

# TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

## Trajektorienbasierte Teleoperation von Straßenfahrzeugen auf Basis eines Shared-Control-Ansatzes

Sebastian Gnatzig

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. S. Berensmeier  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Lienkamp  
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. H. Bubb, i.R.

Die Dissertation wurde am 01.06.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 17.11.2015 angenommen.



---

# Kurzfassung

Die urbane Mobilität wird in Zukunft eine stärkere Integration der unterschiedlichen Verkehrsmittel erfordern, um den sozio-ökonomischen und ökologischen Herausforderungen zu begegnen. Das situationsabhängige Teilen der Fahrzeuge wird populärer. Diese neue Mobilität wird von einer automatischen Bereitstellung der Car-Sharing-Fahrzeuge profitieren. Die vorliegende Arbeit stellt einen Teleoperations-Ansatz vor, um Straßenfahrzeuge im innerstädtischen Verkehr sicher und fahrerlos zu bewegen. Bei der Teleoperation verbleibt ein Mensch im Regelkreis und steuert einen Teleroboter an einem entfernten Ort. Die Arbeit diskutiert, warum die Teleoperation nach heutigem Stand der Technik für die vorliegende Aufgabenstellung besser geeignet ist als ein rein autonomer Fahrbetrieb. Wichtige Aspekte sind die Entscheidungs- und Denkprozesse, die auf Navigations- und Bahnführungsebene der Fahraufgabe notwendig sind. Diese löst der Mensch aufgrund seines Erfahrungsschatzes heute besser als ein technisches System. Die reaktionsschnellen Anforderungen auf der Stabilisierungsebene hingegen werden bereits heute in vielen Bereichen besser von maschinellen Ansätzen erfüllt. Von dieser Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine wird ein Shared-Control-Ansatz zur Fahrzeugführung abgeleitet, der auf der Supervisory Control-Methodik basiert. Als geeignete Bahnführungsgrößen werden zur Laufzeit manuell geplante Trajektorien identifiziert. Der Operator definiert geeignete Bahnparameter und übermittelt diese segmentweise an das Fahrzeug. Dieses fährt dann selbstständig längs- und quergeregelt die vorgegebene Bahn ab.

Die Arbeit stellt den Systementwurf eines Fahrzeugführungssystems zur trajektorienbasierten Teleoperation vor. Dabei wird die automatische Fahrzeugführung beschrieben, eine robuste Kommunikationsmethodik zur Übertragung diskreter Steuerungsvorgaben entwickelt und die geeignete Schnittstelle zum Operator entworfen. Abschließend wird der trajektorienbasierte Steuerungsansatz in der Simulationsumgebung mit Hilfe einer Probandenstudie validiert. Zusätzlich demonstrieren reale Versuchsfahrten die Leistungsfähigkeit des Ansatzes in der Praxis.

Der neue vorgestellte Ansatz bringt zwei wesentliche Vorteile gegenüber der klassischen, direkt gesteuerten Teleoperation mit sich. Zum einen ist der trajektorienbasierte Ansatz durch lokales Schließen des Stabilisierungs-Regelkreises unabhängig von den Zeitverzögerungen, die bei der Teleoperation aufgrund der Datenübertragung entstehen. Zum anderen beinhaltet die Steuerung ein implizites Sicherheitskonzept bei einem Kommunikationsverlust. Wenn keine weiteren Eingaben vom Operator am Fahrzeug ankommen, fährt es maximal bis zum Ende des bereits vorgegebenen Pfades und hält sicher an.

---

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München. Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp, der es mir ermöglicht hat, diese Arbeit am Lehrstuhl anzufertigen. Insbesondere in der Anfangsphase hat er mit seinen Ideen zu zukünftigen Mobilitätskonzepten maßgeblich das Konzept einer Fahrzeugteleoperation geprägt.

Prof. Dr. rer. nat. habil. Heiner Bubb danke ich, dass er sich als Zweitkorrektor zur Verfügung gestellt hat und hilfreiche Hinweise besonders zur Statistik gegeben hat, sowie Prof. Dr. rer. nat. Sonja Berensmeier für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Eine großartige Hilfe waren auch die Mitarbeiter des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik. Mein besonderer Dank gilt hier meinem Gruppenleiter Dr.-Ing. Frank Diermeyer für die bedingungslose Unterstützung und die hilfreichen Diskussionen. Ohne meinen „Vorgänger“ Dr.-Ing. Sven Kraus würde es meine Dissertationsarbeit in dieser Form nicht geben. Er hat uns einen mit viel Mühen aufgebauten Versuchsträger überlassen - dessen Erhalt uns vermutlich ebenso viel Anstrengung gekostet hat.

Unvergessen bleibt auch die gemeinsame Zeit mit meinen Projektkollegen Frederic Chuchowski und Tito Tang. Die Arbeit an den Versuchsträgern und die vielen ausgiebigen Diskussionen werden mir stets in guter Erinnerung bleiben. Die bedingungslose gegenseitige Unterstützung hat maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Ein großer Dank gilt auch den vielen Studenten, die mich durch studentische Arbeiten bei der Durchführung des Projekts unterstützt haben. Besonders hervorheben möchte ich: Erick Haas, Joachim Michniewicz, Rafael Opela, Florian Schuller, Maximilian Völkl und Jens Warthenpohl, für ihre Mitarbeit bei diversen Testfahrten und Versuchsdurchführungen.

Abschließend möchte ich meiner Familie danken. Meinem Schwiegervater Wilfried, der sich stets zum Korrekturlesen bereiterklärt hat. Meinen Eltern, die mir die universitäre Ausbildung ermöglicht haben. Sowie meiner Frau Katharina, die mich beim Anfertigen der Dissertation stets unterstützt und ermuntert hat.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Formelzeichen</b>	<b>v</b>
<b>Glossar</b>	<b>viii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	2
1.3 Vorgehensweise . . . . .	4
<b>2 Teleoperation</b>	<b>5</b>
2.1 Definition . . . . .	5
2.2 Systementwurf für teleoperierte Straßenfahrzeuge . . . . .	7
2.2.1 Einflussgrößen auf die Fahraufgabe . . . . .	7
2.2.2 Systembeschreibung . . . . .	9
2.3 Teleoperiertes Fahren . . . . .	11
2.4 Ableitung relevanter Problemstellungen . . . . .	12
<b>3 Stand der Technik zu Teleoperation und automatisierter Fahrzeugführung</b>	<b>14</b>
3.1 Automatisierte Fahrzeugführung . . . . .	14
3.1.1 Fahrerassistenzsysteme . . . . .	14
3.1.2 Automatisches Fahren entlang vorab geplanter Bahnen . . . . .	15
3.1.3 Autonomes Fahren . . . . .	18
3.2 Menschliche Leistungsfähigkeit und die Auswirkungen von Zeitverzögerungen	21
3.2.1 Menschliche Leistungsfähigkeit zur Erfüllung der Fahraufgabe . . . . .	21
3.2.2 Zeitverzögerungen bei der Teleoperation . . . . .	26
3.3 Steuerungskonzepte mit ausgeprägter Mensch-Maschine-Interaktion . . . . .	28
3.3.1 Steuerungskonzepte aus der Teleoperation . . . . .	29
3.3.2 Steuerungskonzepte aus der Fahrerassistenz . . . . .	31
<b>4 Methodik zur Kombination von Mensch und Maschine bei der Teleoperation</b>	<b>35</b>
4.1 Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine . . . . .	35
4.1.1 Bewertung des Potentials einer autonomen Fahrzeugführung . . . . .	36
4.1.2 Vergleich von menschlichem und maschinellem Informationsverarbeitungsprozess . . . . .	40
4.1.3 Ableitung einer geeigneten Funktionsteilung der Fahraufgabe . . . . .	44
4.2 Entwurf einer Benutzerschnittstelle bei geteilter Fahraufgabe . . . . .	49
4.2.1 Bewertung bestehender Steuerungskonzepte . . . . .	49
4.2.2 Ableiten einer Shared-Control-Methodik zur Teleoperation auf Führungsebene . . . . .	51
4.2.3 Ableiten eines Abstraktionsniveaus für die Kommunikationsschnittstelle	55

<b>5</b>	<b>Vorgehen: Entwicklung einer trajektorienbasierten Teleoperation</b>	<b>58</b>
5.1	Systementwurf eines trajektorienbasierten Steuerungskonzepts . . . . .	58
5.2	Fahrzeugführung . . . . .	59
5.2.1	Pfadverwaltung . . . . .	59
5.2.2	Querführung . . . . .	63
5.2.3	Längsführung . . . . .	65
5.3	Operator-Schnittstelle und Visualisierung . . . . .	67
5.3.1	Anzeigekonzept . . . . .	67
5.3.2	Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle . . . . .	72
5.4	Architektur des Gesamtsystems . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Ergebnisse: Erprobung und Validierung der prototypischen Umsetzung</b>	<b>75</b>
6.1	Bewertung des Ansatzes in der Simulationsumgebung . . . . .	75
6.1.1	Simulationsumgebung . . . . .	75
6.1.2	Vorversuche zur menschlichen Leistungsfähigkeit . . . . .	76
6.1.3	Durchführung einer Probandenstudie zum Vergleich von direkter und trajektorienbasierter Teleoperation . . . . .	76
6.2	Validierung des Ansatzes im Realfahrzeug . . . . .	84
6.2.1	Randbedingungen . . . . .	84
6.2.2	Funktionsweise . . . . .	85
6.2.3	Vergleichsfahrten . . . . .	88
<b>7</b>	<b>Diskussion</b>	<b>91</b>
7.1	Probandenstudie und Realfahrten . . . . .	91
7.2	Sicherheit bei der Fahrzeugführung . . . . .	93
7.3	Automatisierungsgrad . . . . .	96
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>98</b>
<b>9</b>	<b>Ausblick</b>	<b>100</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>101</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>103</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>117</b>
	<b>Studentische Arbeiten</b>	<b>118</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen</b>	<b>120</b>
	<b>Anhang</b>	
<b>A</b>	<b>Probandenstudie</b>	<b>121</b>

---

## Verwendete Formelzeichen

$a$	Beschleunigung
<b>A</b>	Systemmatrix
<b>B</b>	Eingangsmatrix
$c$	Schräglaufsteifigkeit
<b>C</b>	Ausgangsmatrix / Translationsmatrix
$C_0, C_1$	Anfangskrümmung, Krümmungsänderung einer Klothoiden
$df$	Anzahl Freiheitsgrade
<b>E</b>	Durchgriffsmatrix
$f_c$	Crossover-Frequenz
$f_x, f_y$	bezogene Brennweiten
$G(s)$	Übertragungsfunktion im Frequenzbereich
$H_0, H_1$	Nullhypothese, Alternativhypothese
$J_{zz}$	Gierträgheit
$K$	Verstärkungsfaktor
<b>K</b>	Reglermatrix / Kamerakalibrierungsmatrix
$l$	Bahnkoordinate
$l_v, l_h$	Schwerpunktsabstand vorne, hinten
$L$	Länge eines Segments
$m$	Fahrzeugmasse
$p$	Signifikanzwert
<b>P</b>	Vorsteuermatrix / Projektionsmatrix
<b>Q</b>	Gewichtungsmatrix Regelfehler
<b>R</b>	Rotationsmatrix
$R$	Krümmungsradius
<b>S</b>	Gewichtungsmatrix Stellaufwand
$t$	Prüfgröße des t-Tests
$T$	Zeitkonstante
$T_A$	Antizipationszeit
$T_D$	Vorhaltezeit
$T_I$	Verzögerungszeitkonstante
$T_N$	neuromuskuläre Verzögerung
$T_P$	Prädiktionszeit
<b>u</b>	Stellvektor
$v$	Geschwindigkeit
$V$	Verstärkungsfaktor
<b>V</b>	Vorsteuermatrix
$y$	Querablage / lateraler Offset
<b>y</b>	Ausgangsvektor
$\beta$	Schwimmwinkel
$\delta_L$	Lenkwinkel
$\theta, \dot{\theta}$	Headingwinkelfehler, Änderung des Headingwinkelfehlers

$\kappa$	Straßenkrümmung
$\mu$	Mittelwert der Grundgesamtheit
$\hat{\mu}$	Stichprobenmittel
$\sigma$	Standardabweichung der Grundgesamtheit
$\hat{\sigma}$	Stichprobenstandardabweichung
$\phi$	Phase
$\psi, \dot{\psi}$	Gierwinkel, Gierrate
$\Psi$	Kurswinkel
$\omega$	Kreisfrequenz
$\omega_c$	Crossover-Kreisfrequenz

## Indizes

C	Kamera
direkt	direktes Steuerungskonzept
h	hinten
HW	Lenkwinkel am Lenkrad
M	Mensch
max	maximal
o	offener Regelkreis
off	Offset
q	quer, lateral
R	Regelung
rand	Phasenrand / Phasenreserve
ref	Referenzwerte / Sollwerte
RW	Lenkwinkel am Rad
S	Steuerung
t	Totzeit
TOF	Teleoperiertes Fahren
trajekt.	trajektorienbasiertes Steuerungskonzept
v	vorne

## Abkürzungen

ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
ASR	Antriebsschlupfregelung
DGPS	Differential Global Positioning System
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
FPGA	Field Programmable Gate Array
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
LTE	Long Term Evolution
MABA-MABA	„men are better at“-„machines are better at“

---

SP	Schwerpunkt
TOF	Teleoperiertes Fahren
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System

# Glossar

Ein **Box-Plot** wird zur Visualisierung der Variationsbreite einer statistischen Verteilung verwendet. Er stellt den Bereich dar, in dem sich die mittleren 50 Prozent der Messwerte um den Median befinden. Die Antennen geben Maximal- und Minimalwert an, wobei Ausreißer oberhalb des 1,5-fachen Interquartilsabstands unberücksichtigt bleiben [McG78], [Bor05, S. 40].

Die **Crossover-Frequenz**  $\omega_c$  (Durchtrittsfrequenz) ist definiert als Frequenz am 0 dB-Durchgang des Amplitudengangs im Frequenzbereich [Zac11, S. 189].

Die **DARPA** (Defense Advanced Research Projects Agency) gehört dem amerikanischen Verteidigungsministerium an und koordiniert Forschungsprojekte wie etwa die Wettbewerbe für autonome Fahrzeuge: die Grand Challenges (2004 und 2005) und die Urban Challenge 2007 [Thr06], [Kam08], [Fle08].

**Differential GPS** (DGPS) ist ein Verfahren zum Senden von Korrektursignalen zur Verbesserung der GPS-Genauigkeit. Die Korrektur wird an einer stationären Referenzstation erzeugt, deren absolute Position sehr genau bekannt ist. Dadurch wird die Positionsschätzung auf den Submeter-Bereich verbessert, teilweise bis auf wenige Zentimeter [Man04, S. 217 ff.].

Die **ECE** (Economic Commission for Europe) erlässt internationale Regelungen zur Genehmigung von Fahrzeugtypen und -bauteilen [Gel09, S. 27].

Die **ELROB** (European Land-Robot Trial) ist ein Wettbewerb zum Demonstrieren und Vergleichen der Eigenschaften unbemannter Systeme.

**H.264** ist ein hocheffizientes Verfahren zur Videokompression. Es wird unter anderem für Filme auf Blu-rays, beim hochauflösenden Fernsehen (HDTV) aber auch zum Streamen auf mobile Endgeräte verwendet.

Das **HMMWV** (High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle) ist ein Geländefahrzeug, das für die US-amerikanischen Streitkräfte in den 1980ern entwickelt wurde.

**Intermodale Mobilitätskonzepte** kombinieren den öffentlichen Nahverkehr mit Auto und Fahrrad zu einer übergangslosen Dienstleistung [Can09, S. 23].

**MATLAB** ist eine Software der Firma MathWorks zur numerischen Berechnung mathematischer Probleme.

**QT** ist ein plattformübergreifendes Anwendungs- und Bedienschnittstellen-Framework für C++-Entwickler.

Die **Round-Trip-Time** beschreibt in Netzwerken die Zeitdauer, die ein Datenpaket vom Sender zum Empfänger und zurück benötigt.

**Simulink** ist eine Erweiterung von MATLAB zur grafischen Modellierung dynamischer Systeme und deren numerischer Simulation.

---

**SPSS** ist eine besonders für sozialwissenschaftliche Auswertungsprobleme entwickelte Software für die computergestützte statistische Auswertung [Bor05, S. 727].

**Telepräsenz** ist das Gefühl eines Operators, sich an einen entfernten Ort versetzt zu fühlen. Das Gefühl wird durch die Darstellung von Sensorsignalen aus der fernen Umgebung erzeugt [Sch10a, S. 36 ff.].

Eine **Trajektorie** bezeichnet in der Regelungstechnik den zeitlichen Verlauf des Zustands eines dynamischen Systems. Der Zustandsvektors  $x$  verändert mit der Zeit  $t$  seine Koordinaten im  $n$ -dimensionalen Zustandsraum [Lun13, S. 75].

**UDP** (User Datagram Protocol) ist ein verbindungsloses Netzwerkprotokoll. Im Gegensatz zu TCP (Transmission Control Protocol) werden keine Verbindungen aufgebaut und das valide Ankommen der Daten wird nicht überprüft. Der Vorteil von UDP ist der kleine Paket-Header und das Entfallen der Empfangsbestätigungsnachrichten.

**VaMoRs** (Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen), **Vita** (Vision Technology Application) und **VaMP** (Kurzform für VaMoRs-P, die PKW-Variante des ersten VaMoRs Versuchsträgers) sind Versuchsfahrzeuge der Universität der Bundeswehr München zur autonomen Fahrzeugführung [Mau00, S. 20].

**veDYNA** ist ein Fahrdynamiksimulationsprogramm der Firma Tesis DYNAware. Es ist geeignet für hochpräzise virtuelle Fahrdynamikuntersuchungen von unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen in einer echtzeitfähigen MATLAB/Simulink-Umgebung.

Eine **VPN-Verbindung** (Virtual Private Network) ermöglicht den gesicherten externen Zugriff auf ein lokales Netzwerk.

In dem **Wiener Übereinkommen** [Uni68] verpflichten sich eine Vielzahl von Ländern, so auch Deutschland, gewisse Verkehrsregeln zu schaffen und einzuhalten. Dieser internationale Vertrag hat Auswirkungen auf die Entwicklung automatisierter Funktionen im Bereich der Fahrerassistenzsysteme [Gel09, S. 30 f.], [Lut12].



---

# 1 Einleitung

Ob Gesellschaft, Wirtschaft oder Umwelt: Die Welt wandelt sich. Dies wird Auswirkungen auf unser zukünftiges Leben und die Mobilität haben. Es gibt unterschiedliche, parallele Entwicklungen, die diesen aktuellen Wandel auslösen: Gesellschaftlich findet weltweit eine Verstädterung statt. Etwas mehr als die Hälfte der Erdbevölkerung lebte 2011 in urbanen Ballungsgebieten, im Jahr 2050 werden es voraussichtlich 67 Prozent sein [Uni12, S. 4 ff.]. Die wirtschaftliche Folge ist ein verändertes Nutzungsverhalten des Automobils. Vor allem bei der jüngeren Generation verliert der Besitz des eigenen Fahrzeugs an Symbolkraft. Die durchgängige Verbindung zu Freunden und Geschäftskontakten durch Smartphones und soziale Netzwerke lässt eine individuelle Mobilität weniger wichtig erscheinen [Can09, S. 12 ff.]. Ökologisch wird der Wandel durch die Endlichkeit der fossilen Energieträger sowie den Klimawandel ausgelöst. Beides ist ein Treiber hin zu energieeffizienter und CO<sub>2</sub>-neutraler Mobilität [Fou12, S. 407].

Diese Entwicklungen setzen die Politiker weltweit unter Handlungsdruck. Es ist anzunehmen, dass in Zukunft der Verkehrssektor vermehrt reguliert wird, um Klimaziele zu erreichen [Fou12, S. 408]. Die Beschränkung des Befahrens von Innenstädten auf lokal emissionsfreie Fahrzeuge und die Einführung hoher Mautgebühren für verbrennungsmotorische Fahrzeuge sind nur die Vorboten von rechtlich und politisch veränderten Rahmenbedingungen [Wal11, S. 13 ff.].

## 1.1 Motivation

Trotz des ökologischen Wandels und dem verlorenen Prestige des eigenen Autos bei der jüngeren Generation gibt es aktuell keine Anzeichen einer postautomobilen Gesellschaft. Das Auto wird nach wie vor das meist genutzte Individualverkehrsmittel bleiben. Canzler und Knie [Can09, S. 11 f.] gehen aber davon aus, dass sich die dominante Rolle des Automobils in unseren heutigen Verkehrskonzepten relativieren wird. Im städtischen Bereich, wo kurze Wege und eine dichte Verkehrsinfrastruktur alternative Verkehrsmittel verfügbar machen, entstehen in Zukunft effiziente und flexible intermodale Mobilitätskonzepte [Can09, S. 16 ff.]. Diese scheitern in der Praxis aber noch an unterschiedlichen Zugangsvoraussetzungen zu den Verkehrsmitteln [Wol12, S. 528].

Als erste Entwicklung dieser neuen Mobilität erlebt aktuell das Car-Sharing eine Evolution. Die neuen Floating-Fleet-Systeme, wie etwa BMWs Drive Now [Dri15] oder Daimlers car2go [car15], bei denen das Fahrzeug an nahezu beliebigen Orten im Geschäftsgebiet abgeholt und wieder abgestellt werden kann, kombinieren hohe Flexibilität mit einem schnellen Buchungsprozess [Sch04, S. 37], [Fra01, S. 37 f.]. Nicht nur wegen der geringeren spezifischen Emissionen von Car-Sharing-Nutzern [Wol12, S. 540], sondern auch wegen der größeren Flexibilität und den geringeren Kosten wird der Car-Sharing-Markt in den nächsten Jahren rasant wachsen [Fro12]. Durch E-Car-Sharing könnte auch die Elektromobilität vom Wachstum der Car-Sharing-Branche profitieren, indem die Auslastungen der Elektro-

fahrzeuge gesteigert und dadurch Kosten gesenkt werden [Sei13]. Eine essentielle Voraussetzung für eine weitere Verbreitung von Car-Sharing im Verbund mit anderen öffentlichen Verkehrsmitteln ist der barrierefreie Zugang zu den Fahrzeugen und eine einfache, intuitive Nutzung ohne bürokratischen Aufwand [Can12, S. 10]. Die aktuellen Floating-Fleet-Systeme gehen stärker auf das Kundenverhalten ein als das konservative Car-Sharing und vereinfachen das Buchungs- und Transaktionssystem durch die Verwendung neuer Informations- und Kommunikationstechnologien. Aber auch die Benutzung von Floating-Fleet-Systemen bietet noch Einschränkungen für den Kunden gegenüber dem eigenen Fahrzeug. So muss der Nutzer sich zuerst ein Fahrzeug in der Nähe suchen und dieses etwa zu Fuß erreichen. Die Konzepte sind zudem auf das One-Way-Prinzip ausgelegt. Wenn auch eine Rückfahrt notwendig ist, muss das Fahrzeug durchgängig gebucht werden und die Parkzeit bezahlt werden oder der Kunde hofft, dass passend zur Rückfahrzeit wieder ein freies Fahrzeug fußläufig verfügbar ist. Insbesondere das E-Car-Sharing bringt organisatorische Probleme mit sich. So müssen die Fahrzeuge regelmäßig vom Kunden an Ladestationen abgestellt werden. Passiert dieses nicht, müssen Service-Mitarbeiter der Betreiberfirmen dieses übernehmen. Eine ähnliche Problematik ergibt sich aber generell durch das One-Way-Prinzip beim Floating-Fleet-Car-Sharing. Die Fahrzeuge sind permanent ungleichverteilt über das Stadtgebiet. Dies müssen Service-Mitarbeiter durch manuelles Umfahren der Fahrzeuge korrigieren [Has13].

Aus den genannten Problemen zur Integration des Automobils in intermodale Mobilitätskonzepte leitet sich unmittelbar die Notwendigkeit einer automatisierten Bereitstellung ab. Der Kunde muss sich das Fahrzeug nicht mehr suchen, sondern kann sich ein freies Car-Sharing-Fahrzeug rufen. Dieses wird dann automatisiert vor Ort bereitgestellt. Nach der Nutzung wird das Fahrzeug wieder automatisiert geparkt oder auch zum Tanken respektive Laden gebracht.

In gewissem Rahmen gibt es solche Systeme bereits, etwa ein Valet-Parking vor exklusiven Hotels und Restaurants oder eine Chauffeur- und Taxi-Dienstleistung. Diese Konzepte sind zur Problemlösung allerdings ungeeignet, entsprechen sie doch nicht der von den jungen Nutzern angestrebten gemeinschaftlichen Nutzung von Fahrzeugen. Würde der Kunde chauffiert werden wollen, würde er sich bereits heute ein Taxi rufen. Der Vorteil des Individualverkehrs und somit auch des Car-Sharings sind insbesondere die eigene Privatsphäre und Unabhängigkeit im selbst genutzten PKW [Fla13, S. 94]. Ein Grund, weshalb viele Pendler das Fahrzeug dem überfüllten öffentlichen Nahverkehr vorziehen. Auch wenn sie damit die voll besetzte Bahn gegen Staus auf den Einfallstraßen in die Metropolregionen tauschen.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Wenn man die Frage der automatisierten Bereitstellung von Straßenfahrzeugen aus Sicht der Automatisierungstechnik in der Robotik betrachtet, gibt es seit circa Mitte des 20. Jahrhunderts zwei grundlegende Entwicklungsrichtungen, insbesondere im Hinblick auf robotische Fahrzeuge. Einerseits wird seit jeher versucht, dem Menschen das Ausführen wenig komplexer Tätigkeiten zu erleichtern, bzw. den Menschen komplett durch eine Maschine zu ersetzen, etwa beim Autopilot im Flugzeug [She02, S. 14]. Dies ist das klassische Themenfeld der Automatisierungstechnik. Andererseits gab es immer Tätigkeiten, die für eine vollständige Automatisierung zumeist aufgrund ihrer Komplexität nicht geeignet waren. Dies sind meist keine Routinetätigkeiten wie etwa die Tiefseerkundung [She02, S. 33 f.]. Hier hat sich das Forschungsfeld der teleoperierten Fahrzeuge entwickelt (Abbildung 1.1). Bei

der Teleoperation ist der *Teleoperator* eine Maschine, die die menschlichen Fähigkeiten zur Wahrnehmung und Manipulation auf einen vom Menschen entfernten Ort überträgt. Der Mensch, der diese Maschine bedient, wird als *Operator* bezeichnet. Wenn die Maschine die Eingaben des Operators mit eigenen Mechanismen und insbesondere künstlicher Intelligenz unterstützt, spricht man von einem *Teleroboter* [She92, S. 3 ff.].

Mittlerweile erreicht die Forschung in der Robotik einen Punkt, an dem die eigenständigen Entwicklungszweige Automatisierung und Teleoperation ein Ende finden. Auf der einen Seite ist es nicht möglich, beliebig komplexe Tätigkeiten zu automatisieren. Auf der anderen Seite kann auch nicht jede Tätigkeit durch eine einfache Fernsteuerung realisiert werden, weil auch der menschliche Operator eine begrenzte Leistungsfähigkeit besitzt [Fon01a, S. 2]. Für weiterführende Systeme in der Robotik ist es daher zwingend notwendig, die Entwicklungen aus beiden Forschungsfeldern zusammenzuführen. Hierzu müssen die autonomen Basisfähigkeiten des Roboters mit den Fähigkeiten und Fertigkeiten des menschlichen Operators kombiniert werden. In der modernen Telerobotik ist somit die elementare Schlüsselfrage bei der Erfüllung komplexer Aufgaben die Frage nach der geeigneten Kombination von Mensch und Maschine [Tza07, S. 447].

Ausgehend von den obigen Überlegungen ergibt sich für diese Arbeit die Aufgabe, eine fahrerlose automatische Fahrzeugführung zur Bereitstellung und zum Wegparken im urbanen Verkehr zu diskutieren. Basierend auf einem Ansatz zur Mensch-Maschine-Interaktion soll eine geeignete Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine abgeleitet werden, um die Fahraufgabe bestmöglich zu bewältigen. Dabei wird der Fokus auf den Entwurf eines Steuerungskonzeptes gelegt, das in der Lage ist, eine robuste und sichere Fahrzeugführung im Straßenverkehr zu garantieren. Ziel ist das Aufzeigen eines geeigneten Schnittpunkts zwischen maschineller Intelligenz und menschlichen Fähigkeiten. An ein solches Steuerungskonzept stellt sich im urbanen Anwendungsbereich die Anforderung, komplexe innerstädtische Verkehrssituationen beherrschen zu können. Die Kooperation mit anderen Verkehrsteilnehmern und das Spurfolgen in Verkehrsräumen ohne Fahrbahnmarkierung sind not-

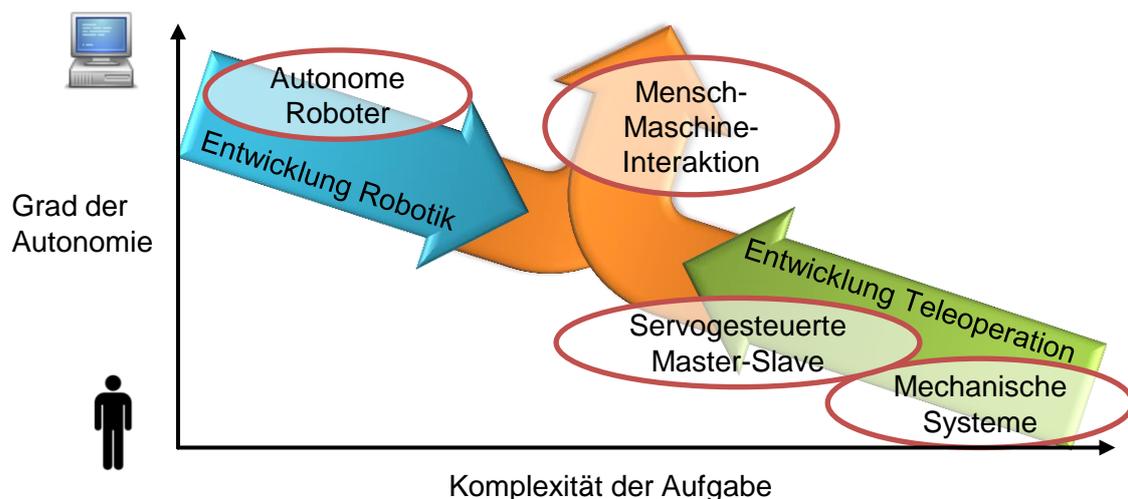


Abbildung 1.1: Klassifizierung der Entwicklungen in der Robotik nach Grad der Autonomie und Komplexität. Die eigenständigen Entwicklungen autonomer und teleoperierter Roboter werden zukünftig zur Mensch-Maschine-Interaktion verknüpft (eigene Darstellung nach [Tza07, S. 446]).

wendig. Die Fahrzeugführung muss dabei bis zu Geschwindigkeiten von 50 km/h stabil und sicher sein.

### 1.3 Vorgehensweise

Der strukturelle Aufbau dieser Arbeit wird in Abbildung 1.2 dargestellt. Sie führt zunächst mit den Grundlagen zur Teleoperation in die Thematik ein. Dazu werden Charakteristika teleoperierter Systeme und der Systementwurf eines teleoperierten Straßenfahrzeugs diskutiert. Kapitel 3 stellt den Stand der Technik zu Teleoperation und einer Automatisierung der Fahrzeugführung vor. Darauf aufbauend wird eine Bewertung der aktuellen Forschung vorgenommen und die forschungsleitende Fragestellung zur Kombination von Mensch und Maschine abgeleitet (Kapitel 4). Zusätzlich wird mit Shared Control eine geeignete Methodik zur Problemlösung aufgezeigt. Im Anschluss wird in Kapitel 5 das Vorgehen erörtert, das auf der Shared-Control-Methodik basiert und eine trajektorienbasierte Steuerung als Lösung für das Problem einer sicheren fahrerlosen Fahrzeugführung entwickelt. Das Steuerungskonzept wird in einem Versuchsträger prototypisch realisiert. Die Kapitel 6 und 7 stellen die Ergebnisse der Validierung des Systems in Simulation und Realität vor und diskutieren die Resultate vor dem Hintergrund der Zielerfüllung und Anwendbarkeit. Abschließend fasst Kapitel 8 die Arbeit zusammen und Kapitel 9 gibt einen Ausblick auf offene Probleme und die weitere Verwendung der Ergebnisse.

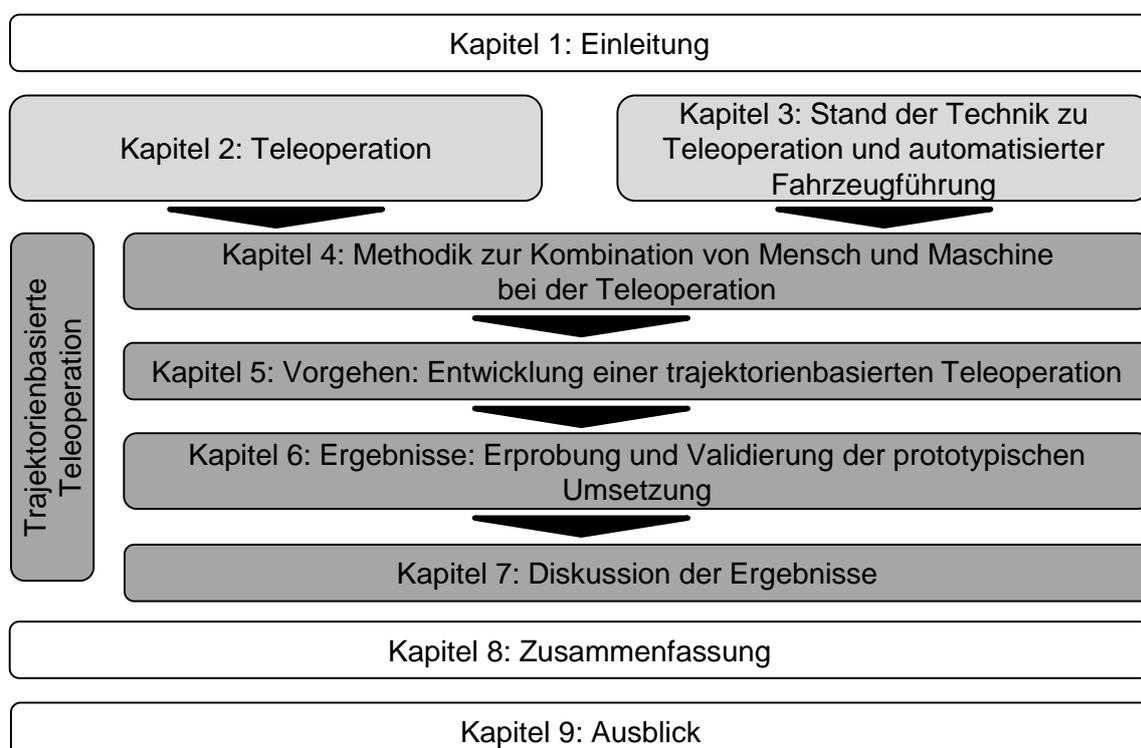


Abbildung 1.2: Struktureller Aufbau der Arbeit.

---

## 2 Teleoperation

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen teleoperierter Roboter und Fahrzeuge. Dabei wird in Kapitel 2.1 die Teleoperation zunächst definiert. Darauf aufbauend wird ein Systementwurf für ein teleoperiertes Straßenfahrzeug vorgestellt (Kapitel 2.2) und validiert (Kapitel 2.3). Abschließend leitet Kapitel 2.4 relevante Problemstellungen bei der Teleoperation von Straßenfahrzeugen ab.

### 2.1 Definition

Die Teleoperation ist ein Teilgebiet der Robotik. Die ersten Forschungen zur Fernsteuerung von Robotern starteten am Anfang des 20. Jahrhunderts. Mediales Interesse erlangte die Teleoperation in den 70er Jahren, als der sowjetische Lunokhod, ein ferngesteuerter mobiler Erkundungsroboter, auf dem Mond zum Einsatz kam [Shi97]. Die Ausprägungen aktueller Systeme reichen von teleoperierten Unterwasserfahrzeugen über Bodenfahrzeuge bis hin zu Luftfahrzeugen (Abbildung 2.1). Die Einsatzzwecke starten bei der Tiefseerkundung, etwa zur Erschließung von Erdölquellen, und enden bei der Erkundung des Weltraums, wie aktuell durch den Mars-Rover Curiosity der NASA [Fon01b], [Gro12].

