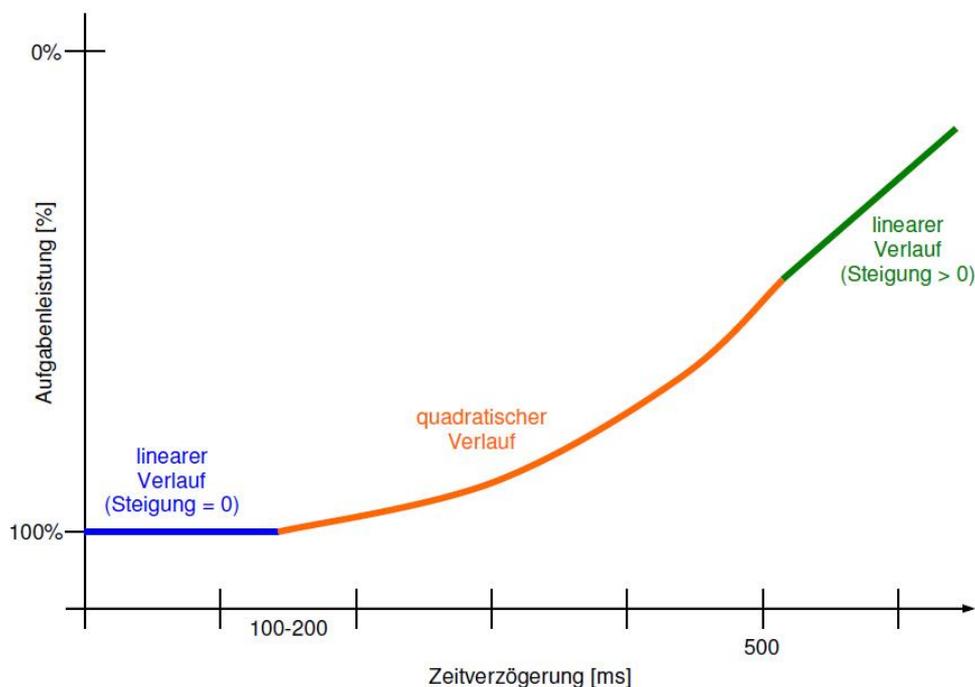


Abbildung 3.1: Abfall der Aufgabenleistung in Abhängigkeit von der Zeitverzögerung nach [Pon08, S. 201]

Das Maß der Beeinträchtigung des Menschen hängt dabei von der Höhe der Latenzzeit und deren Variabilität ab. Bis zu einem gewissen Grad kann der Mensch Verzögerungen gut kompensieren. Dabei ist zu beachten, dass eine variable Zeitverzögerung die Leistungsfähigkeit des Menschen stärker beeinträchtigt als eine konstante [Dav10, S. 592]. Eine konstante Totzeit von 400 bis 500 ms stellt unterdessen das Maximum der tolerierbaren Latenz dar, bei der ein menschlicher Fahrer zum Beispiel einen doppelten Fahrspurwechsel mit 50 km/h noch mit hinreichender Güte durchführen kann [Die11]. Mit wachsenden Totzeiten sinken sowohl die Genauigkeit beim Halten einer vorgegebenen Spur wie auch die fahrbare Geschwindigkeit. Außerdem steigt die mentale Belastung des Fahrers [Dav10, S. 591 f].

Bei sehr hohen Zeitverzögerungen neigt der Mensch zur Anwendung der sogenannten „Move-And-Wait“-Strategie. Dabei handelt es sich um eine open-loop Steuerung, bei der der Operator eine Steuerungseingabe tätigt und anschließend die Reaktion des Roboters abwartet, bevor er den nächsten Steuerungsbefehl erteilt [She63, S. 29], [She93, S. 593]. Auf diese Art und Weise kann zwar die Stabilität des Systems sichergestellt werden, jedoch sinkt damit die maximal mögliche Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters enorm.

Die am FTM verwendete konstante Zeitverzögerung von 500 ms liegt zwar noch nicht (weit) über der kritischen Latenz, kann sich aber bereits negativ auf die Performance und die Fahrsicherheit auswirken und sollte deshalb nicht vernachlässigt werden. Durch den Einsatz eines Predictive Displays kann der Einfluss der Latenzzeit auf die Fahraufgabe abgeschwächt [Dav10, S. 592] und somit eine Instabilität des Systems verhindert werden.

3.3 Erläuterung der Notwendigkeit der Prädiktion anhand eines Beispiels

Zur Veranschaulichung soll die Notwendigkeit der Prädiktion an einem Beispiel erklärt werden (Abbildung 3.2). Dabei handelt es sich beim Fahrzeug B um das eigene, teleoperierte Objekt, das an der Kreuzung nach links abbiegen soll. Das Fahrzeug A ist ein Verkehrsteilnehmer, der in die entgegengesetzte Richtung unterwegs ist. Das hier gezeigte Bild ist um die Totzeit Δt verzögert. Durch die Kästen in den jeweiligen Farben wird die momentane Position der Fahrzeuge ohne Zeitverzögerung verdeutlicht.

Ohne Prädiktion geht der Operator also davon aus, dass sich sein Fahrzeug an der Position 4, das entgegenkommende Fahrzeug an der Position 1 befindet. In diesem Fall könnte er der Meinung sein, dass er noch vor dem Fahrzeug A nach links abbiegen kann. In Wirklichkeit befindet sich das entgegenkommende Fahrzeug jedoch bereits an der Position 2 und das eigene Fahrzeug an Position 3. In diesem Fall ist ein Abbiegen vor dem Fahrzeug A nicht mehr möglich.

Ohne die Hilfestellung durch ein Predictive Display müsste der Operator also durch geschulten Blick anhand der geschätzten Relativgeschwindigkeit und der ihm bekannten konstanten Zeitverzögerung abschätzen, wie weit sich sein eigenes und

das entgegenkommende Fahrzeug bereits aufeinander zubewegt haben und ob ein Abbiegevorgang vor diesem noch möglich ist. In diesem Fall unterstützt ein Predictive Display den Operator bei der Antizipation des Verkehrsgeschehens und senkt somit die mentale Belastung des Fahrers.

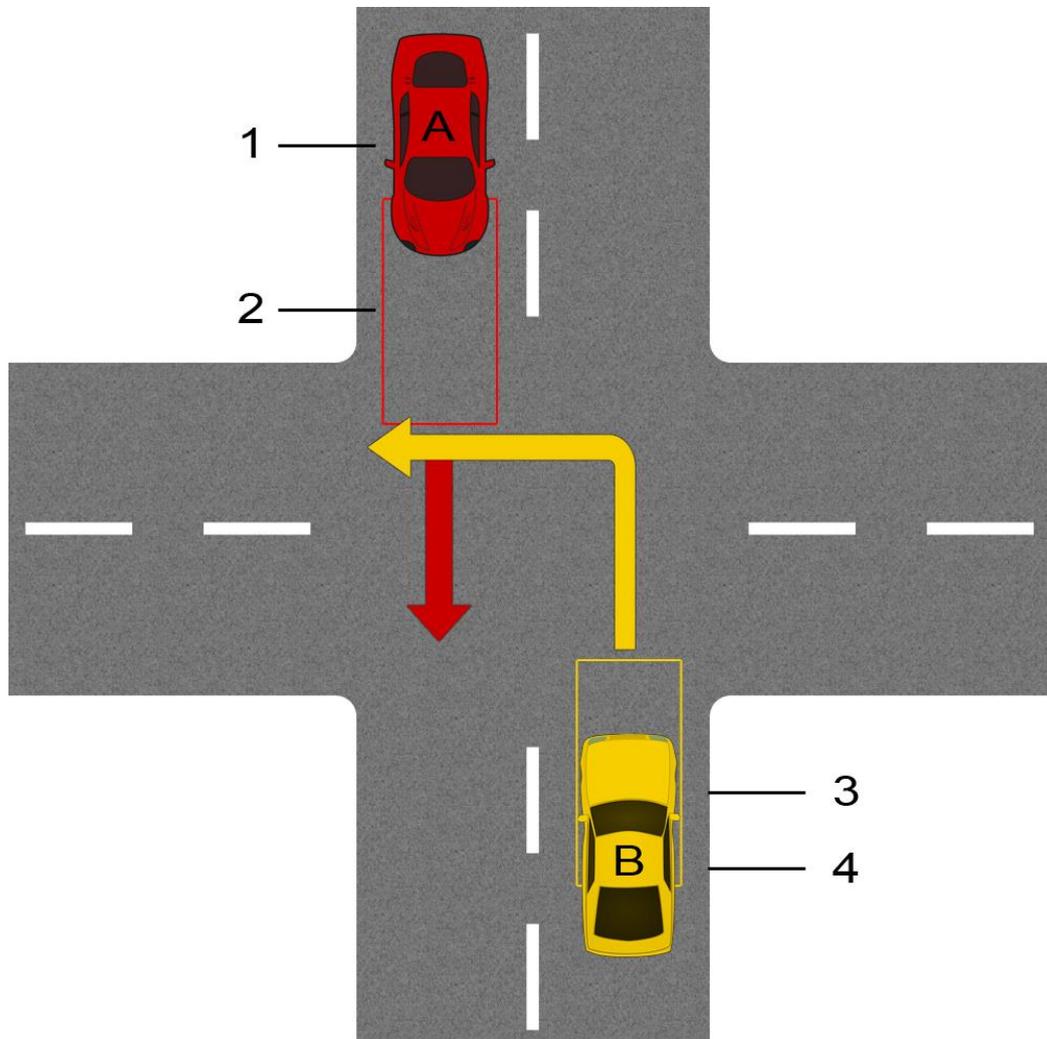


Abbildung 3.2: Veranschaulichung des Nutzens von Predictive Displays anhand eines beispielhaften Abbiegevorgangs

3.4 Umsetzung des Predictive Display Konzepts am FTM

Um die Bewegungen der Verkehrsteilnehmer verlässlich präzisieren zu können, muss zum Beispiel die aktuelle Position der Objekte relativ zum eigenen Fahrzeug, der Geschwindigkeitsvektor, der Gier-Winkel und die Gier-Rate bekannt sein.

Die Position und die Geschwindigkeit sowie die Dimensionen der Objekte werden mittels der Lasersensoren und des Langstrecken-Radarsensors erfasst [Gna13] und die daraus resultierenden Rohdaten mit Hilfe eines Matlab/Simulink-Modelles auf dem Server ausgewertet. Zur Maximierung der Ausfallsicherheit und der Genauigkeit der Positionsdaten werden dabei die Daten des Laserscanners und

des Radarsensors fusioniert. Um gültige (PKWs, LKW, Fußgänger, etc.) von ungültigen Objekten (Bäume, parkende Autos, Häuser, etc.) zu unterscheiden, werden die Objekte anhand der Dimensionen, der Geschwindigkeit, der Bewegungsrichtung und der erkannten Form des Objekts klassifiziert.

Anschließend werden die zukünftigen Koordinaten mit Hilfe eines Prädiktionsmodelles berechnet und diese im fahrzeugeigenem Koordinatensystem (X-Achse in Fahrzeuglängsrichtung, Y-Achse nach links, Z-Achse nach oben) dann an die Bildverarbeitung übergeben. Dort werden sie in das Kamera-Koordinatensystem transformiert und schließlich dem Operator auf dem Monitor angezeigt.

Zusätzlich zum Videobild mit den prädizierten Verkehrsteilnehmern kann bei Bedarf auf einem separaten Monitor noch eine Vogelansicht mit den erkannten Objekten angezeigt werden. Dies erleichtert dem Fahrer die Orientierung und bietet eine Hilfestellung bei langsamen Fahrmanövern wie dem Parken [Gna13].

Abbildung 3.3 zeigt eine Übersicht über den Systemaufbau des Predictive Display Konzepts.

Zur Entwicklung der Anzeigemethoden für das Predictive Display wurden zur Ideenfindung einige Möglichkeiten zuerst in einem Bildbearbeitungsprogramm umgesetzt. Anschließend wurden ausgewählte Methoden in Matlab implementiert und so die Umsetzbarkeit für den Einsatz im teleoperierten Betrieb gezeigt. Dabei wurde auf Datensätze von bereits im Vorfeld aufgezeichneten Messfahrten zurückgegriffen, da so die von den Sensoren ermittelten Positionsdaten über die gesamte Dauer der Fahrt verfügbar sind. Die visualisierten zukünftigen Positionen der Objekte beruhen also auf den durch die Umfeldsensorik ermittelten Daten. Somit wird das Prädiktionsmodell umgangen und es können Fehler bei der Vorausberechnung ausgeschlossen werden. Aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Objekterkennung in den Messfahrten und der aufwendigen Umsetzung der Anzeigemethoden in Matlab wurde auch die Weiterentwicklung der Methoden mit Hilfe von Bildbearbeitungsprogrammen ausgearbeitet.

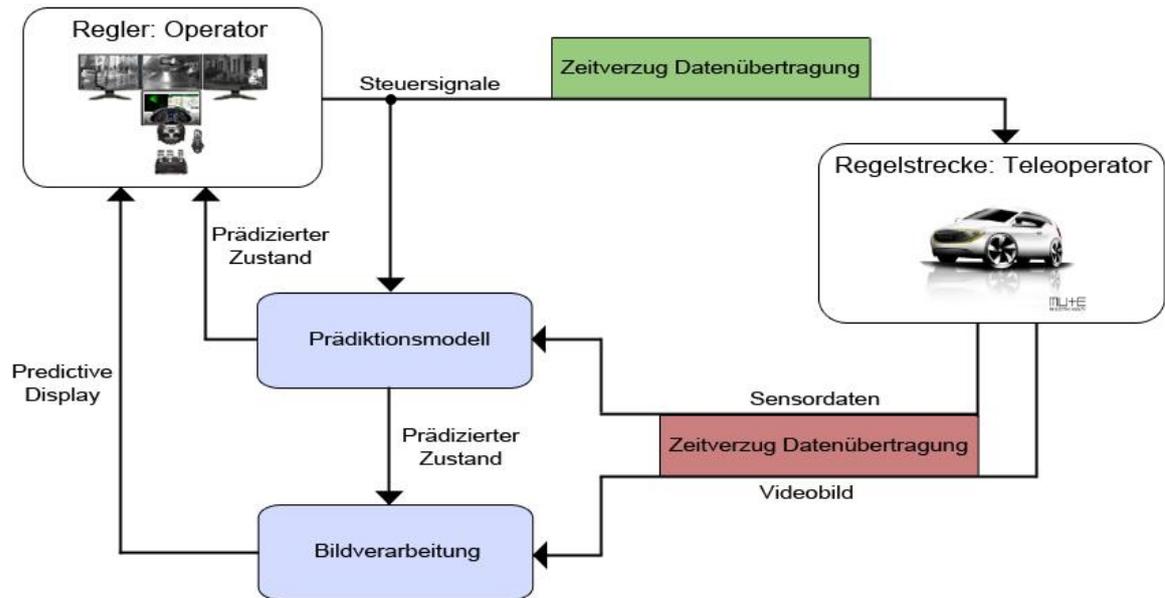


Abbildung 3.3: Systemaufbau des Predictive Display Konzepts nach [Chu13a]

4 Entwicklung von Anzeigemethoden

4.1 Bereits bestehende Anzeigemethoden

Wie bereits weiter oben beschrieben, werden Predictive Displays bereits in einigen Anwendungsbereichen erfolgreich eingesetzt. Die Darstellungsform kann dabei je nach Einsatzzweck sehr unterschiedlich sein. Zur Unterstützung von Fluglotsen können zum Beispiel die vorausberechneten Flugrouten der Objekte im betrachteten Luftraum recht einfach durch Linien am Radarbildschirm verdeutlicht werden [End99, S. 56].

Bei Manipulatoren kann dem Operator die vorausberechnete Position des Roboterarmes angezeigt werden. Bei einfachen Aufgaben wie dem Platzieren eines Bolzens in einer Bohrung kann dies beispielsweise durch ein kleines Quadrat, welches die zukünftige Position der Bolzenspitze verdeutlicht, geschehen [Tsu96, S. 1545]. Bei komplexeren Aufgaben bietet es sich an, den kompletten Greifarm des Roboters abzubilden. Dies kann zum einen durch ein Kanten-, zum anderen durch ein Volumenmodell geschehen [Bej90, S. 546 ff]. Um die Bewegungen der Objekte zu visualisieren, müssen diese dafür jedoch als 3D-Modelle vorhanden sein [Den03]. Dies ist momentan nur für Roboter in einer definierten, geschlossenen Umgebung möglich. Neueste Forschungen beschäftigen sich mit der Abbildung des Umfelds als computergeneriertes Modell, um so eine Perspektivenänderung der Kamera und Bewegungen des Manipulators fotorealistisch darstellen zu können [Bur04, S. 22 ff].

Je nach Anwendungszweck ist die Verwendung von Kanten- oder Volumenmodellen vorzuziehen. Volumenmodelle liefern zwar ein genaueres Abbild des Roboters, bei Überlagerung des Videobildes mit dem 3D-Modell können jedoch wichtige Bildausschnitte verdeckt werden. In diesem Fall bietet sich die Verwendung von Kantenmodellen an [Bej90, S. 547]. Bei seinen Untersuchungen zur Auswirkung der Zeitverzögerung auf die Fahrleistung kommt Davis et al. zu den selben Ergebnissen. Auch hier wird angemerkt, dass das verwendete 3D-Volumenmodell, besonders bei langsamer Fahrt, große Teile des Videobildes verdeckt und deshalb zur Darstellung der Prädiktion nicht optimal ist [Dav10, S. 593].