Neben den klassischen Ausprägungsformen unbemannter Unterwasser- und Luftfahrzeuge, die neben der Forschung auch in kommerziellen Anwendungen zum Einsatz kommen, hat sich in der Robotik die Klasse teleoperierter Bodenfahrzeuge etabliert. Hierzu zählen neben den bereits genannten Weltraum-Erkundungsrovern auch mobile Roboter für Gefahreinsätze, wie etwa zur Bombenentschärfung, und unbemannte Bodenfahrzeuge (*Unmanned Ground Vehicles, UGV*). Unbemannte Bodenfahrzeuge sind Teleroboter, die dem klassischen Automobil am nächsten kommen, jedoch explizit ohne bordeigenen Fahrer bewegt werden [Fon01b].

Die Entwicklung der unbemannten Bodenfahrzeuge ist vorwiegend militärisch geprägt. Amerikanische Forschungsinstitutionen wie das Naval Ocean Systems Center oder das Army Research Laboratory haben seit den 1980er Jahren an der Entwicklung unbemannter Bo-



Abbildung 2.1: Unterschiedliche teleoperierte Roboter: Links ein Remotely Operated Vehicle (ROV) für Tiefseearbeiten [Fon01a, S. 128], in der Mitte die Mars Exploration Rover der NASA [Baj08], rechts ein unbemanntes Erkundungsflugzeug der US Air Force vom Typ Predator [Fon01a, S. 124].

denfahrzeuge für den militärischen Einsatz geforscht. Dabei standen Tätigkeitsfelder wie Aufklärung, Erkundung oder die Landminensuche im Fokus [Fon01b], [Fon01a], [Kay97a], [Kay97b]. Das Naval Ocean Systems Center hatte bereits in den 1980er Jahren einen Gelände-Buggy und ein Militärfahrzeug vom Typ HMMWV zu teleoperierten unbemannten Bodenfahrzeugen umgebaut, um das Verhalten von Operatoren zu untersuchen (Abbildung 2.2). Die Kommunikation erfolgte über ein Glasfaserkabel, das große Datenmengen übertragen konnte. Dieses schränkte die Reichweite und die Flexibilität des Fahrzeugs aber stark ein [Kay97a, S. 10 ff.], [Gag95]. Für das amerikanische Tactical Unmanned Ground Vehicle Programm wurden in den 1990er Jahren die teleoperierten Bodenfahrzeuge weiterentwickelt. Als Basisversuchsfahrzeug wurde das Surrogate Teleoperated Vehicle (STV) entworfen, das sowohl durch ein Glasfaserkabel als auch per Funk fernsteuerbar war [Fon01a, S. 126], [Gag95]. Appelqvist [App10] beschreibt den Aufbau eines teleoperierten Geländefahrzeugs auf Basis eines Land Rover Discovery für das Finnische Militär zur Überwachung und Aufklärung (Abbildung 2.2). Zur Datenübertragung kommt ein Wireless LAN zum Einsatz. Die Reichweite der Fernsteuerung bleibt daher auf einige hundert Meter beschränkt [App10], [App07]. Spätestens seit den DARPA Challenges zeigt sich, dass der Bereich der unbemannten Bodenfahrzeuge um die autonomen oder semi-autonomen Roboter erweitert wurde. Viele Entwicklungen und Projekte lassen sich nicht mehr eindeutig einer Steuerungs- oder Automatisierungsklasse zuordnen. Vielmehr können die Fahrzeuge situationsadaptiv im automatischen oder ferngesteuerten Modus betrieben werden [App10, S. 240]. Allen genannten Teleoperationsanwendungen ist gemein, dass die zu erfüllende Aufgabe für eine vollständige Automatisierung zu komplex ist und ein Mensch die Aufgabe auf Grund der Unerreichbarkeit oder Gesundheitsgefährdung des Ortes nicht direkt ausführen kann. Ein menschlicher Experte wird benötigt, der die Aufgabe aus der Ferne ausführen oder zumindest überwachen muss. Der Teleoperator erweitert dabei die Sinne und Fähigkeiten des Menschen auf den entfernten Ort [Win00, S. 148].

Teleoperierte Systeme lassen sich nach ihrer Systemausprägung unterscheiden. Zunächst können reine Telepräsenzsysteme von solchen Systemen differenziert werden, die eine Handlung am entfernten Ort vornehmen können. Bewegliche Teleoperatoren gliedern sich in fixierte und mobile Roboter. Fixierte Roboter befinden sich an einem festen Ort und sind zumeist mit einem Greifarm ausgestattet. Ihr Einsatzgebiet ist beispielsweise die Medizintechnik. Die mobilen Roboter können sich hingegen frei im Raum bewegen wie etwa die Mars-Rover oder unbemannte Flugobjekte [Win00, S. 148]. Die mobilen Teleoperatoren gliedern sich ferner nach Systemen mit einer direkten Sichtverbindung (Outside-In-Ansatz) und ohne Sichtverbindung zwischen Operator und Teleoperator. Ohne direkte Sichtverbindung handelt es sich um einen Inside-Out-Ansatz, bei dem zum Beispiel mittels Kameras der



Abbildung 2.2: Unbemannte Bodenfahrzeuge: Die Bilder zeigen einen Dune Buggy (links) und einen HMMWV (mittig) aus den 1980ern, die vom Naval Ocean Systems Center mit Hilfe eines fiberoptischen Kabels teleoperiert wurden [Fon01a, S. 126]. Rechts ist ein Land Rover Discovery des Finnischen Militärs dargestellt, der zur Fernsteuerung per Wireless LAN umgebaut wurde [App10, S. 238].

Operator die Welt aus Sicht des Roboters sieht [McG87].

Diese Arbeit diskutiert einen Ansatz zur fahrerlosen Fahrzeugführung. Bereits aus der Zielstellung ergibt sich somit die Betrachtung von mobilen Robotern. Die Bewegung eines Fahrzeugs an einem fernen Ort muss auf einem Inside-Out-Ansatz basieren. In den weiteren Ausführungen beziehen sich alle Bezeichnungen auf solche Systeme, eine weitere sprachliche Differenzierung findet nicht statt.

Trotz der Unterschiede im Anwendungsfall definiert Winfield [Win00, S. 148 f.] drei charakteristische Elemente, die jedes teleoperierte System kennzeichnen:

*Operatorarbeitsplatz:* Der Operator steuert den Teleoperator von einem Kommandostand aus. Dieser Operatorarbeitsplatz besteht einerseits aus Anzeigeelementen, die den aktuellen Zustand des Roboters und seine Umwelt visualisieren, sowie aus Eingabemöglichkeiten, um Stellsignale zu generieren [Kay95]. Das Hauptelement der Visualisierung stellt meistens ein Live-Kamerabild aus der Roboterperspektive dar [Ack11, S. 47 ff.]. Mögliche Eingabegeräte sind Lenkrad und Pedale wie bei konventionellen Fahrzeugen, aber auch Joysticks und berührungssensitive Eingabegeräte werden verwendet [Fon01b], [Fon01d].

*Kommunikationsverbindung:* Über einen Kommunikationskanal tauschen Operator und Teleoperator Sensor- und Stellsignale aus. Die Übertragung kann kabelgebunden oder kabellos erfolgen. Die einzigen aktuellen mobilen Systeme, bei denen häufig eine kabelgebundene Übertragung erfolgt, sind Unterwasserroboter, weil bei der kabellosen Kommunikation im Wasser die Schallausbreitung Datenrate und Latenz limitiert [She78, S. 69 f.], [Far10]. Um die Mobilität für alle weiteren Teleoperationssysteme an Land und in der Luft zu garantieren, ist im Allgemeinen eine kabellose Datenübertragung notwendig. Der Hauptauslegungspunkt bei der Wahl der Kommunikationstechnologie ist die Minimierung der zeitlichen Verzögerung [Win99].

*Teleroboter:* Der Teleroboter selber ist sehr anwendungsspezifisch aufgebaut. Er verfügt zumindest über die notwendige Kommunikationsarchitektur, um die Stellsignale vom Operator zu empfangen. Zumeist sind Teleroboter mindestens mit einer Kamera ausgerüstet, um dem Operator die Roboterumgebung zu visualisieren. Je größer die bordeigene Intelligenz und Autonomie des Roboters ist, desto ausgeprägter müssen Prozessoreinheit und Sensorsystem sein [Win00, S. 149].

## 2.2 Systementwurf für teleoperierte Straßenfahrzeuge

Dieses Kapitel stellt den Systementwurf eines teleoperiertes Straßenfahrzeugs vor. Dazu werden zunächst wichtige Einflussgrößen auf die Leistungsfähigkeit des Menschen zur Bewältigung der Fahraufgabe identifiziert, die Auswirkungen auf eine Fahrzeugteleoperation haben (Kapitel 2.2.1). Schließlich wird in Kapitel 2.2.2 der Entwurf der drei charakteristischen Elemente Teleoperator, Kommunikationskanal und Operatorarbeitsplatz vorgestellt.

### 2.2.1 Einflussgrößen auf die Fahraufgabe

Die Fahrzeugführungsaufgabe erfordert vom Menschen, das Fahrzeug längs und quer entlang der Straße zu führen und die Kollision mit anderen Objekten zu vermeiden. Im Straßenverkehr verwendet der Mensch dabei maßgeblich vier Sinneskanäle: Die Rückmeldungen aus der Umgebung erfolgen vornehmlich visuell, aber auch der auditive, der haptische und der vestibuläre Sinn sind partiell an der Fahrzeugführung beteiligt. Hierdurch ergibt sich

eine gewisse Redundanz bei der Umgebungserfassung [Bub01, S. 155 f.]. Die Übertragung dieser Sinneseindrücke auf den Operatorarbeitsplatz ist, vergleichbar wie bei einem Fahr-simulator, notwendig, um dem Operator die erfolgreiche Ausführung der Fahraufgabe zu ermöglichen.

Bei der Fahrzeugführung wählt der Fahrer einen gewünschten Kurs für das nächste Straßenstück. Die visuelle Wahrnehmung ist als einziger Sinn in der Lage, vorausschauende Informationen über den Fahrbahnverlauf bereitzustellen. Das Auge gilt daher als wichtigstes Sinnesorgan zur Fahrzeugführung [Coh91]. Zusätzlich nimmt der Fahrer die eigene Position in der Fahrspur wahr und beobachtet sowie prädiziert die Position und Bewegung anderer Verkehrsteilnehmer [Wie96]. Ein wichtiger Aspekt des visuellen Sinneskanals ist die Tiefenwahrnehmung zur Orientierung im Raum und zur Geschwindigkeitswahrnehmung. Der räumliche Tiefeneindruck entsteht für den Menschen dabei umso stärker, je mehr Tiefenkriterien (monokulare, okulomotorische, stereoskopische und bewegungsinduzierte [Sch10b, S. 326]) verwendet werden können [Krü07, S. 51 ff.]. Das horizontale Gesichtsfeld beim Menschen erreicht etwa 200 Grad mit beiden Augen [Sch10b, S. 323]. In einem Simulator kann meistens nur ein begrenztes Sichtfeld realisiert werden. Fahrer, denen im Realfahrzeug das Sichtfeld auf 60 Grad beschränkt wurde, zeigten allerdings vergleichbar gute Ergebnisse in der Bahnführung wie diejenigen ohne Sichteinschränkung [Kay97a, S. 11]. Das Abbiegen wurde bei der Teleoperation von Probanden leichter mit 120 Grad Sichtfeld als mit 40 Grad Sichtfeld empfunden [McG87].

Der Hörsinn ist neben dem Sehsinn der zweite Fernsinn. Töne können sowohl vertikal als auch horizontal im Raum geortet werden. Die Distanzschätzung ist hingegen nicht so gut [Fri09, S. 29 ff.]. Beim Fahren informiert die auditive Wahrnehmung den Menschen über den Fahrzustand und über die Umgebung [Neg07, S. 50]. Zur Geschwindigkeitswahrnehmung verwendet der Mensch einen Mix unterschiedlicher Sinnesinformationen, wobei auditive und visuelle Informationen die größte Bedeutung haben [Bub77]. Während die Geschwindigkeit ohne visuellen Kanal überschätzt wird, wird sie ohne akustische Rückmeldung stark unterschätzt [Eva70].

Der haptische Sinneskanal ist ein notwendiges Element zum Erfüllen der Fahraufgabe. Das Lenkrad ist hierbei eine wichtige Quelle für fahrdynamische Größen. Es erlaubt dem Fahrer, über haptische Rückmeldungen Rückschlüsse auf den Zustand der Fahrbahn und den Fahrbahn-Reifen-Kontakt zu ziehen [Bub01, S. 167 f.]. Ohne eine mechanische Verbindung zur Fahrbahn, wie etwa bei Steer-by-Wire-Systemen oder in Fahrsimulatoren, muss die Lenkkraft simuliert werden, um die Regelgüte des Fahrers nicht zu reduzieren [Koc10, S.20].

Durch das Gleichgewichtsorgan kann der Mensch sowohl translatorische als auch rotatorische Bewegungen wahrnehmen [Sch10b, S.345]. Die Auswirkung einer fehlenden oder falschen Beschleunigungssimulation auf die Performanz des Fahrers ist empirisch nicht eindeutig belegt [Kem03], [Wil05]. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass vornehmlich in hochdynamischen Situationen eine fehlende Beschleunigungssimulation zu einem schlechteren Regelverhalten des Operators führt. Die Darstellung einer Beschleunigungssimulation ist allerdings mit hohem Aufwand verbunden und kann niemals das reale Fahrverhalten abbilden [Neg07, S.40].

Neben der Sinneswahrnehmung hat das Präsenzerleben Einfluss auf die Leistung der Operatoren. Die Präsenz beschreibt das Erleben einer nicht realen Umgebung [Hee05, S. 43]. Der Begriff wird sowohl in rein virtuellen Fahr-simulator-Umgebungen als auch bei der Teleoperation verwendet [Hee05, S. 54 ff.]. Die Präsenz kann durch die optimierte Darstellung der sensorischen Informationen, wie etwa die Nutzung von Stereoskopie oder einem größeren Sichtfeld, gesteigert werden [Hen94, S. 45].

Ferner ist das Bewusstsein für die Situation von großer Bedeutung. Endsley definiert Situationsbewusstsein als die Fähigkeit, eine komplexe Situation wahrzunehmen, korrekt zu interpretieren und die zukünftige Entwicklung der Situation zu antizipieren [End88], [End01, S. 3 ff.]. Dieses Situationsbewusstsein ist besonders in dynamischen und komplexen Umgebungen wichtig, um effizient zu handeln. Schwere Fehler bei der Fahrzeugführung lassen sich häufig auf mangelndes Situationsbewusstsein zurückführen [Rau09, S. 10]. Ein geeignetes Maß an Situationsbewusstsein zu schaffen, ist besonders in Telepräsenzumgebungen problematisch. Hier führt nicht allein die Quantität der dargestellten Informationen, sondern vorwiegend die Selektion der Daten zu einem erhöhten Situationsbewusstsein, denn falsche oder unwichtige Informationen führen zu einer Fehlinterpretation der Situation [Rau09, S. 7].

### 2.2.2 Systembeschreibung

Aus der charakteristischen menschlichen Wahrnehmung zur Fahrzeugführung lassen sich Anforderungen an ein Teleoperations-System ableiten. So muss beim Systementwurf maßgeblich der visuelle Sinneskanal angesprochen und ein geeignetes Maß an Situationsbewusstsein und Präsenz geschaffen werden. Im Rahmen des Projektes *Teleoperiertes Fahren* wurde am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München ein generisches Konzept für teleoperierte Fahrzeuge entworfen (Abbildung 2.3). Das Fahrzeug ist über eine kabellose Datenverbindung mit dem Internet verbunden. Der Operator verfügt an seinem stationären Arbeitsplatz ebenfalls über eine Internetverbindung. Er bekommt Sensorsignale dargestellt und gibt Stellsignale vor. Die folgenden Abschnitte stellen diesen allgemeinen Systementwurf in einer Kurzfassung vor. Eine ausführliche Darstellung findet sich in [Die11], [Gna13].

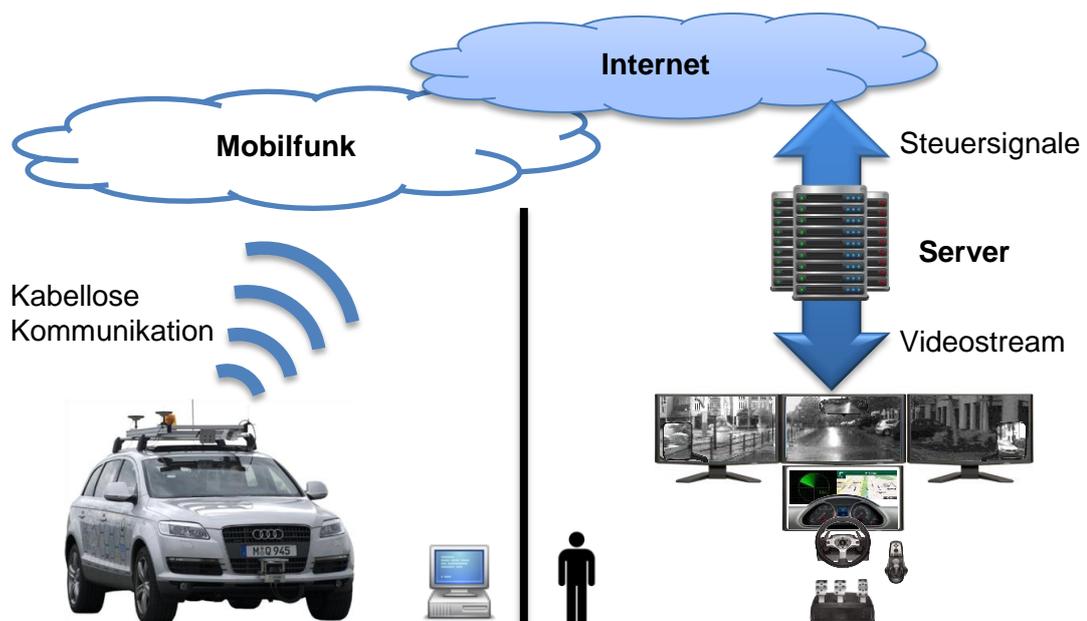


Abbildung 2.3: Systementwurf für ein klassisches Teleoperationsschema, übertragen auf Straßenfahrzeuge (eigene Darstellung nach [Die11]).

### 2.2.2.1 Architektur des Versuchsträgers

Zur prototypischen Umsetzung wurde ein Versuchsträger vom Typ Audi Q7 für die Fahrzeugteleoperation umgebaut. Das Fahrzeug ist zuvor im DFG-Sonderforschungsbereich Transregio 28 *Kognitive Automobile* mit Fähigkeiten zum autonomen Fahren ausgestattet worden [Thu08], [Goe09], [Kra12, S. 24 ff.].

Als maßgebliches Sensorsystem übermitteln bordeigene Kameras ein Live-Bild der Fahrzeugumgebung an den Operator. Dazu wurde ein statisches Kamerakonzept mit acht Kameras realisiert, die eine komplette Rundumsicht abbilden. Die nach vorne gerichteten Kameras realisieren ein zusammenhängendes frontales Gesichtsfeld von über 200 Grad [Die11]. Jede Kamera liefert eine VGA-Auflösung in Farbe. Farbbilder sind gegenüber einem Schwarz-Weiß-Bild zu bevorzugen, weil im Allgemeinen die Umgebung besser und Hindernisse früher wahrgenommen werden können [Mil88]. Als weitere Sensoren kommen drei Lidar-Scanner vom Typ SICK LMS291-S05 mit je 180 Grad horizontalem Öffnungswinkel und ein Long-Range-Radar an der Fahrzeugfront mit 16 Grad horizontalem Öffnungswinkel zum Einsatz [Kra12, S. 25 ff.]. Dieses hybride Sensornetzwerk wird mittels komplementärer und kompetitiver Sensordatenfusion zu einer konsistenten maschinellen Umfeldwahrnehmung erweitert [Gna10]. Das Sensorkonzept ist in Abbildung 2.4 illustriert.

Die Stellelemente in einem modernen Kraftfahrzeug sind bereits über elektronische Schnittstellen adressierbar. Hierzu wird etwa dem Motorsteuergerät ein entsprechendes Sollmotor-moment oder dem ESP-Steuergerät eine Sollverzögerung vorgeben. Eine elektromechanische Lenkung stellt einen Lenkwinkel ein. In Kombination mit einem Shift-by-Wire-Getriebe wird so die primäre Fahraufgabe vollständig elektronisch steuerbar [Kra12, S. 31 ff.]. Die Verarbeitung der Sensordaten und die Bedienung der Aktorik erfolgen durch zwei Rechen-einheiten. Hierbei werden hart-echtzeitfähige Prozesse, die eine feste Zykluszeit unbedingt erfordern, von einer Rapid-Prototyping-Plattform der Firma dSpace übernommen. Die Kommunikation mit dem Operatorarbeitsplatz und die Verarbeitung der Videostreams erledigt ein automotive-fähiger Car-PC.

### 2.2.2.2 Kommunikationskanal

Als Kommunikationskanal für eine kabellose, robuste Datenübertragung zwischen Fahrzeug und Operator wird mobiles Internet verwendet. Netzabdeckung und Bandbreite des Mobilfunks haben sich in den vergangenen Jahren rasant entwickelt. UMTS-Verbindungen (3G)

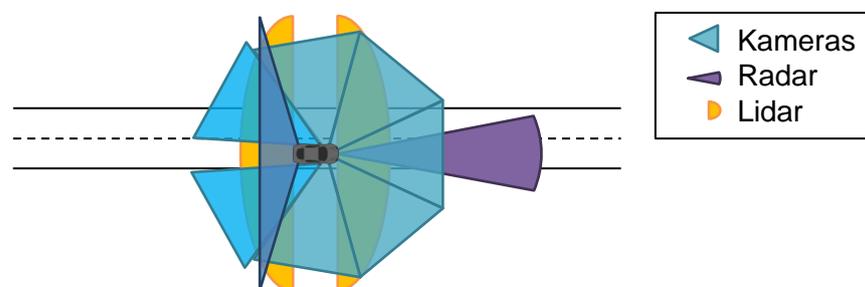


Abbildung 2.4: Das Sensorkonzept basiert auf acht Kameras und wird durch zwei 180-Grad-Lidar-scanner und einen Long-Range-Radar erweitert. Ein dritter Lidarscanner ist auf dem Dach des Versuchsträgers angebracht und auf die Fahrbahn gerichtet. Dieser ist in der Abbildung nicht dargestellt.

sind nahezu flächendeckend ausgebaut. Die vierte Generation der Mobilfunknetze (4G, LTE) ist zumindest in großen Ballungszentren verfügbar, die weiteren Ausbaustufen wie LTE-Advanced sind bereits in der Entwicklung [Kis13].

Der limitierende Faktor der Kommunikationsverbindung ist die Uplink-Geschwindigkeit im Fahrzeug, weil hierüber die Videodaten gesendet werden. Der Upstream aktueller Mobilfunkstandards ist nicht ausreichend, um permanent alle Sensordaten an den Operator zu senden. Die Daten müssen im Fahrzeug sinnvoll selektiert und komprimiert werden. Um die beschränkte Bandbreite effektiv zu nutzen, werden die Videobilder mit einem H.264-Video-Codec komprimiert. Zur weiteren Reduktion der Datenmenge werden die Qualität und die Auflösung einzelner Kameras angepasst sowie situationsabhängig einzelne Kameras abgeschaltet. Um den Overhead der Datenkommunikation so gering wie möglich zu halten, wird eine verbindungslose UDP-Verbindung verwendet.

Die zellulare Struktur der Mobilfunknetze erlaubt keine direkte Knoten-zu-Knoten-Kommunikation. Die Daten werden immer über das Basisnetz geroutet. Daher sind die Paketlaufzeiten und die Datenrate abhängig von der Auslastung in den Zellen sowie im Basisnetz. Die daraus resultierenden Zeitverzögerungen sind somit nicht deterministisch. Zudem ist die Round-Trip-Time höher und schwankt stärker, wenn sich einer der Knoten bewegt. Von ihrer zellularen Struktur her sind klassische Mobilfunknetze für die echtzeitfähige Kommunikation ungeeignet [Wew07].

### 2.2.2.3 Operatorarbeitsplatz

Das zum Aufbau des Operatorarbeitsplatzes verwendete Vorgehen orientiert sich am Entwurfsprozess klassischer Fahrsimulatoren, etwa [Neg07]. Um ein hohes Telepräsenzerleben zu erreichen, wird der Arbeitsplatz ähnlich zu einem Fahrzeugcockpit aufgebaut. Es werden die konventionellen Stellelemente Lenkrad, Pedale und Gangwahlhebel verwendet. Zusätzlich sitzt der Operator auf einem Fahrzeugsitz. Ein angemessenes Gesichtsfeld wird durch drei Monitore erreicht (Abbildung 2.5).

Das Design der grafischen Bedienoberfläche orientiert sich an Methoden zum Entwurf von Bedienschnittstellen für semi- und voll-autonome Roboter [Ste04]. Die Ansicht von Live-Kamerabildern aus Sicht des Roboters ist dabei obligatorisch. Der Operator kann unterschiedliche Kamerasetups wählen. Zusätzlich werden Informationen wie die aktuelle Geschwindigkeit oder die Betätigung der Blinker angezeigt.

## 2.3 Teleoperiertes Fahren

Mit dem vorgestellten Versuchsaufbau wurden verschiedene Testfahrten unter unterschiedlichsten Bedingungen durchgeführt. Die maximale Entfernung zwischen Operator und Versuchsfahrzeug betrug bis zu 100 Kilometer. Durch die Verwendung von mobilem Internet für die Datenübertragung konnten keine Unterschiede zwischen kleinen und großen Entfernungen festgestellt werden. Im Allgemeinen wird eine direkte Teleoperation von Straßenfahrzeugen erst durch LTE möglich. Die Datenübertragung mittels UMTS ist so volatil, dass nur eine der acht Kameras kontinuierlich mit akzeptabler Auflösung gesendet werden kann. Mit LTE können hingegen drei Kameraperspektiven durchgängig übermittelt werden, mit der Option, weitere Kameras situationsabhängig hinzuzunehmen und dafür die anderen Perspektiven in Auflösung oder Qualität einzuschränken. Drei Kameras ermöglichen in der aktuellen Konfi-



Abbildung 2.5: Operatorarbeitsplatz zur Fahrzeugteleoperation.

guration ein frontales Sichtfeld von mehr als 135 Grad. Dies reicht zum Folgen von kurvigen Straßen aus. Beim Abbiegen oder Rückwärtsfahren werden weitere Kameraperspektiven ergänzt.

Die mittlere Round-Trip-Time der LTE-Verbindung bleibt bei den Testfahrten unterhalb von 100 Millisekunden. Da die Zeitverzögerungen stark schwanken, hat es sich generell als hilfreich erwiesen, die Videodaten zu puffern, um dem Operator einen Videostream mit konstanter Bildwiederholfrequenz anzuzeigen. Dies führte zumindest in der subjektiven Wahrnehmung zu einem verbesserten Situationsverständnis. Die hohe Volatilität der Live-Videoübertragung erfordert eine Pufferung von 500 Millisekunden. Bei den LTE-Testfahrten stellte sich somit eine Gesamt-Zeitverzögerung im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis von etwa 550-600 Millisekunden ein.

Der Operator stellte bei den Testfahrten meist Geschwindigkeiten von etwa 30 km/h ein. Die Geschwindigkeit wurde von einem Tempomaten eingeregelt, um den Operator von der längsdynamischen Regeltätigkeit zu entlasten. Unter diesen Randbedingungen konnte der Operator das Fahrzeug noch sicher in der Spur halten. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen lassen vermuten, dass hochdynamische Fahrmanöver wegen der Zeitverzögerungen aber nicht möglich sind. Geschwindigkeiten von bis zu 50 km/h scheinen erreichbar zu sein, wobei aktuelle Testfahrten mit maximal 35 km/h gefahren wurden [Gna13].

## 2.4 Ableitung relevanter Problemstellungen

Im Rahmen des Projektes *Teleoperiertes Fahren* am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik sind ausgehend von den obigen Ergebnissen drei forschungsleitende Fragestellungen für die Teleoperation von Straßenfahrzeugen erarbeitet worden, die für eine weitere Betrachtung lohnenswert erscheinen.

*Erstens* stellt sich die Frage nach der Auswirkung von Kommunikations-Zeitverzögerungen auf die Fahraufgabe. Zeitverzögerungen sind zwar aus dem Teleoperationskontext im Allgemeinen bekannt, der erweiterte Anwendungsbereich auf Straßenfahrzeuge erfordert aber eine neue Betrachtung wegen der höheren Dynamik und der Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer. Bei der konventionellen manuellen Fahraufgabe im Fahrzeug gibt es im Gegensatz zur Teleoperation keine weiteren signifikanten Totzeiten, außer der Reaktionszeit des

Fahrers. Es stellt sich somit die Frage nach einem Steuerungskonzept, das trotz zusätzlicher Zeitverzögerungen eine sichere Fahrzeugführung durch den Operator gewährleisten kann. Der *zweite* forschungsrelevante Aspekt betrifft ergonomische Fragestellungen auf der Operator-Seite. Durch die Verlagerung der Fahraufgabe aus dem Fahrzeug heraus unterliegt der Operator nicht mehr den Sinneseindrücken, die im Auto auf ihn wirken. Es ist daher zu fragen, welche Informationen der Operator benötigt, um ein Fahrzeug aus der Entfernung sicher zu führen.

*Drittens* gilt es zu klären, wie sich ein teleoperiertes System gegenüber Fehlerquellen robust verhalten kann. Dies führt auf die Fragestellung der klassischen Robotik nach Sicherheit beim Ausführen autonomer oder hoch-automatischer Funktionen, wird in der Teleoperation allerdings um den Aspekt des Operators erweitert. Es ist zu erarbeiten, inwiefern der Operator durch umsichtiges Handeln im Voraus bereits einen sicheren Zustand durchgängig gewährleisten kann.

In dieser Arbeit wird vornehmlich der erste Aspekt behandelt, die Frage nach einem Steuerungskonzept, das unabhängig gegenüber dem Einfluss von Zeitverzögerungen ist und eine sichere Fahrzeugführung ermöglicht. Die weiteren Fragestellungen werden in weiteren Dissertationen am Lehrstuhl behandelt und sind Bestandteil weiterer Veröffentlichungen [Die11], [Lut12], [Chu13], [Gna13].

## 3 Stand der Technik zu Teleoperation und automatisierter Fahrzeugführung

Für die Entwicklung einer geeigneten Mensch-Maschine-Interaktion ist die Kombination von menschlichen Fähigkeiten mit maschineller Intelligenz unersetzlich. In diesem Kapitel wird dargestellt, welche relevanten Forschungsergebnisse zur vorliegenden Arbeit beitragen. Zunächst wird vorgestellt, welche Arten zur Automatisierung der Fahraufgabe generell möglich sind und in welchen Szenarien diese zum Einsatz kommen können (Kapitel 3.1). Ferner wird in Kapitel 3.2 betrachtet, welche Fähigkeiten der Mensch zur Erfüllung der Fahraufgabe benötigt, in welche Teilaspekte sich die Fahrzeugführung gliedern lässt und wie der Mensch bei der Teleoperation durch Zeitverzögerungen in seiner Leistungsfähigkeit beschränkt wird. Abschließend zeigt Kapitel 3.3, welche Steuerungskonzepte mit einer expliziten Interaktion und Kooperation von Mensch und Maschine bereits zur Führung von Kraftfahrzeugen existieren.

### 3.1 Automatisierte Fahrzeugführung

Die Betrachtung zur Automatisierung der Fahrzeugführung kann in drei Kategorien unterteilt werden, die seriennahen Fahrerassistenzsysteme (Kapitel 3.1.1), das automatische Fahren entlang vorab geplanter Bahnen (Kapitel 3.1.2) und die autonomen Fahrzeugführungssysteme (Kapitel 3.1.3).

#### 3.1.1 Fahrerassistenzsysteme

Zunächst als reines Komfortsystem ausgelegt, war der Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control, ACC) das erste Serien-Fahrerassistenzsystem, das nicht nur eigene Fahrdynamikmessgrößen, sondern auch Umgebungsdaten von anderen Verkehrsteilnehmern benötigte. Das System erfasst meist mit einem Radarscanner vorausfahrende Fahrzeuge und passt sich der Geschwindigkeit des Zielobjektes an, wobei ein gewünschter Sicherheitsabstand eingehalten wird. Die ACC-Funktionalität ist erst durch den Serieneinsatz von elektrischem Gaspedal und dem elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP) ermöglicht worden, wodurch quasi ohne Mehrkosten automatische Gas- und Bremsengriffe realisiert werden konnten [Win09b, S. 478 ff.]. Mittlerweile können die Serien-ACC-Systeme das Fahrzeug auch bis in den Stand abbremsen, dort halten und automatisch wieder anfahren. Dies ist besonders als Komfortfunktion für den Stop-and-go-Verkehr auf der Autobahn gedacht. Dazu wird erweiterte Sensorik benötigt, etwa in Form von zwei zusätzlichen Nahbereichsradarsensoren [Pas07]. Trotz des erweiterten Geschwindigkeitsbereichs bis in den Stillstand, werden als Anwendungsgebiet des ACC-Systems hauptsächlich die Autobahn oder autobahnähnliche Straßen angegeben. Im innerstädtischen Verkehr ist die Funktionsweise auf-

grund engerer Fahrbahnbreiten und kleiner Kurvenradien eingeschränkt [Win09b, S. 518]. Mit dem Serieneinsatz des ACC-Systems wurde auch die Entwicklung von Frontalkollisionsschutzsystemen gefördert. Vor allem die Zusatzsensorik, die durch die Full-Speed-Range-ACC-Systeme in die Serienfahrzeuge gekommen ist, ermöglicht eine effektive Kollisionserkennung, auch im Nahbereich und im innerstädtischen Verkehr. Hierdurch kann der Fahrer vor einem potentiellen Unfall gewarnt und konditioniert werden [Win09a, S. 540 f.]. Zusätzlich lässt sich bei erkannter Unvermeidbarkeit eine automatische Notbremsung zur Minimierung der Unfallschwere auslösen [Stä08].

Im Bereich der Querregelung unterstützen in Serienfahrzeugen aktive Querführungssysteme (Lane Keeping Support, LKS) den Fahrer beim Spurhalten und lenken das Fahrzeug selbstständig zurück in die Spur, wenn ein Spurverlassen erkannt wird. Das eigentliche Lenken soll aus rechtlichen Gründen jedoch vom Fahrer ausgehen. Daher werden die Systeme mit einer Hands-off-Erkennung zum Detektieren freihändigen Fahrens ausgestattet. Das System deaktiviert sich dann selbstständig. Die Anwendungsbereiche heutiger Systeme beschränken sich auf autobahnähnliche Straßen mit mehreren Fahrspuren und deutlich sichtbaren Fahrspurmarkierungen. Diese Markierungen und die Fahrzeugposition innerhalb der Spur werden üblicherweise mit einer Kamera detektiert. Als Aktorik dient eine elektrische Hilfskraftlenkung (EPS) [Gay09, S. 554 ff.].

Die nächste Generation automatischer Assistenzsysteme werden integrierte Längs- und Querregelungssysteme sein. Die ersten Seriensysteme werden Assistenzsysteme für das teilautomatisierte Fahren in bestimmten Situationen auf der Autobahn sein. Stausituationen bieten sich hier zunächst aufgrund der geringeren Dynamik und der guten Überprüfbarkeit der Systemgrenzen an [Win09c, S. 672], [Hör11, S. 11]. Teilautomatisierte Stauassistenten übernehmen während eines Staus die komplette Längs- und Querführung. Der Fahrer überwacht nur noch die Funktion, muss aber weiterhin im Regelkreis bleiben, also aufmerksam sein und jederzeit zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung bereit sein [Gas12, S. 9]. Alle deutschen Premiumhersteller entwickeln derartige Funktionen bereits seit einigen Jahren für den Serieneinsatz [Hör11], [Sch09a]. Audi hat auf der Consumer Electronics Show (CES) 2013 in Las Vegas angekündigt, in diesem Jahrzehnt ein hochautomatisiertes System auf den Markt zu bringen, das dem Fahrer erlaubt, temporär Nebentätigkeiten auszuführen [Aud13]. BMW kooperiert mit dem Automobilzulieferer Continental, um bis 2014 den Testbetrieb mehrerer hochautomatisierter Versuchsfahrzeuge auf europäischen Autobahnen zu realisieren. Auch hierbei liegt der Zeithorizont für hochautomatisiertes Fahren mit erlaubten Nebentätigkeiten noch in diesem Jahrzehnt, eine Teilautomatisierung soll bereits in den nächsten Jahren möglich sein (Abbildung 3.1) [BMW13].

#### 3.1.2 Automatisches Fahren entlang vorab geplanter Bahnen

Im Zuge der Automatisierung der Fahraufgabe sind abseits des öffentlichen Straßenverkehrs Systeme entwickelt worden, die automatisch einer vorab geplanten Bahn folgen. Diese Systeme haben keinen oder nur beschränkten Einfluss auf die Gestaltung dieser Sollbahn, fahren diese selbstständig ab. Ein Anwendungsziel solcher Systeme ist die reproduzierbare Erprobung von Fahrerassistenzsystemen. Im Gegensatz zum Testen von Fahrdynamikregelssystemen müssen in der Fahrerassistenz nicht nur interne, sondern auch externe Parameter variiert werden, wie etwa das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer. Mit steigendem Automatisierungsgrad und vielfältigeren Einsatzszenarien kann die Erprobung nur noch effektiv und vollständig abgedeckt werden, wenn das Versuchsfahrzeug und die involvierten Fremdfahrzeuge präzise reproduzierbaren Kursen folgen. Dabei müssen etwa für Notbremsysteme



Abbildung 3.1: Roadmap zum hochautomatisierten Fahren, jeweils unter Angabe eines Zeithorizonts bis zur Serienreife und Beschreibung des Automatisierungsgrads [Con13].

me auch knappe Vorbeifahrten getestet werden. Mit Testfahrern ist dies hinsichtlich Genauigkeit und Sicherheit nicht zu realisieren [Sch11].

Als Lösungsansatz werden Fahrroboter eingesetzt, die DGPS-basiert vordefinierten Kursen präzise folgen (Abbildung 3.2). Wobei das Folgen im Kontext mit anderen parallel fahrenden Fahrzeugen sowohl zeitlich als auch räumlich exakt sein sollte. Die Daimler AG setzt solche Systeme mit einer zeitlichen Genauigkeit von 20 ms beim Passieren der Wegpunkte und einer maximalen Querabweichung im Dezimeterbereich ein [Sch11].

Kehl beschreibt in [Keh07] ein ähnliches Verfahren. Hierbei soll der Einfluss des Versuchsfahrers auf Fahrdynamiktests durch den Einsatz einer Lenkmaschine ersetzt werden. Kehl regelt ausschließlich die Querdynamik, damit das Versuchsfahrzeug reproduzierbar einer vorgegebenen Sollspur, etwa einem doppelten Fahrspurwechsel, folgt. Längsdynamisch greift nach wie vor der Versuchsfahrer ein [Keh07, S. 2 ff.]. Der Einsatz im Rahmen von fahrdynamischen Untersuchungen im Grenzbereich erfordert eine robuste Querregelung gegenüber den Nichtlinearitäten an der Reifenhaftgrenze. Das vorgestellte System basiert dabei auf einer Vorgabe der Sollbahn mit Hilfe eines Polynoms [Keh07, S. 11 ff.]. Der Regelungsansatz verwendet eine nichtlineare Vorsteuerung auf Basis eines invertierten nichtlinearen Einspurmodells. Die Erweiterung der Gültigkeit des Einspurmodells auf den fahrdynamischen Grenzbereich wird durch die Verwendung adaptierter Reifenkennlinien erreicht, die etwa die Nichtlinearitäten der komplexen Fahrwerkskinematik teilweise beinhalten. Aufgrund der Güte der Vorsteuerung reicht zur Regelung ein linearer PD-Regler zur stabilen Bahnfolge aus [Keh07, S. 43 ff.]. Das System erreicht im dynamischen Grenzbereich bis 1 g Querbeschleunigung eine maximale Querablage von unter 35 cm [Keh07, S. 80].

Eine weitere Anwendung des automatisierten Fahrens ist das Fahren im fahrdynamischen Grenzbereich auf Rennstrecken. Waldmann [Wal09] setzt dieses Verfahren als *BMW Track Trainer* für Fahrertrainings auf Rennstrecken ein. Die Sollbahn stellt hierbei eine Sicherheitslinie mit spätem Einlenken vor Kurven und großen Radien dar. Im Gegensatz zur zeitoptimalen Linie gibt es keine numerischen Methoden, die Sicherheitslinie zu berechnen. Daher wird die Sollbahn manuell vom Sicherheitsfahrer abgefahren und als hochgenaue digitale Karte abgespeichert. Dabei werden lediglich Positionsdaten aufgezeichnet. Die wei-



Abbildung 3.2: Konzepte zum hochautomatisierten Fahren: links abgebildet der *BMW Track Trainer* zum Erlernen einer Sicherheitslinie auf der Rennstrecke [BMW11]; mittig die Darstellung einer automatischen Kollision mit einem Softtarget auf dem Testgelände von Daimler [Sch11]; rechts automatisches Fahren mittels Optimalsteuerung durch Pylontore im Volkswagen-Projekt *GTI 53+1* [Mül06].

teren zur Regelung notwendigen Daten wie Kurswinkel, Krümmung und kumulierte Streckenlänge werden aus den Positionsdaten abgeleitet. Während des automatischen Fahrens referenziert sich das Fahrzeug laufend mittels DGPS-basierter Positionsmessung auf die Sollbahn [Wal09, S. 11 ff.]. Zum automatischen Fahren auf einer Rennstrecke existieren Algorithmen, die sehr robust und recheneffizient die Regeldifferenzen zur Sollbahn berechnen. Zur Querregelung werden eine instationäre Vorsteuerung und eine Zustandsregelung verwendet. Die Auslegung erfolgt durch dynamische Programmierung. Aufbauend auf einer gegebenen Fahrlinie wird eine Methodik vorgestellt, die in Abhängigkeit der Querbeschleunigung die maximale Kurvengeschwindigkeit berechnet. Diese Methodik berücksichtigt das Beschleunigungs- und Verzögerungsvermögen des Fahrzeugs unter der Nebenbedingung des Kammschen Kreises. Die Geschwindigkeitstrajektorie wird durch eine Vorsteuerung der Fahrwiderstände realisiert und mit einem klassischen PD-Regler unterlagert [Wal09, S. 51 ff.]. Der Vorteil des automatischen Fahrens auf der Rennstrecke ist, dass der Teilnehmer am Sicherheitstraining die Schulungslinie aus der Fahrerperspektive erleben kann, um im Anschluss die Strecke selbstständig abfahren zu können. Das System erreicht dabei Querbeschleunigungen im mitteldynamischen Bereich bis  $7 \text{ m/s}^2$ . Die Querabweichung bleibt unterhalb von 20 cm, wobei die Querführung robust und die eingeregeltlen Lenkwinkel nachvollziehbar sind [Wal09, S. 95 ff.].

Müller-Beßler [Mül06] beschreibt einen im Rahmen des Volkswagen Forschungsprojektes *GTI 53+1* entwickelten Ansatz, der ein Optimalsteuerproblem zum Befahren der zeitoptimalen Trajektorie eines bekannten Kurses löst. Der Kurs wird entweder vorgegeben oder kann mittels Pylonen abgesteckt und mit Hilfe von Laserscannern automatisch erfasst werden. Ziel ist die Objektivierung von Closed-Loop-Manövern für Fahrdynamikuntersuchungen. Dabei kann der Einfluss des Testfahrers eliminiert und durch ein reproduzierbares Fahrermodell ersetzt werden. Resultat einer Optimalsteuerung sind wiederum die Koordinaten der Sollbahn über einen gegebenen Zeithorizont. Die weiteren Regelgrößen Kurswinkel und Krümmung werden daraus abgeleitet. Das Längsdynamik-Profil wird wie bei Waldmann [Wal09] im Nachgang unter Berücksichtigung der Reifenhaftgrenzen erstellt. Die Querregelung verwendet eine antizipatorische Vorsteuerung auf Basis eines inversen Fahrzeugmodells, unterlagert mit einer kompensatorischen Regelung für die Abweichung der Querablage und den Kurswinkelfehler mittels PI- und P-Regler sowie nachgeschaltetem Verzögerungsglied erster Ordnung. Die vorgestellte Regelung zeigt sich sehr robust, auch bis in den hochdynamischen Bereich von  $10 \text{ m/s}^2$  Querbeschleunigung. Die Querablage bleibt zumeist unterhalb 35 cm [Mül06].

In [Kri12] wird der Entwurf eines Renn-Reglers für das automatische Fahren diskutiert. Als Vorgabe dient eine Rennlinie, die sich aus Geraden-, Kurven- und Übergangsegmenten zusammensetzt. Als Übergänge zwischen Gerade und Kurve fungieren Klothoiden, Kurven mit einem linearen Krümmungsverlauf, die auch im Straßenbauwesen verwendet werden [Kri12, S. 277 f.]. Die Reglerstruktur ist für Längs- und Querregelung getrennt und basiert auf einer jeweiligen Vorsteuerung sowie einer Rückführung des Regelfehlers. Das Längsgeschwindigkeitsprofil berücksichtigt die Zusammenhänge des Kammschen Kreises, die maximal mögliche Längsbeschleunigung wird in Abhängigkeit der Querschleunigung vorgesteuert. Ein unterlagerter Schlupfregler hält das Fahrzeug an den Grenzen der Reifenhaftung. Die Vorsteuerung der Querführung basiert auf einem Einspurmodell mit linearer Reifencharakteristik. Die verbleibende Regelabweichung wird mit Hilfe einer Spurhaltereege- lung in Form eines P-Reglers auf die extrapolierte Querablage an einem Vorausschau- punkt realisiert. Hinzu kommt ein robustheitssteigernder Dämpfungsfaktor für die Gierrate [Kri12, S. 278 ff.]. Die Validierung des beschriebenen Vorgehens erfolgt auf einem ausgetrockneten Salzsee. Das Fahrzeug lässt sich an den fahrdynamischen Grenzen mit einer maximalen Vorausschau-Querablage von 0,5 m bewegen [Kri12, S. 289 ff.].

In [Söh01] wird zum Folgen einer vorgegebenen Sollbahn ein nichtlineares Regelgesetz durch Ein-/Ausganglinearisierung entwickelt und mit einer linearen Zustandsrückführung auf Basis eines  $H_2$ -Reglers mit Störgrößenaufschaltung verglichen. Hierbei konnten im Realfahrzeug keine nennenswerten Unterschiede zwischen linearem und nichtlinearem Ansatz festgestellt werden. Die nichtlineare Regelung verspricht aber Vorteile, wenn das reale nicht- lineare Verhalten der Regelstrecke hinreichend bekannt ist. Dann konnten zumindest in der Simulation Verbesserungen erzielt werden. Die maximale Querablage der Realfahrten liegt mit beiden Reglern unterhalb von etwa 0,6 m [Söh01, S. 144 f.].

#### 3.1.3 Autonomes Fahren

Autonome oder vollautomatische Systeme sind die höchste Stufe der Klassifizierung auto- matischer Fahrzeugführungssysteme [Gas12]. Dabei wird der Begriff autonom in der Fahr- zeugtechnik im Allgemeinen mit bordautonom gleichgesetzt. Dies bedeutet, dass sich ein autonomes Fahrzeug selbstständig im Straßenverkehr bewegen kann, ohne zusätzliche In- frastruktur zu benötigen. Semiautonom agiert ein Fahrzeug, wenn es nur den Menschen, aber keine weitere Infrastruktur benötigt [Mau00, S. 5]. Die Autonomie eines Fahrzeugs ist im Besonderen dadurch gekennzeichnet, dass es die Fahrzeugführung trotz Unsicherheiten in der Steuerung oder Wahrnehmung über längere Zeit ausführen kann und sich an Verän- derungen adaptiert. Darüber hinaus kann der eigene Systemzustand valide überwacht wer- den und auf Fehler kann ohne fremde Hilfe sicher reagiert werden [Ant93, S. 2]. Das große Differenzierungsmerkmal zwischen automatischen und autonomen Funktionen ist somit die An- oder Abwesenheit eines Menschen, der den Prozess überwachen und im Notfall ein- greifen muss [Wil12, S. 11].

Die Entwicklungen der autonomen Fahrzeuge im aktuellen Jahrtausend sind vorrangig durch die DARPA Challenges 2004 und 2005 forciert worden. Ziel der Wettkämpfe, an denen For- scherteams aus der ganzen Welt teilnahmen, war es, eine bestimmte Fahrmission durch das Fahrzeug erfüllen zu lassen, ohne dass ein Mensch eingreifen darf. Nachdem die zweite Grand Challenge von einigen Teams erfolgreich gemeistert werden konnte [Thr06], wurden in der Urban Challenge 2007 die Anforderungen soweit erhöht, dass sie den Verkehr in einer

### 3.1 Automatisierte Fahrzeugführung

---

Stadt repräsentieren sollten. Auch dieser Wettbewerb wurde von mehreren Forscherteams erfolgreich bewältigt, auch wenn es mehrere Aus- und Unfälle gab [Fle08], [Kam08].

Im Folgenden wird ein Überblick über aktuelle Forschungsergebnisse und die Historie autonomer Fahrzeuge gegeben. Aufgrund der langen Historie werden lediglich Höhepunkte dargestellt. Eine ausführlichere Einführung findet sich in etwa in [Mau00; Kam09; Wil12].

#### 3.1.3.1 Forschungsergebnisse aus Deutschland

Die Anfänge der Forschung autonomer Fahrzeuge liegen in den 1980er Jahren. An der Universität der Bundeswehr München wurde mit *VaMoRs* das erste Roboter-Fahrzeug aufgebaut, das 1987 autonom auf einer abgesperrten Autobahn fahren konnte [Zap88]. Im Anschluss an diese erste Demonstration startete das europäische *PROMETHEUS* Projekt, in dem die Universität der Bundeswehr in Zusammenarbeit mit Daimler-Benz die Machbarkeit autonomer Autobahnfahrten vorstellte. Die zwei Versuchsträger *Vita II* und *VaMP* (Abbildung 3.3) fuhren während der Abschlusspräsentation 1994 autonom von Paris nach Lille. Es wurden Geschwindigkeiten bis 130 km/h erreicht und mehrere Spurwechsel durchgeführt, die allerdings von einem Sicherheitsfahrer autorisiert werden mussten [Mau00, S. 113 ff.]. Der Fokus der Universität der Bundeswehr München lag auf dem maschinellen Sehen mittels eines 4D-Ansatzes zur Bildverarbeitung. Dieser Ansatz galt als sehr leistungsfähig, erforderte aber einen enormen Rechenaufwand [Dic94], [Dic05]. Aktuelle Forschungen der Universität der Bundeswehr adressieren die autonome Navigation im Gelände. Dazu wurden etwa bei der Civil-ELROB 2009 erfolgreiche Demonstrationen gezeigt [Him11] (Abbildung 3.3).

Im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs Transregio 28 *Kognitive Automobile* beschäftigten sich von 2006 bis 2010 neben der Universität der Bundeswehr auch die Universität Karlsruhe, das Faunhofer IITB in Karlsruhe und die Technische Universität München mit der Erforschung einer dem Menschen ähnelnden kognitiven Wahrnehmung [Thu08], [Goe09, S. 41 ff.]. Der Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München baute im Sonderforschungsbereich einen Versuchsträger auf. Der Wagen auf Basis

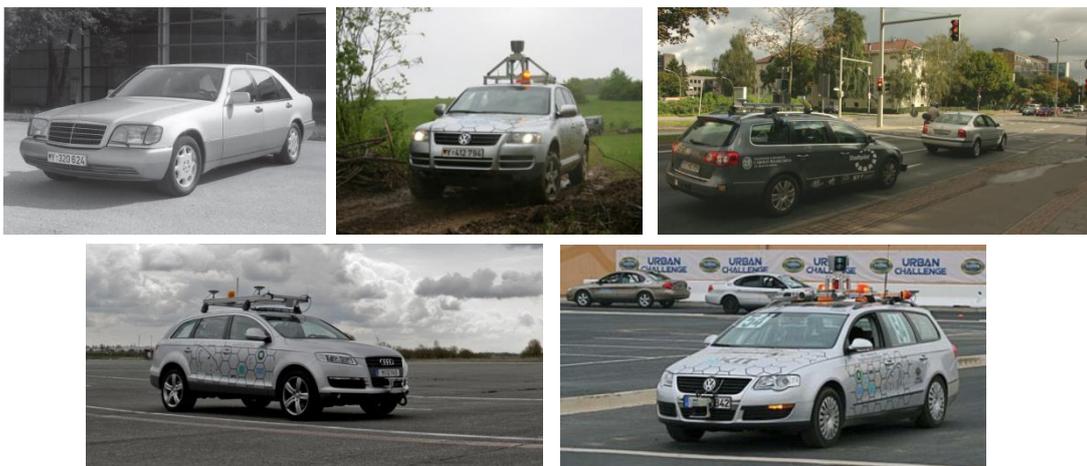


Abbildung 3.3: Autonome Versuchsträger von deutschen Forschungseinrichtungen: *VaMP* (oben, links) [Mau00] und *MuCAR-3* (oben, mittig) [Him11] beide von der Universität der Bundeswehr München, *Leonie* der Technischen Universität Braunschweig (oben, rechts) [Wil12], *MUCCI* der Technischen Universität München (unten, links) (FTM Bildmaterial), *AnnieWAY* der Universität Karlsruhe [Kam08].

eines Audi Q7 wurde dazu mit Lidarscannern, Radarscanner und einer Kameraplattform zum autonomen Autobahnfahren im Längsverkehr ausgestattet [Kra12, S. 24 ff.](Abbildung 3.3). Die kooperativen Fähigkeiten wurden mit Hilfe von Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation demonstriert [Goe08]. Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit verwenden ebenfalls diesen Versuchsträger (Kapitel 2.2.2.1). Der Sonderforschungsbereich war an der DARPA Urban Challenge 2007 mit dem Team *AnnieWAY* aus Karlsruhe beteiligt (Abbildung 3.3). Der mit einem 64-Ebenen-Lidarscanner der Firma Velodyne als Hauptsensor ausgerüstete VW Passat Versuchsträger erreichte als eines von elf Fahrzeugen das Finale [Kam08].

An der Technischen Universität Braunschweig wird seit den 1990er Jahren über autonomes Fahren geforscht. In Kooperation mit Volkswagen steuerte im Projekt *Autonomes Fahren* ein Fahrroboter autonomen einen VW Bus. Ziel des Projektes war es, die Testfahrer bei Dauerversuchen zu entlasten [Söh01]. Die Universität Braunschweig nahm ebenfalls mit einem eigenen Versuchsträger an der DARPA Urban Challenge teil. Das Team *CarOLO* hatte dazu einen autonomen VW Passat aufgebaut, der das Finale erreichte [Ber08]. Im Projekt *Stadt-pilot* demonstrierten die Braunschweiger das autonome Fahren zudem im öffentlichen Verkehr auf dem Braunschweiger Stadtring, einer innerstädtischen, mehrspurigen Ringstraße mit Kreuzungen und Lichtsignalanlagen. Die Interaktion mit einer Variation anderer, realer Verkehrsteilnehmer stand im Fokus [Wil12, S. 44 ff.]. Der verwendete Versuchsträger *Leonie* (Abbildung 3.3) erweiterte dazu das bereits sehr umfangreiche Sensorkonzept von *Caroline* aus der DARPA Urban Challenge um weitere Laserscanner. Diese dienten einer Erhöhung der Reichweite und dem robusten Erkennen der Fahrspurmarkierungen. Als allumfassendes Sensorelement wurde zusätzlich ein Velodyne 360-Grad-Laserscanner auf dem Dach des Versuchsträgers verbaut [Wil12, S. 92 ff.]. Im Oktober 2010 absolvierte das Fahrzeug den Stadtring in Braunschweig mehrmals autonom. Ein Sicherheitsfahrer saß dabei im Fahrzeug und musste etwa den Status der Lichtsignalanlagen vorgeben [Wil12, S. 146 ff.].

#### 3.1.3.2 Forschungsergebnisse weltweit

In den USA ist die Carnegie Mellon University in Pittsburgh seit Jahrzehnten auf dem Forschungsgebiet autonomer Fahrzeuge aktiv. Der Versuchsträger *Standstorm* des *Red Team* legte bei der DARPA Grand Challenge 2004 von allen Teilnehmern die längste Strecke zurück [Urm04]. Die Urban Challenge 2007 gewann die Universität mit dem *Tartan Racing Team* und dem Versuchsträger *Boss*, einem autonomen Chevy Tahoe [Urm08] (Abbildung 3.4).

Ein weiteres Forscherteam an der Carnegie Mellon University begann bereits 1986 mit dem Aufbau eines ersten Roboterfahrzeugs als Testplattform für maschinelles Sehen und autonome Navigation. Der erste Versuchsträger, ein Van mit Kamera und Laserscanner sowie einem komplett mit Server-Racks gefüllten Laderaum, bekam den Namen *NavLab I* [Tho91]. Im Laufe der Jahre sind immer weiter verbesserte Versuchsträger aufgebaut worden. *Navlab 6* bis *NavLab 10* absolvierten 1997 eine automatische Konvoifahrt auf einem kalifornischen Highway [Tho97]. Die Navlab-Fahrzeuge waren dabei nicht immer für eine rein autonome Fahrt konzipiert, sondern seit jeher auch für den Fahrerassistenzbetrieb oder die Teleoperation geeignet [Kay97a], [Fon01b]. Der aktuelle *Navlab 11* Versuchsträger adressiert die Umfeldwahrnehmung und Objekterkennung [Mer13].

Als weitere große Einrichtung in den USA erforscht die Stanford University das autonome Fahren. Mit ihrem Roboterfahrzeug *Stanley*, einem umgebauten VW Touareg, gewann Stanford die DARPA Grand Challenge 2005. Für den Fahrzeugaufbau wurden maßgeblich fünf

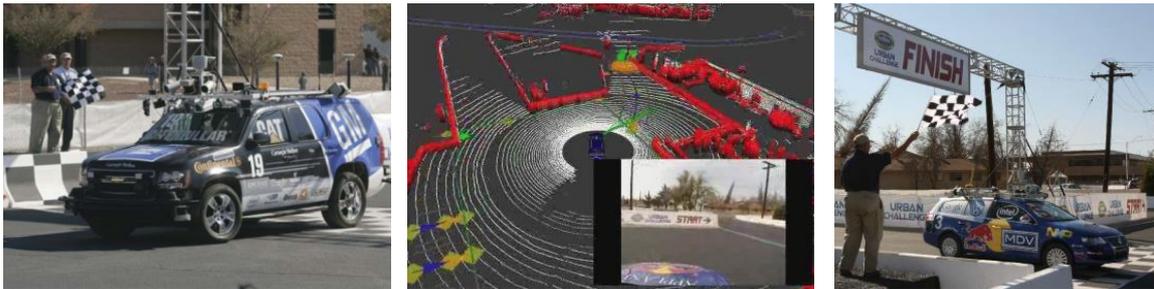


Abbildung 3.4: Autonome Versuchsträger US-amerikanischer Forschungseinrichtungen: *Boss* der Carnegie Mellon University (links) [Urm08], Umgebungsrepräsentation (mittig) und Zieldurchfahrt bei der Urban Challenge von *Junior* der Stanford University [Mon08].

Ein-Ebenen-Lidarscanner verwendet. In unterschiedlicher Ausrichtung auf dem Dach montiert, ließ sich durch Kombination der Laserdaten eine 3D-Umgebungswahrnehmung generieren, die sowohl zur Erkennung der Fahrbahn als auch für die Hinderniserkennung verwendet wurde [Thr06]. Das Stanford-Team nahm ebenfalls an der DARPA Urban Challenge 2007 teil. Als Versuchsträger wurde ein VW Passat neu aufgebaut, *Junior* (Abbildung 3.4). Die Änderungen betrafen eine erweiterte Umfeldwahrnehmung durch einen Mehr-Ebenen-Laserscanner der Firma Velodyne und die Berücksichtigung anderer dynamischer Verkehrsteilnehmer [Mon08].

Die Forschungen aus Stanford werden teilweise vom Internetkonzern Google weitergeführt. Im Rahmen des Projektes *Google Driverless Car* sind mehrere Fahrzeuge vom Typ Toyota Prius zum autonomen Fahren umgerüstet worden. Google adressiert mit seinem Projekt einerseits einen flüssigeren und sichereren Straßenverkehr durch Roboterfahrzeug, andererseits aber auch die geteilte Nutzung von Fahrzeugen in einer vollständig vernetzten Gesellschaft [Gui11]. Hauptsensorelement der Google Fahrzeuge ist ein Velodyne Mehr-Ebenen-Laserscanner. Mit Hilfe von Lokalisierungs- und Matching-Methoden positioniert sich der Algorithmus in hochgenauen 3D-Karten, die vorab durch manuelles Abfahren der Strecke entstehen müssen [Pin12].

## 3.2 Menschliche Leistungsfähigkeit und die Auswirkungen von Zeitverzögerungen

Die Ausführung der Fahraufgabe erfordert vom Fahrer das Lösen eines regelungstechnischen Problems, bei dem auf Basis einer kontinuierlichen Informationsverarbeitung Stellensignale erzeugt werden müssen. Dabei werden nach dem klassischen psychophysiologischen Ansatz die Prozesse Informationsaufnahme (Perzeption), Informationsverarbeitung (Kognition) und Informationsabgabe (Motorik) unterschieden, etwa [Sch10b, S. 226 ff.]. Dieses Kapitel stellt den menschlichen Informationsverarbeitungsprozess vor (Kapitel 3.2.1) und zeigt Auswirkungen von Zeitverzögerungen bei Teleoperation (Kapitel 3.2.2).

### 3.2.1 Menschliche Leistungsfähigkeit zur Erfüllung der Fahraufgabe

Nach dem vereinfachten Systemmodell Fahrer-Fahrzeug-Umgebung von Abendroth [Abe01] werden bei der Informationsaufnahme zunächst die menschlichen Sinnesorgane ausgewer-

tet. Im Straßenverkehr verwendet der Mensch vornehmlich seine visuellen, akustischen, haptischen und vestibulären Sinne, wobei der Großteil der Informationen im Straßenverkehr auf visuellen Reizen basiert (Kapitel 2.2.1). Den Kern der Informationsaufnahme bildet eine innere Repräsentation der Umwelt. Diese kombiniert die aktuellensierte Situation mit Erfahrungen, die der Mensch bereits gesammelt hat. Dieser Prozess wird als Wahrnehmung bezeichnet [Abe09, S. 5 ff.]. Im anschließenden Prozess der Informationsverarbeitung im engeren Sinne wird auf Basis der Wahrnehmung und im Abgleich mit den Zielen entschieden, ob eine Handlung notwendig ist. Dieser kognitive Prozess kann je nach Situation auf unterschiedliche erlernte Regeln zurückgreifen [Abe09, S. 6 f.]. Nach der Verhaltensentscheidung müssen Handlungen umgesetzt werden. Hierzu ist das motorische System notwendig. Die physische Belastung ist bei der Fahrzeugführung allerdings gering und erfordert keinen großen Leistungsaufwand [Abe09, S. 8]. Der vollständige systemtheoretische Zusammenhang der menschlichen Informationsverarbeitung bei der Fahrzeugführung nach Abendroth ist in Abbildung 3.5 dargestellt. Die Informationsverarbeitung im Systemmodell nach Abendroth umfasst die Stufen Wahrnehmung sowie Entscheidung und Handlungsauswahl. Diese lassen sich nach Rasmussen [Ras83] in drei Arten kognitiver Beanspruchung untergliedern: fertigkeitsbasiert, regelbasiert und wissensbasiert. Auf welcher dieser Ebenen die Informationsverarbeitung stattfindet, hängt von der Art der auszuführenden Aufgabe sowie von den individuellen Eigenschaften des Fahrers und von dessen Erfahrungsschatz ab [Abe09, S. 8]. Das Drei-Ebenen-Modell für zielgerichtete Tätigkeiten nach Rasmussen [Ras83] ist ein sehr allgemein auf die menschliche Arbeit anwendbares Modell (Abbildung 3.6, links). Das wissensbasierte Verhalten beschreibt das Handeln bei Aufgaben, die dem Menschen in der Art zuvor noch unbekannt waren. Regelbasiertes Verhalten wird verwendet, wenn eine Aufgabe bereits häufiger bearbeitet und das wissensbasierte Verhalten bereits mehrfach durchschritten wurde. Fertigkeitbasiertes Verhalten wird durch einen mehr oder weniger lang dauernden Lernprozess erworben. Dabei hat der Mensch reflexartige Reiz-Reaktions-Mechanismen gebildet, die dann selbsttätig ablaufen und keine bewusste Kontrolle benötigen. Dies ist die effektivste Form menschlichen Handelns [Ras83] [Don09, S. 15 f.]. Das am weitesten verbreitete Modellverständnis für die menschliche Fahrzeugführung stellt die Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahraufgabe nach Donges [Don82] dar. Dabei wird ausschließlich die primäre Fahraufgabe modelliert. Das Drei-Ebenen-Modell untergliedert drei voneinander differenzierbare Bereiche. Die oberste Ebene ist die Navigationsebene. Hier wird die Fahrtroute gewählt und der zeitliche Ablauf der Fahrt geplant. Auf der darunterliegenden Ebene, der Führungsebene, werden Sollgrößen zum Führen des Fahrzeugs generiert. Dies ist etwa die Wahl der Sollspur oder der gewünschten Geschwindigkeit. Die unterste Ebene ist die Stabilisierungsebene, auf der der Fahrer die Aktorik des Fahrzeugs bedient. Arbeitet der Fahrer auf den oberen Ebenen eher im Sinne einer Steuerung im offenen Regelkreis, so agiert er auf der Stabilisierungsebene als Regler im geschlossenen Regelkreis mit dem Fahrzeug als Regelstrecke (Abbildung 3.6, rechts) [Don82]. Die Gliederung der Ebenen korreliert mit den notwendigen Zeitbereichen zum Ausführen der Tätigkeiten. Auf der Navigationsebene, die pro Fahrt nur wenige Male durchschritten wird, agiert der Fahrer im Minutenbereich. Die Auswahl der Sollgrößen auf der Führungsebene berücksichtigt das aktuelle Verkehrsgeschehen und erfolgt mit einer Taktung von wenigen Sekunden. Die Eingriffe auf Stabilisierungsebene erfordern vom Fahrer Reaktionen im Sekundenbereich und darunter. Hier agiert der Mensch als Regler und muss den Regelfehler von gewählten Sollgrößen und wahrgenommenen Istgrößen ausregeln [Don09, S. 19 f.]. Diese drei Ebenen der Fahrzeugführung nach Donges lassen sich den drei Verhaltensstufen nach Rasmussen zuordnen. Dabei kommt der Führungs- und Stabilisierungsebene eine besondere Bedeutung bei der Fahrzeugführung zu. Je nach Erfahrung des Fahrers basie-

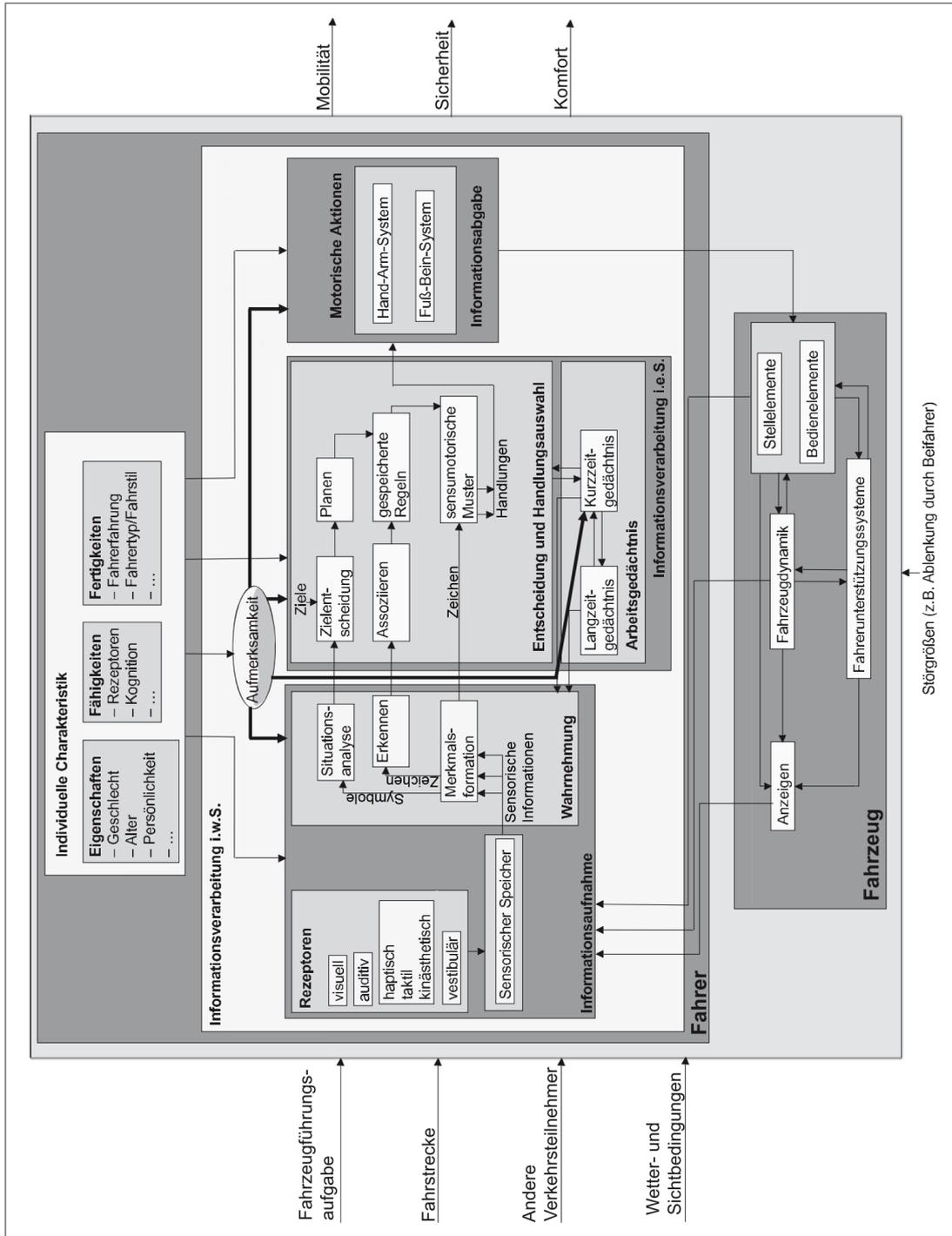


Abbildung 3.5: Systemmodell Fahrer-Fahrzeug-Umgebung nach Abendroth [Abe09, S. 4].