Verplank entwickelte bereits 1978 eine Methode die prädizierte Position von unbemannten Unterwasserfahrzeugen anzuzeigen (Abbildung 4.1). Die Prädiktion des Objekts wurde dabei durch ein Rechteck visualisiert. Da aufgrund der niedrigen Bandbreite nur alle acht Sekunden ein Bild der Kamera übertragen werden konnte, wurde zusätzlich noch ein zweiter, stationärer Rahmen mit vertikalen Linien an den Ecken eingezeichnet. Dieser verdeutlicht, von welcher Position das nächste Bild aufgenommen wird. Dadurch kann sich der Operator besser auf das nächst folgende Bild einstellen und die Prädiktion besser im Sichtfeld behalten [Ver78, S. 420].

Auch bei unbemannten Weltraumfahrzeugen kann die freie Bewegung des Roboters in unbekanntem Terrain vorausberechnet und angezeigt werden (Abbildung 4.2). So zeichnet Mathan et al. die prädizierten Spurlinien zusammen mit einem

Pfeil zur Visualisierung der prädizierten Position und der Orientierung des Fahrzeugs, in das übertragene Videobild ein [Mat96, S. 71 f].

Die beiden zuletzt genannten Anzeigemethoden liefert die Basis für die grundlegenden Überlegungen dieser Arbeit.

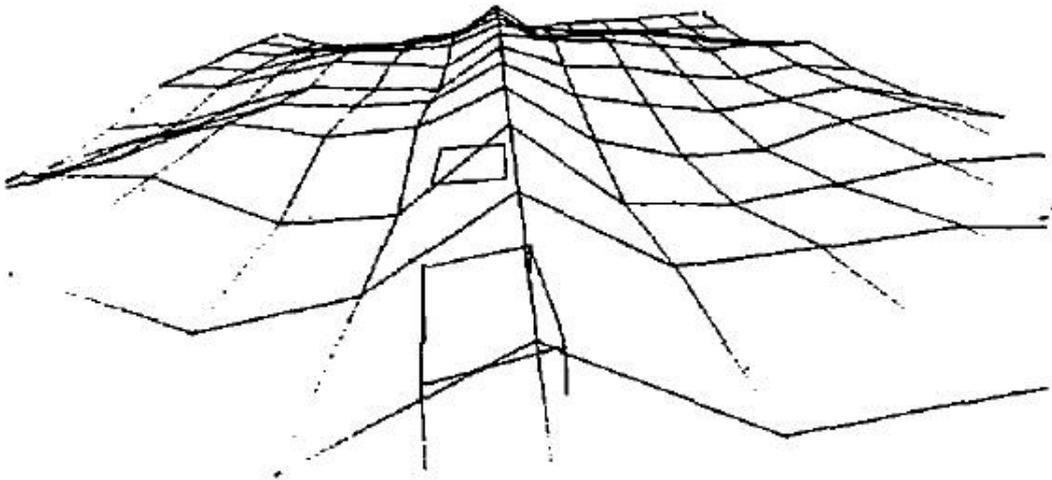


Abbildung 4.1: Predictive Display eines unbemannten Unterwasserfahrzeugs [Ver78, S. 240]

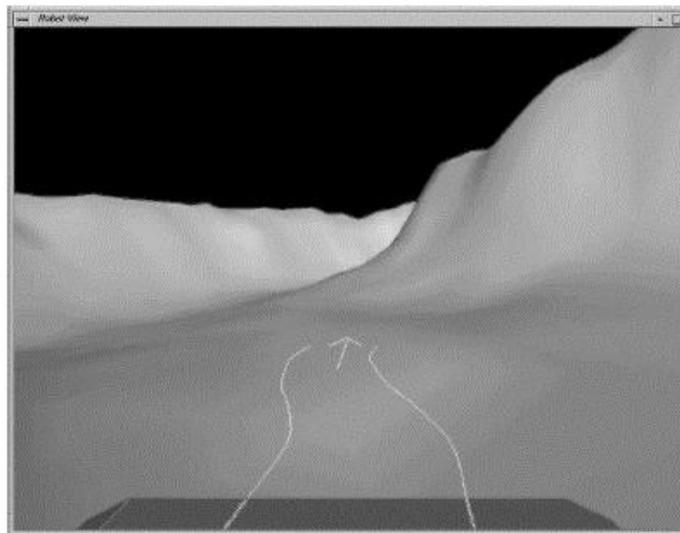


Abbildung 4.2: Predictive Display eines Mond-Rovers mit einer Prädiktionszeit von 5 Sekunden [Mat96, S. 71]

Eine weitere Grundlage zur Entwicklung der Anzeigemethoden stellt das von Daimler-Forschern eingesetzte Verfahren *6D-Vision* dar. Dabei wird die Bewegung von Bildpunkten mittels Stereokamera erfasst, prädiziert und diese Positionsänderung mit Hilfe von Pfeilen in das Videobild eingezeichnet. Die Technik orientiert sich dabei an den Prinzipien des optischen Flusses [Fra07]. Da in dem Videobild jedoch sehr

viele Pfeile angezeigt werden, eignet sich diese Darstellungsform nur bedingt zur direkten Verwendung als Anzeigemethode von prädizierten Objektpositionen.



Abbildung 4.3: 6D-Vision Technik von Daimler am Beispiel einer Radfahrerprädiktion [Rab13]

4.2 Anforderungen an eine Anzeigemethode für prädizierte Verkehrsteilnehmer

Um dem Operator die Position des prädizierten Objekts möglichst genau und intuitiv vermitteln zu können und ihm so die Steuerung des Teleoperators zu erleichtern, sollen zunächst einige Anforderungen definiert werden. Wie bereits unter Punkt 3.3 erwähnt muss es für den Operator erkenntlich sein, wo sich der Verkehrsteilnehmer in Wirklichkeit (ohne Totzeit) im verzögerten Videobild befindet. Dabei ist sowohl die Bewegung des Verkehrsteilnehmers selbst als auch die eigene Bewegung während der Totzeit Δt zu berücksichtigen. Wichtig ist dabei jedoch, dass der Operator nicht durch eine zu hohe Informationsdichte überfordert wird. Die Informationen sollten deshalb übersichtlich und intuitiv dargestellt werden.

Des Weiteren sollten folgende Informationen möglichst einfach und schnell für den Operator ersichtlich sein:

- Die relative Geschwindigkeit des Verkehrsteilnehmers zum eigenen Fahrzeug.
- Die Orientierung und die Bewegungsrichtung des Verkehrsteilnehmers.
- Die perspektivischen Abmessungen des prädizierten Objekts im zeitverzögerten Videobild.

4.3 Mögliche Anzeigemethoden und deren Evaluation

Im Folgenden sollen einige mögliche Anzeigemethoden zur Darstellung einer Prädiktion von PKWs erläutert und hinsichtlich der Erfüllung der oben genannten Kriterien evaluiert werden.

Um das Videobild nicht mit unnötigen Informationen zu überladen, werden die Prädiktionen nur bis zu einer Entfernung von 50 m vor dem Teleoperator eingezeichnet.

Die Beschreibung der Methoden bezieht sich dabei jeweils auf die Sicht des Operators. Somit meinen die Begriffe *zukünftige*, *prädizierte* und *vorausberechnete* Position jeweils die vom Prädiktionsmodell berechnete Position des Objekts, welche im Optimalfall mit der nichtzeitverzögerten Position des Objekts übereinstimmt. Mit der *aktuellen* beziehungsweise *momentanen* Position ist also die um die Totzeit Δt zeitverzögert dargestellte Position des Objekts gemeint.

Eine Möglichkeit zur Visualisierung der Prädiktion besteht darin, einen einfachen Pfeil mittig an der Fahrzeugfont auf Fahrbahnhöhe anzuzeigen (Abbildung 4.4). Durch die Länge des Pfeils kann zwar indirekt die Geschwindigkeit des Objekts und durch die Richtung auch dessen Bewegungsrichtung abgelesen werden, jedoch fehlen Informationen über die Ausrichtung und die perspektivischen Abmessungen des prädizierten Fahrzeugs. Auch die genaue zukünftige Position des Fahrzeugs ist nicht erkennbar, sondern nur eine Bewegungstendenz.

Alternativ wäre es denkbar ein komplettes, fotorealistisches 3D-Modell des erkannten Objekts darzustellen (Abbildung 4.5). Dadurch können die Position, die Orientierung und die perspektivischen Abmessungen des Fahrzeugs optimal dargestellt werden. Die relative Geschwindigkeit ist aus dem Abstand der beiden Objektdarstellungen erkennbar. Problematisch gestaltet sich jedoch die Tatsache, dass zum einen 3D-Modelle aller denkbaren Fahrzeugtypen auf dem Server verfügbar sein und diese passend zum erkannten Objekt ausgewählt werden müssten. Zum anderen sollten diese Modelle dem Videobild nur mit einer verminderten Deckkraft überlagert werden, da sonst große Teile des Videobildes verdeckt würden. Dies würde zu Schwierigkeiten bei der Unterscheidung der prädizierten und der aktuellen Position des Fahrzeugs führen. Die Bewegungsrichtung des Objekts ist bei dieser Methode ebenfalls nicht eindeutig herauslesbar, da nicht klar ersichtlich ist, bei welchem der Objekte es sich um das Prädizierte handelt.



Abbildung 4.4: Darstellung der Fahrzeugprädiktion mittels eines Pfeils auf Fahrbahnhöhe



Abbildung 4.5: Darstellung der Fahrzeugprädiktion mittels der Überlagerung eines 3D-Modells mit 50 % Deckkraft

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, mit Hilfe von zwei Quadern die aktuelle und die zukünftige Position des Objekts zu verdeutlichen (Abbildung 4.6). Die unteren Flächen befinden sich dabei auf Fahrbahnhöhe und die oberen Flächen auf einer

Höhe von rund 40 cm, was in etwa der Stoßstangenhöhe bei vielen Fahrzeugen entspricht. Die Flächen der Quader sind für die aktuelle Position in Blau, die für die prädizierte Position in Rot eingefärbt. Die Kanten werden jeweils als schwarze Linien dargestellt. Mit Hilfe eines Pfeils von der Mitte der aktuellen zur Mitte der zukünftigen Position werden die Bewegungsrichtung und die relative Geschwindigkeit verdeutlicht. Auch die Orientierung und die perspektivische Abmessungen des Objekts sind durch diese Darstellungsart gut erkennbar. Nachteilig ist jedoch, dass auch bei einer reduzierten Deckkraft von rund 60 % die Quader große Teile des Videobildes verdecken und so dem Operator potentiell wichtige Informationen über das Umfeld nicht zur Verfügung stehen.

Abhilfe für dieses Problem bietet die Option, dem Operator nur die Kanten der Quader anzuzeigen und die Deckflächen transparent zu gestalten (Abbildung 4.7). Diese Darstellungsart bietet nahezu alle Vorteile der oben vorgestellten Möglichkeit mit den ausgefüllten Flächen, verdeckt dabei aber weit weniger des Originalbildes. Durch die vielen, sich teilweise überschneidenden Linien wird es für den Operator allerdings schwierig, diese richtig zuzuordnen und den Überblick zu behalten.

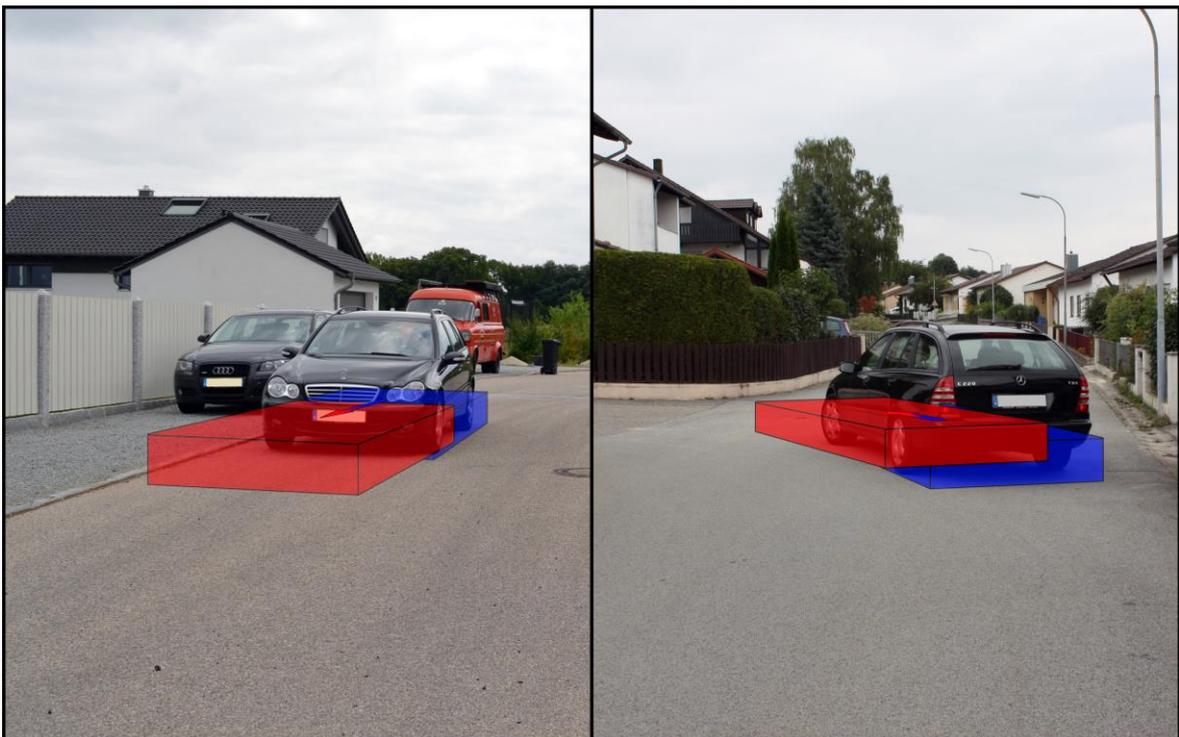


Abbildung 4.6: Darstellung der Fahrzeugprädiktion mittels der Überlagerung von Quadern mit 60 % Deckkraft

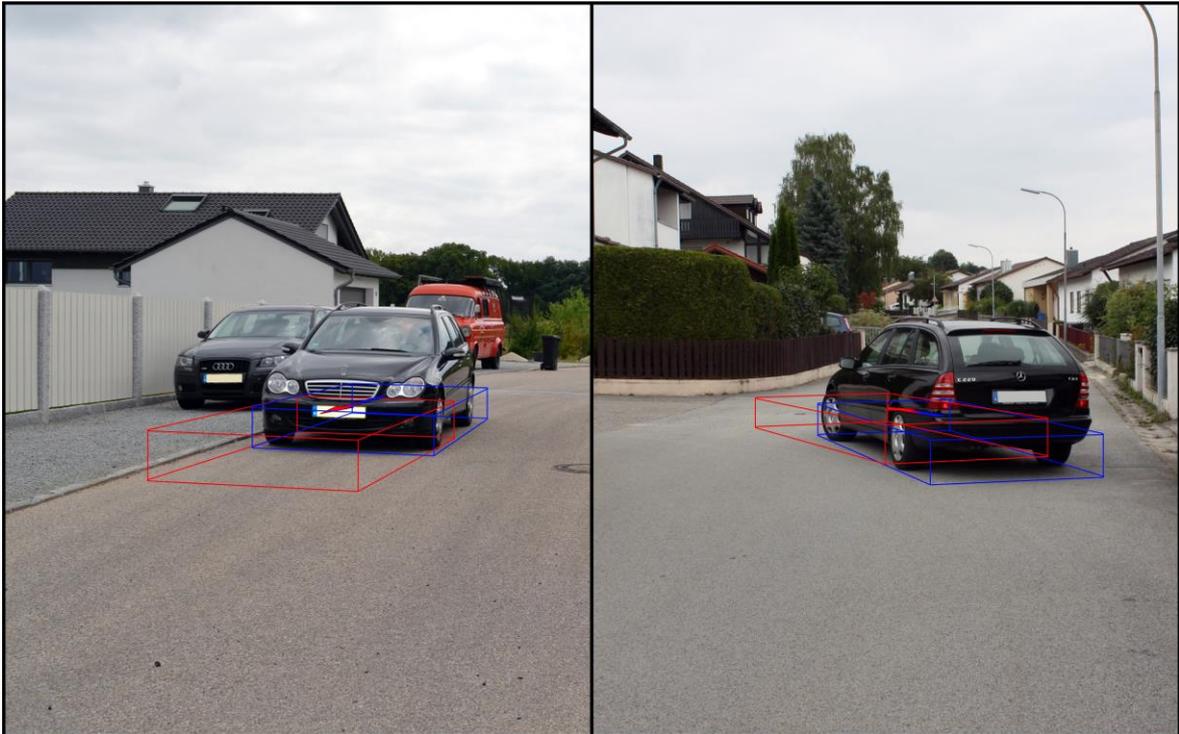


Abbildung 4.7: Darstellung der Fahrzeugprädiktion mittels Kantenmodellen von Quadern

Aufbauend auf diesen ersten Überlegungen wurden folgende vier Anzeigemethoden entwickelt und diese im Kapitel 5 durch einen Probandentest objektiv evaluiert. Zusätzlich wurden die Probanden auch hinsichtlich ihrer subjektiven Meinung zu den jeweiligen Anzeigemethoden befragt.

Positionen der Reifen (PR):

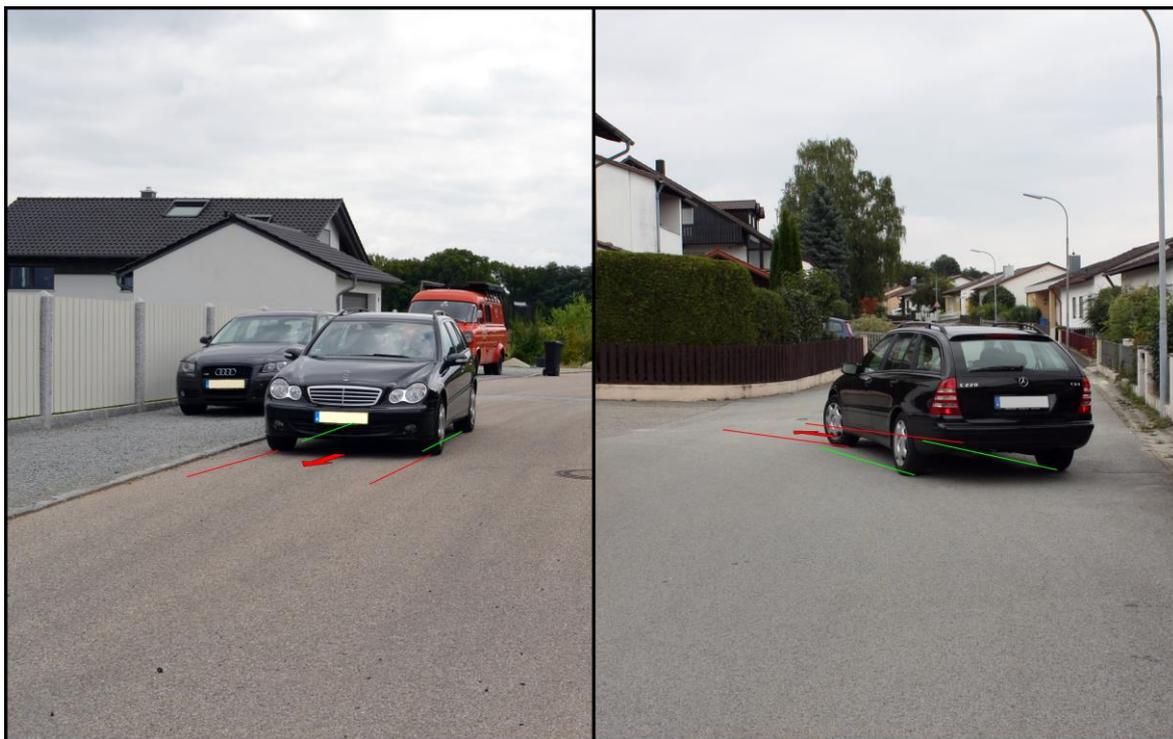


Abbildung 4.8: Position der Reifen als Darstellungsmethode der Fahrzeugprädiktion

Die erste Methode (Abbildung 4.8) lässt sich direkt aus der Anzeigemethode eines Predictive Displays von Weltraumfahrzeugen nach Mathan et al. [Mat96, S. 71 f] ableiten. Dabei wird in das Videobild eine Linie von der momentanen zur vorausgerechneten Position der Reifen eingezeichnet. Um die Darstellung übersichtlicher zu gestalten, werden die Linien der Vorder- und Hinterachse in unterschiedlichen Farben dargestellt. Zusätzlich wird die berechnete Position und die Orientierung des Objekts durch einen Pfeil visualisiert, welcher in der Mitte der prädizierten Fahrzeugposition dargestellt ist.

Die relative Geschwindigkeit ist durch die Länge der dargestellten Spurlinien indirekt ersichtlich. Mit Hilfe des Pfeils kann zwar die ungefähre Position der prädizierten Objektmitte, die Bewegungsrichtung und die Orientierung erkennbar gemacht werden, doch die perspektivischen Abmessungen sind nicht eindeutig herauszulesen. Da durch die eingezeichneten Linien nur die Position der Reifen, nicht aber die der gesamten Karosserie verdeutlicht wird, muss der Operator selbst die Maße der Überhänge erkennen und berücksichtigen. Somit ist eine genaue Positionsbestimmung des prädizierten Fahrzeugs nur schwer möglich.

Positionen markanter Fahrzeugpunkte (PmF):



Abbildung 4.9: Position markanter Fahrzeugpunkte als Darstellungsmethode der Fahrzeugprädiktion

Bei der hier dargestellten Methode (Abbildung 4.9) werden Linien von markanten Punkten des Fahrzeugs (Eckpunkte, auffällige Fahrzeugteile, Anbauteile, etc.) zu deren prädizierter Position gezeichnet. Damit lehnt sich diese Methode an das 6D-Vision Verfahren von Daimler an. Es wurde jedoch darauf geachtet, weniger Linien darzustellen, um die Übersichtlichkeit zu erhalten. Durch die farbliche Hervorhebung sollen diese besser sichtbar gemacht werden.

Diese Variante bietet dem Operator nur wenig Informationsgehalt. Die relative Geschwindigkeit kann zwar indirekt durch die Länge der Linien erschlossen werden, doch die Bewegungsrichtung ist nicht klar ersichtlich und kann nur vermutet werden. Auch die Orientierung des Fahrzeugs und die perspektivischen Abmessungen sind aus der Darstellung kaum erkennbar, da die Umrisse des prädizierten Objekts nur erahnt werden können. Zuletzt sei erwähnt, dass auch eine Umsetzung dieser Methode nur schwer möglich ist, weil dafür zuerst markante Punkte auf den Objekten erkannt werden müssen. Dies übersteigt die Möglichkeiten der Messung mittels Laserscanner und Radarsensoren.

Rahmen in Fahrbahnhöhe (RF):

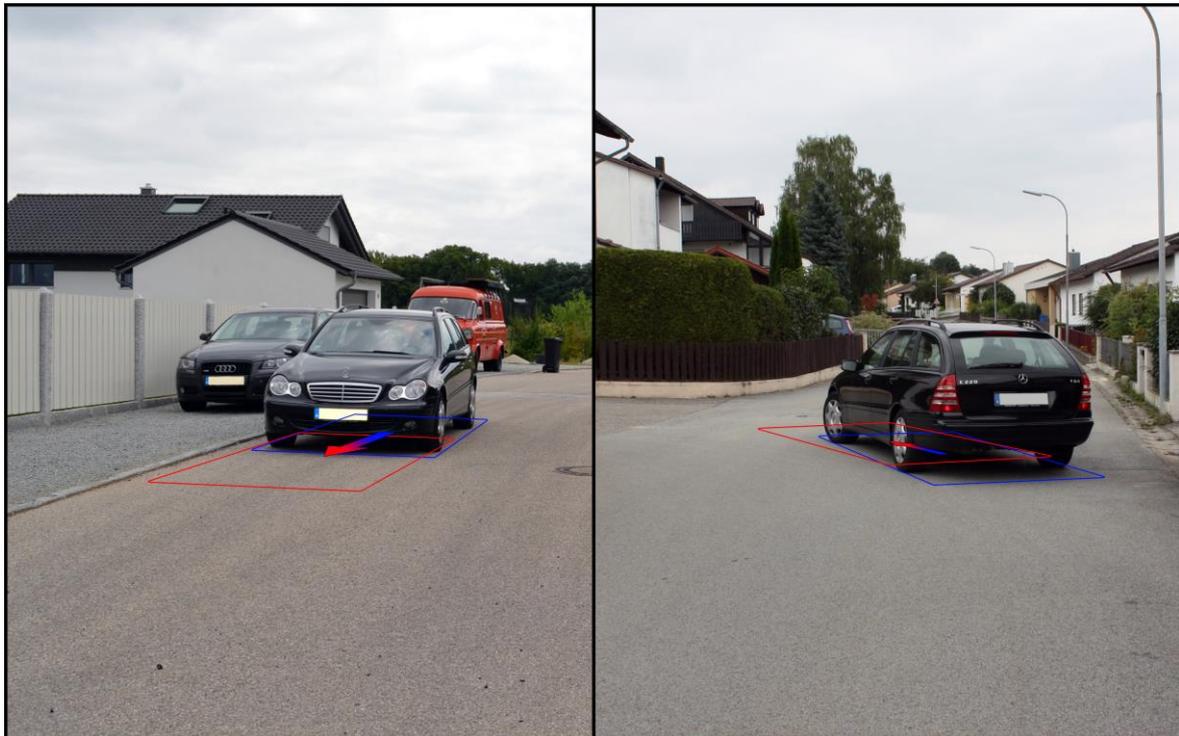


Abbildung 4.10: Rahmen Fahrbahnhöhe als Darstellungsmethode der Fahrzeugprädiktion

Sowohl die aktuelle als auch die prädizierte Position des Fahrzeugs werden durch viereckige Rahmen auf Fahrbahnhöhe veranschaulicht (Abbildung 4.10). Zur besseren Übersicht und Unterscheidung ist der Rahmen der aktuellen blau, der Rahmen der prädizierten Lage rot eingefärbt. Die Abmessungen des blauen Rahmens entsprechen dabei den von den Sensoren ermittelten Dimensionen des Objekts. Die Mittelpunkte der zusammengehörenden Rahmen sind durch einen Pfeil mit Farbverlauf verbunden.

Durch die Orientierung des Pfeils wird die Bewegungsrichtung und durch dessen Länge indirekt die relative Geschwindigkeit des Fahrzeugs veranschaulicht. Der Farbverlauf deutet die Zusammengehörigkeit der beiden Rahmen an. Da der Pfeil auf Fahrbahnhöhe gezeigt wird, ist dieser aus der Kameraperspektive gut erkennbar. Die Dimensionen und die Orientierung des roten Rahmens entsprechen dabei denen des prädizierten Objekts. Weil die Lage der Rahmen in Z-Richtung nicht veranschaulicht wird, können sich allerdings Probleme bei der Interpretation der Lage im dreidimensionalen Raum ergeben. So könnten kleinere Abweichungen bei der Lage des Rahmens relativ zum Fahrzeug aufgrund von perspektivischen Verzerrungen dazu führen, dass der Operator an der Genauigkeit der Objekterkennung zweifelt und somit das Vertrauen auf die Zuverlässigkeit der Prädiktion schwindet.

Rahmen in Stoßstangenhöhe (RS):



Abbildung 4.11: Rahmen Stoßstange als Darstellungsmethode der Fahrzeugprädiktion

Diese Methode (Abbildung 4.11) baut auf der zuvor beschriebenen Methode auf. Im Gegensatz dazu werden die Rahmen nicht auf Fahrbahnhöhe, sondern auf einer Höhe von ca. 40 cm eingezeichnet. Außerdem werden zusätzliche Linien von den Eckpunkten der Rahmen zur Fahrbahn dargestellt.

Die Z-Koordinate der Rahmen entspricht in etwa der Höhe der Stoßstange bei PKWs. Auch die Laserscanner-Messpunkte liegen auf etwa dieser Höhe. Durch diese Wahl kann sichergestellt werden, dass die Dimensionen der Rahmen möglichst genau mit denen des betrachteten Objekts übereinstimmen und originalgetreu abgebildet werden. Mit Hilfe der Höhenverschiebung sollen dem Operator mehr Informationen über die Position des Prädiktionsobjekts im Raum zur Verfügung gestellt und er dadurch bei der Interpretation der Lage im dreidimensionalen Raum unterstützt werden. Die relative Geschwindigkeit, die Orientierung, die Bewegungsrichtung und die perspektivischen Abmessungen des Fahrzeugs werden, wie bereits bei der Methode *Rahmen in Fahrbahnhöhe* beschrieben, dem Operator durch die Ausrichtung und Position der Rahmen und des Pfeils bereitgestellt. Da der Pfeil diesmal aus Übersichtsgründen allerdings auch auf der Höhe des Rahmens gezeichnet wird, ist dieser, bedingt durch die Kameraperspektive, schlechter sichtbar. Zudem können die Überschneidungen der vielen Linien zu Verwirrung beim Operator sorgen.

Im Folgenden sollen zusätzlich Möglichkeiten zur Darstellung einer Radfahrer- und einer Fußgängerprädiktion dargestellt werden.

Radfahrerprädiktion - Rahmen in Stoßstangenhöhe:

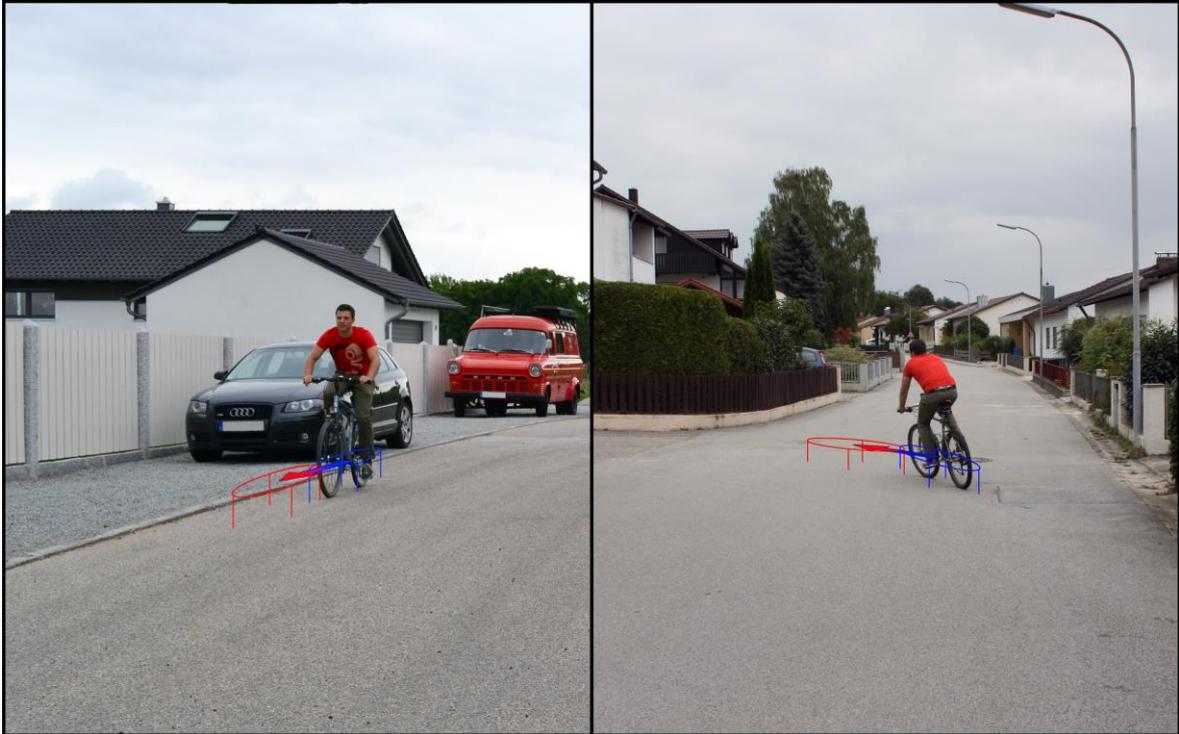


Abbildung 4.12: Rahmen Stoßstangenhöhe als Darstellungsmethode der Radfahrerprädiktion

Die Ergebnisse der Radfahrerprädiktion soll ähnlich denen der PKW-Prädiktion visualisiert werden (Abbildung 4.12). So wird, wie bei der Methode *Rahmen in Stoßstangenhöhe* erläutert, ein Rahmen in einer Höhe von rund 40 cm um das Objekt gezogen und die Prädiktion mittels eines weiteren Rahmens veranschaulicht. Im Gegensatz zur PKW-Prädiktion wird dabei allerdings kein viereckiger, sondern ein Ellipsenförmiger Rahmen verwendet. Damit soll zum einen die Form näher an der eines Radfahrers angelehnt und zum anderen eine einfache optische Trennung von PKW und Radfahrer ermöglicht werden.

Dem Operator wird durch die Höheninformation die Einordnung der Lage des Objekts im dreidimensionalen Raum erleichtert. Durch die Ausrichtung, die Position der Rahmen und mit Hilfe des Pfeils werden die Bewegungsrichtung, die Orientierung des Radfahrers und die relative Geschwindigkeit verdeutlicht. Probleme bereiten auch hier die starke Verzerrung des Pfeils aufgrund der hohen Lage und die vielen Überschneidungen der Linien.