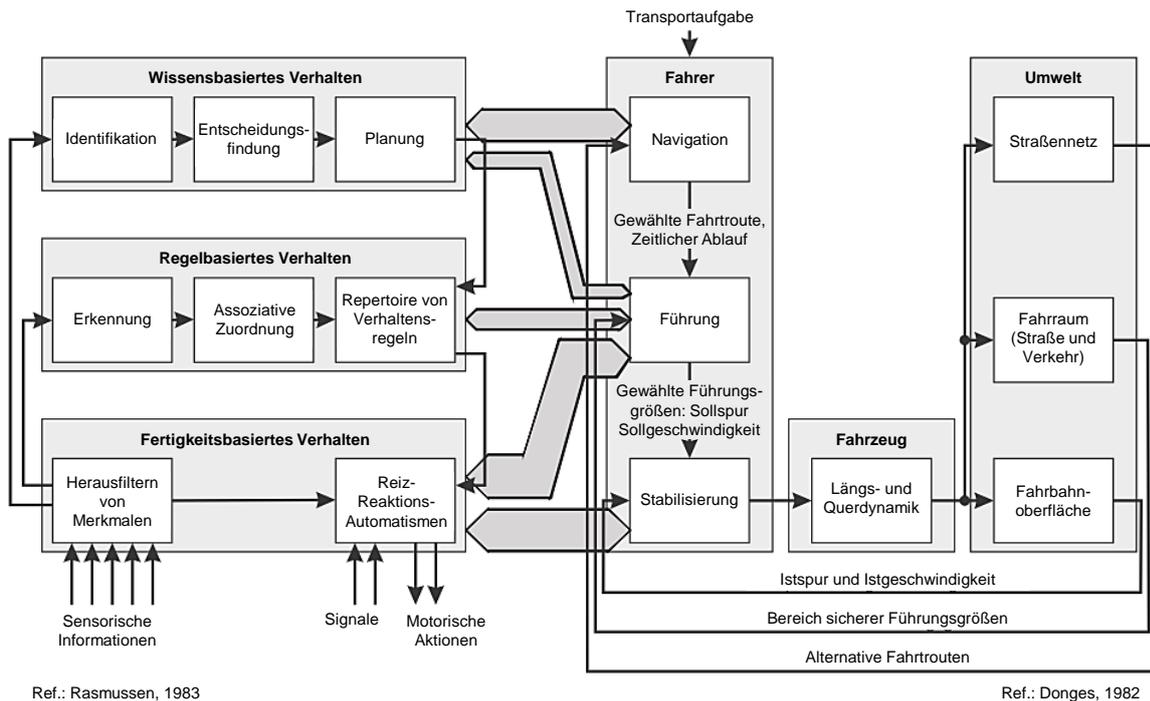


Abbildung 3.6: Kombination des Drei-Ebenen-Modells für zielgerichtete Tätigkeiten nach Rasmussen und der hierarchische Drei-Ebenen-Struktur der Fahraufgabe nach Donges [Don09, S. 15].

ren diese Tätigkeiten mehr oder weniger auf der Ebene des fertigkeitsbasierten Handelns [Don09, S. 16 f.] (Abbildung 3.6). Wenn man die Betrachtung der Informationsverarbeitung auf die fertigkeitsbasierte Ebene limitiert und somit nach Donges nur die Fahrzeugführungs- und Stabilisierungsebene betrachtet, sind regelungstechnische Modelle in der Lage, das Verhalten des Fahrers gut abzubilden. Im Allgemeinen ergibt sich ein Regelkreis mit dem Menschen als Regler und der zu bedienenden Maschine als Regelstrecke (Abbildung 3.7) [Sch10b, S. 308].

Einen auf unterschiedlichste Tätigkeiten anwendbaren Modellansatz für den Menschen als Regler stellt das klassische quasilineare Modell von McRuer [McR59] dar. Die Übertragungsfunktion im Frequenzbereich lautet:

$$G_M(s) = \frac{K}{1 + T_{NS}s} \cdot \frac{1 + T_{DS}s}{1 + T_{I}s} e^{-T_t s} \quad (3.1)$$

Der Mensch wählt den Verstärkungsfaktor  $K$  optimal zur Regelstrecke. Die Zeitkonstanten repräsentieren die neuromuskuläre Verzögerung  $T_N$ , eine Vorhaltezeit  $T_D$  und ein Verzögerungsverhalten  $T_I$ . Die Totzeit  $T_t$  ist die Reaktionszeit des Menschen. Diese wird größer, wenn die Führungsgröße nicht vorhergesagt werden kann, oder kann teilweise kompensiert werden, wenn die Führungsgröße prädizierbar ist. Die Parameter werden vom Menschen während des Regels kontinuierlich adaptiert [Sch10b, S. 310]. Die Parameter Totzeit  $T_t$  und die Zeitkonstante der Neuromuskulatur  $T_N$  bleiben bei der Anpassung jeweils relativ konstant, wohingegen die anderen Parameter in Abhängigkeit der Regelstrecke sehr stark variieren können [Jür97, S. 118]. Exemplarische Zahlenwerte finden sich etwa in [Sch10b, S. 311]. Das klassische quasilineare Modell nach McRuer hat eine große Bedeutung für die Fahrermodellierung, weil viele Ansätze hierauf basieren [Jür97, S. 119].

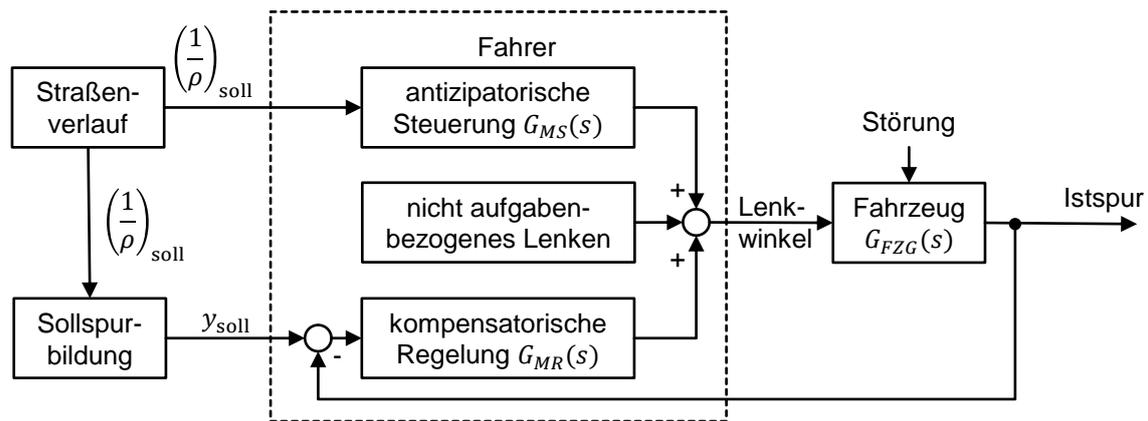


Abbildung 3.7: Allgemeiner Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis zu Querführung (eigene Darstellung nach [Mit04, S. 649]).

Aufbauend auf den Untersuchungen zum quasilinearen Ansatz hat McRuer in [McR62] ein allgemeines regelungstechnisches Modell beschrieben, das Crossover-Modell oder Schnittfrequenz-Modell. Das Modell betrachtet dabei Mensch und Maschine als kybernetische Einheit und fasst somit die symbiotischen Eigenschaften zu einem Gesamtsystem zusammen. McRuer erkannte aus zahlreichen Untersuchungen zum Verhalten des Menschen als Regler, dass trotz interindividueller Unterschiede und unterschiedlicher Regelstrategien das Ergebnis immer recht ähnlich ist. Dabei hat das Gesamtsystem des offenen Regelkreises aus einem Mensch als Regler mit unterschiedlichen Regelstrecken immer in etwa den Verlauf eines Integrierers. Dies gilt insbesondere in einer Dekadenumgebung des Amplitudengangs um die Crossover-Frequenz. Die sogenannte Crossover-Frequenz  $\omega_c$  ist definiert als Frequenz am 0 dB-Durchgang der Amplitude im Frequenzbereich [Sch10b, S. 311 f.], [Jür97, S. 122 f.]. Die Bedeutung des Crossover-Frequenzmodells liegt in der flexiblen Anwendbarkeit auf Mensch-Maschine-Regelkreise, etwa auf die quer- und längsdynamische Modellierung der Fahraufgabe [Wol09, S. 117].

Für einen vertieften Einblick in die regelungstechnische Fahrermodellierung für Längs- und Querdynamik sei auf die Arbeiten von Jürgensohn [Jür97] oder Wolf [Wol09] verwiesen. An dieser Stelle beschränkt sich die vorliegende Arbeit auf die Darstellung der querdynamischen Modellierung, weil die Fahrereingaben zur Bedienung vom Lenkrad um den Faktor zehn hochfrequenter sind als die Bedienung des Gaspedals [Don82]. Die Querdynamik ist somit hinsichtlich Verhalten und Stabilität kritischer. Dies könnte ein Grund sein, weshalb in der Historie der Fahrermodellentwicklung der Fokus auf querdynamischen Modellen lag und der Begriff Fahrermodell zumeist synonym mit einer querdynamischen Modellierung verwendet wird [Jür97, S. 147 ff. und S. 156 f.].

Eines der am häufigsten verwendeten Modelle zur Abbildung des Fahrerverhaltens in querdynamischen Situationen ist das Zwei-Ebenen-Modell des Fahrerlenkverhaltens nach Donges [Don77]. Das Zwei-Ebenen-Modell gehört zu einer wichtigen Klasse der Fahrermodellierung auf Basis der linearen Regelungstechnik mit antizipatorischen Steueranteilen. Die Modellierung geht davon aus, dass der Fahrer einen Anteil des gestellten Lenkwinkels entsprechend der vorausliegenden Straßenkrümmung wählt. Da die Krümmung nicht von der Dynamik des Fahrzeugs abhängt, steuert der Fahrer somit einen Teil des Lenkwinkels vor [Jür97, S. 150 f.]. Der zweite Anteil des Lenkwinkels ergibt sich auf Basis einer kompensatorischen Regelung. Der Fahrer nimmt die Krümmungsänderung, den Gierwinkelfehler und die Querabweichung wahr und regelt diese im geschlossenen Regelkreis aus [Don77, S. 70 ff.].

Das Zwei-Ebenen-Modell ist die Grundlage für viele weitere abgeleitete Fahrermodelle mit antizipatorischer Vorsteuerung gewesen. So kann die Vorsteuerung des Fahrers sehr gut durch folgende Übertragungsfunktion beschrieben werden [Mit04, S. 649]:

$$G_{MS}(s) = \frac{\delta_{LS}(s)}{\kappa(s)} = V_{MS} \frac{e^{T_A s}}{1 + T_{1S}s + T_{2S}^2 s^2} \quad (3.2)$$

Dabei schaut der Fahrer um die Antizipationszeit  $T_A$  auf die vorausliegende Fahrspurkrümmung und stellt einen entsprechenden Lenkwinkel ein. Der Fahrer zeigt dabei zusätzlich  $PT_2$ -Verhalten mit der Verstärkung  $V_{MS}$  und den Zeitkonstanten  $T_{1S}$  und  $T_{2S}$ . Im Falle eines idealen Fahrers, dessen Vorausschaupunkt der Bahnkrümmung ideal folgt, ergeben sich die Parameter der antizipatorischen Vorsteuerung ausschließlich aus Fahrzeugkonstanten. Der Fahrer steuert das Fahrzeug mit der inversen Charakteristik der Fahrzeugübertragungsfunktion [Mit04, S. 649 ff.]. Für die kompensatorische Regelung wird nach [Mit04, S. 656 ff.] ein vereinfachtes klassisches quasilineares Modell verwendet. Dieses besteht lediglich aus den Vorhalte- und Verzögerungszeiten  $T_D$  und  $T_I$ , der Totzeit  $T_t$  und der Verstärkung  $V_M$ . Dieses Modell wird auch als vereinfachtes Präzisionsmodell nach McRuer benannt:

$$G_{MR}(s) = \frac{\delta_{LR}(s)}{\Delta y(s)} = V_M \frac{1 + T_D s}{1 + T_I s} e^{-s T_t} \quad (3.3)$$

Der Fahrer stellt den Lenkwinkel hierbei in Abhängigkeit des Fehlers der Querablage von der Sollspur. Auch für den Teil der kompensatorischen Regelung kann eine Prädiktion ergänzt werden. Diese bringt zum Ausdruck, dass der Mensch nicht auf die aktuelle Querablage am Fahrzeugschwerpunkt regelt, sondern auf eine voraussichtliche Querablage in einer gewissen Entfernung vor dem Fahrzeug. Diese Zeitkonstante wird als Prädiktionszeit  $T_P$  bezeichnet und hat eine ähnliche Bedeutung wie die Antizipationszeit  $T_A$  [Mit04, S. 654 ff.]. Die Kombination aus Präzisionsmodell und Vorausschaumodell führt zu folgendem Übertragungsverhalten des Fahrers [Mit04, S. 657]:

$$G_{MR}^*(s) = G_{MR}(s) e^{s T_P} = V_M \frac{1 + T_D s}{1 + T_I s} e^{s(T_P - T_t)} \quad (3.4)$$

Die Konstanten Vorhalte- und Verzögerungszeit sowie die Totzeit sind meist in relativ engen Grenzen festgelegt. Im Wesentlichen kann der Fahrer seine Verstärkung  $V_M$  und die Vorausschauzeit  $T_P$  variieren. Dabei lassen sich diese aber nicht wie bei der Steuerung aus Fahrzeugparametern oder der Geschwindigkeit bestimmen. Die Regelaufgabe und die Fahrsituation beeinflussen die Werte entscheidend [Hen04, S. 77].

### 3.2.2 Zeitverzögerungen bei der Teleoperation

Im Gegensatz zu konventionellen Mensch-Maschine-Interaktions-Anwendungen ist in der Teleoperation die Zeitverzögerung bei der Datenkommunikation das entscheidende Kriterium beim Entwurf der Steuerung. Die Zeitverzögerung entsteht im Allgemeinen durch die räumliche Trennung von Operator und Teleoperator und die damit notwendige Datenübertragung. Neben den Verarbeitungszeiten der Signale an den Sende- und Empfangsrechnern ist die Übertragungsgeschwindigkeit des Übertragungsmediums meist der beschränkende Faktor [She93]. Bei der Übertragung mittels elektromagnetischer Wellen ist somit die Lichtgeschwindigkeit limitierend. Dies führt bei Anwendungen im Weltraum zu minimalen Verzögerungen von 400 Millisekunden im erdnahen Orbit und bis zu 3000 Millisekunden auf dem Mond für die einfache Wegstrecke. Die reale Kommunikationslatenz (Round-Trip-Time)

für Hin- und Rückweg liegt aufgrund von nicht direkten Kommunikationswegen und Datenpufferung meist bereits bei 6000 Millisekunden im Erdorbit. Bei Unterwasseranwendungen werden vornehmlich akustische Datenübertragungen eingesetzt, die durch die Schallgeschwindigkeit des Wassers limitiert sind. Hier führen bereits kurze Entfernungen von einigen hundert Metern zu Round-Trip-Times im Sekundenbereich [She93].

Da bei der Teleoperation zumeist deutlich mehr Daten von der Teleoperator-Seite zum Operator gesendet werden müssen, die teilweise noch vorverarbeitet - beispielsweise komprimiert - werden müssen, entstehen dort die größeren Zeitverzögerungen. Der Kanal vom Operator zum Teleoperator überträgt im Gegensatz dazu meist nur einige wenige Stellsignale und führt zu geringerer Latenz. Diese Ungleichverteilung in der Kommunikation hat auf die menschliche Wahrnehmung allerdings keinen Einfluss. Im regelungstechnischen Sinn nimmt der Mensch als Regler die Regelstrecke, also das Fahrzeugverhalten, als generell zeitverzögert wahr. Eine Zuordnung der einzelnen Zeitverzögerungen in Hin- und Rückkanal ist ihm nicht möglich [She93], [Pon08, S. 188].

Das Vorhandensein von Zeitverzögerungen im Regelkreis hat zwei Auswirkungen: Zum einen kann durch die Zeitverzögerung der geschlossene Regelkreis instabil werden [She93]. Zum anderen wird die Leistungsfähigkeit des Menschen als Operator reduziert [Pon08, S. 188 ff.]. Nach Kay [Kay97a] sind die Zeitverzögerungen bzw. der Kommunikationskanal ausschlaggebend für die Gestaltung des Teleoperationsansatzes. Kay unterscheidet dabei zwischen kontinuierlichen und verzögerungsfreien, quasi-kontinuierlichen und schwach verzögerten sowie diskret und verzögerten Teleoperationssystemen. Bewertet wird das Kriterium anhand der Zeitverzögerung und der Bandbreite respektive der resultierenden Aktualisierungsrate der Sensorinformationen am Operatorarbeitsplatz. Es gibt genau zwei unterschiedliche Ausprägungsformen der Steuerungsmethodik. Solange die Verzögerung klein und die Aktualisierungsrate hoch sind, kann ein direktes Steuerungskonzept eingesetzt werden. Im Falle von hohen Verzögerungen und geringen Bandbreiten sind indirekte Steuerungen zu verwenden. Hierbei handelt es sich um die Steuerung semi-autonomer Teleoperatoren [Kay97a, S. 7 ff.].

Zur Auswirkung von Zeitverzögerungen im Kommunikationskanal auf die menschliche Leistungsfähigkeit betrachtet Pongrac [Pon08] den Menschen als informationsverarbeitendes System mit modellierten Prozessen. Die menschliche Informationsverarbeitung wird durch die Physiologie mitbestimmt und ist prozess- und zeitabhängig. Es gibt somit eine Schwelle der zeitverzögerten Rückmeldungen, die noch zu keiner veränderten Aufgabenleistung beim Menschen führen [Pon08, S. 188 f.]. Die einzelnen Abläufe der Informationsverarbeitung werden mit unabhängigen Prozessoren bearbeitet, die gewissen zeitlichen Rahmenbedingungen unterliegen. So arbeitet der für die Perzeption zuständige Prozessor mit einer Zykluszeit von etwa 100 ms, wobei maximale Werte bis 200 ms möglich sind. Der kognitive Prozessor verarbeitet die Informationen der Sinneswahrnehmung mit einer durchschnittlichen Zykluszeit von 70 ms. Kognitiv anspruchsvolle Reaktionen benötigen aber bis zu 170 ms. Die motorische Aktion schwankt von 30 ms Zykluszeiten bei Reflexantworten bis zu 100 ms bei willentlichen Bewegungen (Mittelwert etwa 70 ms) [Car83, S. 23 ff.].

Während der perzeptuelle und kognitive Prozess im Sinne eines geschlossenen Regelkreises funktionieren, wird der motorische Prozess lediglich ausgelöst und läuft dann ohne Rückmeldung von Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung ab. Wenn eine externe Zeitverzögerung während der ersten beiden Prozesse auftritt, ist diese zwar wahrnehmbar, hat aber keine leistungsmindernden Auswirkungen, weil die Motorik noch angepasst werden kann [Pon08, S. 189]. Pongrac [Pon08] leitet ein psychologisches Modell zu den Effekten der Zeitverzögerung visueller und haptischer Daten auf die Aufgabenleistung

ab, das durch empirische Untersuchungen belegt wird. Dabei stellt sie fest, dass unterhalb einer Motorikschwelle von 150 ms Zeitverzögerungen zwar bereits wahrgenommen werden können, die menschliche Performanz aber unbeeinträchtigt bleibt. Erst darüber hinaus besteht ein quadratischer Zusammenhang zwischen Zeitverzögerung und Reduktion der Aufgabenleistung. Ab etwa 500 ms geht der quadratische in einen linearen Verlauf über (Abbildung 3.8) [Pon08, S. 219 ff.]. Dabei hängt die Reduktion der Aufgabenleistung beim Arbeiten unter Zeitverzögerung stark von Aufgabentyp und -schwierigkeit ab. Insgesamt scheinen Aufgaben mit Objektkontakt, wie etwa Platzierungsaufgaben, stärker von Zeitverzögerungen abhängig zu sein als Aufgaben mit freier Bewegung, wie Greifaufgaben [Pon08, S. 190]. Eine maximale Obergrenze, bis zu der der Mensch eine visuelle Zeitverzögerung kompensieren kann, sind etwa 1000 ms. Haptisches Feedback kann wesentlich schlechter kompensiert werden. Bei höheren visuellen Verzögerungen agieren Menschen häufig mit einer Move-and-wait-Strategie. Dabei handelt der Mensch nicht mehr im Sinne einer Regelung, sondern steuert kurze Bewegungen vor und wartet dann bis das Ergebnis seiner Stellgrößeneingabe ersichtlich ist. Dieses Vorgehen wiederholt er bis zum Aufgabenziel [She63]. Bei Zeitverzögerungen im Sekundenbereich kommen zur verminderten Reglerfähigkeit beim Operator zusätzlich emotionale Belastung und Frustration hinzu [She93]. Die angegebenen Zusammenhänge gelten für eine konstante Zeitverzögerung. Variable Zeitverzögerungen reduzieren die Aufgabenleistung weiter und konnten von den Versuchspersonen schlechter kompensiert werden. Zusätzlich werden diese auch subjektiv als unangenehmer empfunden [Pon08, S. 219].

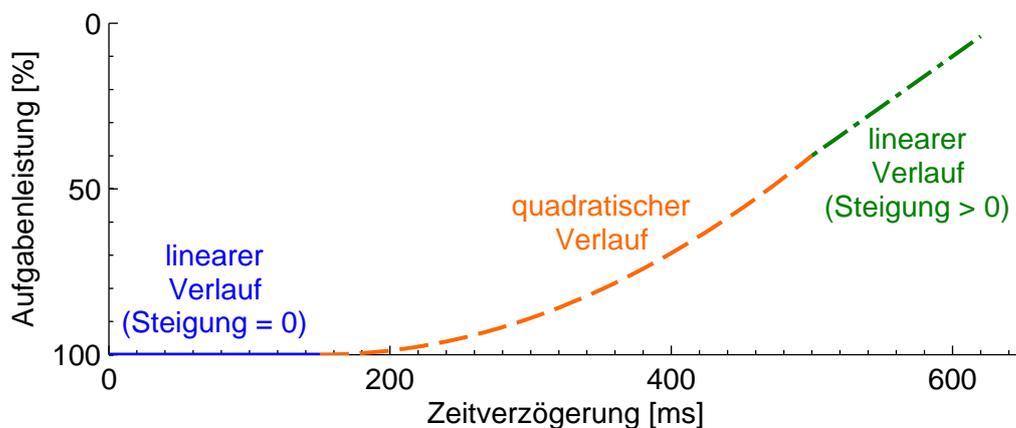


Abbildung 3.8: Abhängigkeit der menschlichen Aufgabenleistung von der Zeitverzögerung (eigene Darstellung nach [Pon08, S. 201]).

### 3.3 Steuerungskonzepte mit ausgeprägter Mensch-Maschine-Interaktion

Steuerungskonzepte, die eine Funktionsteilung von Mensch und Maschine vorsehen, gibt es sowohl in der Teleoperation (Kapitel 3.3.1) als auch in der Fahrerassistenz (Kapitel 3.3.2). Dieses Kapitel stellt die relevanten Konzepte vor.

### 3.3.1 Steuerungskonzepte aus der Teleoperation

In der Robotik werden zur Teleoperation von Fahrzeugen generell zwei Steuerungsarten unterschieden: Zum einen der direkte Steuerungsansatz, bei dem der Operator für die komplette Fahrzeugsteuerung zuständig ist. Und zum anderen die semi-autonome oder indirekte Steuerung, bei der das Fahrzeug autonome Basisfunktionen wie etwa eine Pfadfolgeregelung oder eine Hindernisvermeidung verwendet, um die Zielvorgaben des Operators umzusetzen [Kay97a, S. 7 f.]. Der rein autonome Betrieb des Fahrzeugs ist dann der zur Teleoperation komplementäre Steuerungsansatz, hier wird kein Mensch mehr für die Bewältigung der Fahraufgabe benötigt. Der Mensch ist maximal Überwacher und gibt einmalig das Navigationsziel vor (Abbildung 3.9).

Der klassische Ansatz in der Teleoperation ist die direkte Steuerung. Dabei steuert der Operator das Fahrzeug üblicherweise mit einem manuellen Steuergerät, während er die Bewegung des Teleoperators auf einem Video überwacht. Dabei können bordeigene oder externe Kameraansichten dargestellt werden. Der Mensch schließt durch seine permanenten Eingriffe auf Basis des Videobildes den Regelkreis. Der Teleoperator kann ihn zwar in der Wahrnehmung unterstützen, die essentiellen Funktionen wie Situationsinterpretation, Verhaltensentscheidung und Ausführung liegen aber beim Menschen. Diese Steuerungs-

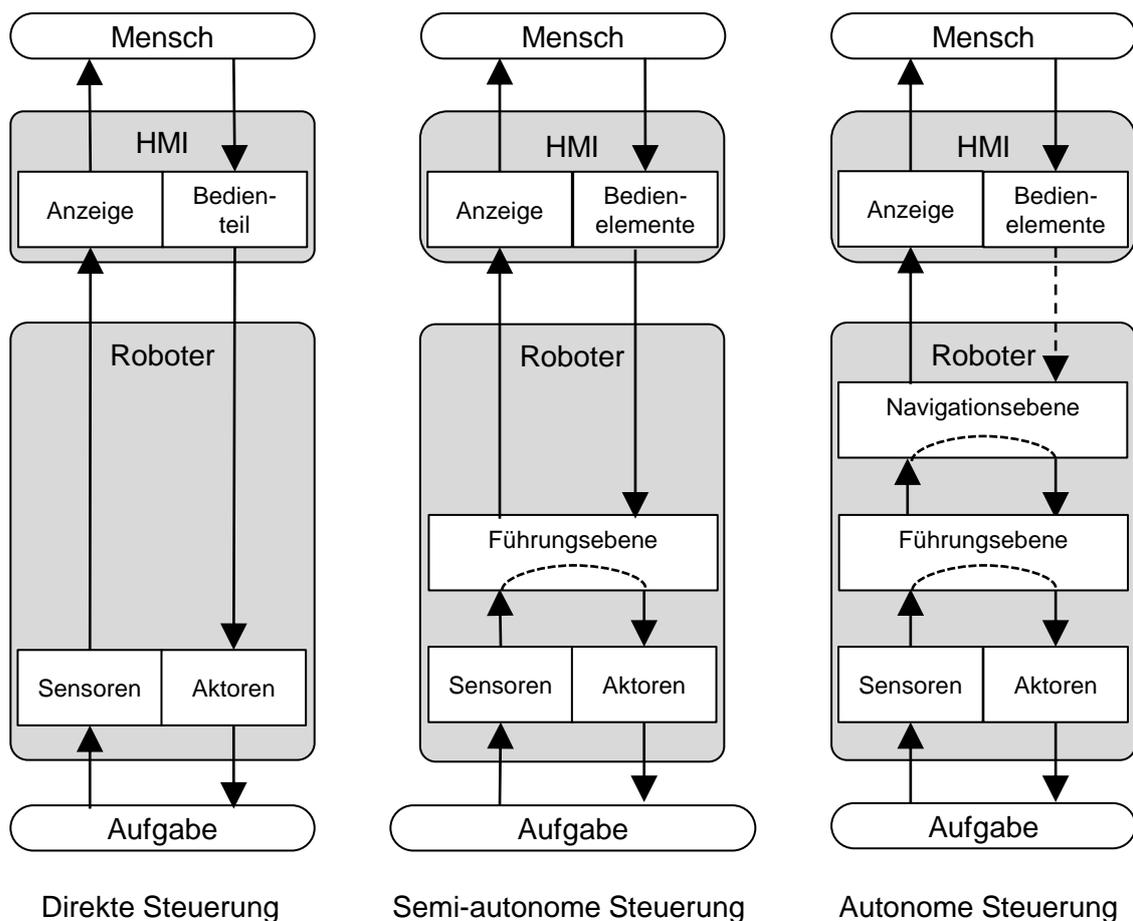


Abbildung 3.9: Darstellung unterschiedlicher Automatisierungsgrade bei der Steuerung. Je höher der Automatisierungsgrad, desto stärker ist bordeigene Intelligenz des Roboters auf Führungs- oder Navigationsebene notwendig (eigene Darstellung nach [Fon01a, S. 15 ff.]).

art wird für alle Klassen von Teleoperatoren - unbemannte Boden- und Luftfahrzeuge oder Unterwasserfahrzeuge - verwendet. Der Vorteil der direkten Steuerung ist die einfache Implementierung und die kostengünstige Realisierung. Der größte Nachteil ist die direkte Abhängigkeit vom Operator. Die Systemleistungsfähigkeit wird direkt von der Operatorleistung beeinflusst, die von individuellen Eigenschaften wie sensomotorischen Fähigkeiten, Wissen, Trainingsstand oder Stress bestimmt wird [Fon01a, S. 15].

Neben dem klassischen Ansatz sind vor allem wegpunktbasierte Steuerungsansätze in der Teleoperation verbreitet. Dabei gibt der Operator eine Sequenz von Zielkoordinaten vor, die das Fahrzeug passieren muss. Dies ist ähnlich zum Vorgeben der Fahrroute bei autonomen Fahrzeugen, etwa in den DARPA Challenges [Mon08], [Wil12, S. 29 ff.]. Mit dem Unterschied, dass im klassischen Teleoperationsansatz die Wegpunkte über kleinere Horizonte vorgegeben werden und der Teleroboter eine geringere Autonomie hinsichtlich der Neuplanung der Trajektorie zum Erreichen der Wegpunkte besitzt. Die Auswahl der Wegpunkte kann unterschiedlichsten Kriterien genügen, etwa der Sicherheit oder der guten Bekanntheit der Route. Wegpunktbasierte Steuerungsverfahren haben einige Vorteile gegenüber der direkten Steuerung: Sie sind nicht so stark von den motorischen Fertigkeiten des Operators abhängig, benötigen weniger Bandbreite bei der Datenübertragung und sind robust gegenüber großen Zeitverzögerungen. Zur Vorgabe der Wegpunkte können karten- oder kamerabasierte Verfahren eingesetzt werden. Die kartenbasierte Vorgabe erfordert hochgenaues Kartenmaterial und eine exakte Positionierung des Teleroboters innerhalb der Koordinaten der Karte. Für unbekannte Einsatzorte wird daher das kamerabasierte Verfahren verwendet [Fon01a, S. 133 f.]. Kay [Kay97a] beschreibt einen wegpunktbasierten Ansatz zur semi-autonomen Fernsteuerung eines Straßenfahrzeugs. Dabei liegt der Fokus auf einer Steuerung für einen Kommunikationskanal mit großer Zeitverzögerung und geringer Bandbreite. Das entwickelte *STRIFE*-System (Supervised TeleRobotics Using Incremental Polyhedral Earth Reprojection) basiert auf der Übertragung von Einzelbildern einer Frontkamera im Fahrzeug. Der Operator definiert dann eine Sequenz von Wegpunkten im Kamerabild und übermittelt diese an das Fahrzeug. Das Fahrzeug fährt diese dann selbstständig ab. Da das Einsatzszenario des verwendeten Versuchsträgers *NavLab 2* von der Carnegie Mellon University vornehmlich Geländefahrten sind, schätzt das System die Geländetopologie auf Basis der zurückliegenden Strecke, um die Kamerabildpunkte perspektivisch auf die reale 3D-Umgebung zu transformieren. Die einzelnen definierten Wegpunkte werden als Stützstellen eines kubischen Splines verwendet, damit ein stetiger Pfad als Vorgabe der Fahrzeugregelung übergeben wird. Während das Fahrzeug automatisch an das Ende der definierten Strecke fährt, wird ein neues Einzelbild an den Operator gesendet, aus dem er wieder Wegpunkte auswählen und an das Fahrzeug übermitteln kann. Dazu kann die Kamera auch vom Operator geschwenkt werden. Die durchschnittliche Round-Trip-Time vom Übermitteln der Wegpunkte bis zum Erhalten des nächsten Kamera-Frames betrug 12,9 Sekunden. Diese entstanden durch die Bandbreitenlimitierung des Kommunikationskanals und die beschränkte Prozessorleistung zur Aufnahme und Komprimierung der Bilddaten [Kay97a, S. 55 ff.].

Kay hat eine Probandenstudie zur Eignung des semi-autonomen Systems durchgeführt. Dabei konnten zwei Drittel der Probanden auch eine schwierige Navigationsaufgabe in unbekanntem Gebiet bewältigen. Das Fahrzeug fuhr dabei mit etwa zwei Meilen pro Stunde konstanter Geschwindigkeit bis es den letzten definierten Wegpunkt erreicht hat. Die reale durchschnittliche Geschwindigkeit war deutlich geringer aufgrund vieler Stopps. Als Kritik wurde hauptsächlich das unzureichende Wissen über die Fahrzeugposition während der Bildaufnahme diskutiert. Es war den Probanden nicht bewusst, an welcher Position und mit welcher Kameraausrichtung die Aufnahmen erfolgten, so dass unklar war, in welcher Relati-

on das neue Bild zu den bereits gelegten Wegpunkten stand. Die Einzelbilder stellen zudem nicht die Dynamik des Fahrens dar [Kay97a, S. 71 ff.].

Die Mars-Rover der NASA werden ebenfalls mit einem wegpunktbasierendem System gesteuert. Wegen der sehr großen Zeitverzögerungen durch die Entfernung zum Mars, aber auch durch die Limitierung der Kommunikation auf günstige Erde-Mars-Konstellationen, ist es notwendig, dass die NASA-Operatoren die gesamte Bewegungssequenz für einen Mars-Tag im Voraus an den Rover senden. Der Rover muss die Route dann mit Hilfe bordeigener Autonomie bewältigen [Baj08]. Zur Wegpunktplanung wird eine 3D-Umgebung verwendet, die auf Basis der Stereokameras der Rover erstellt wird. In einer Simulationsumgebung werden die Steuerkommandos getestet. Dazu können einfach Bewegungs- und Drehungsvorgaben gemacht werden oder High-Level-Wegpunkt-Kommandos gewählt werden [Coo98]. Die Steuersequenz wird in der Simulationsumgebung verifiziert und an den Rover gesendet [Wri05]. Fong [Fon01a] hat ein neuartiges Teleoperations-Interface für einen Personal Digital Assistant (PDA) entwickelt. Dabei wird der Teleroboter mittels Wireless LAN von einem mobilen Endgerät aus gesteuert. Das Steuerungskonzept basiert auf einem kooperativen Verhalten von Operator und Roboter. Der Roboter kann mit dem Operator im semi-autonomen Modus in Dialog treten, wenn der Pfad unklar ist oder durch ein Hindernis versperrt wird [Fon01a, S. 41 ff.]. Zusätzlich zum klassischen direkten Ansatz ermöglicht das PDA-Interface wegpunktbasierendes Fahren. Hierzu wird entweder ein eventgesteuertes Kamerabild angezeigt oder eine Belegungskarte der Umgebung. Die Belegungskarte bietet das größere Situationsbewusstsein. Die Wegpunkte werden in eine Ebene transformiert und dann vom Roboter automatisch angefahren [Fon01a, S. 48 ff.]. Ein Sicherheitsmechanismus unterlagert die menschlichen Eingaben und überprüft die Vorgaben auf ihre Durchführbarkeit. Während in unkritischen Situationen der Operator die volle Kontrolle über den Roboter hat, passt der Sicherheitsmechanismus im Sinne der Kooperation den Grad der Autonomie im Falle von sicherheitskritischen Situationen an und überschreibt mitunter die Eingaben des Operators [Fon01c].

#### 3.3.2 Steuerungskonzepte aus der Fahrerassistenz

Moderne Fahrerassistenzsysteme bieten dem Fahrer einen immer größer werdenden Unterstützungsgang. Die Systeme arbeiten dabei auf allen Ebenen der Fahrzeugführung. Die Assistenzsysteme dienen zwar der Erhöhung von Komfort und Sicherheit, verursachen allerdings auch ein Dilemma: Durch die Übernahme von Teilaspekten der Fahrzeugführung werden vom Fahrer selbst neue Bedienfähigkeiten gefordert. So stellen sich bei einer teilautomatisierten Fahrzeugführung dem Fahrer vor allem Überwachungsaufgaben, denen er mit einer durchgängigen Aufmerksamkeit und der Fähigkeit zur Rückübernahme begegnen muss [Win06]. Für die reine Überwachungstätigkeit einer Automatisierung ist der Mensch allerdings eher ungeeignet [She02, S. 147].