Radfahrerprädiktion - Rahmen in Fahrbahnhöhe:

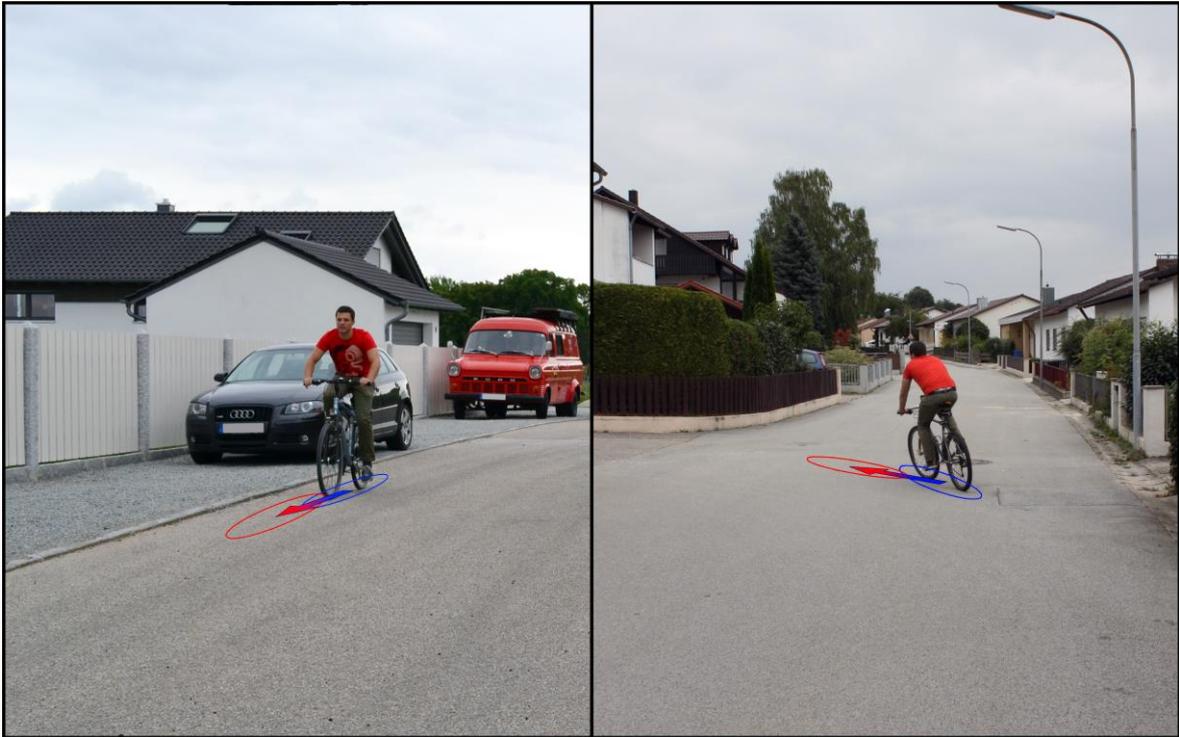


Abbildung 4.13: Rahmen Fahrbahnhöhe als Darstellungsmethode der Radfahrerprädiktion

Alternativ zur Radfahrerprädiktion durch einen - *Rahmen in Stoßstangenhöhe* kann auch hier der Rahmen auf Fahrbahnhöhe dargestellt werden. Analog zur PKW Prädiktion bringt dies einige Vor- beziehungsweise Nachteile mit sich. So trägt die verminderte Anzahl an Linien und die bessere Erkennbarkeit des Richtungspfeils zur Übersichtlichkeit der Darstellungsmethode bei. Dagegen spricht die erschwerte Interpretation der Lage der Rahmen im dreidimensionalen Raum durch das Fehlen der Höheninformation.

Allgemein ergeben sich noch weitere Problemstellungen bei der Prädiktion von Radfahrern. So kann zum Beispiel nur schwer die Schräglage des Radfahrers in Kurven abgebildet werden und auch ausgestreckte Arme beim Abbiegen werden vernachlässigt. Auf diese Problematik soll aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden.

Fußgängerprädiktion - Kreis:

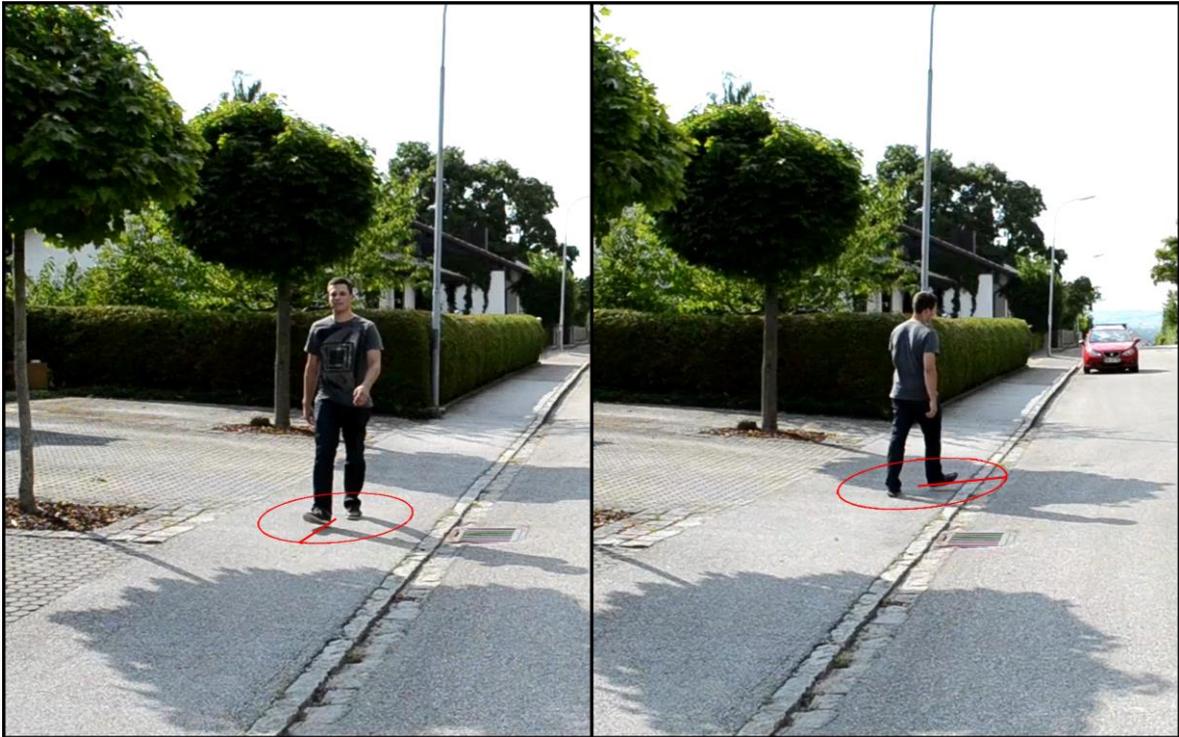


Abbildung 4.14: Kreis als Darstellungsmethode der Fußgängerprädiktion

Bei der Prädiktion von Fußgängern müssen dem Operator vor allem zwei wesentliche Informationen über das Bewegungsverhalten des Passanten zur Verfügung gestellt werden. Zum einen der Bewegungsradius bei konstant bleibender Gehgeschwindigkeit und zum anderen die momentane Bewegungsrichtung. Da Fußgänger ihre Richtung sehr schnell ändern können kann keine Prädiktion im Sinne einer exakt definierten, prädizierten Position getroffen werden. Deswegen und aufgrund der normalerweise recht geringen Bewegungsgeschwindigkeit von Fußgängern wird stattdessen der Bewegungsradius angezeigt.

Dieser kann am einfachsten durch einen Kreis visualisiert werden (Abbildung 4.14). Durch eine Linie ausgehend vom Mittelpunkt des Kreises wird die momentane Richtung der Bewegung aufgezeigt.

Fußgängerprädiktion - Tropfenform:

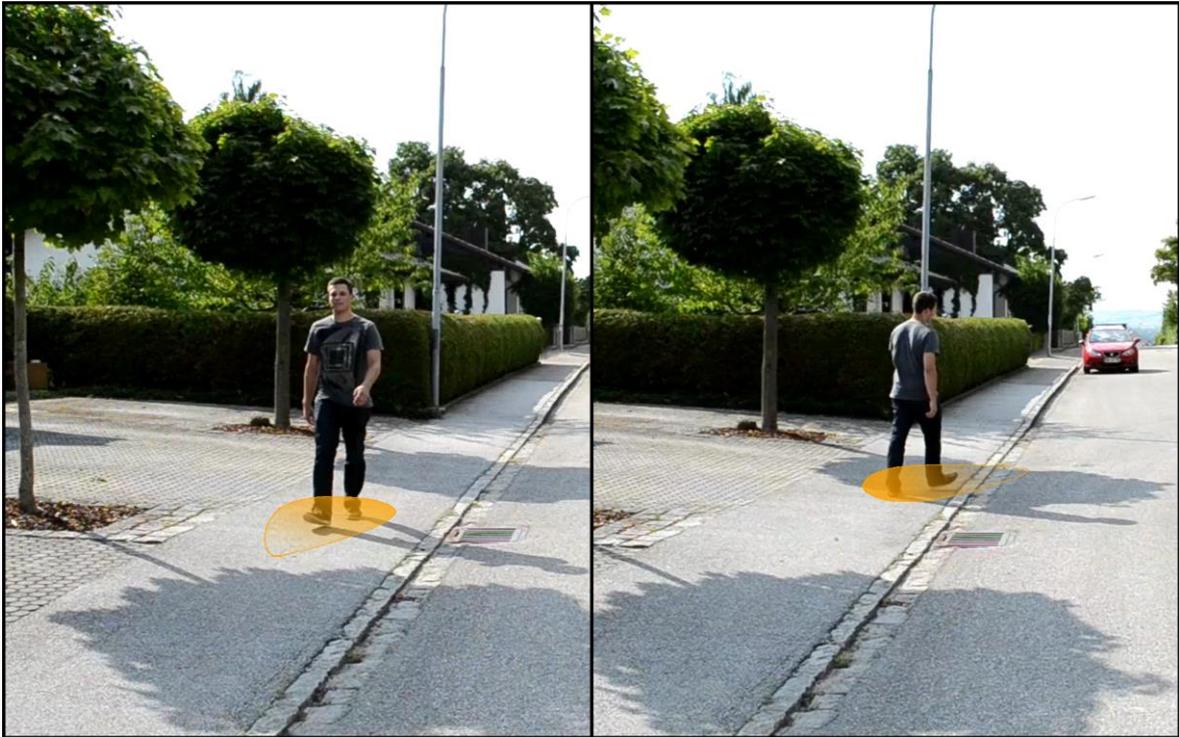


Abbildung 4.15: Tropfenform als Darstellungsmethode der Fußgängerprädiktion

Alternativ dazu kann die Prädiktion eines Fußgängers auch durch eine Tropfenform verdeutlicht werden (Abbildung 4.15). Die Spitze des Tropfens zeigt dabei die Bewegungsrichtung des Passanten an. Durch einen linearen Deckkraftverlauf der Farbe von der Rundung hin zur Spitze soll deutlich gemacht werden, dass es sich nur um die vermutliche Bewegungsrichtung des Fußgängers handelt, da dieser seine Richtung schnell ändern kann. Mit Hilfe der Kontur wird der Bewegungsradius verdeutlicht. Um möglichst wenig vom Videobild zu verdecken, wird die Tropfenform insgesamt nur mit einer Deckkraft von rund 80 % dargestellt.

5 Vergleich der Anzeigemethoden mittels einer Probandenbefragung

5.1 Entwicklung eines Fragebogens

Um die entwickelten Anzeigemethoden für PKWs objektiv zu evaluieren, wurde eine Studie mit 21 Probanden durchgeführt. Dabei soll den Versuchsteilnehmer möglichst intuitiv ein gutes Szeneverständnis vermittelt und so die Antizipation des Verkehrsgeschehens erleichtert werden. Durch die Studie soll die effektivste Methode zur Erreichung dieses Ziels gefunden und eventuelles Verbesserungspotential erkannt werden. Zum empirischen Vergleich der Anzeigemöglichkeiten wurde ein Fragebogen entwickelt, welcher sich auf vier konstruierten Verkehrssituationen bezieht.

Um definierte und vergleichbare Bedingungen für den Probandentest zu schaffen, wurden keine Bilder aus den aufgezeichneten Messfahrten, sondern eigens dafür angefertigte verwendet. Dadurch wurden auch ungenau erfasste Positionsdaten und Fehler in der Klassifikation der Objekte ausgeschlossen. Des Weiteren konnte die grafische Umsetzung so leichter an die Bedürfnisse angepasst werden.

Die Erstellung der Bilder für den Probandentest verlief dabei in mehreren Schritten.

Zuerst wurden für die Startposition und für jede der prädizierten Positionen ein Bild mit dem zu betrachtenden Fahrzeug aufgenommen und die Eckpunkte am Boden markiert. Anschließend wurde je ein Foto ohne Fahrzeug aus derselben Perspektive gemacht, wobei die Eckpositionen des Objekts durch Pfosten kenntlich gemacht wurden (Abbildung 5.1). Die Kameraperspektive wurde dabei so gewählt, dass sie in etwa der im Versuchsträger verwendeten Kameras entspricht. Im Nachhinein wurden die Bilder in einem Bildbearbeitungsprogramm superponiert und schließlich die unterschiedlichen Prädiktionen mit Hilfe der Eckmarkierungen eingezeichnet. Auf diese Weise konnte eine exakte Positionierung der Rahmen und Linien sichergestellt werden.

So wurden für jede der unter 5.3 beschriebenen vier Testsituationen mehrere Bilder erstellt, um den Versuchspersonen möglichst viele unterschiedliche Szenen anzubieten und so einen Lerneffekt auszuschließen. Es soll verhindert werden, dass der Proband ein Bild wiedererkennt und dann aufgrund seiner zuvor getroffenen Wahl entscheidet. Um ein großes Spektrum an Varianten zu erstellen, wurden teils mehr prädizierte Positionen als nötig, teils Situationen mit unterschiedlichen Fahrzeugen aufgenommen.

Der gesamte Probandentest gliederte sich in zwei Teilbereiche. Im ersten Teil wurden die Anzeigemethoden objektiv bewertet. Dazu musste der Proband die Position des prädizierten Objekts relativ zur Umgebung erkennen. Um die bereits erwähnten Lerneffekte auszuschließen, variierte die Reihenfolge in der die unterschiedlichen Anzeigemethoden bei den einzelnen Versuchen dargestellt werden. Zusätzlich wurden auch immer wieder unterschiedliche Umgebungen und unterschiedliche Fahrzeuge verwendet.

Für den objektiven Teil des Tests wurden insgesamt vier unterschiedliche Test-Konfigurationen erstellt. Diese Konfigurationen unterscheiden sich sowohl durch unterschiedliche Reihenfolgen der Anzeigemethoden als auch durch die verwendeten Szenen.

Beim zweiten Teil des Tests handelte es sich um eine subjektive Beurteilung der Anzeigemethoden. Dadurch soll die Akzeptanz der unterschiedlichen Methoden zur Visualisierung einer Prädiktion überprüft und Verbesserungspotential erkannt werden.



Abbildung 5.1: Aufbau zur Erfassung der Bilder für den Probandentest. Links: Fahrzeug und Eckmarkierungen an der Startposition. Rechts: Fahrzeug und Eckmarkierungen an einer der zu prädizierenden Positionen.

5.2 Zusammensetzung der Probandengruppe

Im Folgenden wird, wie in der gesamten Arbeit, die männliche Form zur Bezeichnung der Probanden verwendet, wobei gleichermaßen auch weibliche Versuchsteilnehmer gemeint sein können.

Die Probandengruppe besteht aus 19 männlichen und 2 weiblichen Personen. Insgesamt wurden also 21 Personen im Alter zwischen 19 und 55 Jahren getestet. Das Durchschnittsalter lag bei 27,2 Jahren (vergleiche auch Abbildung 5.2). Die Probanden besitzen allen den Führerschein der Fahrerlaubnisklasse B (PKW) und fahren im Mittel zwischen 5.000 und 10.000 km pro Jahr.

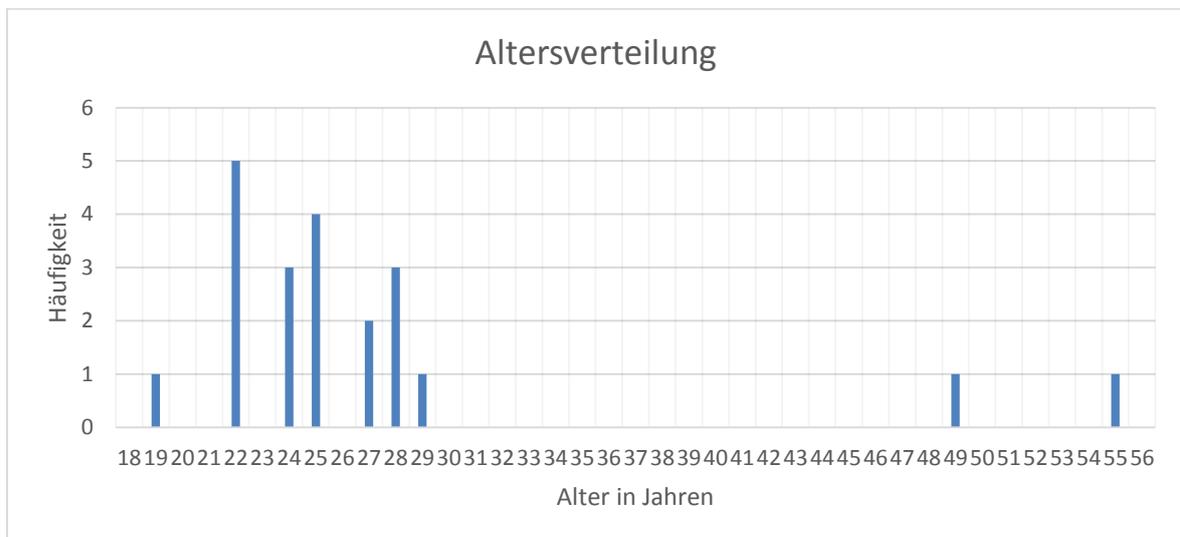


Abbildung 5.2: Altersverteilung der Probanden

5.3 Durchführung des Probandentests

Im Folgenden werden die verwendeten Testszenarien und der Ablauf des Probandentests beschrieben. Bei den gezeigten Schemata zeigen die dargestellten Fahrzeuge wiederum die aktuellen Positionen im zeitverzögerten Bild und die eingezeichneten Rahmen die prädizierten Positionen der jeweiligen Fahrzeuge an. Mithilfe dieser Schaubilder wurde auch den Probanden vor jedem der Tests die Aufgabenstellung verdeutlicht.

Die für den Test verwendeten Bilder werden den Versuchspersonen jeweils für sieben Sekunden auf einem Monitor gezeigt. Danach wird der Bildschirm schwarz und der Proband muss eine Entscheidung treffen.

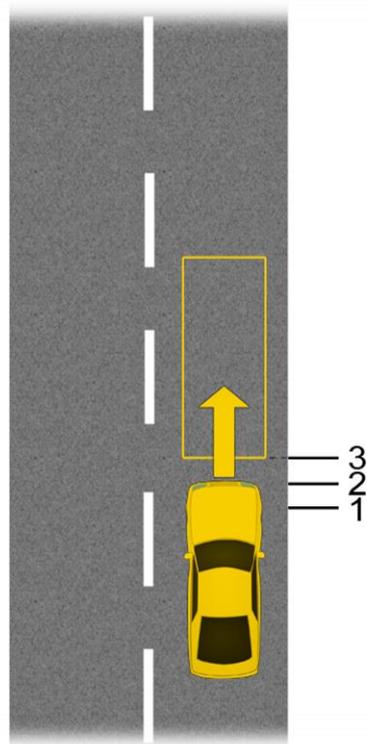
Um dem Probanden das nötige Hintergrundwissen zu vermitteln, wird ihm zunächst ein kurzer Text mit allgemeinen Informationen zum teleoperierten Fahren vorgelegt. Dabei wird auch das Vorhaben, der Latenzzeitproblematik durch eine Prädiktion der Verkehrsteilnehmer zu entgegen, beschrieben. Um diese Prädiktionen dem Operator zu vermitteln, muss eine möglichst einfache und intuitive Anzeigemethode gefunden werden.

Anschließend füllt die Versuchsperson einen kurzen Fragebogen mit allgemeinen Angaben zu ihrer Person aus. Der Fragebogen ist Anhang unter Punkt A zu sehen.

Nach diesen Vorbereitungen wird mit dem ersten Teil des eigentlichen Tests begonnen. Vor jedem der einzelnen Versuche wird dem Probanden eine kurze Beschreibung des Versuchs zusammen mit den im Folgenden verwendeten Schemata gezeigt. Eventuelle Unklarheiten wurden mit dem Versuchsleiter besprochen. Danach werden der Reihe nach die nachfolgend beschriebenen Versuche durchgeführt und dabei die Antworten vom Versuchsleiter erfasst. Vor dem ersten Versuch werden dem Probanden keine Informationen zu den einzelnen Anzeigemethoden gegeben. Die Versuchsperson muss also selbst die dargestellte Methode erfassen und richtig deuten. So können im Nachhinein die einzelnen Methoden hinsichtlich ihres intuitiven Verständnisses verglichen werden.

Beispielbilder zu den einzelnen Tests sind im Anhang unter Punkt B zu finden.

Position abschätzen (Abbildung 5.3):



Dem Probanden werden zu jeder der in Kapitel 4.3 beschriebenen Darstellungsmethoden zwei Bilder eines Fahrzeugs auf einer geraden Straße gezeigt. Darauf ist das Fahrzeug zusammen mit einer Prädiktion seiner zukünftigen Position zu sehen. Am Fahrbahnrand ist ein Maßstab mit drei Positionsmarkierungen eingeblendet. Anhand der im Bild dargestellten Prädiktion muss der Proband bestimmen, an welcher Position sich das prädizierte Fahrzeug befindet. Bewegt sich das Objekt dabei von dem Betrachter weg ist die Position des Fahrzeughecks, bei einem entgegenkommenden Objekt die der Fahrzeugfront zu nennen.

Abbildung 5.3: Schema Position abschätzen

Anschließend werden dem Probanden nochmals alle vier verwendeten Darstellungsvarianten der Reihe nach gezeigt. Er wird gebeten die dargestellte Anzeigemethode in eigenen Worten zu erklären. Wenn nötig, wird dabei die Erläuterung durch den Versuchsleiter ergänzt beziehungsweise verbessert. So wird vor dem zweiten Test der gleiche Kenntnisstand aller Versuchspersonen erreicht.

Spurwechsel mit Hindernis (Abbildung 5.4):

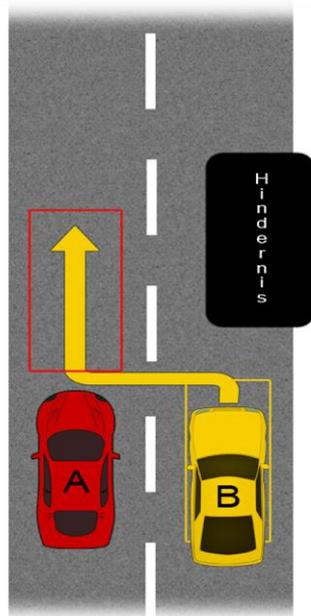
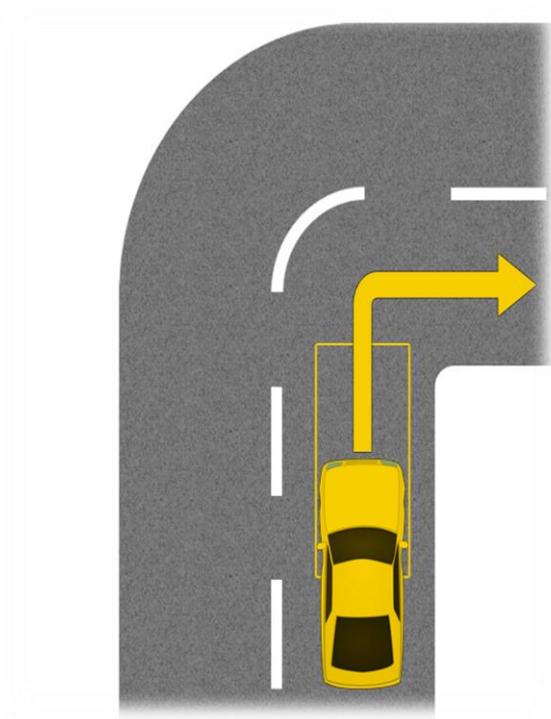


Abbildung 5.4: Schema Spurwechsel mit Hindernis

Beim zweiten Test werden dem Probanden pro Anzeigemethode drei Bilder gezeigt. Darauf sind zwei, sich in die gleiche Richtung bewegend Fahrzeuge zu sehen. Fahrzeug A befindet sich auf der linken Spur und überholt das Fahrzeug B. Da die rechte Fahrbahn durch ein Hindernis versperrt ist, muss auch das Fahrzeug B die Spur wechseln und nach links ausweichen. In der zeitverzögerten Darstellung ist ein Spurwechsel noch nicht möglich, weil die linke Spur (noch) nicht frei ist. Wenn sich beide Fahrzeuge aber mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen, kann es sein, dass Fahrzeug A sich bereits vor Fahrzeug B befindet. Dadurch wäre die linke Spur frei und ein Spurwechsel des rechten Fahrzeugs möglich. Der

Proband soll nun bei jedem der gezeigten Bilder entscheiden, ob das prädizierte Fahrzeug B bereits die Spur ungehindert wechseln kann. Dabei muss sowohl die prädizierte Position des Fahrzeugs A als auch die des Fahrzeugs B zunächst richtig erkannt und dann zueinander in Relation gesetzt werden.

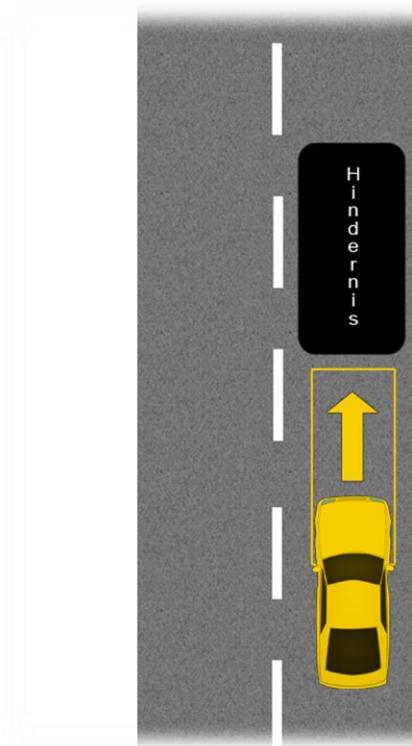
Abbiegevorgang (Abbildung 5.5):



Bei Test Nummer drei wird dem Probanden ein Video eines PKWs beim Abbiegen nach rechts ohne jegliche Prädiktion gezeigt. Anschließend sind nacheinander drei Bilder des Fahrzeugs mit Prädiktionen an unterschiedlichen Positionen entlang der Bewegungsrichtung zu sehen. Der Proband soll abschätzen, bei welchem der Bilder das prädizierte Fahrzeug mit dem Einlenken beginnen muss, um die Kurve wie auf dem zuvor gezeigten Video zu durchfahren.

Abbildung 5.5: Schema Abbiegevorgang

Auffahren auf ein Hindernis (Abbildung 5.6):



Beim letzten Test ist ein Fahrzeug zu sehen, welches sich auf ein Hindernis zubewegt. Dem Probanden werden je Anzeigemethode nacheinander einige Bilder gezeigt, bei welchen sich das prädizierte Fahrzeug von Bild zu Bild immer näher auf das Hindernis zubewegt. Bei jedem der gezeigten Bilder soll die Versuchsperson entscheiden, ob das vorausberechnete Objekt bereits mit dem Hindernis kollidiert ist, sich die Prädiktion also bereits „im“ Hindernis befindet. Sollte die Versuchsperson fälschlicherweise ein Bild, bei dem das Fahrzeug bereits mit dem Hindernis kollidiert ist, als „noch nicht kollidiert“ bewerten, so wird ihm auf dem Bildschirm „Zu spät“ angezeigt und dies vom Versuchsleiter vermerkt. Sobald der Proband angibt

Abbildung 5.6: Schema Auffahren auf ein Hindernis

eine Kollision erkannt zu haben, wird sofort zur nächsten Anzeigemethode übergegangen.

Im Anschluss an Teil Eins des Tests werden dem Probanden erneut alle vier Anzeigemethoden nacheinander mittels Bildern und teilweise auch mittels kurzen Videosequenzen gezeigt. Die Versuchsperson soll dann eine kurze subjektive Beurteilung durchführen, die Vor- beziehungsweise Nachteile der einzelnen Methoden nennen und gegebenenfalls Verbesserungsvorschläge äußern.

Danach werden die Anzeigemethoden in einer Übersicht dargestellt und der Proband gebeten diese in einer Rangfolge zu ordnen. Abschließend hat der Versuchsteilnehmer noch die Möglichkeit, eigene Wünsche und Ideen für eine Visualisierung der Fahrzeugprädiktion zu nennen. Falls diese Vorschläge bereits umgesetzt wurden, wird ihm ein Bild davon gezeigt. Der Proband wird dann gebeten seine Empfehlung anhand des gezeigten Bildes zu bewerten.

5.4 Ergebnis der Probandenbefragung

5.4.1 Teil 1: Objektive Beurteilung

Bei diesem Teil des Tests wurde überprüft, wie gut die Probanden die Position des prädizierten Objekts relativ zur Umgebung erkennen. Für eine richtig gelöste Aufgabe erhält der Proband einen Punkt. Die im Folgenden verwendeten Diagramme zeigen jeweils die Anzahl an Punkten, die im Durchschnitt über alle Probanden erreicht wurden.

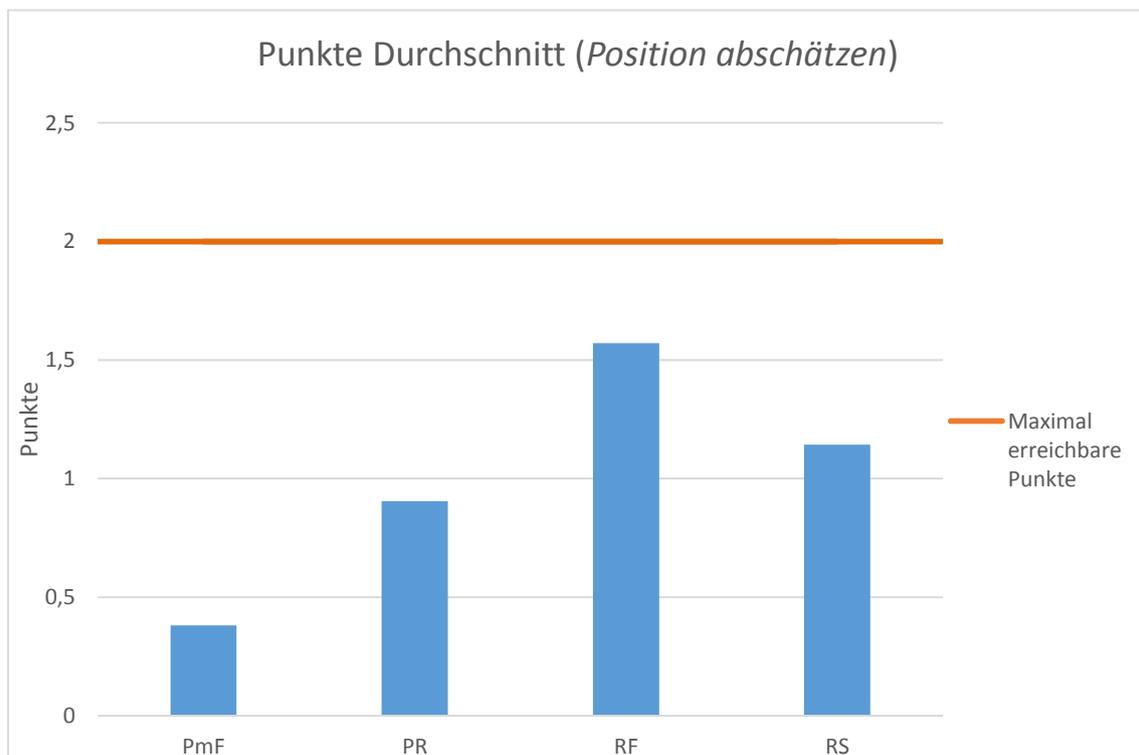


Abbildung 5.7: Durchschnittliche Punkteverteilung beim Position Abschätzen

Da vor dem ersten Versuch (*Position abschätzen*) den Probanden die Anzeigemethoden weder gezeigt noch erklärt wurden und nur eine begrenzte Zeit zum Erkennen der richtigen Position zur Verfügung stand, kann daraus auf das intuitive Verständnis der Methoden geschlossen werden. Anhand von Abbildung 5.7 ist gut erkennbar, dass die Methode *Rahmen in Fahrbahnhöhe (RF)* besonders einfach zu erfassen ist. Die Probanden konnten bei dieser Anzeigemethode im Schnitt 1,6 der 2 gezeigten Positionen richtig erkennen. Auffällig ist, dass bei der Methode *Positionen markanter Fahrzeugpunkte (PmF)* nur rund 0,4 von 2 Punkten erzielt wurden. Viele Probanden gaben an, von der großen Anzahl der Linien verwirrt zu sein und deshalb keine genaue Aussage treffen zu können.

Da nach diesem ersten Versuch die Anzeigemethoden einzeln vorgestellt und eventuelle Fragen geklärt werden, liefern die folgenden Versuche keine neuen Erkenntnisse, wie intuitiv die Anzeigevarianten zu erfassen sind.

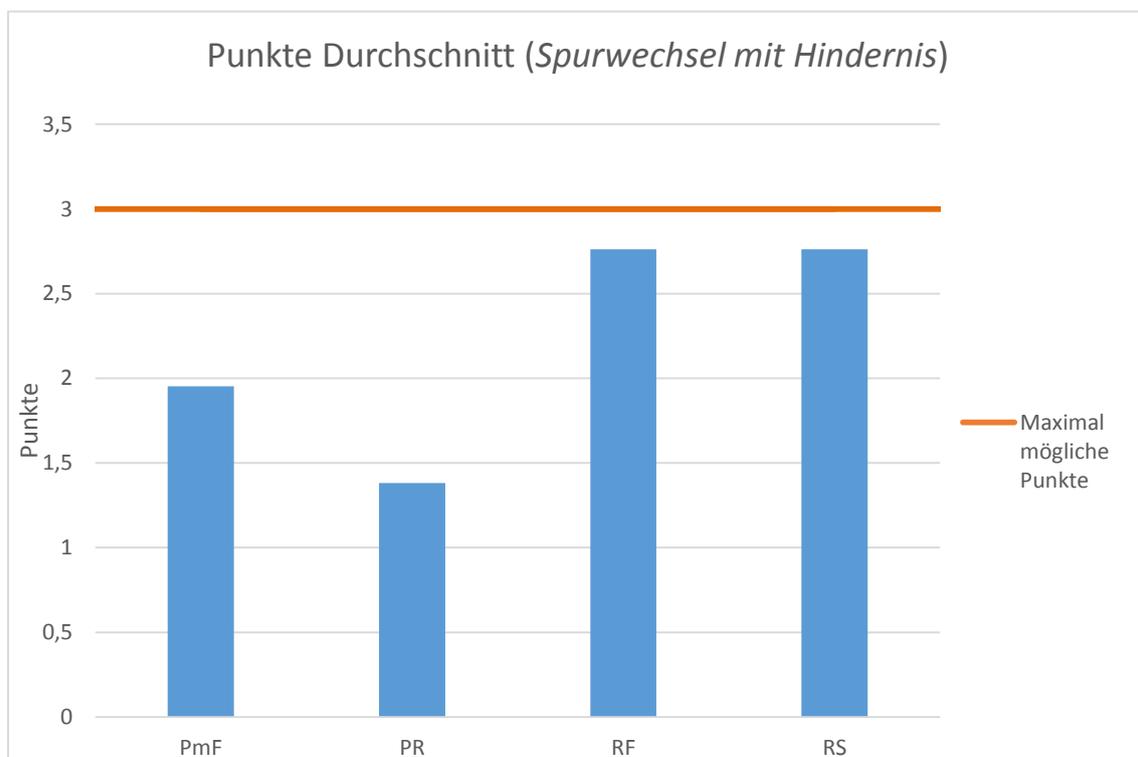


Abbildung 5.8: Durchschnittliche Punkteverteilung beim Spurwechsel mit Hindernis

Der zweite Versuch (*Spurwechsel mit Hindernis*) stellt insofern eine Steigerung der Komplexität dar, als nun die prädierte Position von zwei Objekten erkannt und zueinander in Relation gesetzt werden muss. Hier fällt auf, dass sowohl die Methode *RF* als auch die *- Rahmen in Stoßstangenhöhe (RS)* sehr gut abgeschnitten haben. Bei beiden wurden 2,8 von 3 möglichen Punkten erreicht (Abbildung 5.8). Dies entspricht etwa 92 % der erreichbaren Punkte. Im Gegensatz dazu erreichte die Variante *Positionen der Reifen (PR)* nur 1,4 Punkte, was etwa nur 46 % der Maximalpunktzahl entspricht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass viele Probanden den Überhang des Fahrzeugs nicht beachteten und deswegen den Abstand der beiden Fahrzeuge überschätzten. Bei der Anzeigemethode *PmF* gaben mehrere

Probanden an, sich nur auf ihr Gefühl verlassen und keine wirkliche Abschätzung der einzelnen Fahrzeugpositionen getroffen zu haben. Dadurch gelang es ihnen dennoch, im Schnitt rund 65 % der Punkte zu erreichen.