Die Kombination mehrerer Einzelsysteme erhöht die Komplexität des Gesamtsystems, weil die Systeme klassischerweise parallel zueinander und dem Fahrer angeordnet sind. Der Fahrer muss somit jedes System einzeln überwachen und sich der Situation (Situation Awareness [End88]) und des Betriebsmodus (Mode Awareness [Sar95]) bewusst sein [Hak09, S. 641]. Winner [Win06] beschreibt mit dem Paradigma der seriellen Assistenz einen Ausweg aus diesem Dilemma. Klassische Fahrerassistenzsysteme bedienen sich dem Paradigma der parallelen Assistenz, das System agiert parallel zum Menschen. Der Fahrer tätigt die Fahreingaben, das System interpretiert den Fahrerwunsch und wirkt ebenfalls auf die Fahrzeugführung ein. Dabei kann das System entweder simultan zum Fahrer agieren, wie et-

wa ein Spurhalteassistent, der zusätzlich zum Fahrerhandmoment ein Lenkradmoment aufbringt. Oder das System arbeitet sequenziell, während der Fahrer es überwacht und keine Eingaben tätigt. Dies ist etwa der Fall bei einem ACC-System. Diese Systeme erschweren es dem Fahrer aber, eine erfolgreiche Rückübernahme durchzuführen, weil es keine kontinuierliche Anpassung der Unterstützung gibt, sondern die Systeme aktiviert oder deaktiviert respektive übersteuert sind [Hak09, S. 641]. Die serielle Assistenz verspricht einen Ausweg, weil nicht mehr die Summe der Einzelsysteme auf die Fahrzeugführung wirkt, sondern der Fahrer durch ein übergreifendes Bedienkonzept mit einer vereinheitlichten Schnittstelle die Fahrzeugführung beauftragt [Win06]. Unter dem Paradigma der seriellen Assistenz lassen sich Fahrerassistenzsysteme entwickeln, die eine kooperative Automatisierung ermöglichen. Der Begriff Kooperation kennzeichnet eine intensive, gemeinsame Interaktion von Mensch und System [Hak09, S. 641].

H-Mode ist eine Interaktionssprache für hochautomatisierte Fahrzeuge, die eine kooperative Interaktion gemäß dem Paradigma der seriellen Assistenz darstellt. Dabei bedient sich H-Mode der Horse-Metapher, dem Bildnis von einem Reiter und seinem Pferd. Das Pferd gilt dabei sinnbildlich als System, das über eigene Sensorik und Intelligenz verfügt, mit denen es Entscheidungen bezüglich seiner Fortbewegung treffen kann. Der Reiter ist symbolisch der Fahrer, der eine eigene Idee der Fortbewegung hat und diese auf das Pferd überträgt. Dabei agiert der Reiter einmal mit eher losen Zügeln, wenn das Pferd dem richtigen Weg selbstständig folgt, und einmal mit angezogenen Zügeln, wenn das Pferd Vorgaben genau umsetzen soll. H-Mode ist nun eine konkrete Umsetzung der H-Metapher zur Fahrzeugführung [Fle03].

Bei H-Mode wird durch eine multimodale Kombination der Fahrereingriff mit den automatischen Eingriffen durch ein haptisches Eingabegerät verknüpft. Dabei entsteht ein kontinuierlicher Übergang zwischen den unterschiedlichen Graden der Automation. Lose Zügel entsprechen einer hochautomatisierten Fahrt, angezogene einer assistierten Fahrt. Damit bildet H-Mode einerseits eine parallel-simultane Fahrerassistenz ab, für den Fall der assistierten Fahrweise agieren Fahrer und System gleichzeitig. Andererseits wird eine seriell-sequenzielle Assistenz erreicht, wenn im hochautomatisierten Betrieb nur das System die Fahrzeugführung übernimmt. Der kontinuierliche Übergang zwischen den Automationsmodi wird durch eine variable Gewichtung der Absichten von Fahrer und Automation an einem Summationspunkt erreicht. Im Falle der losen Zügel werden die Eingaben der Automation höher gewichtet, bei angezogenen Zügeln hat die Intention des Fahrers ein höheres Gewicht. So agiert H-Mode mit losen Zügeln im Sinne einer kontinuierlichen Kommunikation auf Stabilisierungsebene, mit angezogenen Zügeln im Sinne einer diskreten Kommunikation auf Bahnführungsebene [Hak09, S. 647 f.].

Eine Kooperation beinhaltet die unterschiedliche Handlungsvorstellung beider Kooperationspartner. Als Lösungsansatz wird bei H-Mode das Konzept der Arbitrierung vorgestellt. Dabei wird als Arbitrierung die zeitkritische, strukturierte Verhandlung der Handlungsvorstellungen von Mensch und Maschine verstanden, um für das Gesamtsystem rechtzeitig eine eindeutige, optimale Willensbildung zu erzielen. Dabei wird mit Hilfe eines haptischen Feedbacks dem Menschen die Intention der Maschine dargestellt. In einer Moderationsphase wird auf dem haptischen Sinneskanal die nächste Aktion ausgehandelt. In der Entscheidungsphase wird dann eine eindeutige Wahl für die weitere Fahrzeugführung getroffen (Abbildung 3.10) [Kel06], [Löp08]. Zentrales Bedienelement ist bei H-Mode ein Sidestick mit Kraft-Weg-Rückmeldung. Dabei bringt der Fahrer Kräfte auf den Stick auf, die einer Wunschbewegung des Fahrzeugs in Längs- und Querrichtung entsprechen. Das Feedback, welche Reaktion das Fahrzeug ausführt, wird über die Position des Sticks an den Menschen zurückgemeldet.

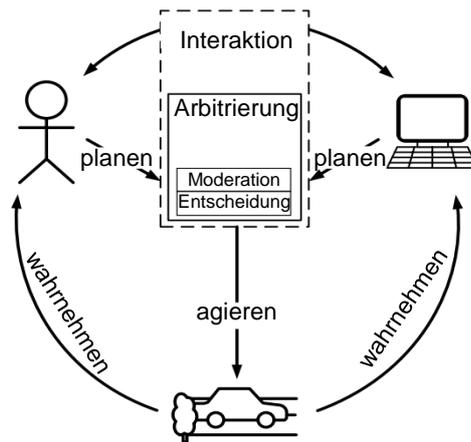


Abbildung 3.10: H-Mode: Mensch und Maschine kooperieren bei der Fahrzeugführung, indem beide interagieren und eigene Intentionen bilden. Konflikte werden durch Arbitrierung aufgelöst [Löp08] (Übersetzung v. Verf.).

Zusätzlich dient eine Greifkraftmessung als Indikator für den Fahrerwunsch nach Überstimung der Automation [Dam11].

Ein weiterer Ansatz der kooperativen Fahrzeugführung ist Conduct-by-Wire. Dabei wird die Stabilisierungsebene vollständig vom Fahrer entkoppelt. Anstelle des kontinuierlichen Kommunikationskanals der klassischen Fahrzeugführung wird eine Kommunikationsmöglichkeit auf Bahnführungsebene geschaffen. Im Falle von Conduct-by-Wire wird dieser Kommunikationskanal als Manöverschnittstelle initiiert [Win05]. Die Namensgebung Conduct-by-Wire bringt dabei zum einen zum Ausdruck, dass das Fahrzeug auf einer höheren Ebene der Fahraufgabe geführt wird und nicht mehr durch den Fahrer stabilisiert werden muss. Zum anderen wird ein Betätigungselement auf X-by-Wire-Basis verwendet. Dieses muss nicht die bestehenden konventionellen Eingabegeräte ersetzen, sondern eine ereignisdiskrete Steuermöglichkeit bieten [Win06]. Um ein Fahrzeug auf Bahnführungsebene über Manövervorgaben zu steuern, wurde ein Manöverkatalog entworfen. Dieser hat die Anforderungen, dass alle Verkehrssituationen mit Hilfe einer endlichen Anzahl an Einzelmanövern zu bewältigen sein müssen. Für ein Autobahnscenario ergeben sich dann die Manöver Fahrspurwechsel, Straße folgen, Anfahren, Stillstand und rechts Ranfahren. Dabei werden explizite und implizite Manöver unterschieden. Explizite Manöver werden direkt vom Fahrer beauftragt und haben ein definiertes Ende. Implizite Manöver sind nicht zwingend abgeschlossen und folgen entweder auf ein beendetes explizites oder ein anderes implizites Manöver. Explizite Manöver sind etwa Fahrspurwechsel, ein implizites Manöver, das auf den Fahrspurwechsel folgt und nicht vom Fahrer ausdrücklich beauftragt werden muss, ist das Manöver zum Folgen der Straße [Sch12, S. 54 ff.].

Der Conduct-by-Wire-Ansatz berücksichtigt neben der Beauftragung von Manövern aber auch die Systemgrenzen, die dieses Konzept mit sich bringt. So sind Verkehrssituationen denkbar, in denen eine Manöverbeauftragung nicht sinnvoll erscheint, etwa beim Fahren auf einem großen Parkplatz ohne Fahrbahnmarkierungen. In dieser Situation soll der Fahrer wieder auf das konventionelle Steuerungssystem zurückgreifen können. Kauer [Kau10] wählt für die konventionellen Fahrereingaben die Eingabegeräte Lenkrad und Fahrpedale. Für die diskrete Beauftragung der Manöver erwies sich ein taktiles Touch-Display als beste, weil frei programmierbare Interaktions-Schnittstelle. So können die Manöver situationsabhängig hervorgehoben oder komplett ausgeblendet werden. Darüber hinaus erhält der Fahrer visuelles Feedback zum aktuell gewählten Manöver und der aktuellen Geschwindigkeit.

Das taktile Display ermöglicht haptisches Feedback als Bestätigung der Benutzer-Eingabe. Zusätzlich zu den Manövern selber kann der Fahrer bei der Manöverschnittstelle die Geschwindigkeit, die Sollzeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug und eine Exzentrizität der Querregelung zur Fahrspurmitte definieren [Kau10] (Abbildung 3.11). Eine intuitivere Eingabemöglichkeit zur Manöर्वorgabe kann durch eine Gestenerkennung in Kombination mit einem kontaktanalogen Head-Up-Display erreicht werden. Dabei wählt der Fahrer ohne Blickabwendung die Manöver aus. Im Display wird ihm die Eingabe bestätigt und die damit verbundene Trajektorie dargestellt [Fra12b].



Abbildung 3.11: Benutzerschnittstelle zum manöverbasierten Fahren im Rahmen des Conduct-by-Wire [Kau10].

---

## 4 Methodik zur Kombination von Mensch und Maschine bei der Teleoperation

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine fahrerlose innerstädtische Fahrzeugführung durch eine geeignete Kombination aus menschlichen Fähigkeiten und maschineller Intelligenz zu realisieren. In diesem Kapitel werden die Defizite der bisherigen Forschungsergebnisse dahingehend bewertet und Verbesserungsmöglichkeiten diskutiert. Dazu stellt Kapitel 4.1 eine geeignete Funktionsteilung zur Fahrzeugführung vor. Anschließend wird eine geeignete Benutzerschnittstelle abgeleitet (Kapitel 4.2).

### 4.1 Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine

Aus systemergonomischer Perspektive muss beim Entwurf eines Mensch-Maschine-Systems der geeignete Automatisierungsgrad bestimmt werden. Auf Basis von Gestaltungszielen und einer Funktionsanalyse erfolgt die Funktionszuweisung an Mensch und Maschine [Sch10b, S. 1021]. Die Funktionsteilung in Mensch-Maschine-Systemen ist eine der bedeutendsten Forschungsrichtungen im Bereich Human Factors [Win11]. Als Ausgangspunkt dient häufig eine klassische MABA-MABA-Liste („men are better at“-„machines are better at“) [Sch10b, S. 1021]. Fitts [Fit51] stellte bereits 1951 eine Liste vor, in der die jeweiligen Fähigkeiten des menschlichen und maschinellen Handelns verglichen wurden (Tabelle 4.1). Die Funktionszuweisung erfolgt zu derjenigen Ressource, deren Fähigkeiten am besten zur Aufgabenerfüllung geeignet sind. Fitts Ergebnisse haben heute noch Bestand, auch wenn die Entwicklung der Technologie deutlich fortgeschritten ist [Win11].

Die Gültigkeit des vergleichenden Ansatzes von Fitts ist allerdings eingeschränkt. So bezweifelt Jordan [Jor63], dass Mensch und Maschine überhaupt vergleichbar sind und für beide die gleichen Kriterien anzuwenden sind, Mensch und Maschine sind eher komplementär. Darüber hinaus wird Fitts Liste generell als veraltet, statisch und unzureichend bewertet. Zusätzlich ist der Vergleich vom Kontext abhängig, dessen Daten sich wiederum meist nicht erheben lassen [Win11], [She02, S. 58 ff.], [Han93, S. 66 ff.]. Eine weitere klassische Aufteilungsstrategie ist die Rest-Verteilung, bei der jede automatisierbare Tätigkeit automatisiert wird und die restlichen Aufgaben beim Menschen verbleiben. Zudem gibt es die ökonomische Funktionsteilung, durch die nur Tätigkeiten automatisiert werden, bei denen die Personalkosten für den Menschen höher als die Automatisierungskosten sind [Ina03, S. 149 f.]. Der vergleichende Ansatz von Fitts wird aber nach wie vor als erster Anhaltspunkt für die Funktionsteilung in Mensch-Maschine-Systemen verwendet, weil bis heute valide Methoden zur Funktionsteilung fehlen [Han96], [She00]. Es gibt keine allgemein anerkannte Methodik [She02, S. 58].

Die folgenden Kapitel diskutieren eine geeignete Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine zur fahrerlosen Fahrzeugführung. Dazu wird zunächst in Kapitel 4.1.1 der Extremwert der Funktionsteilung, die autonome Fahrzeugführung, betrachtet. Kapitel 4.1.2 lei-

Tabelle 4.1: Ursprüngliche MABA-MABA-Liste nach Fitts von 1951 [Fit51, S. 10] (Übersetzung v. Verf.).

Menschen scheinen heutigen Maschinen in den folgenden Aspekten überlegen:	Heutige Maschinen scheinen Menschen in den folgenden Aspekten überlegen:
1. Fähigkeit geringe visuelle oder akustische Energien zu erfassen.	1. Fähigkeit schnell auf Steuerungssignale zu reagieren und große Kräfte gleichmäßig und präzise anzuwenden.
2. Fähigkeit Muster in Licht und Tönen wahrzunehmen.	2. Fähigkeit sich wiederholende Routinetätigkeiten auszuführen.
3. Fähigkeit zu improvisieren und flexible Verfahren anzuwenden.	3. Fähigkeit Informationen kurzfristig zu speichern und dann wieder vollständig zu entfernen.
4. Fähigkeit sehr große Mengen an Informationen über einen langen Zeitraum zu speichern und sich an relevante Fakten zu gegebener Zeit zu erinnern.	4. Fähigkeit deduktiv zu schlussfolgern und dieses zu berechnen.
5. Fähigkeit induktiv zu schlussfolgern.	5. Fähigkeit hochkomplexe Operationen auszuführen, insbesondere mehrere Prozesse parallel.
6. Fähigkeit zu beurteilen.	

tet dann eine MABA-MABA-Liste für die fahrerlose Fahrzeugführung ab, auf deren Basis eine Teilung der Fahraufgabe vorgeschlagen wird (Kapitel 4.1.3)

#### 4.1.1 Bewertung des Potentials einer autonomen Fahrzeugführung

Nach dem Stand der Technik sind vollständig autonome Fahrzeuge noch nicht realisierbar. Auch wenn Wettbewerbe wie die DARPA Challenges suggerieren, dass autonomes Fahren längst umsetzbar ist, so müssen die Ergebnisse dieser Demonstrationen relativiert werden. Dass einige der 89 Teams bei der DARPA Urban Challenge den vorgegeben Stadtparcours vollständig und sicher absolviert haben, lässt keine Aussagen über eine allgemeine Funktionssicherheit und Robustheit der Systeme zu. Die verwendeten Systeme befinden sich in einem prototypischen und nicht nach industriellem Standard abgesicherten Zustand [Ber08]. Trotz der sehr guten Randbedingungen, einer gut strukturierten Umgebung und einem enormen sensorischen und rechenintensiven Aufwand, den die teilnehmenden Teams beim Aufbau der Versuchsträger betrieben, kam es zu Unfällen zwischen den autonomen Fahrzeugen [Fle08].

Auch wenn eine grundsätzliche Realisierbarkeit demonstriert wurde, sind noch diverse technische Probleme zu lösen. Trotz der verwendeten Fusion mehrerer unterschiedlicher Sensoren, die auf unterschiedlichen physikalischen Messprinzipien beruhen, ist die maschinelle Umgebungserfassung bei weitem nicht so leistungsfähig wie der Mensch [Sti05, S. 9]. Ein großes Problem des maschinellen Sehens ist nach wie vor die robuste Objektdetektion und Klassifikation. Das immense Wissen über das vielfältige Erscheinungsbild von Objekten kann aktuell weder in vertretbarer Zeit einem Algorithmus antrainiert werden, noch könnte es in Echtzeit bearbeitet werden [Dic05, S. 204].

Zusätzlich sind die eingesetzten Sensoren häufig Prototypen, die die üblichen Anforderungen der Automobilindustrie nicht erfüllen. Dies gilt nicht nur hinsichtlich Bauraum und Kosten, sondern auch in Bezug auf die Robustheit gegenüber Störungen von anderen Sensoren oder Umgebungseinflüssen [Ber08]. Allerdings kann erst durch die Verwendung dieser Sensorsysteme mit der manuellen Aufzeichnung hochgenauer digitale Karten der Teststrecken begonnen werden. Aktuelle Karten sind essentiell dafür, dass die autonomen Systeme die Strecke selbstständig bewältigen können [Pin12].

Viele Projekte zum autonomen Fahren beschränken sich auf Autobahnszenarien oder autobahnähnliche Straßen. Autobahnen sind aufgrund ihrer gut strukturierten Umwelt und der Limitierung der beteiligten Verkehrsteilnehmer besonders gut zur Automatisierung geeignet [Sch12, S. 3]. Auch etwa das Innenstadtszenario des Braunschweiger Stadtpilot-Projekts basiert auf ähnliche Voraussetzungen wie auf der Autobahn. Es sind Fahrspurmarkierungen und baulich getrennte Fahrstreifen sowie hauptsächlich andere Fahrzeuge als Verkehrsteilnehmer vorhanden [Wil12, S. 63 ff.]. Zusätzlich wird zwar das Befahren von Kreuzungen beherrscht, wobei die Erkennung von Lichtsignalanlagen nicht automatisch, sondern manuell durch den Sicherheitsfahrer erfolgt [Wil12, S. 148]. Ebenso waren die Szenarien der DARPA Urban Challenge stark vereinfacht. So gab es trotz des urbanen Umfelds keine anderen Verkehrsteilnehmer außer Fahrzeugen, es mussten keine Verkehrszeichen erkannt werden. Die Umgebungsbedingungen in Kalifornien waren zudem ideal. Die Sensorik wurde weder durch Wetter noch durch Tunnelfahrten oder Abschattungen beeinflusst [Ber08].

Ein weiteres technisches Problem entsteht durch die optimale Trajektorienplanung vieler autonomer Bahnplanungsalgorithmen. Die Algorithmen zur kollisionsfreien Trajektorienplanung basieren letztendlich immer auf dem Bewerten der Handlungsalternativen, zumeist über Kostenfunktionale. Im Falle einer kritischen Situation mit einer möglichen Kollision müssten dann die Kosten der Kollisionsschwere bewertet werden. Dies bezieht unter Umständen auch Fahrzeuginsassen im eigenen oder anderen Fahrzeug mit ein sowie gegebenenfalls weitere Beteiligte, wenn ein Ausweichen zwar zunächst eine Kollision vermeidet, aber etwa den Gegenverkehr oder Passanten gefährdet. Letztendlich müsste das Kostenfunktional Verletzungsschweren von Menschen bewerten. Dies führt zu rechtlichen und moralisch-ethischen Problemen [Pin12].

Zu den noch ungelösten technischen Problemen kommt hinzu, dass autonome Fahrzeuge nach aktueller Rechtslage nicht erlaubt sind. Nach dem Wiener Übereinkommen von 1968 (WÜ), auf dem viele nationale und auch die Deutsche Straßenverkehrsordnung beruhen, sind autonome Fahrzeuge generell nicht zulässig, weil jedes Fahrzeug eine Person als Führer haben muss (WÜ Art. 8, Abs. 1). Zulassungsrechtlich stehen zusätzlich die Bauvorschriften für Kraftfahrzeuglenkanlagen einer Vollautomatisierung entgegen. Hierbei legt die ECE-Regel 79 explizit fest, dass autonome Lenkanlagen unzulässig sind [Lut12].

Winner geht allerdings davon aus, dass das Zulassungsrecht zumindest im Hinblick auf das Wiener Übereinkommen zukünftig an den Einsatz elektrifizierter Brems- und Lenkanlagen sowie die aktuellen technischen Möglichkeiten angepasst wird [Win09c, S. 668 f.]. Die US-Staaten Kalifornien und Nevada haben bereits 2012 ihr Zulassungsrecht hinsichtlich autonomer Fahrzeuge geändert. Dies ist allerdings nur ein erster Schritt, gehen die Gesetzestexte doch kaum über das hinaus, was im Rahmen von Erprobungsfahrten vorher bereits zugelassen und gängige Praxis war. Produkthaftungs- und Versicherungsfragen sowie Differenzierungen der Automatisierungsgrade werden nur unzureichend erörtert [Pin12].

Zur Zulassungsfähigkeit gehört neben den Restriktionen durch die Straßenverkehrsordnung aber zusätzlich, dass das gesamte Risiko im Straßenverkehr durch das neu zugelassene System nicht höher sein darf als vor der Zulassung. Dies muss mit anerkannten Methoden

wie Dauertests abgesichert sein. Bei Fahrerassistenzsystemen ist eine Absicherung nur beschränkt notwendig, weil der Mensch die Rückfallebene darstellt. Bei autonomen Systemen muss der Beweis geführt werden, dass das maschinelle System mindestens so gut wie der Mensch ist. Es ist jedoch keine auf den Straßenverkehr anwendbare Metrik zur Quantifizierung der Leistungsfähigkeit von autonomen Fahrrobotern und zum Vergleich mit menschlichen Fahrern bekannt [Win09c, S. 668 ff.].

Bezüglich der rechtlichen Einstufung automatischer Fahrerassistenzsysteme in Deutschland hat ein Arbeitskreis der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) fünf Automatisierungsstufen definiert. Die Kategorien unterscheiden sich in dem Grad, in dem der Fahrer das System noch unterstützen respektive im Notfall wieder übernehmen muss (Abbildung 4.1). Nach deutschem Recht ist der teilautomatisierte Fall aktuell die höchste zulässige Automatisierungsstufe. Hier muss der Fahrer die Längs- und Querführung nicht selber ausführen, das System aber dauerhaft überwachen. Dies ergibt sich hauptsächlich aus dem Vorsichts- und Rücksichtnahmegebot aus §1 der Straßenverkehrsordnung. Bereits ab der Hochautomatisierung sind dem Fahrer per Definition temporäre Nebentätigkeiten erlaubt und die Übernahme muss erst nach gewisser Zeit erfolgen. Dies widerspricht der aktuellen Gesetzgebung [Gas12, S. 8 ff.]. Die BASt definiert als höchste Ausprägungsform der Fahrzeugautomatisierung das vollautomatisierte Fahren im Sinne einer Fahrerassistenz. Dabei übernimmt das Fahrzeug vom Fahrer die vollständige Fahraufgabe für einen definierten Anwendungsfall. Der Fahrer sitzt aber nach wie vor im Fahrzeug und führt das Fahrzeug in allen anderen Anwendungsfällen. Ein autonomer Fahrroboter, der ein Fahrzeug über eine komplette Route selbstständig bewegt, ohne dass sich ein Mensch im Fahrzeug befindet, würde über diese Definition noch hinausgehen und wurde von der Betrachtung ausgeschlossen [Gas12, S. 32].

Im Gegensatz zu autonomen Fahrzeugen werden hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme in den nächsten Jahren serienreif sein. Aufgrund der oben genannten Vorzüge des Autobahnscenarios werden sich diese ebenfalls auf diesen Anwendungsbereich beschränken. Zusätzlich werden für die Systeme weitere enge Systemgrenzen definiert, wie etwa das ausschließliche Fahren im Stau bei niedriger Geschwindigkeit oder außerhalb von Baustellen. Dennoch kann eine Vielzahl von kritischen Situationen entstehen, die vorab nicht bei der Implementierung des Systems berücksichtigt werden können, zum Beispiel verlorene Ladung auf der Fahrbahn [Rau12]. In diesem Fall müsste wieder ein Fahrer übernehmen, um das System immer in einen sicheren Zustand zu überführen. Die Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der autonomen Straßenfahrzeuge kommen demnach vornehmlich hoch-



Abbildung 4.1: Einteilung der Automatisierungsstufen nach Definition der BASt-Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ (eigene Darstellung nach [Fle11]).

automatisierten Anwendungen im Fahrerassistenzbereich zu Gute. Die Automobilhersteller haben in ihren Ankündigungen ein hochautomatisiertes Fahren auf der Autobahn noch vor 2020 prognostiziert [Aud13], [BMW13]. Der Zeithorizont bis zum Einsatz eines vollautomatisierten Fahrzeugs im öffentlichen Mischverkehr mit anderen menschlichen Fahrzeugen ist im Gegensatz dazu noch nicht absehbar, insbesondere nicht für Szenarien in beliebiger Verkehrsumgebung abseits der Autobahn [Sti05, S. 5], [Win09c, S. 667], [Gas12, S. 7]. Vor allem der für die vorliegende Arbeit relevante Aspekt einer fahrerlosen innerstädtischen Fahrzeugführung wird sich in den nächsten Jahrzehnten noch nicht autonom realisieren lassen.

Die hochautomatisierten Systeme zum Fahren entlang vorab geplanter Bahnen sind hingegen heute bereits einsatzfähig. Die Systeme, die Daimler etwa zum Testen der Fahrerassistenzsysteme verwendet, oder mit denen BMW Fahrertrainings auf der Rennstrecke durchführt, haben sich in ihren jeweiligen Einsatzzwecken bewährt. Hierzu sind verschiedenste regelungstechnische Ansätze bekannt, die ein robustes Fahren bis in den querdynamischen Grenzbereich ermöglichen. Die verwendeten Reglerstrukturen basieren dabei auf optimalen Regelungsansätzen oder einfachen PID-Reglern. Die Regler werden häufig mit einer antizipatorischen Vorsteuerung kombiniert. Der Entwurf der Regler basiert in vielen Arbeiten auf einem einfachen Einspurmodell und erzielt trotzdem eine hohe Robustheit bis in den nichtlinearen querdynamischen Grenzbereich.

Auf Basis der bisherigen Forschungsergebnisse wird im Folgenden erörtert, welche Unterschiede ein autonomes und ein teleoperiertes Fahrzeugkonzept charakterisieren. Hierzu werden drei grundlegende Bereiche gegenübergestellt: die technologischen Voraussetzungen, die Gesetzgebung und die zukünftigen Anwendungsszenarien.

Bezüglich der technologischen Voraussetzungen gilt es drei Bereiche zu differenzieren: die Sensorik, die Aktorik und die Algorithmik. Die Sensorik ist ein essentieller Bestandteil autonomer Fahrzeuge. Erst die maschinelle Wahrnehmung mit einer Vielzahl von umgebungs-erfassenden Sensoren macht eine sichere Fahrzeugführung im Verkehr möglich. Sensordatenfusionsansätze kombinieren die Vorteile der meist unterschiedlichen physikalischen Messprinzipien der Sensoren. Dabei sind sowohl komplementäre als auch redundante Fusionsaspekte notwendig, um eine Robustheit gegenüber einem Sensorausfall zu erhalten [Stü04], [Ber08]. In der Teleoperation agiert der Mensch als Sensor. Dabei ist es häufig ausreichend, eine Kamera zu verwenden, weil dem Operator bereits ein Videobild zur Situationsinterpretation ausreicht. Der Einsatz weiterer Sensorik ist eher optional [App10, S. 242]. Hinsichtlich der Aktorik zeigen sich keine nennenswerten Unterschiede zwischen autonomer und teleoperierter Ausprägung. In beiden Fällen muss die Aktorik redundant ausgeführt sein, um bei Ausfall eines Aktors stets einen sicheren Fahrzustand zu erreichen. Im Gegensatz zu teil- oder hochautomatisierten Fahrerassistenzsystemen kann nicht auf einen Fahrer im Fahrzeug zurückgegriffen werden, der bei Aktorikausfall die Fahrzeugführung übernimmt [Lut12].

Bei der Algorithmik gibt es große Unterschiede zwischen Teleoperation und Autonomie. Ein autonomer Algorithmus muss die Fähigkeiten des Menschen besitzen. Die Maschine übernimmt die vollständige Aufgabe eines Fahrroboters - von der Situationsinterpretation über die Verhaltensentscheidung bis zur Regelung der Fahrzeugführung. Ein autonomer Fahrroboter erfordert einen relativ hohen Implementierungs- und Rechenaufwand. Eine gleichwertige Leistungsfähigkeit zum Menschen wird hierbei noch nicht erreicht [Win09c, S. 667 ff.], [Ber08]. Bei der Teleoperation ist der algorithmische Aufwand deutlich geringer einzustufen. Hier sind lediglich Stellregler zu implementieren, die die Vorgaben des Operators in geeigneter Weise umsetzen.

Im Bereich der rechtlichen Bewertung stellt sich das Bild differenziert dar. Solange eine Bewertungsmöglichkeit der Leistungsfähigkeit von Fahrrobotern sowie die Rechtssicherheit in Fragen der Produkthaftung fehlen, werden keine fahrerlosen autonomen Serienfahrzeuge für deutsche Straßen zugelassen werden. Der Zeithorizont bewegt sich vermutlich jenseits von 2050 [Gas12, S. 7]. Es ist fraglich, ob teleoperierte Fahrzeuge eine Sonderstellung einnehmen. Bei der Teleoperation ist der Mensch als Operator nach wie vor in der Verantwortung für die eigentliche Fahrzeugführung. In der Einstufung nach der BAST befände sich die Teleoperation somit unterhalb der Hochautomatisierung. Die BAST hat teleoperiertes Fahren allerdings explizit von ihrer Betrachtung ausgeschlossen [Gas12, S. 32]. Zusätzlich kann der Operator etwa aufgrund eines Kommunikationsausfalls nicht in jeder Situation adäquat reagieren. Dann müsste zumindest kurzzeitig eine maschinelle bordeigene Intelligenz eingreifen, mit den gleichen Einschränkungen wie beim rein autonomen Betrieb. Zusammenfassend gilt, dass teleoperierte Fahrzeuge nach aktueller Rechtslage zwar unzulässig sind, aber weniger Konflikte mit der Rechtsordnung als autonome Fahrzeuge aufweisen, weil weiterhin ein Mensch Führer des Fahrzeugs bleibt und nicht ein technisches System [Lut12].

Die Anwendungen von autonomen und teleoperierten Fahrzeugen unterscheiden sich einerseits nach dem Anwendungsszenario und andererseits nach dem Aufwand, dieses Szenario zu ermöglichen. Dabei ist vor allem der personelle Aufwand bei der Teleoperation zu sehen. Sie ist eher einer Taxi-Dienstleistung gleichzusetzen, mit den entsprechenden personellen und monetären Aufwendungen. Das autonome Fahren ist in einem einmalig ausgerüsteten Fahrzeug hingegen ohne weiteren Aufwand zu betreiben. Zusätzlich wird der Fahrer beim autonomen Fahren komplett von der Fahraufgabe entlastet und kann Nebentätigkeiten ausführen. Die Teleoperation verlagert die Fahraufgabe hingegen lediglich auf eine Person an einem externen Ort. Bezüglich des Anwendungsszenarios selber und eines möglichen Nutzungsbereichs können autonome Fahrzeuge zunächst auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen zum Einsatz kommen. Autobahnen zeichnen sich durch eine wenig komplexe Straßentopologie und bekannte Verkehrsteilnehmer und Fahrtrichtungen aus [Sch12, S. 3]. Die Teleoperation ist hierzu komplementär im innerstädtischen Umfeld bei hoher Komplexität, aber eher geringerer Geschwindigkeit angesiedelt [App07]. Dies ist dadurch bedingt, dass der Operator durch seine hohe Interpretationskompetenz auch komplexe innerstädtische Szenarien korrekt analysieren kann, allerdings wegen der geringen Stabilitätsreserven unter dem Einfluss von Zeitverzögerungen auch nur innerstädtische Geschwindigkeiten (bis 60 km/h [Tan15, S. 64]) beherrschen kann.

Tabelle 4.2 stellt die Bewertungen übersichtlich dar. Auf Basis der hier getätigten Ausführungen lässt sich zusammenfassen, dass die Teleoperation sowohl technologisch als auch rechtlich weniger Schranken aufweist als die Realisierung autonomer Fahrzeuge. Allerdings entstehen bei der Teleoperation Einschränkungen hinsichtlich des Anwendungsszenarios. Die Teleoperation ist eher eine Lösung für genau spezifizierte Anwendungsbereiche und als Entwicklungsstufe auf dem Weg zum autonomen Fahren zu sehen.

#### **4.1.2 Vergleich von menschlichem und maschinellem Informationsverarbeitungsprozess**

Auf Basis der obigen Ergebnisse ist eine autonome Fahrzeugführung als Lösungsansatz für eine fahrerlose, innerstädtische Fahrzeugführung nach aktuellem Stand der Technik noch nicht darstellbar. Die Teleoperation bietet hingegen die Möglichkeiten, bereits zeitnah eine

## 4.1 Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine

Tabelle 4.2: Vergleich der Realisierungs- und Einsatzmöglichkeiten autonomer und teleoperierter Fahrzeuge zur fahrerlosen Fahrzeugführung. Die Bewertung erfolgt nach positiven (+), neutralen (o) und negativen (-) Aspekten.

		<b>Autonomes Fahren</b>		<b>Teleoperiertes Fahren</b>	
<i>Technologie</i>	Sensorik	redundant		einfach	
	Aktorik	redundant		redundant	
	Algorithmik	wie Mensch		nur Regelung	
<i>Recht</i>	Wiener Über-einkommen	kein Fahrer		Mensch als Fahrer	
	Zulassungsrecht	Metrik fehlt		Rückfallebene Mensch	
<i>Anwendung</i>	Unterhalt	keine Kosten		hohe Personalkosten	
	Szenarien	Fahrer-Entlastung		Aufgaben-Verlagerung	
		Autobahn			Stadt

fahrerlose Fahrzeugführung im unteren Geschwindigkeitsbereich zu realisieren. Um eine geeignete Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine bei der teleoperierten Fahrzeugführung ableiten zu können, wird der menschliche und maschinelle Informationsverarbeitungsprozess verglichen. Wie in Kapitel 3.2.1 dargestellt, wird der menschliche Informationsverarbeitungsprozess nach dem vereinfachten Systemmodell Fahrer-Fahrzeug-Umgebung von Abendroth [Abe01] in die Einzelprozesse Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung im engeren Sinne und Informationsabgabe unterteilt. Im Falle einer vollständigen Automatisierung müssen diese entsprechend äquivalent von der Maschine ersetzt werden, weil sich die Maschine in der für den Menschen geschaffenen Infrastruktur des Straßenverkehrs selbstständig zurechtfinden muss. Im Folgenden werden in Bezug auf diese Prozesse die Fähigkeiten der Maschine nach dem aktuellen Stand der Technik diskutiert.

Die Entwicklung der Qualität maschineller Informationsverarbeitung in der Fahrzeugentwicklung kann an der Evolution der Fahrerassistenzsysteme nachvollzogen werden (Abbildung 4.2). Bei den konventionellen Fahrerassistenzsystemen, wie etwa dem Antiblockiersystem (ABS) oder dem Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), wurden lediglich Fahrdynamiksensoren zur Ermittlung der internen Fahrzeugzustände verwendet. Diese Systeme gehören der Klasse der autonom intervenierenden Systeme an, weil ihre Regelungen im Millisekundenbereich agieren und damit fernab jeglicher menschlicher Eingriffsmöglichkeiten sind. In der nächsten Generation folgten Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung. Durch diese konnte erstmals das Fahrzeugumfeld automatisiert überwacht werden und somit Komfortfunktionen für eine automatisierte Längsführung realisiert werden. Hauptsächlich aus Kosten- und Aufwandsgründen werden zur Umgebungserfassung bekannte Sensoren aus der Robotik, wie Ultraschall, Lidar oder Radar, verwendet [Sti05, S. 5 f.].