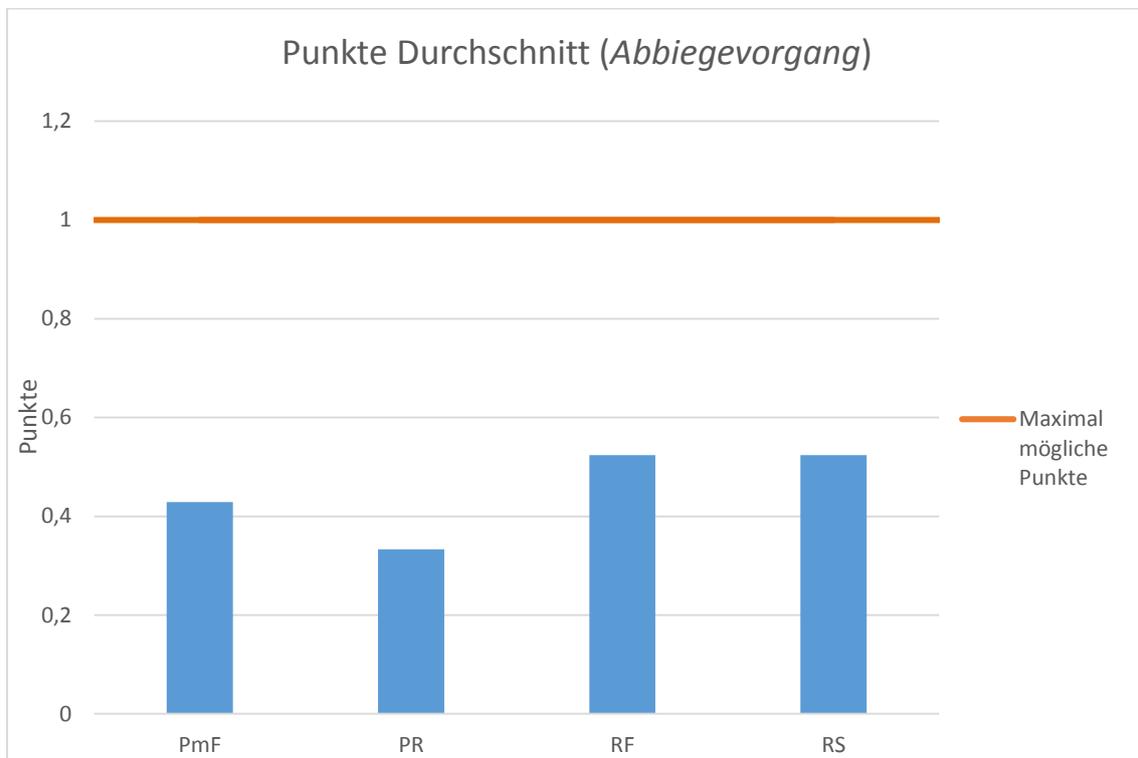


Abbildung 5.9: Durchschnittliche Punkteverteilung beim Abbiegevorgang

Beim *Abbiegevorgang* wurden insgesamt nur sehr wenige Punkte erreicht (Abbildung 5.9). Dies lässt sich dadurch begründen, dass eine exakte Position, bei der mit dem Einlenken begonnen werden muss, nur sehr schwer auszumachen ist. Es handelt sich also eher um eine gefühlsmäßige Entscheidung. Am besten schlossen auch hier die Anzeigemethoden *RF* und *RS* mit jeweils rund 52 % der maximal erreichbaren Punkte ab. Aufgrund der recht kleinen Unterschiede zwischen den einzelnen Methoden ist aus diesem Versuch jedoch kaum eine Tendenz herauszulesen.

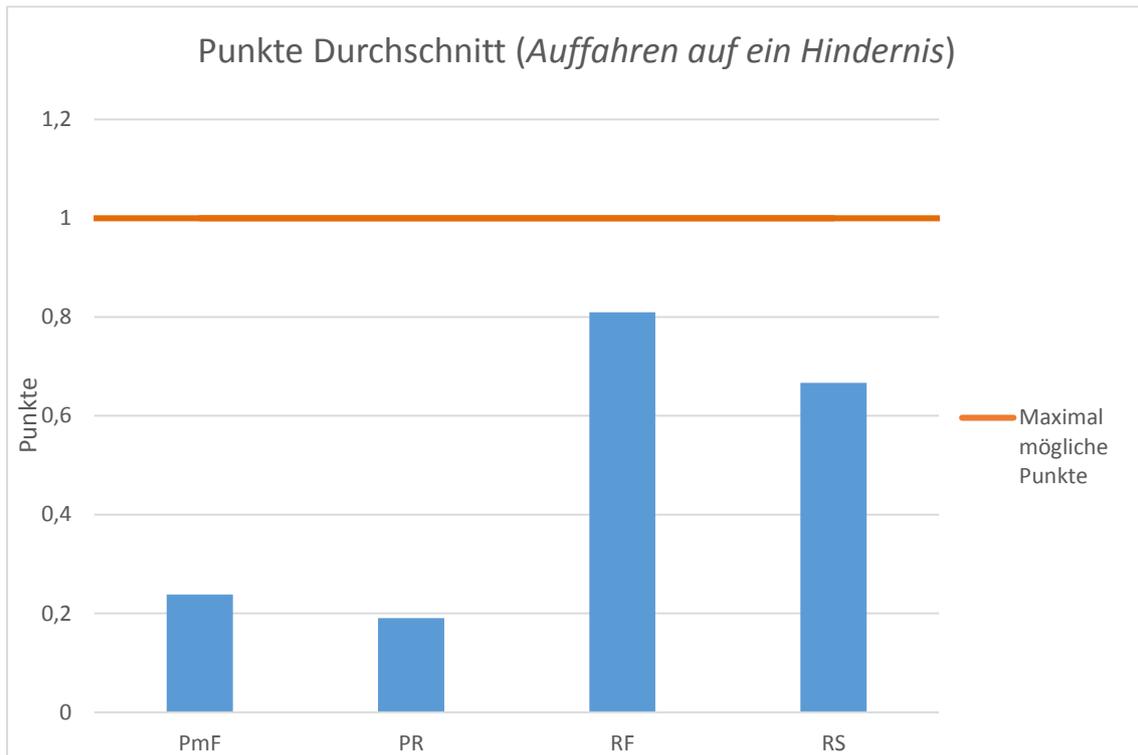


Abbildung 5.10: Durchschnittliche Punkteverteilung beim Auffahren auf ein Hindernis

Beim letzten Versuch (*Auffahren auf ein Hindernis*) zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Methoden. Während bei den Anzeigevarianten *RF* und *RS* jeweils gute Ergebnisse erzielt wurden, schnitten die Varianten *PmF* und *PR* (Abbildung 5.10) deutlich schlechter ab. Die mangelhaften Ergebnisse bei *PR* sind darauf zurückzuführen, dass der Überhang des Fahrzeugs nicht visualisiert und dieser wiederum von den Probanden unterschätzt wurde. Ähnliches gilt für die *PmF*. Da sich keine der Linien auf Fahrbahnhöhe befindet, ist es sehr schwierig sich vorzustellen, wo sich das Objekt genau befindet. Deutlich wird diese Beobachtung vor allem, wenn man die Ergebnisse weiter aufschlüsselt (Abbildung 5.11). Dabei können die als Falsch gewerteten Einschätzungen der Versuchspersonen in die Möglichkeiten *Proband hat den Abstand zum Hindernis überschätzt* und *Proband hat den Abstand zum Hindernis unterschätzt* unterteilt werden. Ein Überschätzen des Abstandes ist als kritisch zu erachten, da dies im realen Anwendungsfall zu Kollisionen führen kann. Ein Unterschätzen des Abstandes ist bei Weitem nicht so gravierend. Es ist deutlich erkennbar, dass bei der Methode *PR* der Abstand zum Hindernis meist überschätzt wurde. Bei der Darstellungsweise *PmF* hingegen wurde der Abstand überwiegend zu klein eingeschätzt. Besonders positiv ist hervorzuheben, dass weder bei Methode *RF* noch bei *RS* der Abstand zum Hindernis überschätzt wurde.

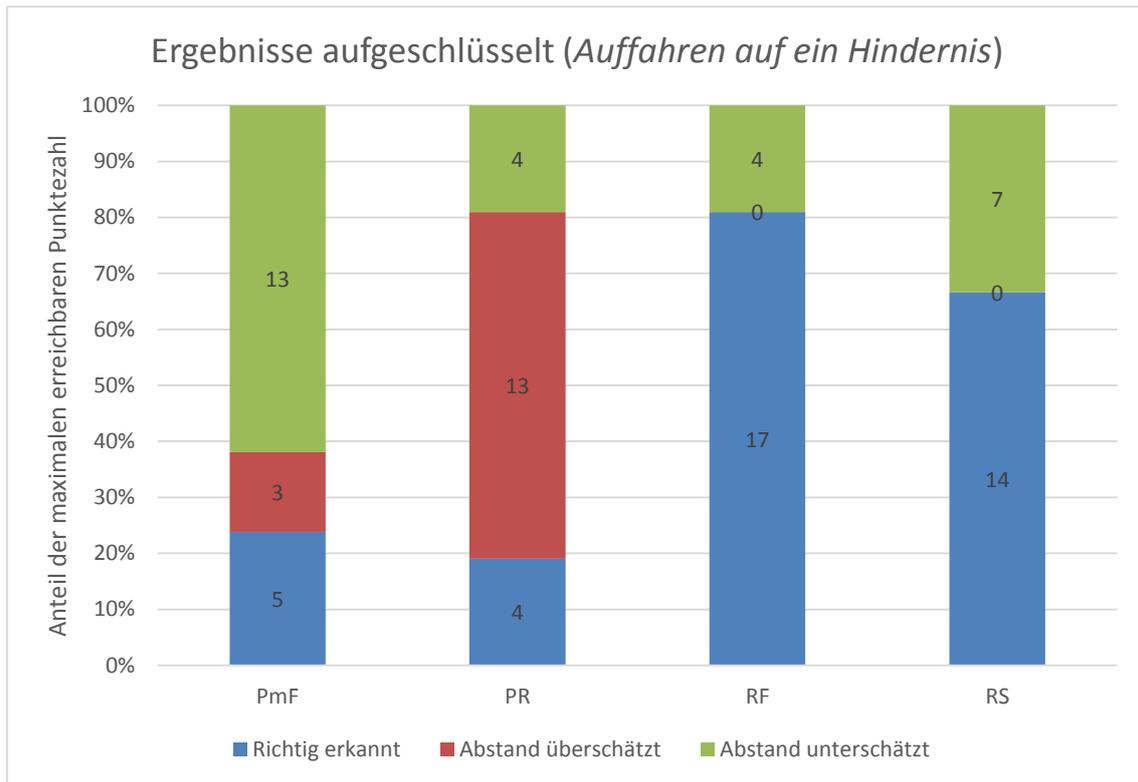


Abbildung 5.11: Aufschlüsselung der Ergebnisse beim Auffahren auf ein Hindernis nach

Insgesamt ergibt sich dadurch die in Abbildung 5.12 ersichtliche Punkteverteilung. Die meisten Punkte wurden bei der Anzeigemethode *RF* erreicht. Hier ergab sich einer Durchschnittspunktzahl von 5,7 Punkten, was 81 % der 7 maximal erreichbaren Punkte entspricht. An zweiter Stelle steht die Darstellungsmethode *RS*. Es wurden im Schnitt 5,1 Punkte, also 73 % der Maximalpunktzahl, erzielt. Nahezu gleichauf liegen die Methoden *PmF* und *PR* mit durchschnittlich 3 beziehungsweise 2,8 Punkten, was 43 % beziehungsweise 40 % der möglichen Punkte entspricht.

Objektiv betrachtet liefert also die Anzeigemethode *Rahmen in Fahrbahnhöhe* die besten Ergebnisse. Fünf der 21 Probanden erreichten bei dieser Methode sogar die volle Punktzahl, lösten also alle Aufgaben mit Hilfe der so visualisierten Prädiktion fehlerfrei.

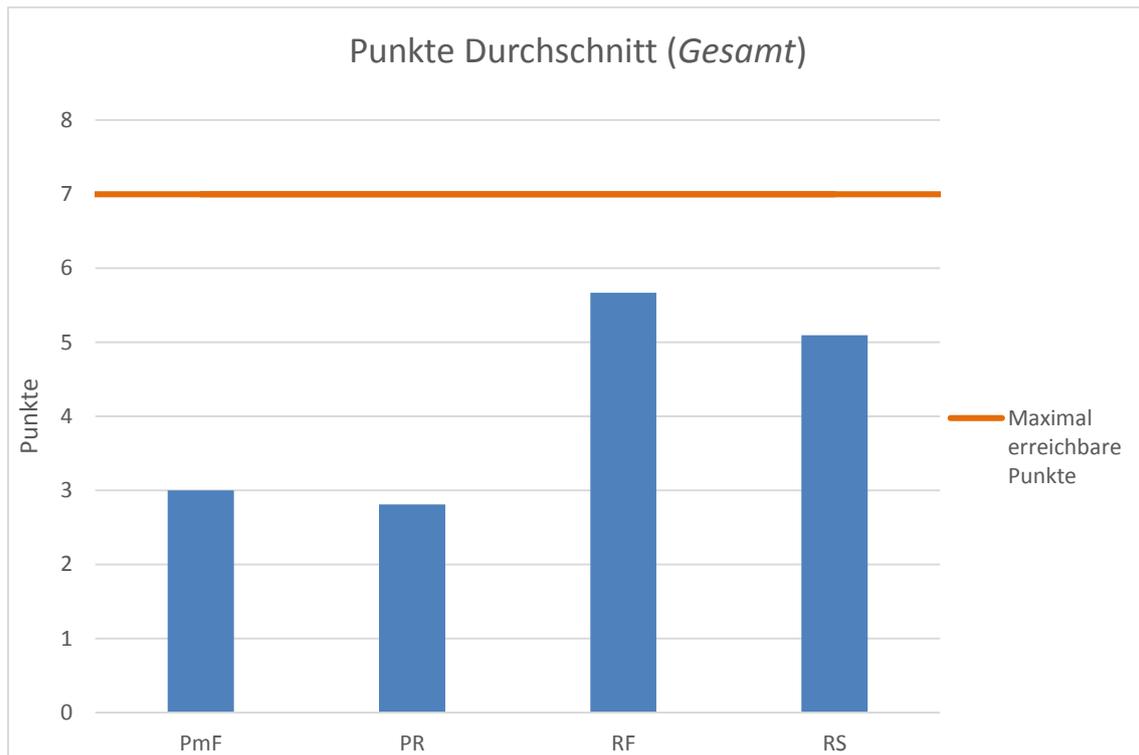


Abbildung 5.12: Durchschnittliche Punkteverteilung beim gesamten Test

5.4.2 Teil 2: Subjektive Beurteilung

Beim zweiten Teil des Tests hatten die Probanden die Möglichkeit, die unterschiedlichen Anzeigemethoden zu bewerten und Verbesserungsvorschläge zu äußern.

Bei der Darstellungsweise *Positionen markanter Fahrzeugpunkte* gab über die Hälfte der Testpersonen an, es seien zu viele Linien zu sehen und diese würden sie verwirren. Außerdem sei die genaue Position des prädizierten Objekts nur sehr schwer erkennbar, die Darstellungsform unübersichtlich und die Antizipation der Objektbewegung mental sehr anstrengend. Allerdings lasse sich die Bewegungsrichtung und die relative Geschwindigkeit recht gut erahnen.

Bei der Methode *Positionen der Reifen* wurde hauptsächlich kritisiert, dass der Überhang des Fahrzeugs nicht mit abgebildet wird und so eine Einschätzung der exakten Position des Objekts schwierig ist. Durch das Fehlen dieser wichtigen Information sei der Betrachter einer zusätzlichen mentalen Belastung ausgesetzt. Positiv sei zu sehen, dass sich durch die wenigen Linien eine sehr übersichtliche Darstellungsform ergibt.

Bei der Prädiktion mittels *Rahmen in Fahrbahnhöhe* wurden nur vereinzelt Punkte beanstandet. Kritikpunkte ergaben sich hauptsächlich aufgrund der gezeigten Videosequenz. Hier wurde bemängelt, dass der Rahmen zur Visualisierung der Position aufgrund perspektivischer Verzerrung oft nicht direkt unter dem Fahrzeug zu sein scheint. Dies kann dazu führen, dass der Operator das Vertrauen in die Prädiktion verliert. Auch werden die Rahmen bei weit entfernten Objekten perspektivisch bedingt eher als Linien und nicht als Rahmen wahrgenommen. Positiv sei jedoch ganz klar die Tatsache, dass durch den Rahmen der komplette Umriss des

Fahrzeugs abgebildet wird und sich so eine sehr intuitive Darstellungsform ergibt. Durch die Positionierung der Rahmen auf Fahrbahnhöhe könne die Lage des Objekts im Raum leicht erkannt werden. Die Fahrbahn diene dabei als Referenz zur Positionsbestimmung.

Bei der Evaluation der Methode - *Rahmen in Stoßstangenhöhe* stellte sich heraus, dass auch hier die Vielzahl der Linien einige Versuchsteilnehmer verwirrt. Die Anzeigemethode sei dadurch unübersichtlich, vor allem wenn sich das Fahrzeug nur langsam bewegt und die Linien sich dadurch überschneiden. Andere lobten jedoch, dass durch die Darstellung des gesamten Fahrzeugumrisses und die Dreidimensionalität der Rahmen die Position des Objekts gut abgeschätzt werden kann. Besonders bei der Videosequenz seien die Rahmen einfacher den Objekten zuzuordnen. Der dargestellte Pfeil zwischen den zwei Rahmen werde aufgrund der höheren Position und der Kameraperspektive jedoch stärker verzerrt und solle deshalb besser auf Fahrbahnhöhe angezeigt werden.

Im Anschluss an die subjektive Bewertung sollten die Probanden die Anzeigemethoden in eine Rangfolge mit den Plätzen 1 bis 4 einordnen. Hier zeigt sich noch einmal deutlich, dass die Methode *Rahmen in Fahrbahnhöhe* von den Versuchspersonen am besten angenommen wurde (Tabelle 5.1).

Rang	Anzeigemethode
1	<i>Rahmen in Fahrbahnhöhe</i>
2	<i>Rahmen in Stoßstangenhöhe</i>
3	<i>Positionen der Reifen</i>
4	<i>Positionen markanter Fahrzeugpunkte</i>

Tabelle 5.1: Subjektive Rangfolge der Anzeigemethoden durch die Probanden

Einigen Probanden wurde im Anschluss noch eine weitere Anzeigemethode (Abbildung 5.13) mit der Bitte, diese ebenfalls zu bewerten, vorgestellt. Die Darstellung baut auf die Methode *RF* auf. Dabei wird auf die nicht sichtbaren Kanten des Rahmens verzichtet und so die vom Betrachter abgewandte Ecke des Rahmens nicht dargestellt. Zusätzlich wird an der dem Betrachter zugewandten Ecke eine vertikale Linie angezeigt, um ihm die Zuordnung des Rahmens zum Objekt zu erleichtern. Der Pfeil zur Anzeige der Bewegungsrichtung verbindet in der Frontansicht die Vorderkanten, in der Heckansicht die Hinterkanten der Rahmen für die aktuelle und die prädierte Position.

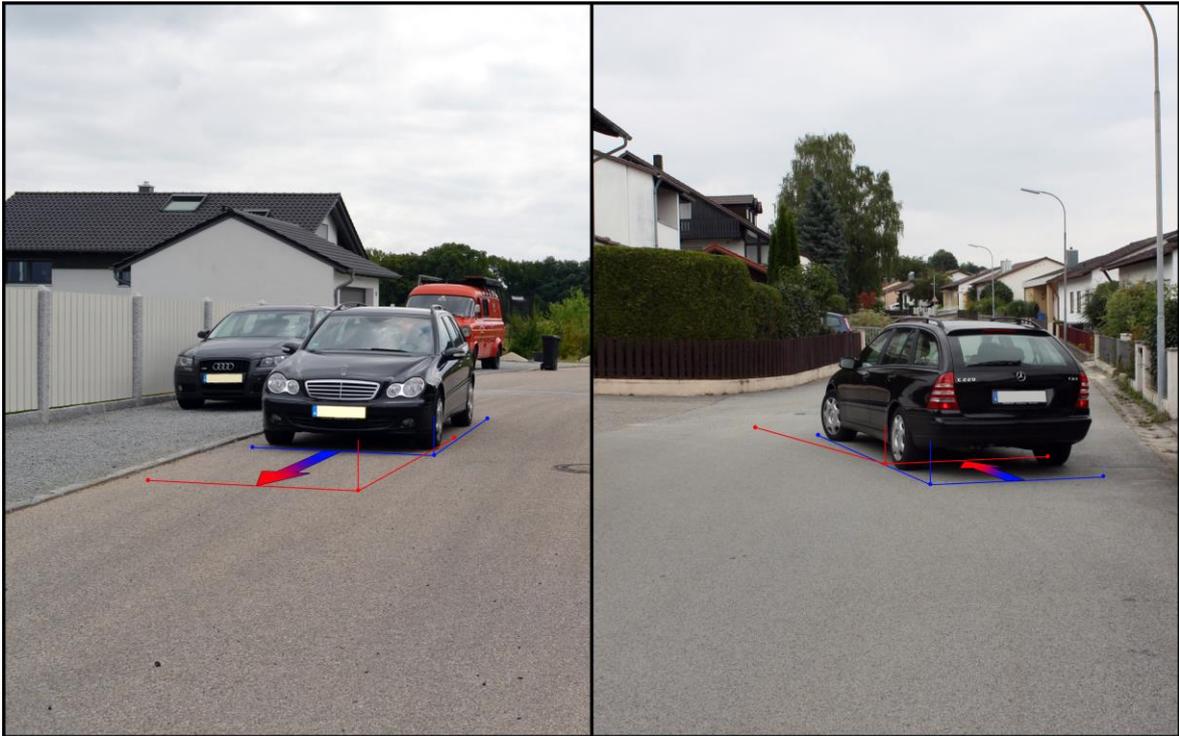


Abbildung 5.13: L-Förmiger Rahmen als Darstellungsmethode der Fahrzeugprädiktion

Da die Überlegungen zu dieser Methode erst im Laufe des Test entstanden sind, konnte leider nur rund die Hälfte der Probanden dazu befragt und auch kein objektiver Test dazu durchgeführt werden. Die meisten der befragten Versuchsteilnehmer ordneten diese Methode jedoch schlechter als die Methode *RF* ein. Das Fehlen einer Ecke wurde als verwirrend empfunden und man ergänze die fehlende Ecke automatisch in der Vorstellung wieder. Dies erfordere eine unnötige mentale Anstrengung und verschlechtere nur den räumlichen Eindruck. Positiv sei die verbesserte Übersichtlichkeit und die klar ersichtliche Zuordnung des Pfeils zu einer Kante des Rahmens.

Zum Abschluss des Probandenversuchs hatten die Versuchsteilnehmer noch die Gelegenheit, eigene Vorschläge zur Visualisierung der Prädiktionen zu nennen. Soweit diese bereits im Zuge der Vorentwicklungen umgesetzt wurden, konnte mit Hilfe des dazu passenden Bildes direkt näher darauf eingegangen werden.

Einige der Probanden schlugen vor die Prädiktionen mit Hilfe eines 3D-Modells des Objekts zu verdeutlichen. Nachdem sie das unter Punkt 4.3 vorgestellte Bild mit dem überlagerten 3D-Modell des Fahrzeugs betrachtet hatten, wurde dieses jedoch zum größten Teil wieder verworfen. Die Begründung dafür war, dass große Teile des Bildes verdeckt werden und die Darstellungsform durch die Überlagerungen sehr unübersichtlich wirkt. Auch die ebenfalls unter Punkt 4.3 vorgestellte Möglichkeit der Darstellung durch ein Kantenmodell eines Quaders wurde aufgrund der schlechten Übersicht und der vielen sich überschneidenden Linien wieder verworfen. Um dieser Problematik zu entgehen, wurde vorgeschlagen, dynamisch zwischen den beiden Methoden *RF* und *RS*, abhängig von der relativen Geschwindigkeit und

der Anzahl der sich im Sichtfeld befindlichen Verkehrsteilnehmer zu wechseln. Bei kleinen Geschwindigkeiten und vielen prädizierten Objekten solle die Darstellungsform *RF*, bei größeren Geschwindigkeiten und wenigen Objekten die Methode *RS* angezeigt werden. So könnten verwirrende Überscheidungen vermieden werden. Eine derartige Umsetzung könnte den Operator jedoch durch ständiges Wechseln zwischen den beiden Methoden im Geschwindigkeits-Grenzbereich stark beeinträchtigen.

6 Diskussion der Ergebnisse

Es sei erwähnt, dass eine Befragung von nur 21 Probanden nur Tendenzen für die Ergebnisfindung aufzeigen kann. Eine repräsentative Erhebung hätte jedoch den Umfang dieser Arbeit überstiegen.

Die Ergebnisse der Probandenbefragung haben gezeigt, dass neben den unter Punkt 4.2 dargelegten Anforderungen an eine Anzeigemethode für prädizierte Verkehrsteilnehmer noch weitere Punkte Beachtung finden müssen. So ist es besonders wichtig, nicht zu viele Linien für die Prädiktion einzuzichnen, um die Übersichtlichkeit der Darstellungsform zu behalten. Wichtig erscheint auch, den kompletten Umriss des Fahrzeugs abzubilden und so den Betrachter bei der Antizipation zu entlasten. Außerdem muss die Prädiktion eindeutig dem Objekt zuzuordnen sein. Durch optische Verzerrungen können Zweifel bei der Zuordnung auftreten. Um die Position des Objekts möglichst intuitiv zu verdeutlichen, sollte der Umriss des Fahrzeugs auf Fahrbahnhöhe klar erkennbar sein. Die Fahrbahn kann gut als Referenz für die Positionsbestimmung verwendet werden.

Die vorgestellte Methode *Rahmen in Fahrbahnhöhe* erfüllt die meisten erforderlichen Punkte. Daraus lässt sich auch das gute Abschneiden der Darstellungsweise beim Test mit den Versuchspersonen erklären. Dennoch besteht auch hier Verbesserungspotential. So können zur besseren Zuordnung der Rahmen zu den Objekten zusätzlich vertikale Linien bis zur Stoßstangenhöhe an den Eckpositionen angezeigt und dem Operator somit die dreidimensionale Interpretation der Rahmen erleichtert werden. Dabei ist darauf zu achten, den Betrachter nicht durch zu viele sich überschneidende Linien zu verwirren. Abhilfe dafür kann das Weglassen der vertikalen Linie an der dem Operator abgewandten Ecke schaffen. Zusätzlich ist es möglich, die Rahmenlinien an dieser Ecke mit verminderter Deckkraft zu zeichnen (Abbildung 6.1). Auf diese Art kann dem Operator eine möglichst große Anzahl an Informationen zur Verfügung gestellt werden, ohne ihn zu überfordern. Der Pfeil zur Anzeige der Bewegungsrichtung wird mittig auf Fahrbahnhöhe dargestellt. Dadurch wird eine möglichst geringe optische Verzerrung, bedingt durch die Kameraperspektive, sichergestellt. Er verbindet dabei die für den Operator relevantesten Kanten miteinander. Ist das Fahrzeug in der Frontansicht zu sehen, handelt es sich dabei um die Vorderkanten der aktuellen und der prädizierten Position, in der Heckansicht sind dies die Hinterkanten der beiden Rahmen.

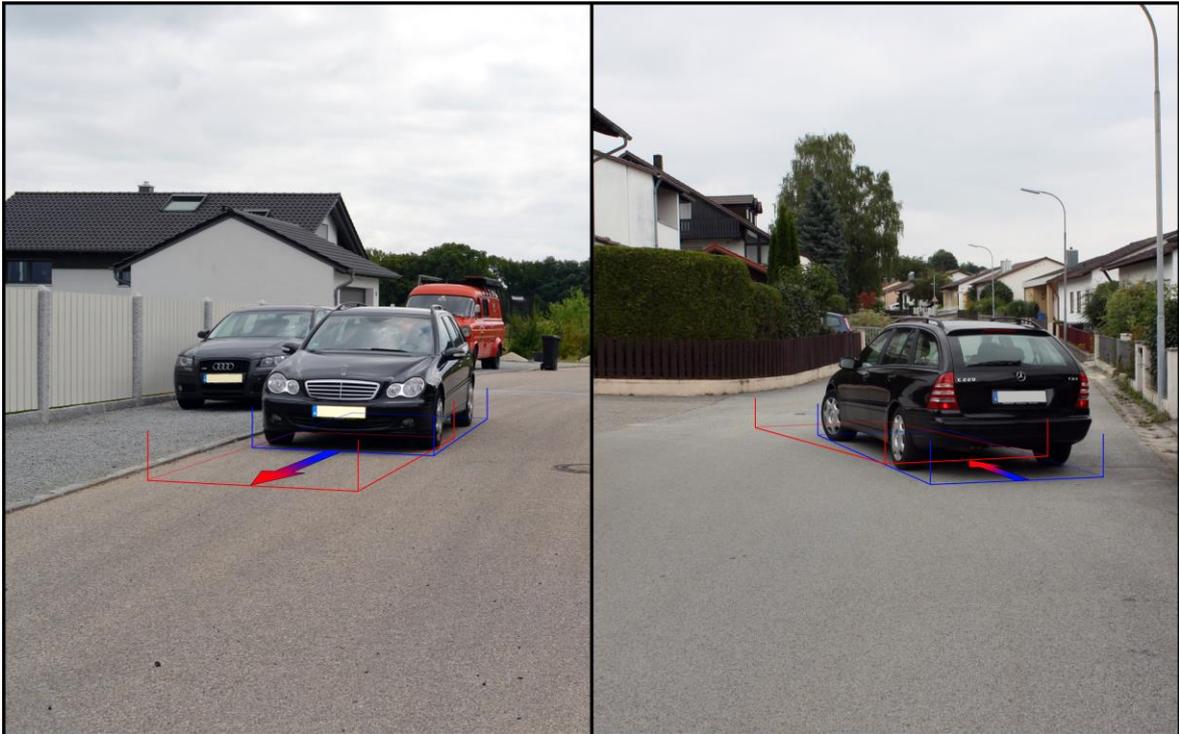


Abbildung 6.1: Darstellung der Fahrzeugprädiktion mittels eines Rahmens auf Fahrbahnhöhe mit verminderter Deckkraft (35 %) an der abgewandten Ecke und vertikalen Linien

7 Zusammenfassung und Ausblick

Um ein teleoperiertes Fahrzeug sicher führen zu können, müssen dem Operator Informationen über die Umgebung des Fahrzeugs zugänglich gemacht werden. Aufgrund der bei der Übertragung des Videobildes über das Mobilfunknetz auftretenden Zeitverzögerungen und deren negativen Auswirkungen auf die menschliche Leistungsfähigkeit sollte der Operator bei der Antizipation des Verkehrsgeschehens unterstützt werden. Dies ist beispielsweise in Form eines Predictive Displays möglich. Diese Technik hat sich bereits in vielen Anwendungsgebieten etabliert und soll nun für die Anwendung im teleoperierten Straßenverkehr angepasst werden. Dabei wird die Positionsänderung der Verkehrsteilnehmer über die Dauer der Übertragungsverzögerung vorausberechnet und dem Operator grafisch dargestellt. Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer Methode zur Darstellung dieser prädizierten Verkehrsteilnehmer und diese auf ihre Tauglichkeit hin zu untersuchen.

Dazu wurden mehrere Darstellungsmöglichkeiten entwickelt und vier ausgewählte Methoden in einem Probandentest evaluiert. Zusammenfassend kann dabei festgestellt werden, dass dem Operator eine Projektion des kompletten Umrisses des Fahrzeugs auf die Fahrbahn dargestellt werden sollte. Dadurch konnte, wie in dem Probandentest gezeigt, die Position des prädizierten Objekts am besten verdeutlicht werden. Dieses Prinzip wurde bei der Anzeigemethode *Rahmen in Fahrbahnhöhe* umgesetzt. Aufbauend auf den Ergebnissen des Probandentest wurden einige Verbesserungsmöglichkeiten dieser Darstellungsvariante aufgezeigt.

Die Leistungsfähigkeit der einzelnen Anzeigemethoden wurde bei den Tests hauptsächlich statisch, also nicht auf bewegten Bildern, beurteilt. Da die Anzeigemethoden jedoch später in das übertragene Videobild eingezeichnet werden müssen, sollten zumindest die zwei effektivsten Methoden durch eine Gegenüberstellung beim Einsatz mit bewegten Bildern verglichen werden. Dabei können auch die in dieser Arbeit diskutierten Verbesserungsvorschläge eingearbeitet werden. Denkbar wäre dabei auch eine Erweiterung der Anzeigemethoden durch dynamische Aspekte. So könnte zum Beispiel die Deckkraft des Rahmens für die prädizierte Position bei *Rahmen in Fahrbahnhöhe* und *Rahmen in Stoßstangenhöhe* in regelmäßigen Intervallen pulsieren, der Rahmen also immer wieder aufs Neue mit voller Deckkraft dargestellt werden und dann langsam verblassen. Auch der Pfeil zur Verdeutlichung der Bewegungsrichtung könnte in regelmäßigen Intervallen vom Fuß zur Spitze hin neu gezeichnet werden oder durch eine den Pfeil in selber Richtung durchlaufende Markierung animiert werden. Eine Wirksamkeit der soeben angeführten Erweiterungen muss allerdings erst im Rahmen weiterführender Tests überprüft werden.