Aktuell richtet sich die Entwicklung neben den bekannten Radarsensoren vermehrt auf videobildbasierte Systeme aus. Vor allem im Nahbereich für die Validierung automatischer

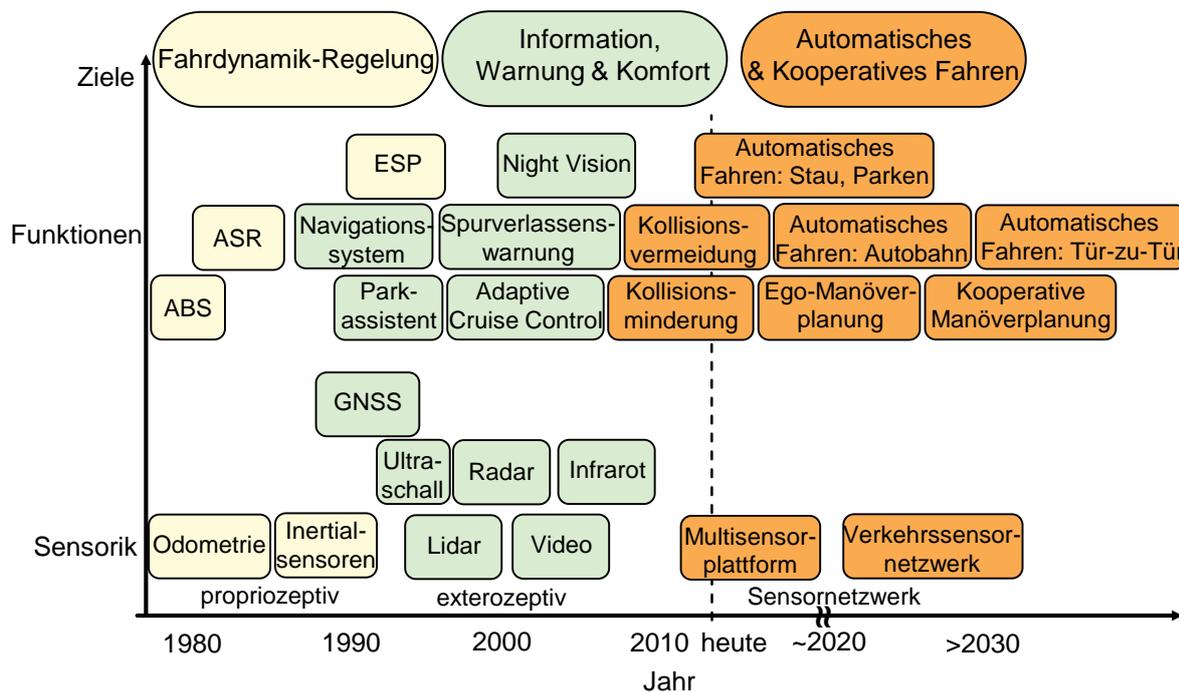


Abbildung 4.2: Roadmap der Fahrerassistenzsysteme-Entwicklung und der verwendeten Sensorik [Ben14](Übersetzung v. Verf.).

Notbremsungen oder bei der Fußgängererkennung haben Kamerasysteme Vorteile gegenüber der etablierten Sensorik. Das zeigt zum Beispiel das für den Deutschen Zukunftspreis 2011 nominierte 6D-Vision-System von Daimler [Fra12a]. Die Realisierung eines maschinellen Sehens mit Hilfe von Kameras ist als Ansatz bereits aus den 80er Jahren von den ersten autonomen Fahrzeugen bekannt [Rei96]. Die kamerabasierte Erfassung hat viele Vorteile gegenüber radar- oder laserbasierten Systemen. Der größte ist die Wahrnehmbarkeit der hauptsächlich visuellen Aspekte des Fahrraums, wie etwa Fahrspuren oder Verkehrszeichen. Darüber hinaus erlaubt die Erkennung von farb- und texturabhängigen Mustern eine dem Menschen ähnliche Klassifikation der anderen Verkehrsteilnehmer. Mit diesen Möglichkeiten geht eine sehr große Datenmenge einher, die in Echtzeit bearbeitet werden muss. Dazu kommt, dass aus einem Monobild keine Tiefendaten gemessen, sondern nur geschätzt werden können. Für eine effektive Entfernungsmessung ist zumindest ein Stereokamerasystem oder die Fusion mit direkt entfernungsmessenden Sensoren notwendig. Aus diesen Gründen gab es bislang lediglich eine geringe Verbreitung von Kamerasystemen im Bereich der Fahrerassistenz. Mit der stetig steigenden Rechenleistung von Mikroprozessoren, die auch auf Steuergeräten oder FPGAs im Fahrzeugbereich zur Verfügung stehen, wird es mehr und mehr möglich, komplexe Bildverarbeitungsalgorithmen in Seriensteuergeräten zu realisieren [Sti05], [Dic05]. Daimler hat als erster Automobilhersteller Stereokameras in der E- und S-Klasse eingeführt [Dai13].

Das maschinelle Sehen mit Hilfe von Kameras gilt allgemein als konsequente Weiterentwicklung hin zu einer menschenähnlichen Wahrnehmung. Hier kann die Evolution in der Biologie der Wirbeltiere als Maßstab angesetzt werden. Die effizienteste Art der Umgebungswahrnehmung ist demnach die Kombination von schneller Ausrichtung des Blickfeldes und peripherem Sehen. Ein großer Bereich des Sichtfeldes wird stets mit geringer Auflösung überwacht, nur ein zentraler Bereich mit einer hohen Auflösung ausgewertet. Der zentrale

Bereich kann durch eine schnelle Blickrichtungsänderung gezielt auf besonders interessante Aspekte gelenkt werden [Dic02, S. 269 f.]. Trotz der Fortschritte im Bereich der Forschung von effizienten Bildverarbeitungsalgorithmen war bereits zu deren Beginn in den 90er Jahren abzusehen, dass ein enormer Rechenaufwand notwendig sein würde, um auch nur annähernd an die Leistungsfähigkeit des Menschen heranzukommen. Hierzu wäre nicht nur die gezielte Auswertung von Farben und Texturen erforderlich, sondern auch ein immenses Hintergrundwissen über die verschiedenen Ausprägungen unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer. Erst der riesige Erfahrungsschatz des Menschen über das mögliche Aussehen unterschiedlicher Objekte bei unterschiedlicher Witterung und aus unterschiedlichen Blickwinkeln und Entfernungen macht das menschliche Sehen so leistungsstark [Dic05, S. 204]. Selbst vermeintlich einfache Aufgaben, wie die robuste Ampelerkennung, stellen immer noch ein großes Hindernis dar [Zie14].

In Bezug auf die Informationsverarbeitung im engeren Sinne, die nach Abendroth [Abe01, S. 11 f.] aus den Prozessen Wahrnehmung sowie Entscheidung und Handlungsauswahl besteht, ist nach aktuellem Stand der Technik der Mensch gegenüber der Maschine immer dann im Vorteil, wenn es um anspruchsvolle Denk- und Entscheidungsprozesse geht. Hier sind insbesondere die unterschiedlichen Formen des Gedächtnisses von Bedeutung, die es dem Menschen ermöglichen, Situationen abzugleichen und bereits erlernte Muster anzuwenden. Diese Mechanismen finden auch bei der Erkennung von Objekten und der Antizipation sowie Prädiktion der Verkehrssituation eine Anwendung [Abe09, S. 13 f.]. Darüber hinaus hilft der riesige Erfahrungsschatz dem Menschen bei der zuverlässigen Erkennung und Klassifikation von Objekten oder dem Fahrbahnverlauf [Sti05, S. 9]. Die maschinelle Wahrnehmung steht noch am Anfang ihrer Entwicklung [Ben14].

Es gibt im Gegensatz dazu heute bereits Bereiche, in denen die maschinelle Wahrnehmung dem Menschen überlegen ist. Das trifft gerade auf Aufgaben mit hohen Reaktionsanforderungen im Millisekundenbereich zu. Dort ist die Zeitdauer der Verarbeitungsprozesskette Wahrnehmung-Entscheidung-Handlung deutlich geringer als beim Menschen [Sti05, S. 9]. Fahrerassistenzsysteme wie ein ABS oder ESP erfüllen Reaktionsanforderungen mit Abtastzeiten, die kein Mensch erreichen kann. Diese Funktionen lassen sich nur automatisiert darstellen [Don09, S. 22]. Darüber hinaus verfügen die entfernungsmessenden Sensoren über eine metrische Genauigkeit unterhalb des Zentimeterbereichs [Stü04, S. 7 ff.]. Der Mensch hingegen, der allerdings auch nicht an das Schätzen von Entfernungen in metrischen Angaben gewöhnt ist, schätzt Distanzen deutlich schlechter ein und variiert zusätzlich mit den Umgebungsbedingungen [Cav01, S. 446]. Als weiterer Vorteil der maschinellen Verarbeitung gilt die Resistenz gegenüber Ermüdung oder Ablenkung [Sti05, S. 9].

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die maschinelle Informationsverarbeitung in vielen Bereichen nach wie vor deutlich hinter den menschlichen Fähigkeiten zurücksteht. Es gibt aber auch Prozesse und Situationen, die bereits heute maschinell besser gelöst werden können. Tabelle 4.3 stellt die Ergebnisse der Diskussion gegenüber. Der erste Teilprozess der Informationsverarbeitung, die Informationsaufnahme (Perzeption), wird weiter untergliedert in die Rezeptoren und die Situationsanalyse. Dabei ist die menschliche Sinnesaufnahme nicht fehlerfrei, aber in vielen Bereichen der Maschine noch immer überlegen. Nachtsicht-Kameras sind indes bereits heute in einer spezifischen Situation besser zur Wahrnehmung geeignet als das menschliche Auge. Die weitere Verarbeitung der wahrgenommenen Daten im Sinne einer Situationsanalyse basiert beim Menschen bereits auf gelerntem und abgespeichertem Wissen aus dem Gedächtnis. Aufgrund des immensen Erfahrungsschatzes und der Abstraktionsfähigkeit, Bekanntes wiederzuerkennen und Unwichtiges auszublenden, ist der Mensch hierbei deutlich besser als maschinelle Ansätze.

Tabelle 4.3: Gegenüberstellung und Bewertung der Fähigkeiten von Mensch und Maschine bezüglich der Informationsverarbeitung zur Fahrzeugführung. Die Bewertung erfolgt nach sehr positiven (++), positiven (+), neutralen (o) und negativen (-) Aspekten.

Informationsverarbeitungsprozess		Mensch	Maschine
<i>Informationsaufnahme</i> (Perzeption)	Rezeptoren		
	Situationsanalyse		
<i>Informationsverarbeitung</i> (Kognition)	Verhaltensentscheidung		
	Pfadplanung		
<i>Informationsabgabe</i> (Motorik)	Reaktionszeit		
	Positionierung		

Das Gleiche gilt für die Informationsverarbeitung im engeren Sinne (Kognition). Die Verhaltensentscheidung auf Basis von Entscheidungs- und Denkprozessen gelingt dem Menschen immer besser als der Maschine, wenn er hinreichend Zeit hat [Abe09, S. 13]. Maschinelle Ansätze erzielen nicht die Verhaltensvariabilität, die ein Mensch beherrscht, sondern können meist nur zwischen implementiertem Verhalten wählen, aber keine neuen Lösungsansätze ableiten. Auch beim Planen der Solltrajektorie ist der Mensch gegenüber der Maschine im Vorteil, weil er in unbekanntem Umgebungen, etwa ohne Fahrspurmarkierungen, zurechtkommt und sich an unvorhergesehene Ereignisse adaptieren kann. Bei gegebenen Fahrspurmarkierungen oder Randbebauung ist dies aber ebenfalls mit maschinellen Algorithmen sehr gut möglich (Kapitel 3.1). Bei der Informationsabgabe ist der Mensch bereits heute der Maschine in vielen Bereichen unterlegen. Die Positionierung des Fahrzeugs erfolgt auf Basis hochgenauer Positionsschätzungen im Zentimeterbereich und somit mit höherer Genauigkeit als es Menschen können. Ebenso unterschreiten die maschinellen Reaktionszeiten jede menschliche Reaktionsfähigkeit (Kapitel 3.1.2).

Winner [Win09c, S. 670 f.] kommt bei seiner Betrachtung zu ähnlichen Ergebnissen. Auch er konstatiert den Aktorsystemen noch am ehesten Fähigkeiten, die an die Leistungsfähigkeit des Menschen heranreichen. Die maschinelle Perzeption ist zwar bereits eindrucksvoll vorangeschritten, allerdings noch unfähig, komplexe Situationen wahrzunehmen. Am geringsten ist die maschinelle Kognitionsleistung einzuschätzen, die insbesondere eine deutlich geringere Entscheidungsflexibilität als die des Menschen aufweist [Win09c, S. 670 f.].

### 4.1.3 Ableitung einer geeigneten Funktionsteilung der Fahraufgabe

Entsprechend der vorangegangenen Diskussion lassen sich folgende Aussagen schlussfolgern: Das Ziel einer fahrerlosen Fahrzeugführung im innerstädtischen Bereich lässt sich aktuell nicht durch autonome Fahrzeuge realisieren. Vor allem die hohen Anforderungen, die die Komplexität des unstrukturierten urbanen Verkehrsraums an die maschinelle Wahrnehmung und Verhaltensentscheidung stellt, sind aktuell nicht beherrschbar. Der urbane Raum wird im Gegensatz zu Autobahnscenarien auch in den nächsten Jahrzehnten noch von menschlich gesteuerten Fahrzeugen in Kombination mit Assistenzsystemen dominiert

werden [Bar08].

Die Analyse der menschlichen und maschinellen Fähigkeiten zur Fahrzeugführung hat gezeigt, dass der Mensch vornehmlich bei Perzeption und Kognition Vorteile gegenüber maschineller Informationsverarbeitung hat. Auch wenn die maschinelle Perzeption dem Menschen in einigen Teilbereichen bereits überlegen ist, so werden komplexe, kognitive Aufgaben - was die Fahrzeugführung im urbanen Raum ohne Zweifel darstellt - vom Menschen aufgrund seiner immensen Erfahrungswerte immer noch besser gelöst. Der Mensch ist in der Lage, auch neue, unbekannte Situationen schnell zu erfassen, zu interpretieren und das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer zu antizipieren. Insbesondere der urbane Verkehrsraum ist von einem hohen Grad an nonverbaler Kommunikation und gegenseitigem Verständnis geprägt [Jür97, S. 34]. Dies können maschinelle Ansätze in der Komplexität aktuell noch nicht allumfassend darstellen.

Bereits bei der Pfadplanung und Erstellung der Führungsgrößen für die Fahraufgabe nähern sich maschinelle Algorithmen den menschlichen Fähigkeiten. So kann die Maschine in gut strukturierten Umgebungen den eigenen Pfad so planen, dass er nicht nur dem Fahrbahnverlauf folgt, sondern dies auch möglichst menschenähnlich tut. Dazu werden bereits beim Entwurf der automatischen Fahrzeugführung menschliche Verhaltensweisen implementiert [Kra12, S. 128 ff.]. Auf Rennstrecken können automatische Algorithmen etwa die zeitoptimale oder sicherste Trajektorie berechnen. Dies setzt allerdings viel Wissen über die Umgebung voraus, zumeist im Rahmen von hochgenauen Kartendaten. Sind Kartendaten für eine Rennstrecke noch relativ leicht zu generieren, erhöht indes der urbane Raum die Komplexität deutlich. So sind Fahrspuren nicht durchgängig mit Fahrbahnmarkierungen gekennzeichnet, parkende oder haltende Fahrzeuge versperren unter Umständen die eigene Spur, so dass auch ein kurzzeitiges Fahren auf der entgegenkommenden Fahrspur notwendig ist. Aktuelle hochautomatisierte Forschungsansätze auf Autobahnen erreichen ihre Systemgrenzen bereits bei geändertem Fahrbahnverlauf in Baustellen [Rau12].

Im Hinblick auf die Motorik ist die Maschine dem Menschen aktuell in vielen Bereichen überlegen. Die derzeitigen Fahrerassistenzsysteme in Serienfahrzeugen sind bereits in der Lage, Geschwindigkeiten exakt einzustellen oder Abstände zum Vorderfahrzeug einzuhalten. Die zugrundeliegenden Sensoren können die eigene Position und die anderer Fahrzeuge im Submeter-Bereich exakt auflösen und daraus Stellvorgaben berechnen, die von der Aktorik präzise eingestellt werden. Zusätzlich arbeiten maschinelle Regelsysteme mit Reaktionszeiten im Millisekundenbereich, sind zudem weder abgelenkt noch müde.

Für eine bestmögliche Arbeitsteilung zwischen menschlicher und maschineller Informationsverarbeitung zur Fahrzeugführung sollten nach dem aktuellen Stand der Technik die Perzeption und die Kognition vom Menschen ausgeführt, die motorische Ausführung hingegen von maschinellen Systemen übernommen werden. Abbildung 4.3 kombiniert diese Schlussfolgerungen mit den Anforderungen an die unterschiedlichen Tätigkeiten zur Fahraufgabe (Kapitel 3.2.1). Im Drei-Ebenen-Modell nach Donges [Don82] ergibt sich eine Funktionsteilung unterhalb der Führungsebene. Der Mensch übernimmt die Ebenen Navigation und Führung, die Führungsgrößen an das Fahrzeug übergeben. Das Fahrzeug folgt dann automatisch diesen Führungsgrößen. Diese Aussagen zur Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine sowie der geeigneten Funktionsteilung der Fahraufgabe gelten im Allgemeinen für Fahrzeugführungssysteme, nicht nur für die Teleoperation im Speziellen. Die Berücksichtigung der vorgestellten Funktionsteilung entspricht einer Fahrzeugführung nach dem Paradigma der seriellen Assistenz, bei der der Mensch das System mit der Fahrzeugführung beauftragt, ohne direkt auf diese einzuwirken [Win06]. Für die Teleoperationssysteme gilt eine zusätzlich Nebenbedingung: Neben der Aufgabenteilung von Mensch und Maschine muss die Stabilität des geschlossenen Regelkreises unter Berücksichtigung der Kommuni-

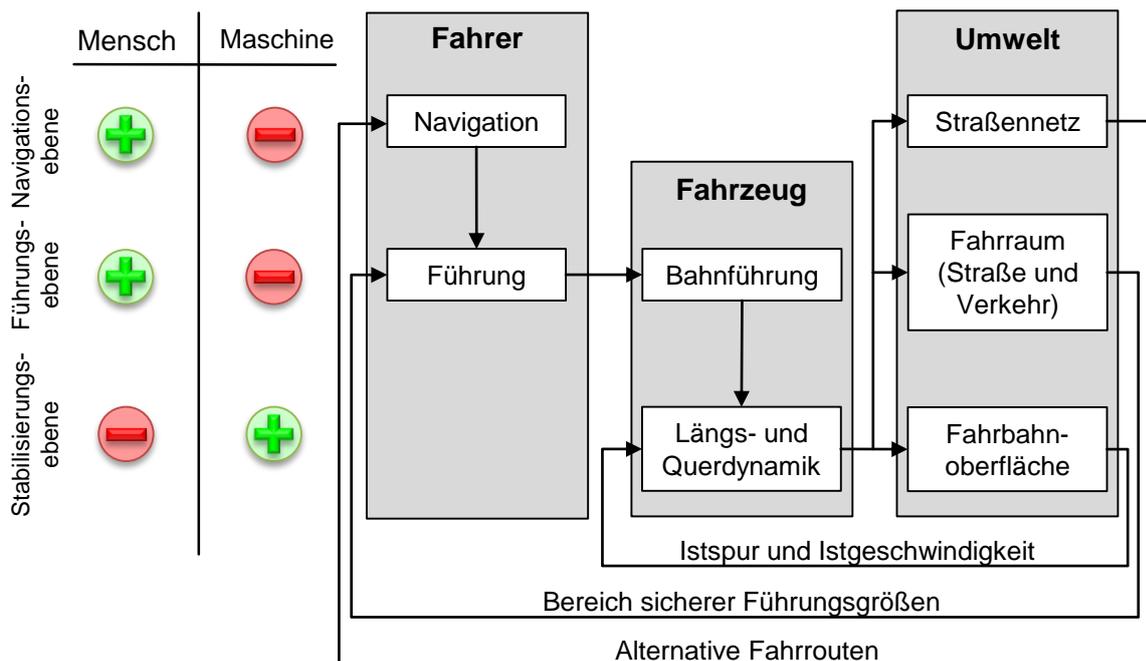


Abbildung 4.3: Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine zur Erfüllung der drei Ebenen der Fahraufgabe: Für die bestmögliche Arbeitsteilung ergibt sich ein adaptiertes Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe für eine Fahrzeugsteuerung auf Führungsebene [Win06, S. 5].

kationstotzeit zwischen Operator und Teleroboter beachtet werden.

In Kapitel 3.2.1 wurden bereits regelungstechnische Modellierungen des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises vorgestellt. Unter Berücksichtigung dieser Modellierungsansätze lassen sich Aussagen über die Stabilität des geschlossenen Regelkreises treffen. Als Stabilitätskriterium bietet sich das vereinfachte Nyquist-Kriterium für den offenen Regelkreis an. Das Nyquist-Kriterium ist relativ universell einsetzbar, wenn der Frequenzgang bestimmt werden kann. Es schließt Untersuchungen von Totzeitsystemen mit ein [Zac11, S. 174 ff.]. Als ein qualitatives Maß für die Stabilität dient die Phasenreserve, der Abstand zur negativen 180-Grad-Phase bei der Crossover-Frequenz [Zac11, S. 191 ff.]. Ziel des Fahrers ist es demnach, eine möglichst große Phasenreserve zu erhalten. Der Fahrer verfügt über eine große Adaptionfähigkeit bei der Ausführung der Fahraufgabe (Kapitel 3.2.1) und kann, je nach Fahrsituation, seine Crossover-Frequenz anpassen, von etwa 0,17 Hz bei normaler Geradeausfahrt auf einer Landstraße bis etwa 0,7 Hz bei einem Spurwechselmanöver. Die Phasenreserve schwankt hierbei je nach Charakteristik des Übertragungsverhaltens. Bei einer Landstraßenfahrt liegt die Phasenreserve im Bereich von 30 bis 45 Grad - und somit im Bereich optimaler Regelungsstrategien. Bei einem dynamischen Fahrspurwechsel sinkt der Wert auf etwa zehn Grad und rückt nahe an die Stabilitätsgrenze heran, allerdings ohne instabil zu werden [Hen04, S. 101]. Der Fahrer zeigt somit bei kritischen Fahrmanövern ein völlig anderes Frequenzverhalten als im normalen Fahrbetrieb [Hen04, S. 97 ff.], [Mit04, S. 659]. Um diese hohe Adaptionfähigkeit zu erzielen, kann der Fahrer seine Reaktionsdauer im Rahmen seiner Leistungsfähigkeit und in Abhängigkeit von der Fahrsituation sowie seiner Aufmerksamkeit variieren. Untersuchungen haben nachgewiesen, dass, je kritischer eine Situation wird, desto schneller reagiert der Fahrer darauf, wodurch die Verzögerungskonstante kleiner wird. Darüber hinaus kann der Fahrer seine eigene Totzeit durch eine verstärkte Aufmerksamkeit reduzieren. Beide Parameter lassen sich aber nur in engen Grenzen variieren [Mit91, S. 192 ff.].

#### 4.1 Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine

In der Teleoperation kommt zur Fahrertotzeit die spezifische Totzeit der Datenübertragung hinzu. Eine zusätzliche Totzeit  $T_t$  im Gesamtsystem führt zu einem steileren Abfall des Phasengangs. Die Übertragungsfunktion eines Totzeitglieds ist gegeben durch:

$$G_t(j\omega) = e^{-j\omega T_t} \quad (4.1)$$

Der Amplitudengang und der Phasengang ergeben sich dann wie folgt:

$$|G_t(j\omega)| = 1 \quad (4.2)$$

$$\phi_t(\omega) = -\omega T_t \quad (4.3)$$

Ein Totzeitglied hat nur Auswirkungen auf den Phasengang, der Amplitudengang bleibt unverändert. Der Phasengang erhält durch das Totzeitglied eine zusätzliche Phasendrehung proportional zur Kreisfrequenz  $\omega$  [Zac11, S. 182].

Wenn nur die kompensatorische Regelung betrachtet wird und die antizipatorische Steuerung unbeachtet bleibt [Hen04, S. 77], lassen sich Aussagen über die maximal zulässige Kommunikationstotzeit treffen. Dazu sei der Fahrer, wie von Henze [Hen04, S. 77] vorgeschlagen, als vereinfachtes Präzisionsmodell mit Vorausschau modelliert. Die Fahrzeugdynamik wird als lineares Einspurmodell abgebildet. Der geschlossene Regelkreis ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

Auf Basis der Modellierungsannahmen kann der Phasen- und Amplitudengang des offenen Regelkreises aus Fahrer- und Fahrzeugübertragungsfunktion berechnet werden, um abzuschätzen, ab welcher Kommunikationstotzeit der geschlossene Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis keine Phasenreserven mehr hat und instabil wird. Der Phasengang beim teleoperierten Fahren (TOF) mit Totzeit  $\phi_{o,TOF}(j\omega)$  resultiert aus Überlagerung der Totzeit mit dem Phasengang des offenen Regelkreises  $\phi_o(j\omega)$ :

$$\phi_{o,TOF}(j\omega) = \phi_o(j\omega) - \omega T_t \quad (4.4)$$

Das Bodediagramm für den offenen Regelkreis mit und ohne Totzeit ist exemplarisch in Abbildung 4.5 dargestellt.

Entsprechend des vereinfachten Nyquist-Kriteriums gilt bei der Stabilitätsbetrachtung für die

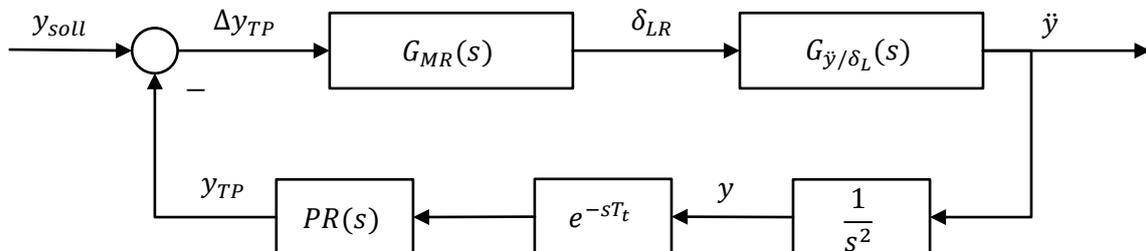


Abbildung 4.4: Abbildung des geschlossenen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises nach Henze [Hen04, S. 93] mit den Übertragungsfunktionen des Fahrers  $G_{MR}(s)$ , des Fahrzeugs  $G_{\ddot{y}/\delta_L}(s)$  und der Fahrervorausschau  $PR(s)$  auf die Querablage  $y$ . Die Teleoperation bedingt eine weitere Totzeit  $T_t$ .

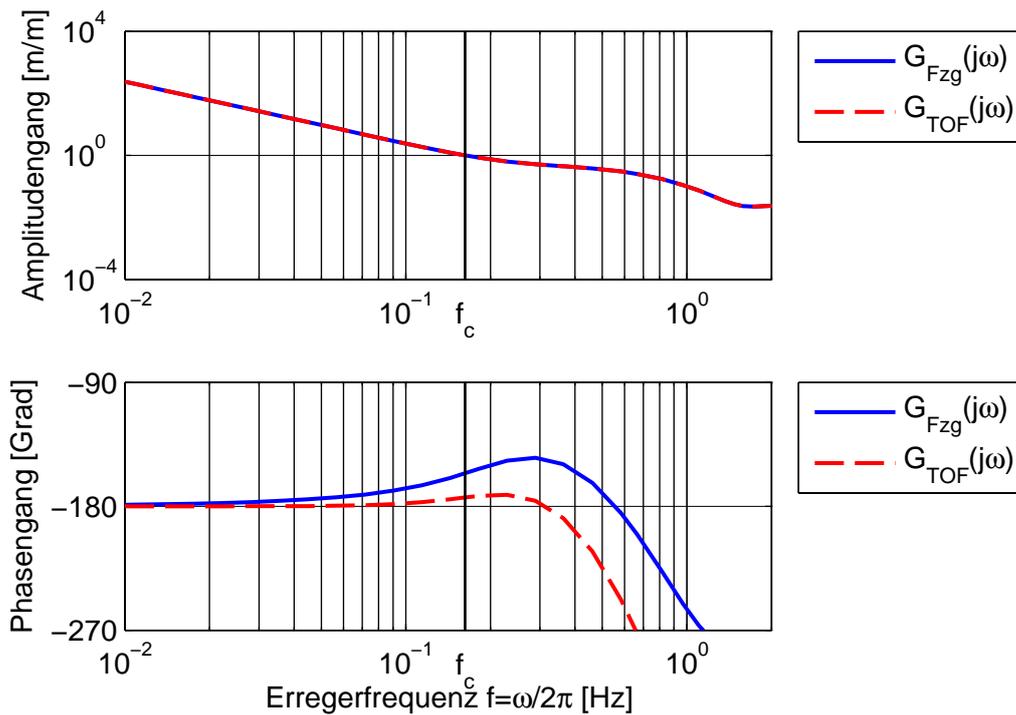


Abbildung 4.5: Bodediagramm eines exemplarischen offenen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises mit einer Crossover-Frequenz von  $f_c=0,16$  Hz. Bei einer angenommenen Zeitverzögerung von 300 ms reduziert sich die Phasenreserve bereits von 24 Grad auf 6 Grad.

Phasenreserve [Zac11, S. 192]:

$$\phi_{\text{rand}} = \pi + \phi_o(j\omega_c) \quad (4.5)$$

$$\phi_{\text{rand, TOF}} = \pi + \phi_{o, \text{TOF}}(j\omega_c) = \pi + \phi_o(j\omega_c) - \omega_c T_t = \phi_{\text{rand}} - \omega_c T_t \quad (4.6)$$

Daraus folgt, dass die Phasenreserve mit Totzeit der Phasenreserve ohne Totzeit vermindert um das Produkt aus Kreisfrequenz  $\omega_c$  und Totzeit  $T_t$  entspricht. Die maximal zulässige Totzeit folgt dann für eine Phasenreserve von null:

$$\phi_{\text{rand, TOF}} = \phi_{\text{rand}} - \omega_c T_t \stackrel{!}{=} 0 \quad (4.7)$$

$$T_{t, \text{max}} = \frac{\phi_{\text{rand}}}{\omega_c} \quad \text{mit} \quad \omega_c = 2\pi f_c \quad (4.8)$$

Dabei ist  $\phi_{\text{rand}}$  die Phasenreserve ohne Kommunikationstotzeit und  $f_c$  die Crossover-Frequenz. Für die Fahrer-Parameter, die Henze [Hen04, S. 106] in seiner Arbeit identifiziert hat, ergibt sich für ein Landstraßenszenario mit 80 km/h eine Crossover-Frequenz von 0,17 Hz und eine Phasenreserve von 40 Grad. Hiermit wäre eine maximale zusätzliche Totzeit von 654 ms zulässig. Für den Fall des dynamischen Fahrspurwechsels mit 80 km/h, bei dem der Fahrer bereits mit einer Crossover-Frequenz von 0,67 Hz agiert und nur noch acht Grad Phasenreserve hat [Hen04, S. 109], verbleiben nur noch 33 ms maximale Totzeit, damit die Regelstrecke noch stabil bleibt.

Damit liegen die maximalen Totzeiten in bestimmten Situationen deutlich unterhalb von üblichen Kommunikationstotzeiten bei der Teleoperation, die teilweise über 500 ms betragen. Der Operator kann zwar durch Variation seiner Fahrerparameter das Übertragungsverhalten verändern und somit eine zusätzliche Phasenreserve für die Kompensation der Kommu-

nikationstotzeit vorsehen. Bei kritischen Fahrmanövern, in denen die Crossover-Frequenz ansteigt und die Phasenreserve ohnehin sinkt [Hen04, S. 101], oder durch eine erhöhte Kommunikationstotzeit, kann die verbleibende Phasenreserve aber soweit reduziert werden, dass der Fahrer dies nicht mehr kompensieren kann. Der geschlossene Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis wird dann instabil.

Die Diskussion einer maximal zulässigen Totzeit für die Teleoperation soll hier aber nur als Abschätzung im Rahmen der Modellierungsannahmen getroffen werden. So ist der Geltungsbereich des quasilinearen Modells eingeschränkt, die linearen Annahmen gelten für die Realität nur bedingt. Insbesondere Stabilitätsaussagen sind mit Vorsicht abzuleiten, weil der Mensch in instabilen Situationen generell anders regelt als in stabilen. Es ist anzunehmen, dass der Mensch die Stabilität als Kriterium für das Variieren seiner Regelparameter verwendet und so ein stabiles Verhalten des geschlossenen Regelkreises einzustellen versucht. Die Stabilität wäre somit handlungsbestimmendes Element am Anfang der Kausalkette und kein Resultat des Verhaltens [Jür97, S. 116 f.]. Bei sehr hohen Zeitverzögerungen versucht der Mensch etwa den Regelanteil an der Stellgröße zu reduzieren und den Anteil der antizipatorischen Steuerung zu erhöhen. Dies führt im Extremfall zu Move-and-Wait-Strategien, bei denen der Mensch nur noch steuert, ohne zu regeln [She63].

Unter der gegebenen Nebenbedingung für die Teleoperation kann die Aussage über eine bestmögliche Aufteilung zwischen menschlicher Intelligenz und maschinellen Fähigkeiten bestehen bleiben. Von den getroffenen Aussagen zur Stabilität des geschlossenen Regelkreises ist nur die Stabilisierungsebene betroffen, weil der Mensch dabei im geschlossenen Regelkreis agiert. Auf der Führungsebene handelt der Mensch im offenen Regelkreis im Sinne einer Steuerung [Don09, S. 16]. Die Wahl einer Fahrzeugsteuerung auf Führungsebene für die Teleoperation ist somit nicht nur bezüglich der Mensch-Maschine-Kooperation geeignet, sondern verhindert gleichzeitig ein instabiles Regelverhalten des Menschen unter dem Einfluss der Zeitverzögerung. In Kapitel 3.2.2 wurde darüber hinaus bereits gezeigt, dass nicht nur die Instabilität ein Problem darstellt, sondern auch die Operator-Leistungsfähigkeit bei Stabilisierungsaufgaben unter dem Einfluss von Zeitverzögerungen schon lange vor einer möglichen Instabilität erheblich reduziert wird. Es empfiehlt sich daher besonders in der Teleoperation, eine entsprechende Funktionsteilung vorzunehmen.

## 4.2 Entwurf einer Benutzerschnittstelle bei geteilter Fahraufgabe

Für die vorgeschlagene Funktionsteilung der Fahraufgabe zwischen Führungsebene und Stabilisierungsebene wird in diesem Kapitel eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle vorgeschlagen. Dazu werden zunächst aktuelle Steuerungskonzepte hinsichtlich ihrer Eignung bewertet (Kapitel 4.2.1), bevor eine grundlegende Methodik vorgestellt wird (Kapitel 4.2.2), auf deren Basis in Kapitel 4.2.3 ein neuartiges Steuerungskonzept entworfen wird.

### 4.2.1 Bewertung bestehender Steuerungskonzepte

In Kapitel 3.3 sind verschiedene bestehende Konzepte zur Teleoperation und zur kooperativen Fahrzeugführung vorgestellt worden. Entsprechend der vorgeschlagenen Funktionsteilung der Fahraufgabe können die bisherigen Ansätze nun bezüglich ihrer Eignung zur

Teleoperation auf Führungsebene bewertet werden. Als wichtigste Kriterien gelten dabei das Beauftragen von Zielvorgaben durch den Menschen auf Fahrzeugführungsebene sowie die Robustheit gegenüber Zeitverzögerungen.

Der klassische Teleoperationsansatz zur direkten Fahrzeugführung scheidet als Steuerungskonzept für die ausgegebene Zielstellung aus, weil dieser nicht auf Führungsebene agiert und keine geeignete Funktionsteilung ermöglicht, wodurch nur bedingt von maschineller Intelligenz profitiert werden kann. Die direkte Teleoperation ist nur mit paralleler Assistenz erweiterbar. Dies führt zu den gleichen Problemen wie bei der klassischen parallelen Fahrerassistenz [Win06]: Der Operator muss unterschiedliche Systeme ohne einheitliche Schnittstelle überwachen und eine Rückübernahme beim Überschreiten funktionaler Grenzen durchführen (Kapitel 3.3.2). Zusätzlich bietet die direkte Teleoperation keine Robustheit gegenüber Zeitverzögerungen. Der Operator kann durch geeignete Methoden zwar unterstützt werden, das Fahrzeug sicher und stabil zu führen. Etwa durch ein Predictive Display, das die Fahrzeugbewegung um die Zeitverzögerung prädiziert und im Videobild darstellt [Chu13]. Eine stabile Fahrzeugführung kann aber nicht garantiert werden. Erst durch die Hinzunahme maschineller Intelligenz kann der Operator bei der Teleoperation entlastet werden. Ein semi-autonomes Steuerungskonzept kann langfristig durch eine weitere Steigerung des Automatisierungsgrades als Übergangstechnologie zum autonomen Fahren werden.

Wegpunktbasierte Verfahren, wie sie bei Weltraum-Rovern oder auch bei Geländefahrzeugen bereits eingesetzt wurden, erfüllen die Anforderungen an eine Mensch-Maschine-Kooperation auf Führungsebene sowie eine Robustheit gegenüber Zeitverzögerungen. Die bekannten Verfahren sind allerdings zu langsam, um im Straßenverkehr Anwendung zu finden. Die Mars-Rover werden beispielsweise mit maximal 140 m/h bewegt [Gro12, S. 28]. Kay beschreibt die durchschnittliche Geschwindigkeit ihres Ansatzes mit etwa drei Kilometer pro Stunde [Kay97a, S. 134]. Darüber hinaus existieren weitere Probleme der wegpunktbasiereten Verfahren. So eignen sich diese maßgeblich, wenn eine hochgenaue digitale Karte vorhanden ist und der Teleroboter sich in der Karte genau positionieren kann. Für unbemannte Flugobjekte ist dieses Steuerungskonzept daher weit verbreitet. Zumal im Flugbetrieb die Bahn zum Ansteuern der einzelnen Wegpunkte relativ flexibel ist. Bei der Fahrzeugführung muss allerdings nicht nur der Wegpunkt erreicht werden, sondern auch die Tangente der Straßenführung folgen. Die ausschließliche Angabe von Wegpunkten ist damit für die innerstädtische Fahrzeugführung zu unspezifisch. Die Tangente kann zwar mit Hilfe von Splines aus der Wegpunkt-Folge geschätzt werden [Kay97a, S. 55 ff.], dies kann aber zu einem schwingenden Trajektorienverlauf führen, weil der Operator nicht in der Lage sein wird, die Wegpunktfolge so exakt zu planen, dass ein gleichmäßiger Kurvenverlauf entsteht.

Das H-Mode-Konzept [Fle03] stellt ein kooperatives Fahrzeugkonzept auf Führungsebene dar. Dabei kann der Fahrer einen hohen Automatisierungsgrad nutzen und sich so teilweise aus der Fahrzeugführungsaufgabe zurückziehen. Je nach Situation kann der Fahrer die Steuerung aber auch komplett manuell übernehmen. Es wird aber keine diskrete Beauftragung der Automation realisiert. Der Fahrer muss auch in den hohen Automatisierungsgraden seine Steuervorgaben über eine direkte, kontinuierliche Schnittstelle vorgeben, etwa die Querablage für einen Spurwechsel. Letztendlich agiert der Fahrer damit weiterhin auf der Stabilisierungsebene [Sch12, S. 12]. Dadurch bleibt das Konzept abhängig von Zeitverzögerungen und der damit verbundenen Gefahr von Instabilitäten. Darüber hinaus gelten für die hochautomatisierten H-Mode-Funktionalitäten dieselben Einschränkungen wie für aktuelle Fahrerassistenzsysteme. Zur automatischen Querführung werden zumindest Fahrspurmarkierungen benötigt, teilweise genügt ein direktes Vorderfahrzeug zum Folgen. Weil

dies im betrachteten Szenario des innerstädtischen Verkehrs nicht permanent gegeben ist, erscheint H-Mode in der aktuellen Ausprägungsstufe zur innerstädtischen Fahrzeugteleoperation ungeeignet.

Conduct-by-Wire [Win05] stellt im Gegensatz zu H-Mode ein vollwertiges Steuerungskonzept auf Führungsebene dar. Hierbei werden diskrete Manövereingaben vom Fahrer getätigt; kontinuierliche Eingaben sind nicht notwendig. Beim Überschreiten der Systemgrenzen wird allerdings auf eine direkte Steuerung umgeschaltet. Conduct-by-Wire folgt dem Prinzip der seriellen Fahrerassistenz, bei dem der Fahrer die Maschine mit Teilmissionen beauftragt, die dann von der Maschine selbstständig ausgeführt werden. Die Verhaltensentscheidung verbleibt damit beim Fahrer, die Situationsanalyse und die Pfadplanung werden vom maschinellen Ansatz übernommen. Dies erfordert ein umfangreiches und zuverlässiges Szenenwissen sowie die Fusion mehrerer umgebungserfassender Sensoren mit digitalen Kartendaten und Infrastruktur-Kommunikation [Gey12]. Auch wenn das Conduct-by-Wire-Projekt teilweise innerstädtischen Szenarien mit Kreuzungssituationen adressiert, so ist dieses nach dem aktuellen Stand der Technik für die Automatisierung nicht darstellbar. Auch für Conduct-by-Wire wird zunächst eine Anwendung in Autobahnszenarien wegen der geringeren Komplexität angestrebt [Sch12, S. 3]. Ferner enthält der manöverbasierte Ansatz weitere kritische Pfade. So wird vorausgesetzt, dass sich die Fahrsituationen durch eine endliche Anzahl von diskreten Elementarmanövern immer lösen lassen. Für komplexe Umgebungen wie das städtische Umfeld ist dies aber noch zu belegen [Win06]. Dabei führt die Limitierung auf Elementarmanöver bereits bei einem einfachen Manöver wie dem Anhalten zu Problemen. Conduct-by-Wire schlägt zwar übliche Anhaltepunkte vor, wie etwa Haltelinien an einer Kreuzung. Es ist aber schwierig, über diskrete Manövereingaben einen Anhaltepunkt konkret festzulegen. Dies ist umso kritischer zu sehen, weil Anhalten im Straßenverkehr nicht selten ein zeitkritisches Manöver mit hohem Gefahrenpotential darstellt [Kau10].

Abschließend kann konstatiert werden, dass keines der bekannten Steuerungskonzepte die Anforderungen an eine innerstädtische Teleoperation von Straßenfahrzeugen erfüllt. Am ehesten bietet noch Conduct-by-Wire eine gegenüber Zeitverzögerungen robuste Steuerung auf Führungsebene. Der Automatisierungsgrad ist allerdings zu hoch für den innerstädtischen Verkehr.

### 4.2.2 Ableiten einer Shared-Control-Methodik zur Teleoperation auf Führungsebene

Im vorangegangenen Kapitel wurden bekannte Steuerungskonzepte hinsichtlich ihrer Eignung zu einer Fahrzeugführung auf Bahnführungsebene diskutiert. Es wurde dargestellt, dass keine dieser Steuerungsarten für die Teleoperation eines fahrerlosen Straßenfahrzeugs im Stadtverkehr geeignet ist, weil entweder die Konzepte nicht auf Straßenfahrzeuge übertragbar sind, keine durchgängige Steuerung auf der Führungsebene erfolgt oder der Automatisierungsgrad in einem innerstädtischen Szenario nicht darstellbar ist. Daher wird im Folgenden ein neues Steuerungskonzept für teleoperierte Straßenfahrzeug entworfen.

Aus der Robotik ist bereits eine allgemeine Methode zur Teilung einer Steuerungsaufgabe zwischen Mensch und Maschine bekannt, zu der sich auch die im vorigen Kapitel diskutierten Steuerungskonzepte mit Ausnahme der direkten Steuerung zuordnen lassen: Supervisory Control [She60]. Das Paradigma der Supervisory Control basiert auf der Analogie der

Mensch-Maschine-Interaktion mit der Kommunikation von einem Vorgesetzten mit seinen Mitarbeitern in einem Unternehmen. Hierbei gibt ein Vorgesetzter seinem Mitarbeiter Ziel-Anweisungen vor. Diese müssen verstanden und in Arbeitsaufträge übersetzt werden. Der Mitarbeiter führt dann die Tätigkeiten aus, sammelt dabei die notwendigen Informationen und Ergebnisse, die er wiederum dem Vorgesetzten in zusammengefasster Form vorstellt. Der Vorgesetzte trifft auf dieser Basis Entscheidungen über die weiteren Ziele. Das Verhältnis von Mensch und Automatisierung kann nun analog gesehen werden, wobei der Mensch dem Vorgesetzten und die Maschine einem Mitarbeiter mit eingeschränkten Fähigkeiten entspricht [She92, S. 1], [She02, S. 115]. Diese Analogie ist zum ersten Mal von Sheridan [She60] unter dem Begriff Metacontrol aufgegriffen worden. Erst später setzte sich die Bezeichnung Supervisory Control durch [Fer67], [She78], [She86]. Per Definition bedeutet Supervisory Control, dass der Mensch periodisch Anweisungen an eine Maschine übermittelt und kontinuierlich Informationen von dieser erhält. Die Maschine schließt mit Hilfe von Aktorik und Sensorik selbstständig einen Regelkreis zum Steuern des Prozesses. Der Prozess wird nicht vom Menschen direkt, sondern immer durch die Maschine gesteuert [She02, S. 115 f.].

Ein Supervisory-Control-System ist charakterisiert durch drei unabhängig geschlossene Regelkreise (Abbildung 4.6): Der Supervisor-Regelkreis wird durch den Menschen geschlossen. Dort werden die Zielvorgaben an den Teleoperator übermittelt. Der entfernte Regelkreis wird am Teleroboter durch maschinelle Intelligenz geschlossen. Dabei werden mit Hilfe autonomer Basisfunktionen die Ziele erreicht. Optional kann noch ein lokaler Regelkreis am Operatorarbeitsplatz geschlossen werden. Dieser ist unabhängig von der Teleoperator-Seite sowie von den Kommunikations-Totzeiten und kann den Operator bei der Prädiktion und Überwachung der Teleoperator-Reaktion unterstützen [Fer67, S. 82].

Die Mensch-Maschine-Kommunikation ist dadurch geprägt, dass der Operator die Gesamtaufgabe in eine Sequenz von Zwischenzielen zerlegen muss, die der Teleroboter selbstständig erreichen kann. Wie stark die Zwischenziele untergliedert werden müssen, hängt vom Grad der autonomen Basisfunktionen des Teleroboters ab [Fer67, S. 82]. Tzafestas [Tza07] differenziert Supervisory Control von Computer-Aided-Systemen. Im Falle der Computer-Unterstützung werden dem Operator lediglich Wahrnehmungs- oder Entscheidungshilfen zur Verfügung gestellt. Unter Supervisory Control gliedert sich im Gegensatz dazu jegliche Steuerung, die auf autonomem, sensor-basiertem Verhalten des Teleroboters beruht. Dabei

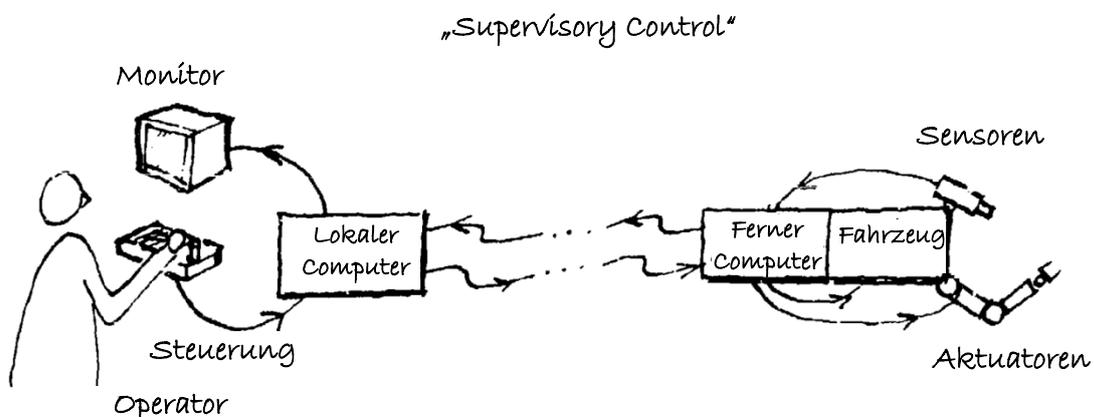


Abbildung 4.6: Allgemeine Definition eines Supervisory-Control-Ansatzes mit drei geschlossenen Regelkreisen: am Operator, über die Kommunikationsverbindung und am Teleroboter [She78, S. 1-2] (Übersetzung v. Verf.).

werden vom Operator mehr oder weniger komplexe Aufgaben an den Teleroboter übermittelt, der diese dann komplett selbstständig erfüllt. Die Teilaufgaben werden auf einem höheren Abstraktionsniveau als klassische Steuergrößen vorgegeben und beinhalten implizite Aspekte zur Aufgabenerfüllung [Tza07, S. 447 f.]. Es können unterschiedliche Ausprägungsstufen der Supervisory Control definiert werden - von Shared Control über Semiautonomous Control bis hin zu High-Level Supervisory Control. Dabei steigt das Abstraktionsniveau der übermittelten Zielgrößen an. So werden bei Shared Control Teilaufgaben, wie „bewege dich zu den Punkten A, B, C und umfahre Hindernisse“, definiert. Diese setzen zumindest bordeigene Sensorik und autonome Fähigkeiten zur Pfadplanung voraus. Die semi-autonome Teleoperation verwendet abstrahierte Ziele, wie „bewege dich zu Ort X“. Hierzu umfassen die Ziele größere Teilaspekte und setzen eine bordeigene Missionsplanung voraus. High-Level Supervisory Control beinhaltet dann nur noch begrenzte Interventionen durch den Menschen, der maßgeblich mit der Überwachungsaufgabe beschäftigt ist. Der Teleroboter ist größtenteils in der Lage, die gestellten Ziele komplett selbstständig zu erreichen [Tza07, S. 459 f.].

Der Mensch übernimmt als Supervisor fünf generische Funktionen. Er plant zunächst die Aufgabe und definiert, was zu tun ist. Im zweiten Schritt wird der Computer für die geplanten Ziele programmiert. Als drittes übernimmt der Mensch anschließend die Monitoring-Aufgabe und überwacht das Erreichen der spezifizierten Ziele. Sollte dabei ein Abweichen oder Fehlverhalten erkannt werden, muss der Mensch viertens intervenieren und etwa das Programm abbrechen, neue Ziele definieren oder auch die manuelle Kontrolle übernehmen. Die fünfte Funktion ist das Lernen aus den Erfahrungen und das Verbessern der Zielvorgaben [She92, S. 15 ff.]. Als Beispiel für ein per Supervisory Control gesteuertes System kann die moderne Flugzeugführung genannt werden. Ähnlich zur Fahrzeugführung werden die drei Ebenen Navigation, Führung und Stabilisierung unterschieden. Jede Ebene ist durch einen eigenen Regelkreis geschlossen. Der Autopilot übernimmt normalerweise alle drei Tätigkeiten, der Pilot überwacht dieses, kann aber jederzeit in jeden der drei Regelkreise eingreifen. In der Fahrzeugtechnik sind ein Automatikgetriebe oder ein Tempomat Beispiele für primitive Formen der Supervisory Control [She92, S. 15 ff.].

Der Vorteil von Supervisory-Control-Ansätzen in der Teleoperation ist die Robustheit gegenüber Kommunikationstotzeiten. Der Operator übergibt die Zielvorgaben und eventuell weitere Instruktionen, wie diese zu erfüllen sind, an den Teleroboter. Ab diesem Zeitpunkt wird der Operator aus dem geschlossenen Regelkreis zur Erfüllung der Zwischenziele quasi ausgeschlossen. Der Regelkreis wird lokal am Teleroboter geschlossen, die Ziele mittels bordeigener Autonomie erreicht. Somit verbleiben keine relevanten Zeitverzögerungen im Regelkreis, Instabilitäten können vermieden werden [She93] (Kapitel 3.2.2). Die Kommunikationstotzeit wird somit aus dem Teleoperations-Regelkreis eliminiert, verbleibt aber im Supervisor-Regelkreis. Sheridan [She93] definiert vier Voraussetzungen, unter denen die verbleibende Totzeit akzeptabel ist: Die Totzeit ist kleiner als die Ausführungsdauer zum Erfüllen der übergebenen Zwischenziele. Die spezifizierten Zwischenziele sollten ein nennenswerter Anteil am Gesamtziel sein. Die Umgebung des Teleroboters sollte prädizierbar sein und sich nur langsam verändern. Und schließlich muss die unterlagerte Autonomie am Teleroboter zuverlässig sein [She93].

Supervisory-Control-Ansätze haben gegenüber der rein autonomen Ausführung den Vorteil, dass die Kombination aus Mensch und Maschine im Allgemeinen leistungsstärker ist. Dadurch können komplexere Tätigkeiten ausgeführt werden. Gegenüber einer direkten Steuerung hat Supervisory Control ebenfalls Vorzüge: So können Aufgaben bei Zeitverzögerung schneller erledigt werden. Die autonomen Basis-Funktionen am Teleroboter können schneller auf plötzliche Ereignisse reagieren als es der Mensch über die zeitverzögerte Kommuni-

kation könnte. Dabei erreicht die Maschine eine höhere Präzision bei Bewegungen und Kräften als im manuellen Betrieb. Zusätzlich bietet der Supervisory-Control-Betrieb die Möglichkeit Aufgaben von der Maschine ausführen zu lassen, die keine permanente Überwachung durch den Menschen benötigen [She86].

Die autonomen Basisfunktionen können im Rahmen der Supervisory-Control-Methodik unterschiedliche Funktionen einnehmen (Abbildung 4.7). Grundsätzlich wird danach unterschieden, welchen Aspekt die Maschine bei der Bewältigung der Aufgabenlast übernimmt. Wenn sich Mensch und Maschine die Aufgabe aufteilen, spricht man vom Teilen (*Sharing*). Konträr dazu können beim Tauschen (*Trading*) der Mensch oder die Maschine abwechselnd die Aufgabe übernehmen [She92, S. 65].

Beim Tauschen kann die Maschine den Menschen entweder komplett ersetzen oder als Rückfallebene dienen. Dabei steuert entweder der Computer oder der Mensch den Prozess. Die Steuerung kann dann an den jeweils anderen abgegeben werden, oder dieser übernimmt sie. Kern der Systemauslegung ist damit der Übergabemechanismus, der festlegt, wann und wie die Aufgabe zum jeweils anderen übergeben werden muss [She92, S. 65 f.]. Der tauschende Ansatz wird verwendet, wenn ein Partner einen Teilaspekt einer Aufgabe machen muss und der andere Partner diese dann erst fortführen kann oder den ersten Teilaspekt überprüfen muss [She02, S. 64].

Der teilende Ansatz ist dadurch gekennzeichnet, dass Mensch und Maschine gleichzeitig unterschiedliche Aspekte des Systems steuern. Die Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine ist damit entscheidend bei der Systemauslegung [She92, S. 65 f.]. Dabei kann die Maschine die Leistungsfähigkeit des Menschen erweitern, so dass die Aufgabenleistung steigt. Alternativ kann die Maschine dem Menschen bei gleichbleibender Aufgabenleistung Last abnehmen. Dabei kann es sich um Teilaspekte derselben Aufgabe handeln, wobei die Maschine den Menschen unterstützt, etwa im Sinne eines Lane Keeping Supports bei der Fahraufgabe. Oder es handelt sich um gegensätzliche Aspekte einer Aufgabe, bei der der Mensch einige Freiheitsgrade bedient, die Maschine die übrigen, beispielsweise wenn der Mensch das Fahrzeug nur lenkt und ein Tempomat die Längsführung übernimmt [Ina03, S. 151]. Durch das gezielte Aufteilen der Aufgabenlast können die Ressourcen von Mensch und Maschine am besten genutzt werden [She02, S. 64]. Eine kooperative Steuerung ist eine Erweiterung dieser Idee, bei der Mensch und Maschine nicht konträr agieren, sondern sich gegenseitig unterstützen [Sch10b, S. 1026].

Auf die Fahrzeugführung übertragen, ist der Shared-Control-Ansatz mit einer seriellen Fah-

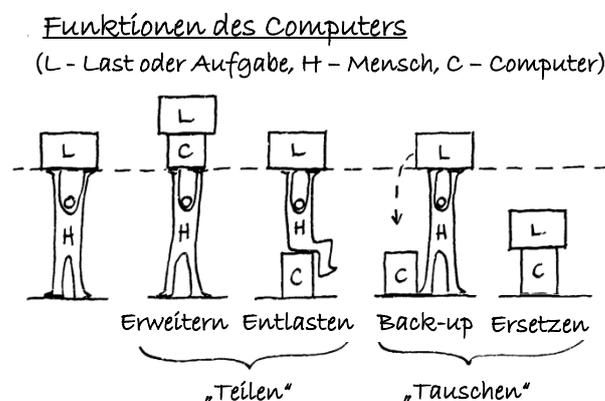


Abbildung 4.7: Der Computer kann im Rahmen der Supervisory Control entweder teilende oder tauschende Funktionen übernehmen [She78, S. 4-6] (Übersetzung v. Verf.).

rerassistenz vergleichbar. Trading Control entspricht der klassischen parallelen Fahrerassistenz [Win06].

Zur Lösung des vorgestellten Problems einer fahrerlosen innerstädtischen Fahrzeugteleoperation ist der Shared-Control-Ansatz am besten geeignet, weil dabei eine serielle Fahrerassistenz auf Fahrzeugführungsebene realisiert werden kann. Der Operator beauftragt das System mit dem Führen des Fahrzeugs durch Übergabe geeigneter Führungsgrößen. Die maschinelle Intelligenz im Fahrzeug schließt dort den Regelkreis und wirkt auf die übrigen Aspekte der Fahrzeugführung ein. Damit bleibt eine Unabhängigkeit gegenüber Zeitverzögerungen erhalten. Im Folgenden wird beschrieben, auf welcher Ebene der Operator seinen Fahrwunsch äußern kann und welche Anforderungen an die Kommunikationsschnittstelle gestellt werden.

### 4.2.3 Ableiten eines Abstraktionsniveaus für die Kommunikationsschnittstelle

In Kapitel 4.2.1 wird erörtert, dass eine Führungsvorgabe von Fahrmanövern im Sinne des Conduct-by-Wire-Ansatzes dem Prinzip der Shared Control entsprechen würde. Allerdings wurde bereits diskutiert, dass eine diskrete Manöverschnittstelle für den Anwendungsbereich Stadtverkehr aktuell nicht existent und eher ungeeignet ist. Zum einen fehlt ein Konzept für eine umfassende maschinelle Situationsanalyse, zum anderen ist die Beauftragung mit diskreten Manövern nicht immer zielführend und möglich. Auch die Vorgabe von Wegpunkten mit den vorgestellten Ansätzen aus der Teleoperation entspricht der Shared-Control-Methode, erfüllt aber nicht die Anforderungen an Eindeutigkeit und realisierbare Fahrzeuggeschwindigkeit. Auf Basis der bisherigen Diskussion zur MABA-MABA-Liste („men are better at“-„machines are better at“) der Fahrzeugführung lässt sich folgern, dass die Situationsanalyse und die Pfadplanung noch beim Menschen verbleiben sollten. Der Operator gibt dabei den Pfad, dem das Fahrzeug folgen soll, vor. Das Fahrzeug schließt den Regelkreis auf der Stabilisierungsebene selbstständig und fährt den vorgegebenen Pfad automatisch ab. In Kapitel 3.1.2 wurden bereits sehr robuste automatische Algorithmen vorgestellt, die in der Lage sind, einem vorab geplanten Kurs sehr exakt zu folgen.

Gemäß den Anforderungen an Supervisory-Control-Systeme muss die Kommunikationsschnittstelle zur Pfadvorgabe folgende Eigenschaften besitzen:

- Es muss eine Methodik gefunden werden, mit der der Mensch in der Lage ist, den Pfad intuitiv vorzugeben. Dabei können analoge oder symbolische Sprachelemente eingesetzt werden.
- Der vorgegebene Pfad muss eine gewisse Länge haben, damit die verbleibende Totzeit im Operator-Regelkreis vernachlässigbar wird. Dazu muss das Befahren des Pfadsegments eine längere Zeit in Anspruch nehmen als die Totzeit.
- Eine Pfadvorgabe spezifiziert lediglich den vom Fahrzeug zu befahrenen Weg, ohne eine zeitliche Vorgabe. Erst durch Vorgabe einer Geschwindigkeit befiehlt der Operator die komplette Fahrzeugführung. Die Kombination aus Pfadvorgabe und Geschwindigkeit resultiert in einer Trajektorienvorgabe für den zeitlichen Verlauf des Zustandsvektors der Fahrzeugdynamik.

Aus dem Stand der Technik (Kapitel 3.1.2) können drei Unterscheidungskriterien zur Trajektorienvorgabe abgeleitet werden: die Methode zur Generierung, der Zeitpunkt der Vorgabe

und die mathematische Beschreibung. Die Generierung kann synthetisch aus Basiselementen erfolgen [Keh07, S. 10] oder messtechnisch erfasst werden [Wal09, S. 37]. Die Vorgabe der Trajektorie kann bereits vor der Fahrt geplant werden, wenn die Fahrtroute exakt bekannt ist, wie etwa bei der messtechnischen Erfassung. Alternativ kann die Trajektorie erst während der Fahrt generiert [Kay97a, S. 27] oder dynamisch adaptiert und Neuberechnet werden [Keh07, S. 14 ff.]. Die mathematische Beschreibung kann durch diskrete Sollzustände [Wal09, S. 51 ff.] oder aus stetigen Kurven wie beispielsweise Splines [Keh07, S. 11] definiert werden.

Als Trajektorienvorgabe für teleoperierte Straßenfahrzeuge eignet sich ausschließlich die synthetische Vorgabe, weil der Fahrbahnverlauf innerstädtisch zu vielen kurzfristigen Änderungen wie etwa parkenden und haltenden Fahrzeugen oder Baustellen unterlegen ist. Zusätzlich ist der Aufwand einer hochpräzisen messtechnischen Erfassung nur für ausgewählte, statische Strecken wie zum Beispiel eine Rennstrecke sinnvoll. Eine a-priori Vorgabe der Trajektorie scheidet ebenfalls aufgrund der sich ändernden Umgebungsparameter aus. Zumindest eine dynamische Anpassung der Trajektorie muss zur Laufzeit möglich sein, um kurzfristig Hindernissen auszuweichen und auf einen geänderten Fahrbahnverlauf reagieren zu können. Weil mit der Vorgabe diskreter Wegpunkte die Geschwindigkeitsanforderungen an den innerstädtischen Verkehrs nicht erfüllt werden können (Kapitel 4.2.1), ist eine Definition der Trajektorie auf Basis mathematischer Kurvenbeschreibungen zu bevorzugen. Dies ist zudem wegen der geringeren zu übertragenen Datenmenge zwischen Operator und Teleroboter sinnvoll.

Aus der vorangegangenen Diskussion ergibt sich als geeignetes Shared-Control-Steuerungskonzept die Echtzeit-Vorgabe von parametrisierbaren Kurventypen zur Definition der Trajektorie. Klothoiden haben sich als geeignetster Basistyp herausgestellt. Klothoiden sind Kurven mit linearem Krümmungsverlauf über der Bahnkoordinate. Im Straßenbau werden Klothoiden als Übergangselement zwischen Gerade und Kurve eingesetzt. Ohne diese Elemente müsste der Fahrer vor Kurven sprunghaft einlenken. Weil dies nicht möglich ist, würde das Fahrzeug die vorgegebene Bahnkurve verlassen. Auf einer Klothoide kann der Fahrer hingegen bei der Kurveneinfahrt linear mit dem zeitlichen Verlauf einlenken [Mit04, S. 616 f.]. Die Krümmung einer Klothoide ist gegeben durch:

$$\kappa(l) = \frac{1}{R(l)} = C_0 + C_1 l \quad \text{mit } 0 \leq l \leq L \quad (4.9)$$

Die Krümmung einer Kurve ist dabei reziprok zum Krümmungsradius  $R$  und hängt entlang der Bahnkoordinate  $l$  nur von der Anfangskrümmung  $C_0$  sowie der Krümmungsänderung  $C_1$  ab [Cor04]. Zur Parametrierung einer krümmungsstetigen Folge von Klothoidensegmenten, wie sie für einen stetigen Verlauf des Lenkwinkels notwendig ist, ist somit nur die Variation von zwei Parametern notwendig, die Länge  $L$  und die Krümmungsänderung  $C_1$ . Die Anfangskrümmung  $C_0$  wird durch die Endkrümmung des vorherigen Segments vorgegeben. Bei einer Krümmungsänderung von null ergeben sich die Gerade ( $C_0 = 0$ ) und die Kurve mit konstantem Radius ( $C_0 \neq 0$ ) als Sonderformen der Klothoide. Der Operator wählt dann entsprechende Sequenzen von Krümmungsänderungen und Längen, wodurch der zu befahrende Pfad spezifiziert wird (Abbildung 4.8).

Dieses Vorgehen orientiert sich an Pfadplanungsalgorithmen autonomer Fahrzeuge. Dazu wird ein Set von Kreisbögen [Hun08] oder Klothoiden [Him11] abhängig vom aktuellen Fahrzustand vor dem Fahrzeug aufgespannt. Jede Kurve entspricht einem möglichen weiteren Verlauf der Fahrzeugtrajektorie und ist durch eine veränderte Lenkvorgabe zu erreichen. Unter Verwendung einer Umgebungserfassung, etwa mittels Lidarsensor, und einer Positi-

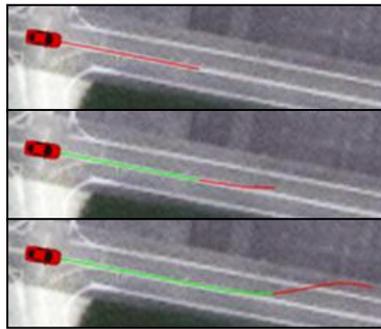


Abbildung 4.8: Vorgabe von drei Klothoidensegmenten mit unterschiedlicher Länge und Krümmungsänderung. Das nächste Segment wird krümmungsstetig an das vorherige angehängt.

onserfassung wird jede Kurve hinsichtlich der Zielerfüllungskriterien bewertet. Die Zielerfüllung wird durch ein Gütefunktional ermittelt, das etwa die Hindernisfreiheit oder die Güte beim Folgen von Wegpunkten berücksichtigt. Diejenige Kurve mit der besten Güte wird an die Fahrzeugregelung übergeben [Hun08]. Mit der Abtastfrequenz der umgebungserfassenden Sensorik von 10 Hz wird auch die Auswahl der Kurven immer wieder neu überprüft und der optimale Kreisbogen ausgewählt [Hun08]. Die Verwendung von Kreisbögen führt zu einem unstetigen Verlauf des Lenkwinkels beim Wechsel auf einen Kreisbogen anderer Krümmung. Diese Vorgabe kann der Lenkwinkelregler nicht umsetzen, wodurch eine Abweichung zur Solltrajektorie entsteht. Durch die Vorgabe von Klothoiden kann dieses Verhalten verbessert werden [Him11].

## 5 Vorgehen: Entwicklung einer trajektorienbasierten Teleoperation

Das folgende Kapitel beschreibt den Entwurfsprozess zur Realisierung eines trajektorienbasierten Steuerungskonzeptes. Dazu wird der Systementwurf nach dem Shared-Control-Ansatz zunächst im Allgemeinen beschrieben (Kapitel 5.1). In den folgenden Kapitel werden die Umsetzung der Fahrzeugführung (Kapitel 5.2), die Mensch-Maschine-Schnittstelle (Kapitel 5.3) und die Gesamtarchitektur des Versuchsträgers (Kapitel 5.4) dargestellt.

### 5.1 Systementwurf eines trajektorienbasierten Steuerungskonzeptes

Das trajektorienbasierte Steuerungskonzept beruht auf der Pfadvorgabe durch den Operator. Auf Basis einer aktuellen Live-Videoperspektive aus dem Fahrzeug kann der Operator die Parameter der Klothoiden im Realbild variieren. Dabei passt er Länge und Krümmungsänderung in der Art an, dass der Kurvenverlauf dem gewünschten Fahrschlauch entspricht. Um dies beurteilen zu können, werden die variierten Parameter perspektivisch im Videobild überlagert. Der Operator wählt dann ein geeignetes Parameterset der Klothoiden aus und übermittelt dieses über den zeitverzögerten Kommunikationskanal an die Fahrzeugführung. Diese generiert den zu befahrenen Pfad, indem das neue Segment an den bestehenden Pfad angehängt wird. Die Trajektoriengenerierung erfolgt auf Basis der Geschwindigkeitsvorgabe durch den Operator. Durch die Eingabe einer Segmentlänge und die Eingabefrequenz impliziert der Operator einen Geschwindigkeitswunsch. Ein Segment soll abgefahren sein, wenn das nächste gelegt wird. Dadurch wird im stationären Fall bei konstanter Länge und Eingabefrequenz neuer Segmente eine konstante Geschwindigkeit erreicht. Die Fahrzeugregelung gibt dann Stellgrößen für die Längs- und Querregelung vor, um der generierten Solltrajektorie möglichst exakt zu folgen. Entsprechend dem Prinzip der Funktionsteilung unterhalb der Führungsebene soll der Mensch das Fahrzeug führen - und nicht ein System. Daher fährt das Fahrzeug immer nur die Trajektorie ab, die vom Operator spezifiziert wurde. Werden keine neuen Eingaben getätigt, hält das Fahrzeug am Ende des Pfades an [Gna12a], [Gna12b].

Das beschriebene Steuerungskonzept basiert dabei auf zwei charakteristischen Elementen, der Zielgrößengenerierung durch den Operator und der automatischen Bahnregelung im Fahrzeug (Abbildung 5.1). Entsprechend der Methodik der Supervisory Control werden drei unabhängige Regelkreise geschlossen. Der Operator-Regelkreis wird durch Prädiktion der Eingaben des Operators lokal am Operatorarbeitsplatz geschlossen. Der Supervisor-Regelkreis wird durch die Übermittlung der Klothoidenparameter an die Fahrzeugführung sowie visuelles Feedback von den Kameras im Fahrzeug geschlossen. Der Teleoperator-Regelkreis wird lokal im Fahrzeug durch eine Positionsschätzung und Regelung auf die Solltrajektorie geschlossen.

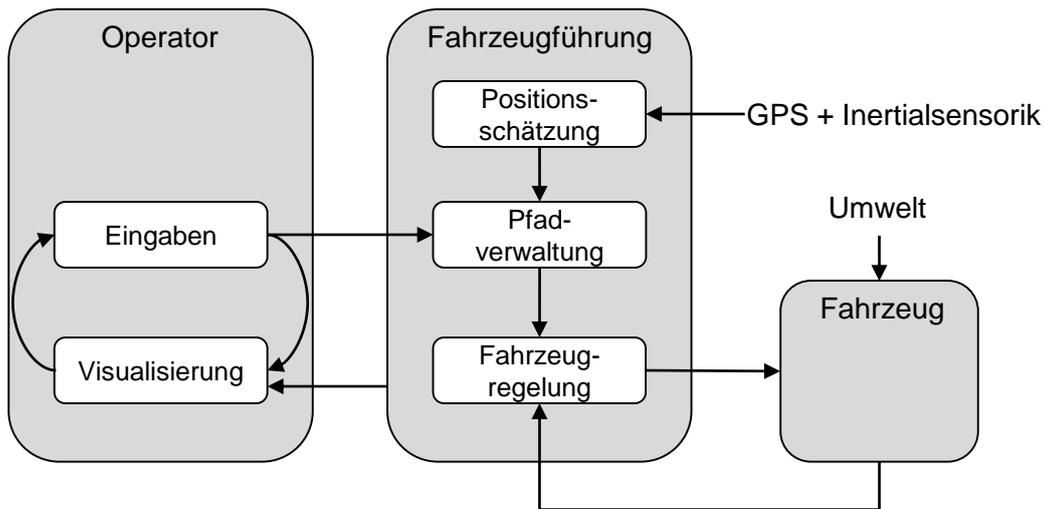


Abbildung 5.1: Entwurf eines Steuerungskonzeptes auf Basis der Shared Control.

## 5.2 Fahrzeugführung

Das System zur automatischen Fahrzeugführung unterteilt sich in die Pfadverwaltung (Kapitel 5.2.1) und die Fahrzeugregelung, die nach Quer- (Kapitel 5.2.2) und Längsführung (Kapitel 5.2.3) unterschieden wird.

### 5.2.1 Pfadverwaltung

Die Aufgabe der Pfadverwaltung besteht darin, die vom Operator an das Fahrzeug übermittelten Segmente in geeigneter Weise mit dem bestehenden Pfad zu kombinieren und zu verwalten. Die Pfadverwaltung gibt die Sollgrößen für die Längs- und Querregelung aus. Für eine flexible Verwendung ist es bei der Verwaltung im Gegensatz zur Übertragung der Kurventypen sinnvoll, eine Diskretisierung der Wegpunkte vorzunehmen. Durch Diskretisierung und lineare Interpolation bleibt der Rechenaufwand zur Laufzeit deterministisch. Überdies könnte zwischen verschiedenen Beschreibungsformen der Kurventypen gewechselt werden.

Bei der Implementierung wird die Diskretisierung der Kurven von der Verwaltung der Sollbahn getrennt. Dadurch kann die Generierung der neuen diskreten Wegpunkte aus den parametrisierten Kurvenfunktionen mit hoher Genauigkeit sowie die Ableitung der Referenzwerte für die Regelung auf Basis der bereits diskretisierten Bahnpunkte mit hoher Wiederholrate erfolgen.

Im Gegensatz zu Anwendungen zum Befahren von bekannten Strecken, wie etwa geschlossenen Rennkursen, ist bei der trajektorienbasierten Steuerung die Länge des Pfades vorher nicht bekannt. Zusätzlich sind bereits abgefahrte Wegpunkte für die Fahrzeugführung nicht weiter relevant. Mit Hinblick auf ein effizientes Speichermanagement und begrenzt zur Verfügung stehenden Arbeitsspeicher auf der verwendeten Rapid-Prototyping-Hardware wird ein Ringpuffer zur Pfadverwaltung verwendet. Ringpuffer allozieren einen konstanten Speicherbereich, der zyklisch beschrieben wird. Die Rechenoperationen sind sehr effizient, weil nur ein Wert geändert werden muss, wenn ein neues Sample hinzukommt [Smi97, S. 507].

### 5.2.1.1 Generierung diskretisierter Wegpunkte

Die diskretisierten Wegpunkte müssen die vorgegebene Bahn vollständig beschreiben. Für die Berechnung der Regelabweichungen sind insbesondere die Sollposition, die Fahrtrichtung und der befahrene Kurvenradius relevant [Wal09, S. 51], [Keh07, S. 11]. Die Sollposition wird in einem ebenen kartesischen Koordinatensystem erfasst. Dieses Koordinatensystem ist ortsfest und bildet die Koordinaten des Erdellipsoiden auf einer tangentialen Ebene zum Erdmittelpunkt ab. Der Headingwinkel verläuft von Norden her positiv im Uhrzeigersinn. Dies entspricht einem klassischen North-East-Down-System aus der Navigationstechnik [Wen11, S. 29](Abbildung 5.2). Bei der Erfassung der Sollposition kann die Höheninformation bei der Straßennavigation vernachlässigt werden [Keh07, S. 27], [Wal09, S. 51]. Als Referenzposition sowohl für Sollpositionen als auch für die Istposition wird grundsätzlich der Fahrzeugschwerpunkt verwendet.

Ausgehend von dem Kurventyp Klothoide ergeben sich die Sollkoordinaten eines neuen Pfadsegments mit Krümmungsänderung  $C_1$  und Länge  $L$  zu [Cor04]

$$x(l) = x_0 + \int_0^l \sin \Psi(\tau) d\tau \quad \text{mit } 0 \leq l \leq L \quad (5.1)$$

$$y(l) = y_0 + \int_0^l \cos \Psi(\tau) d\tau \quad \text{mit } 0 \leq l \leq L \quad (5.2)$$

$$\Psi(l) = \Psi_0 + C_0 l + \frac{1}{2} C_1 l^2 \quad (5.3)$$

$$\kappa(l) = C_0 + C_1 l \quad (5.4)$$

Hierin beschreiben  $x, y$  die kartesischen Koordinaten,  $\Psi$  den Kurswinkel und  $\kappa$  die Krümmung jeweils an der Bahnkoordinate  $l$  eines Segments. Als Anfangswerte  $(x_0, y_0, \Psi_0, C_0)$  werden die Zustände des letzten Wegpunktes verwendet. Dies garantiert einen stetigen Krümmungsverlauf. Zur Berechnung der kartesischen Koordinaten einer Klothoide sind die sogenannten *Fresnelschen Integrale* zu lösen. Dies ist nur numerisch möglich [Hen79]. Dazu wird die Länge  $L$  in  $N$  äquidistante Stützstellen  $l_i$  zerlegt. Die Anzahl der diskretisierten Wegpunkte pro Meter wird dabei konstant belassen, um den Fehler bei der späteren Interpolation zu beschränken.

Da die Wegpunkt-Erzeugung von der Pfadverwaltung funktional getrennt ist, wird vor Übernahme eines Segments eine Konsistenzprüfung durchgeführt. Hierzu werden die obigen Zustände des ersten Punktes des neuen Segments mit dem letzten Wegpunkt des vorher-

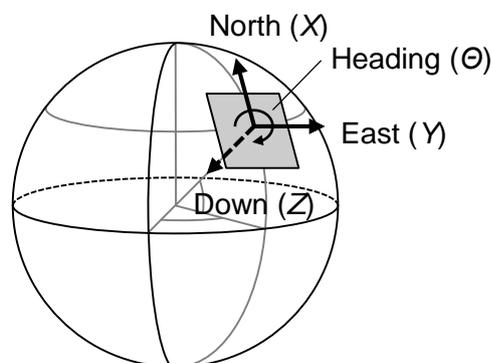


Abbildung 5.2: Alle positionsbezogenen Daten werden auf ein kartesisches Koordinatensystem bezogen.

rigen Segments abgeglichen. Bei Übereinstimmung wird das neue Segment übernommen. Jedem neuen Wegpunkt wird eine eindeutige Pfadkoordinate zugewiesen. Diese verhindert Singularitäten bei der Referenzierung. Wenn der Pfad sich überkreuzt oder parallel verläuft, wäre keine eindeutige Positionsbestimmung möglich. Die Pfadkoordinate des  $i$ -ten neuen Wegpunkts  $l_{\text{Wegpunkt},i}$  ergibt sich aus der bisherigen Pfadlänge  $L_{\text{Pfad}}$  und der Bahnkoordinate  $l_i$

$$l_{\text{Pfad},i} = l_i + L_{\text{Pfad}} \quad (5.5)$$

Auf Basis der Pfad-Zustände können Sollgrößen für die Längsdynamik berechnet werden. Da der verwaltete Pfad per Definition bis zum Ende abgefahren werden soll und zumindest temporär vollständig bekannt ist, ist es möglich, den Geschwindigkeitsverlauf für den gesamten Pfad vorzugeben. Hierfür kann etwa ein Algorithmus zur Berechnung der maximalen Geschwindigkeit auf einer Rennstrecke unter Berücksichtigung maximaler Längs- und Querschleunigung verwendet werden [Wal09, S. 14 ff.]. Dabei wird zunächst durch eine parametrierbare maximale Querschleunigung die maximale Kurvengeschwindigkeit bestimmt. Diese berücksichtigt allerdings noch nicht das Beschleunigungsvermögen des Fahrzeugs respektive die Haftreibungsgrenzen. Auf Basis einer Betrachtung am Kammschen Kreis wird dann in einem Vorwärts-Rückwärts-Algorithmus das erzeugte Geschwindigkeitsprofil an die maximale Längsbeschleunigung und Längsverzögerung angepasst [Wal09, S. 24 ff.].

Als Randbedingungen wird festgelegt, dass das Fahrzeug am Anfang des Pfades steht. Am Ende des Pfades soll es ebenfalls wieder zum Stehen kommen. Die Neuberechnung des Geschwindigkeitsprofils ist bei einer neuen Segmenteingabe nur für den Bereich des Pfades notwendig, der hinter dem Bremspunkt liegt, ab dem in den Stand gebremst wird.

Aus dem Geschwindigkeitsprofil können je Wegpunkt eine maximale Geschwindigkeit  $v_{\text{max}}$  und eine maximale Beschleunigung  $a_{\text{max}}$  bestimmt werden.

In Kombination mit den bisherigen Zustandsgrößen ergibt sich folgender Zustandsvektor für einen diskretisierten Wegpunkt:

$$\mathbf{p}_{\text{Wegpunkt}} = [x \quad y \quad \Psi \quad \kappa \quad l_{\text{Pfad}} \quad v_{\text{max}} \quad a_{\text{max}}]^T \quad (5.6)$$

Mit einer Initialisierungsanforderung kann der Operator den Pfad zurücksetzen. Die Anfangswerte werden dann durch die aktuelle Fahrzeugposition vorgegeben, die Pfadkoordinate sowie die maximale Geschwindigkeit auf null gesetzt.

### 5.2.1.2 Positionsmessung und Referenzierung

Die Positionsschätzung erfolgt mittels eines integrierten Navigationssystems, das die Informationen einer Inertialmessplattform mit einem Satellitennavigationssystem kombiniert. Aus der Verwendung dieser komplementären Navigationssensoren resultiert eine langzeitgenaue Lageschätzung mit hoher Abtastfrequenz [Wen11, S. 189 ff.]. Im Versuchsträger kommt eine GPS-gestützte Inertialmessplattform der Firma Oxford Technical Solutions zum Einsatz. Das System arbeitet mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz, die ausreichend für die Regelungsaufgaben bei der Fahrzeugführung ist. Die Ausgangsdaten sind dabei bereits Kalman-gefiltert und werden mit einer geringen Latenz von 3,5 Millisekunden ausgegeben. Das verwendete System vom Typ RT3003 verfügt über zwei Antennen zur direkten Messung der Ausrichtung des Fahrzeugs. Die maximale Positionsgenauigkeit erreicht in Kombination

mit Differential GPS und zusätzlicher Auswertung der GPS-Trägerphasen etwa zwei Zentimeter [Oxf11, S. 20].

Für die Berechnung der Regelfehler muss ein Zusammenhang zwischen aktueller Position des Fahrzeugs und der Sollbahn hergestellt werden. Dazu ist es notwendig, denjenigen Punkt auf der Sollbahn zu bestimmen, dessen Verbindungslinie mit dem Fahrzeugschwerpunkt orthogonal zum Kurswinkel steht. Waldmann [Wal09] hat dazu ein recheneffizientes Verfahren entwickelt, das bei einem diskretisierten Pfad zu einer robusten Lösung führt. Dazu wird unter der Annahme eines konstanten Sollkurswinkels und konstanter Fahrzeugdynamik, ausgehend von der letzten bekannten Referenzposition, eine prädiizierte Referenzposition für den aktuellen Zeitschritt berechnet. Weil die getroffenen Annahmen besonders in engen Kurven nicht aufrechterhalten werden können, wird die Orthogonalität von Position und geschätzter Referenzposition überprüft. Ist der Schätzfehler oberhalb eines Schwellwertes, wird von der geschätzten Referenzposition aus mit gleichbleibendem Verfahren weiter iteriert. Waldmann gibt an, dass das Verfahren nach spätestens einer weiteren Iteration konvergiert [Wal09, S. 54 ff.].

Als Adaption des von Waldmann beschriebenen Algorithmus wird eine Erweiterung beim Überschreiten des Pfades ergänzt. Aufgrund von äußeren Störeinflüssen oder fehlerhafter Positionsschätzung ist es denkbar, dass die Fahrzeugregelung nicht vor dem Ende des Pfades zum Stehen kommt. Dennoch müssen valide Referenzwerte an die Fahrzeugregelung übergeben werden. Dies gelingt mit der Annahme einer konstant gekrümmten Verlängerung am Anfang und Ende des Pfades. Ist eine Referenzposition gefunden, können die weiteren Zustandsgrößen des Pfades durch Interpolation zwischen den zwei benachbarten Wegpunkten erzeugt werden.

### 5.2.1.3 Schnittstelle zum Operator

Der Operator interagiert maßgeblich über zwei Steuerungsnachrichten mit der Pfadverwaltung. Zum einen können Segmente durch Setzen einer Krümmungsänderung sowie Segmentlänge vorgegeben werden. Und zum anderen kann eine Initialisierungsaufforderung zum Zurücksetzen des Pfades gesendet werden. Die Einhaltung der Reihenfolge der einzelnen Segmentvorgaben ist zwingend notwendig, weil die Segmente nur relativ zueinander spezifiziert werden. Die Integrität des Pfades kann außerdem durch unbeabsichtigte Neuinitialisierungen gestört werden. Die UDP-basierte Netzwerkkommunikation zwischen Operator und Fahrzeug via Internet ist potentiell anfällig für Kommunikationsfehler und garantiert keine Reihenfolge der Nachrichten [Mei12, S. 650 f.].

Um die korrekte Reihenfolge einzuhalten und Übertragungsfehler zu vermeiden, wird ein Handshake-Verfahren entwickelt [Bäh10, S. 237]. Dabei erhält jede Nachricht eine fortlaufende Segment-Kennung (Segment Identifier). Die Pfadverwaltung beantwortet jede Anfrage mit einer Bestätigungs-Nachricht, die aktuelle Statuswerte und die nächste zu verwendende Kennung beinhaltet. Das Operator-Interface muss dann die nächste Anfrage mit genau dieser Kennung verschicken. Anfragen an die Pfadverwaltung mit falscher Kennung werden verworfen. Es werden getrennte Kennungsschlüssel für Segmentvorgaben und Initialisierungsanfragen vorgehalten. Bei einer Initialisierung wird sowohl eine Bestätigung über die nächste Initialisierungskennung als auch über den nächsten Segment Identifier verschickt.

### 5.2.2 Querführung

Die Bahnfolgeregelung geschieht mittels eines Querregelungsansatzes zum automatischen Fahren entlang vorgegebener Bahnen. In Kapitel 3.1.2 wurden bereits einige Ansätze vorgestellt, die bis in den fahrdynamischen Grenzbereich robust anwendbar sind. Der in dieser Arbeit verwendete Querführungsansatz orientiert sich an Waldmanns [Wal09] Ansatz zum Fahren entlang der vorgegebenen Sicherheitslinie auf einer Rennstrecke. Dabei wird die Querführung kombiniert aus einem Zustandsregler und einer instationären Vorsteuerung. Die Vorsteuerung ermöglicht es, vorab Wissen über den weiteren Verlauf der Sollbahn vorzugeben. Dies ist im Besonderen möglich, weil die abzufahrende Bahn soweit vollständig bekannt ist [Wal09, S. 65 f.].

Die Modellierung der Querdynamik basiert auf einem linearen Einspurmodell. Insbesondere für den in dieser Arbeit vorliegenden niederdynamischen Fahrbereich ist der Definitionsbereich des Einspurmodells bis  $4 \text{ m/s}^2$  [Mit04, S. 560] ausreichend. Darüber hinaus konnten andere Arbeiten keine Vorteile einer nichtlinearen Modellierung belegen [Söh01, S. 144 ff.]. Die Modellierung des Einspurmodells wird um die kinematischen Zusammenhänge mit der Sollbahn erweitert (Abbildung 5.3). Die Änderung der Querablage von der Sollbahn wird bestimmt von der Geschwindigkeit  $v$  sowie durch den Winkelfehler zwischen Fahrzeugausrichtung  $\psi$  und Sollkurswinkel  $\Psi_{ref}$  und den Schwimmwinkel  $\beta$  [Wal09, S. 69]:

$$\dot{y}_q = \theta v + \beta v \quad \text{mit } \theta = \psi - \Psi_{ref} \quad (5.7)$$

Durch Differentiation ergibt sich für die Änderung des Headingwinkelfehlers [Wal09, S. 69]:

$$\dot{\theta} = \dot{\psi} - \kappa_{ref} v \quad (5.8)$$

Das erweiterte Einspurmodell erhält zusätzlich zur Gierrate  $\dot{\psi}$  und Schwimmwinkel  $\beta$  die Zustände Headingwinkelfehler  $\theta$  und Querablage  $y_q$ . Die Krümmung  $\kappa_{ref}$  wird als Störgröße modelliert [Wal09, S. 70]. Auf eine Berücksichtigung der Querbeschleunigung wie bei Waldmann wird aufgrund des niederdynamischen Fahrbereichs verzichtet. Für die Zustands-

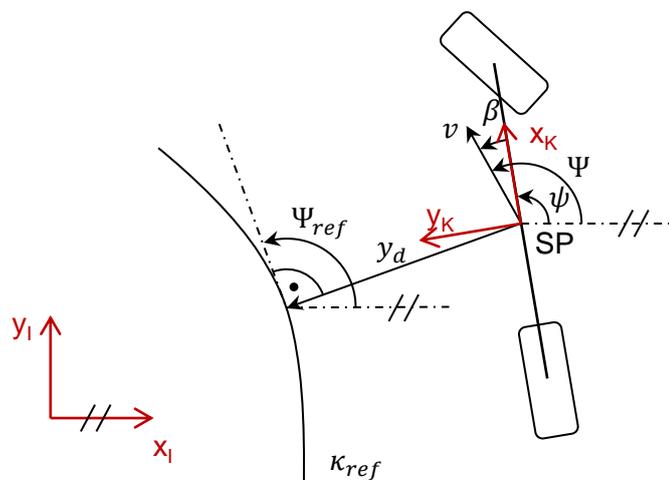


Abbildung 5.3: Das Einspurmodell wird um die kinematischen Zusammenhänge in Bezug auf die Sollbahn ergänzt [Wal09, S. 68].

raumdarstellung folgt dann:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{E}\mathbf{s} \text{ mit } \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \psi \\ \beta \\ \theta \\ y_q \end{bmatrix}, \mathbf{u} = \delta \text{ und } \mathbf{s} = \kappa \quad (5.9)$$

Die Systemmatrizen sind gegeben durch [Wal09, S. 70]:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{c_v l_v^2 + c_h l_h^2}{J_{zz} v} & -\frac{c_v l_v - c_h l_h}{J_{zz}} & 0 & 0 \\ -\frac{c_v l_v - c_h l_h}{m v^2} - 1 & -\frac{c_v + c_h}{m v} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v & v & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{c_v l_v}{J_{zz}} \\ \frac{c_v}{m v} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -v \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Als Ausgangsgrößen werden die Querablage  $y_q$  und der Headingwinkelfehler  $\theta$  gemessen:

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta \\ y_q \end{bmatrix} \text{ mit } \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Waldmann definiert dann ein Optimierungsproblem, das den Regelfehler des diskretisierten Modellverhaltens bezogen auf eine vorgegebene Trajektorie  $\bar{\mathbf{y}}$  unter Berücksichtigung des Stellaufwands  $\mathbf{u}$  entlang eines finiten Horizonts  $K$  minimiert [Wal09, S. 71]:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (\mathbf{y}_k - \bar{\mathbf{y}}_k)^T \mathbf{Q}_k (\mathbf{y}_k - \bar{\mathbf{y}}_k) + \mathbf{u}_k^T \mathbf{S}_k \mathbf{u}_k \quad (5.12)$$

Die Lösung mittels dynamischer Programmierung führt auf ein optimales Regelgesetz mit zeitvariantem Regler und einer instationären Vorsteuerung der Störgrößen  $\mathbf{s}_k$  und der Trajektorie  $\bar{\mathbf{y}}_k$  [Wal09, S. 71]:

$$\mathbf{u}_{k-1}^{\text{opt}} = -\mathbf{K}_{k-1} \mathbf{x}_{k-1} - \mathbf{P}_{k-1}^{k-1} \mathbf{s}_{k-1} + \mathbf{V}_{k-1}^{k-1} \bar{\mathbf{y}}_{k-1} \cdots - \mathbf{P}_{k-1}^K \mathbf{s}_K + \mathbf{V}_{k-1}^K \bar{\mathbf{y}}_K \quad (5.13)$$

Die Linearisierung der Fahrdynamik setzt eine konstante Geschwindigkeit voraus, von der auch Regler- und Vorsteuer-Matrizen abhängen. Um den vollständigen Anwendungsbereich der Querregelung abzudecken, werden die Matrizen für diskrete Geschwindigkeitsstützstellen berechnet. Für die aktuelle Geschwindigkeit werden die Verstärkungsmatrizen dann zwischen den Stützstellen linear interpoliert [Wal09, S. 83].

Das Vorsteuern über dem finiten Horizont setzt entsprechendes Wissen über die Vorsteuergrößen voraus. Die Vorsteuerung der als Störgröße  $\mathbf{s}$  modellierten Krümmung  $\kappa$  ergibt sich direkt aus dem Pfad. Für das Vorsteuern der Trajektorie  $\bar{\mathbf{y}}$  müssen die notwendigen Sollgrößen für Headingwinkelfehler  $\theta$  und Querablage  $y_q$  bestimmt werden. Die Sollquerablage ergibt sich zu null, solange das Fahrzeug dem Pfad exakt folgen soll. Der Headingwinkelfehler nimmt bei Kreisfahrt von null verschiedene Werte an. Als Führungsgrößen eignet sich hierbei der Wert für die stationäre Kreisfahrt [Brü94, S. 63]. Aus der Betrachtung am Einspurmodell ergibt sich für den Headingwinkelfehler im stationären Fall der negative Schwimmwinkel (aus Formel 5.7). Der Schwimmwinkel bei stationärer Kreisfahrt folgt zu [Sch09b, S. 250]:

$$\beta_{\text{stat.}} = \kappa \left( l_h - \frac{m v^2 l_v}{c_h l} \right) = -\theta_{\text{soll}} \quad (5.14)$$

Die Querregelung und Vorsteuerung ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Das modellierte System verwendet als Stellgröße den Lenkwinkel am Rad. Dies empfiehlt sich bei der Modellierung, weil dadurch ein universeller Ansatz dargestellt wird. Die Lenkinematik kann dann in geeigneter Weise für die vorhandene Aktorik angepasst werden [Keh07, S. 52]. In der vorliegenden Arbeit wird der Lenkaktor mittels Lenkrate bedient. Ein unterlagerter PID-Lenkradwinkelregler stellt den Solllenkwinkel ein.

Abbildung 5.5 zeigt das Gesamtsystem zur Querführung. Der Operator übermittelt der Pfadverwaltung die Segmente durch die Vorgabe von Länge  $L$  und Krümmungsänderung  $C_1$ . Zusätzlich kann der Operator den vorgesteuerten Querversatz  $y_{q,off}$  auf die Trajektorie vorgeben. Dadurch kann er die Eingabe bereits bestätigter Segmente korrigieren, etwa wenn der Pfad zu nah an den Fahrbahnrand gelegt wurde.

### 5.2.3 Längsführung

Das Konzept der Längsregelung muss einem vorgegebenen Geschwindigkeitsverlauf robust folgen. Im Gegensatz zur Querführung reicht dabei aufgrund der geringeren Dynamik ein klassischer PID-Regler in einer Kaskadenstruktur. Auf unterster Ebene wird durch eine Beschleunigungsregelung ein Sollmotormoment vorgeben. Es ist vorteilhaft, die Fahrwiderstände durch eine nichtlineare Modellierung vorzusteuern. Oberhalb der Beschleunigungsregelung befindet sich eine Kaskade zum Nachfahren eines vorgegebenen Geschwindigkeitsverlaufs [Kra12, S. 124 ff.].

Das beschriebene Längsführungskonzept würde bereits ausreichen, um einen vorgegebenen Pfad möglichst schnell abzufahren [Wal09, S. 86 f.]. Die Pfadverwaltung erstellt bereits die benötigten Sollgrößen. Bei der trajektorienbasierten Steuerung ist der Pfad aber immer nur abschnittsweise bekannt bzw. wird zyklisch vom Operator erweitert. Damit geht eine zyklisch schwankende Geschwindigkeitsvorgabe einher, weil sich das Fahrzeug dem Pfad nähert und dann maximal verzögert, um dort zum Stehen zu kommen. Wenn der Operator den Pfad wieder verlängert, steigt die Sollgeschwindigkeitsvorgabe wieder an. Die Anforderungen an das entworfene Steuerungskonzept sehen urbane Einsatzszenarien vor. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass eine möglichst gleichmäßige und

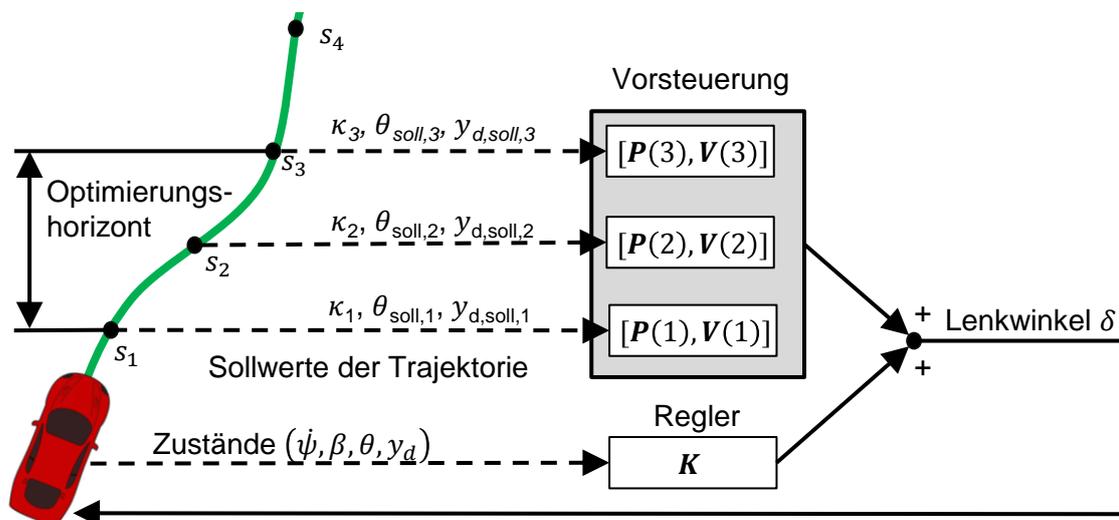


Abbildung 5.4: Querführung als Kombination aus Zustandsregelung und Vorsteuerung (eigene Darstellung nach [Wal09, S. 83]).

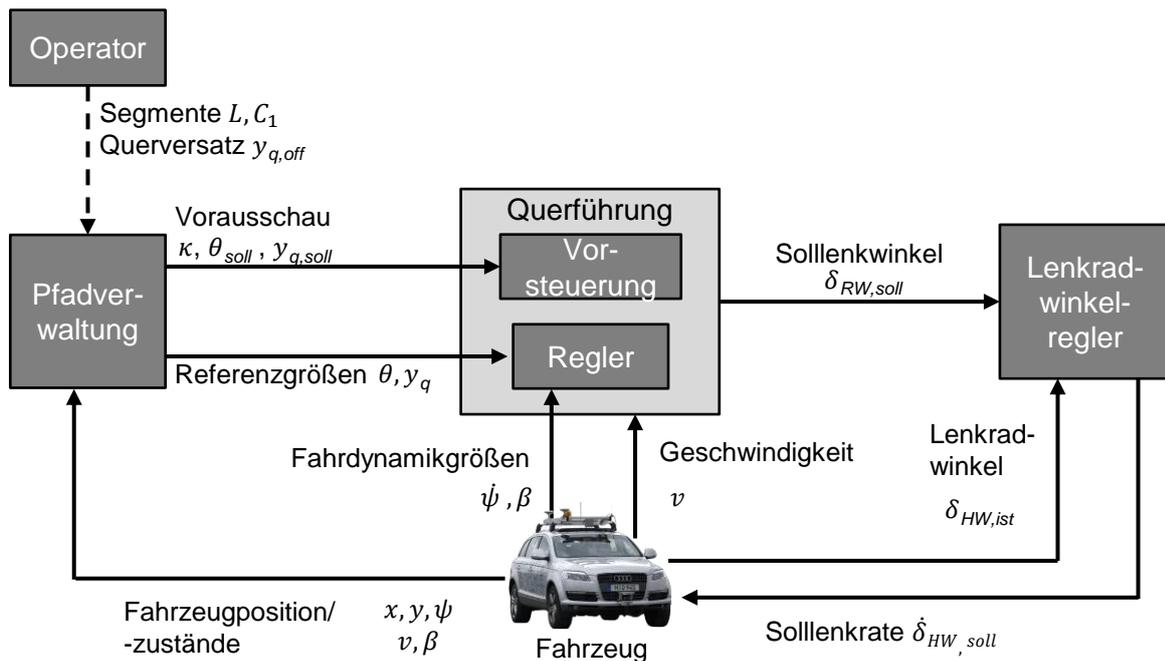


Abbildung 5.5: Aufbau der Querführung zur trajektorienbasierten Teleoperation.

ruckarme Geschwindigkeitsvorgabe den Verkehrsfluss weniger beeinflussen wird und für andere Verkehrsteilnehmer besser antizipierbar ist. Das Anfahr- und Bremsnicken beeinflusst zudem die Kameraperspektive, die dem Operator dargestellt wird.

Um eine möglichst ruckarme Geschwindigkeitsvorgabe zu erhalten, wird das Längsführungskonzept um die Metapher eines virtuellen Vorderfahrzeugs erweitert. Das Pfadende vor dem Fahrzeug verhält sich demnach wie ein anderes Fahrzeug, das voraus fährt. Im Sinne einer konventionellen Abstandsregelung ist es dann sinnvoll, dem Vorderfahrzeug in einem gewissen Abstand zu folgen. Die Geschwindigkeit orientiert sich dabei an der Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs sowie einem geschwindigkeitsabhängigen Sollabstand zwischen den Fahrzeugen. Wie in Kapitel 5.1 beschrieben, gibt der Operator bei der Segmentvorgabe bereits durch Segmentlänge  $L$  und Eingabefrequenz  $f_{\text{Eingabe}}$  vor, wie schnell Segmente abgefahren werden sollen. Diese Geschwindigkeitsvorgabe wird als Geschwindigkeit des virtuellen Vorderfahrzeugs angenommen.

Der Istabstand zum virtuellen Vorderfahrzeug bzw. zum Pfadende ist bei der trajektorienbasierten Steuerung durch einen Sägezahnverlauf charakterisiert. Das Fahrzeug nähert sich dem Pfadende, bis der Abstand durch ein neues Segment wieder sprunghaft ansteigt. Weil dieser Verlauf für stetige Stellgrößenverläufe ungeeignet ist, wird das Verhalten des Operators prädiziert, um den Zeitpunkt zu schätzen, an dem ein neues Segment vorgegeben wird. Der Istabstand wird dann kontinuierlich weiter prädiziert. Der Sollabstand ergibt sich aus dem notwendigen Bremsweg mit einer komfortablen Verzögerung und einem geschwindigkeitsproportionalen Anteil zur Kompensation der Ansprechzeiten der Aktorik [Wal09, S. 86]. Das Fahrzeug wird dann maßgeblich durch das Konzept des virtuellen Vorderfahrzeugs längsgeführt. Lediglich zum Beschränken der maximalen Geschwindigkeiten etwa in Kurven und zum Definieren des letztmöglichen Bremspunkts wird die Geschwindigkeitsvorgabe aus der Pfadverwaltung verwendet.

Abbildung 5.6 zeigt das Konzept zur Längsführung. Der Operator hat jederzeit die Möglichkeit, einen zusätzlichen Anhaltepunkt an einer beliebigen Stelle des Pfades vorzugeben, maximal jedoch so nah vor dem Fahrzeug, dass dieses den Anhaltepunkt noch mit der

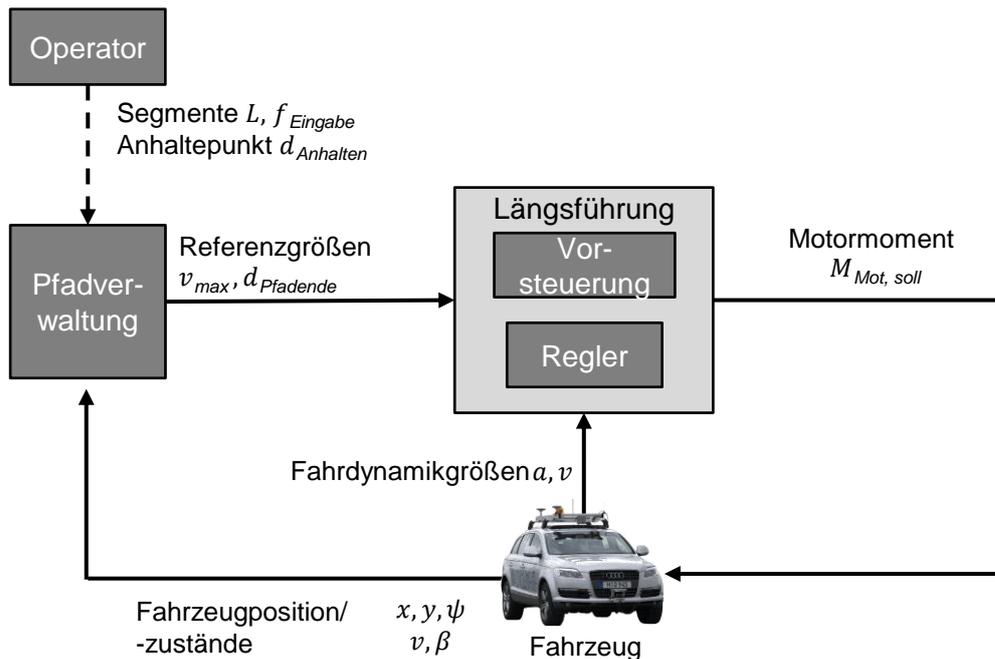


Abbildung 5.6: Aufbau der Längsführung zur trajektorienbasierten Teleoperation.

maximalen Verzögerung erreichen kann. Dies erlaubt dem Operator an Kreuzungen oder Abbiegesituationen anzuhalten. Zusätzlich können kritische Situationen aufgelöst werden, etwa wenn der bereits gelegte Pfad versperrt wird oder neben der Fahrbahn verlegt wurde. Wenn das Fahrzeug im Stopp-Punkt anhält, steht es dem Operator frei, den Pfad weiter abfahren zu lassen oder neu zu initialisieren.

## 5.3 Operator-Schnittstelle und Visualisierung

Dieses Kapitel stellt die Schnittstelle zur Interaktion von Mensch und Maschine bei der trajektorienbasierten Steuerung vor. Dazu werden das Anzeigekonzept (Kapitel 5.3.1) und die Gestaltung der Benutzerschnittstelle (Kapitel 5.3.2) beschrieben.

### 5.3.1 Anzeigekonzept

Die Anzeige am Operatorarbeitsplatz muss den Operator-Regelkreis schließen. Dazu ist es notwendig, zum einen die aktuelle Situation darzustellen, zum anderen eine Prädiktion der Operatoreingaben zu visualisieren. Nach Steinfeld [Ste04] sind beim Design von Operatorschnittstellen semi-autonomer Roboter sowohl Kamera- als auch Kartenperspektiven vorzuhalten. Kapitel 2.2.2.3 hat bereits das grundsätzliche Visualisierungskonzept zur Fahrzeugteleoperation beschrieben. Für die trajektorienbasierte Steuerung wird dies um den prädiktiven Aspekt