Bis zum Erreichen des Optimums der Fahrassistenz im Straßenverkehr, also dem autonomen Fahren, ist es noch ein weiter Weg. Die Teleoperation von Straßenfahrzeugen ist technisch bei Weitem einfacher umsetzbar und kann deswegen als Übergangstechnologie dienen. So kann dabei auf die Erfahrung eines menschlichen Fahrers zurückgegriffen und so die Schwächen bei der Entscheidungsfindung

autonomer Systeme abgefangen werden. Auch die Einsatzmöglichkeiten im Rahmen neuer Mobilitätskonzepte bieten einen Anreiz zur Weiterentwicklung dieser Technologie. So stellen sowohl die Fahrzeugbereitstellung für Carsharing-Angebote als auch eine Vereinfachung der Infrastruktur zum Laden von Elektrofahrzeugen denkbare Szenarien dar.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Klassifizierung von Fahrassistenzsystemen nach dem Grad der Autonomie und dem Grad des erforderlichen Verständnisses des Fahrzeugumfeldes nach [Vac09, S. 2].....	4
Abbildung 2.2:	Basiskonzept des FTM Lehrstuhls zum teleoperierten Fahren [Die11]	6
Abbildung 2.3:	Übertragungsverzögerungen während einer Messfahrt mit einem 3G-Netz nach [Gna13]	7
Abbildung 2.4:	Visualisierung eines vorausberechneten Konflikts bei der Flugsicherung [Wic00, S. 106]	9
Abbildung 3.1:	Abfall der Aufgabenleistung in Abhängigkeit von der Zeitverzögerung nach [Pon08, S. 201].....	10
Abbildung 3.2:	Veranschaulichung des Nutzens von Predictive Displays anhand eines beispielhaften Abbiegevorgangs	12
Abbildung 3.3:	Systemaufbau des Predictive Display Konzepts nach [Chu13a]	14
Abbildung 4.1:	Predictive Display eines unbemannten Unterwasserfahrzeugs [Ver78, S. 240].....	16
Abbildung 4.2:	Predictive Display eines Mond-Rovers mit einer Prädiktionszeit von 5 Sekunden [Mat96, S. 71].....	16
Abbildung 4.3:	6D-Vision Technik von Daimler am Beispiel einer Radfahrerprädiktion [Rab13].....	17
Abbildung 4.4:	Darstellung der Fahrzeugprädiktion mittels eines Pfeils auf Fahrbahnhöhe.....	19
Abbildung 4.5:	Darstellung der Fahrzeugprädiktion mittels der Überlagerung eines 3D-Modells mit 50 % Deckkraft	19
Abbildung 4.6:	Darstellung der Fahrzeugprädiktion mittels der Überlagerung von Quadern mit 60 % Deckkraft	20
Abbildung 4.7:	Darstellung der Fahrzeugprädiktion mittels Kantenmodellen von Quadern	21
Abbildung 4.8:	Position der Reifen als Darstellungsmethode der Fahrzeugprädiktion	22
Abbildung 4.9:	Position markanter Fahrzeugpunkte als Darstellungsmethode der Fahrzeugprädiktion	23
Abbildung 4.10:	Rahmen Fahrbahnhöhe als Darstellungsmethode der Fahrzeugprädiktion	24

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4.11:	Rahmen Stoßstange als Darstellungsmethode der Fahrzeugprädiktion	25
Abbildung 4.12:	Rahmen Stoßstangenhöhe als Darstellungsmethode der Radfahrerprädiktion	26
Abbildung 4.13:	Rahmen Fahrbahnhöhe als Darstellungsmethode der Radfahrerprädiktion	27
Abbildung 4.14:	Kreis als Darstellungsmethode der Fußgängerprädiktion	28
Abbildung 4.15:	Tropfenform als Darstellungsmethode der Fußgängerprädiktion.....	29
Abbildung 5.1:	Aufbau zur Erfassung der Bilder für den Probandentest. Links: Fahrzeug und Eckmarkierungen an der Startposition. Rechts: Fahrzeug und Eckmarkierungen an einer der zu prädizierenden Positionen.	31
Abbildung 5.2:	Altersverteilung der Probanden.....	32
Abbildung 5.3:	Schema Position abschätzen.....	33
Abbildung 5.4:	Schema Spurwechsel mit Hindernis	34
Abbildung 5.5:	Schema Abbiegevorgang.....	35
Abbildung 5.6:	Schema Auffahren auf ein Hindernis	35
Abbildung 5.7:	Durchschnittliche Punkteverteilung beim Position Abschätzen .	36
Abbildung 5.8:	Durchschnittliche Punkteverteilung beim Spurwechsel mit Hindernis.....	37
Abbildung 5.9:	Durchschnittliche Punkteverteilung beim Abbiegevorgang	38
Abbildung 5.10:	Durchschnittliche Punkteverteilung beim Auffahren auf ein Hindernis.....	39
Abbildung 5.11:	Aufschlüsselung der Ergebnisse beim Auffahren auf ein Hindernis nach.....	40
Abbildung 5.12:	Durchschnittliche Punkteverteilung beim gesamten Test.....	41
Abbildung 5.13:	L-Förmiger Rahmen als Darstellungsmethode der Fahrzeugprädiktion	43
Abbildung 6.1:	Darstellung der Fahrzeugprädiktion mittels eines Rahmens auf Fahrbahnhöhe mit verminderter Deckkraft (35 %) an der abgewandten Ecke und vertikalen Linien.....	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1:	Subjektive Rangfolge der Anzeigemethoden durch die Probanden	42
--------------	--	----

Abkürzungsverzeichnis

FTM	Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik
ACC	Adaptive Cruise Control
PR	Anzeigemethode <i>Position der Räder</i>
PmF	Anzeigemethode <i>Position markanter Fahrzeugpunkte</i>
RF	Anzeigemethode <i>Rahmen Fahrbahnhöhe</i>
RS	Anzeigemethode <i>Rahmen Stoßstangenhöhe</i>

Literaturverzeichnis

- [Bej90]: Bejczy, Antal K.; Kim, Won S.; Venema, Steven C.: *The phantom robot: predictive displays for teleoperation with time delay*. In: Proceedings of the 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, S. 546–551, 1990.
- [Ber08]: Berger, Christian; Rumpe, Bernhard: *Autonomes Fahren – Erkenntnisse aus der DARPA Urban Challenge (Autonomous Driving – Insights from the DARPA Urban Challenge)*. In: it - Information Technology, S. 258–264, 2008.
- [Bur04]: Burkert, Tim; Leupold, Jan; Passig, Georg: *A Photorealistic Predictive Display*. In: Teleoperators and Virtual Environments. Vol. 13, S. 22–43, 2004.
- [Can09]: Canzler, Weert; Knie, Andreas: *Grüne Wege aus der Autokrise: Vom Autobauer zum Mobilitätsdienstleister*, Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung, 2009.
- [Chu13a]: Chucholowski, Frederic; Büchner Stefan; Reicheneder Johannes; Lienkamp Markus: *Prediction Methods for Teleoperated Road Vehicles*. In: münchener kolloquium Conference on Future Automotive Technology - Focus Electromobility, 2013.
- [Chu13b]: Chucholowski, Frederic; Sauer, Michael; Lienkamp, Markus: *Evaluation of Display Methods for Teleoperation of Road Vehicles*. In: ICIUS 2013 - 9th International Conference on Intelligent Unmanned Systems, 2013.
- [Dav10]: Davis, James; Smyth, Christopher; McDowell, Kaleb: *The Effects of Time Lag on Driving Performance and a Possible Mitigation*. In: Robotics, IEEE Transactions on, S. 590–593, 2010.
- [Den03]: Deng, Zhenyuan; Jagersand, Martin: *Predictive Display System for Telemanipulation Using Image-Based Modeling and Rendering*. Forschungsbericht, Dept. Computing Science, Edmonton, University of Alberta, 2003.
- [Die11]: Diermeyer, Frank; Gnatzig, Sebastian; Chucholowski, Frederic; Tang, Tito; et al.: *Der Mensch als Sensor - Der Weg zum teleoperierten Fahren*. In: 12. Braunschweiger Symposium AAET 2011 Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, S. 119–135, 2011.
- [End99]: Endsley, Mica; Sollenberger, Randy; Stein, Earl: *The Use of Predictive Displays for Aiding Controller Situation Awareness*. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 43rd Annual Meeting 1999, S. 51–56, 1999.
- [Fra07]: Franke, Uwe; Rabe, Clemens; Gehrig, Stefan: *Kollisionsvermeidung durch raum-zeitliche Bildanalyse*. In: it - Information Technology, 2007.

- [Gna12]: Gnatzig, Sebastian; Haas, Erick; Lienkamp, Markus: *Die Teleoperation als Ansatz zur fahrerlosen Fahrzeugführung*. In: 5. Tagung Fahrerassistenz, 2012.
- [Gna13]: Gnatzig, Sebastian; Chucholowski, Frederic; Tang, Tito; Lienkamp, Markus: *A System Design for Teleoperated Road Vehicles*. In: ICINCO, 2013.
- [Jür01]: Jürgensohn, Thomas: *Kraftfahrzeugführung*, Berlin: Springer, 2001.
- [Kot92]: Kotoku, Tetsuo: *A Predictive Display With Force Feedback And Its Application To Remote Manipulation System With Transmission Time Delay*. In: Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on: Intelligent Robots and Systems, S. 239–246, 1992.
- [Kro96]: Krotkov, Eric; Simmons, Reid; Cozman, Fabio; Koenig, Sven: *Safeguarded Teleoperation for Lunar Rovers: From Human Factors to Field Trials*. In: Proc. IEEE Planetary Rover Technology and Systems Workshop, 1996.
- [Lut12]: Lutz, Lennart S.; Tang, Tito: *Analyse der rechtlichen Situation von teleoperierten (und autonomen) Fahrzeugen*. In: 5. Tagung Fahrerassistenz, 2012.
- [Mat96]: Mathan, Santosh; Hyndman, Arn; Fischer, Karl; Blatz, Jeremiah; et al.: *Efficacy of a predictive display, steering device, and vehicle body representation in the operation of a lunar vehicle*. In: Human Factors in Computing Systems: CHI 96 Conference Companion, S. 71–72, 1996.
- [Par02]: Parent, Michel; Gallais, Georges: *Intelligent transportation in cities with CTS*. In: The IEEE 5th International Conference on: Intelligent Transportation Systems, S. 826–830, 2002.
- [Pon08]: Pongrac, Helena: *Gestaltung und Evaluation von virtuellen und Telepräsenzsystemen an Hand von Aufgabenleistung und Präsenzermpfinden*. Dissertation, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München, München, 2008.
- [Rab13]: Rabe, Clemens: *6D-Vision*.
<http://www.6d-vision.de/home>, abgerufen am 12.10.2013.
- [She63]: Sheridan, Thomas B.; Ferrell, William R.: *Remote Manipulative Control with Transmission Delay*. In: IEEE Transactions on Human Factors in Electronics, S. 25–29, 1963.
- [She93]: Sheridan, Thomas B.: *Space teleoperation through time delay: review and prognosis*. In: Robotics and Automation, IEEE Transactions on, S. 592–606, 1993.
- [Sul06]: Sullivan, Briana; Ware, Colin; Plumlee, Matthew: *Predictive Displays for Survey Vessels*. In: Human Factors and Ergonomic Studies, 2006.

- [Thr06]: Thrun, Sebastian; Montemerlo, Mike; Dahlkamp, Hendrik; Stavens, David; et al.: *Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge*. In: *Journal of Field Robotics*, S. 661–692, 2006.
- [Thu00]: Thurling, Andrew J.: *Improving UAV Handling Qualities Using Time Delay Compensation*. Masterarbeit, Graduate School of Engineering and Management, Air Force Institute of Technology, Ohio, 2000.
- [Tsu96]: Tsumaki, Yuichi; Uchiyama, Massaru: *Predictive display of virtual beam for space teleoperation*. In: *Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on: Intelligent Robots and Systems '96*, S. 1544–1549, 1996.
- [Vac09]: Vacek, Stefan: *Videogestützte Umfelderkennung zur Interpretation von Verkehrssituationen für kognitive Automobile*, Karlsruhe: Univ.-Verlag Karlsruhe, 2009.
- [Ver78]: Verplank, William: *Display Aids for Remote Control of Untethered Undersea Vehicles*. In: *OCEANS '78*, S. 238–241, 1978.
- [Wic00]: Wickens, Christopher D.; Gempler, Keith; Morphey, M. Ephimia: *Workload and Reliability of Predictor Displays in Aircraft Traffic Avoidance*. In: *Transportation Human Factors*, S. 99–126, 2000.
- [Wik13]: Wikipedia: *DARPA Urban Challenge 2007*. http://de.wikipedia.org/wiki/DARPA_Urban_Challenge_2007, abgerufen am 13.09.2013.
- [Win00]: Winfield, Alan F. T.; Schilling, Tyler: *Future Directions in Tele-operated Robotics*. In: *Telerobotic applications*, S. 147–162, 2000.
- [Win09]: Winner, Hermann: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. 1. Auflage, Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.

Anhang

Anhang A: Fragebögen zum Probandentest	ix
Anhang B: Beispielbilder zum Probandentest	xiv

Anhang A: Fragebögen zum Probandentest

Vom Versuchsleiter auszufüllen:	
Versuchsperson: _____	Konfiguration: _____

Fragebogen zur Evaluation von Anzeigemethoden prädizierter Verkehrsteilnehmer

Fahrassistenzsysteme erlangen in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung. Als Ziel kann dabei die vollständige Entbindung des Menschen von der Fahraufgabe angesehen werden (autonomes Fahren). Da auf dem Weg zur autonomen Fahrzeugführung jedoch noch viele technische und rechtliche Probleme zu lösen sind kann als Übergangstechnologie das teleoperierte Fahren dienen.

Darüber hinaus bringt der Trend zur Urbanisierung eine Reihe an negativen Begleiterscheinungen wie Verkehrsstaus, steigende Belastung der Menschen und der Umwelt durch Lärm- und Schadstoffemissionen und Parkplatzknappheit mit sich. Ein denkbarer Lösungsansatz ist die verstärkte Nutzung von Car-Sharing Angeboten. Dafür müssen jedoch die Fahrzeuge regelmäßig im Geschäftsgebiet verteilt, gewartet und betankt bzw. geladen werden. Hier bietet die Teleoperation von Fahrzeugen Möglichkeiten den logistischen Problemstellungen zu entgegenen.

Um teleoperierte Fahrzeuge sicher führen zu können ist es notwendig, dass der Operator sein Umfeld wahrnehmen kann. Dazu wird das Videobild mittels mehrerer Kameras aufgezeichnet und per Mobilfunknetz an den Operatorarbeitsplatz übertragen. Dabei führen Bandbreite-Beschränkungen und Paketlaufzeiten zu einer nicht vernachlässigbaren Zeitverzögerung bei der Übertragung der Daten.

Um den negativen Auswirkungen dieser Zeitverzögerung entgegenzuwirken soll das Verhalten der Verkehrsteilnehmer prädiziert und schließlich in das übertragene Videobild eingezeichnet werden.

Mit Hilfe dieses Fragebogens soll effektivste und intuitivste der vier entwickelten Anzeigemethoden gefunden und eventuelles Verbesserungspotential erkannt werden. Ziel ist es dabei ein möglichst gutes Szeneverständnis zu vermitteln und so die Antizipation des Verkehrsgeschehens zu erleichtern.

Allgemeine Angaben zur Person

Alter	_____ Jahre
Geschlecht	<input type="checkbox"/> m <input type="checkbox"/> w
Fahrleistung pro Jahr	<input type="checkbox"/> bis 5.000 km <input type="checkbox"/> 5.000 km bis 10.000 <input type="checkbox"/> 10.000 km bis 20.000 km <input type="checkbox"/> über 20.000 km
Wie beurteilen Sie ihren Fahrstil?	gemäßigt <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sportlich
Haben Sie Erfahrungen mit Fahr simulatoren?	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein
Wie schätzen Sie ihre Computerspieleerfahrung ein?	erfahren <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> unerfahren
Haben Sie bereits Erfahrungen mit den Darstellungsmethoden für Predictive Displays am FTM gemacht?	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein

Vom Versuchsleiter auszufüllen:

Versuchsperson: _____

Konfiguration: _____

Position schätzen:

<i>Bild Nr.</i>	<i>Position 1</i>	<i>Position 2</i>	<i>Position 3</i>
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Überholen mit Hindernis

<i>Bild Nr.</i>	<i>Spurwechsel möglich</i>	<i>Spurwechsel nicht möglich</i>
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Vom Versuchsleiter auszufüllen:

Versuchsperson: _____

Konfiguration: _____

Abbiegevorgang

<i>Methode Nr.</i>	<i>Bild 1</i>	<i>Bild 2</i>	<i>Bild 3</i>
1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Hindernis

<i>Methode Nr.</i>	<i>Bild 1</i>	<i>Bild 2</i>	<i>Bild 3</i>	<i>Bild 4</i>	<i>Zu spät!</i>
1	<input type="checkbox"/>				
2	<input type="checkbox"/>				
3	<input type="checkbox"/>				
4	<input type="checkbox"/>				

Vom Versuchsleiter auszufüllen:

Versuchsperson: _____

Konfiguration: _____

Subjektive Beurteilung

Rang

	Lines
<input type="checkbox"/>	

	Lane
<input type="checkbox"/>	

	Rahmen Boden
<input type="checkbox"/>	

	Rahmen Stoßstange
<input type="checkbox"/>	

Anhang B: Beispielbilder zum Probandentest

Position abschätzen:



Spurwechsel mit Hindernis:



Abbiegevorgang:



Auffahren auf ein Hindernis:

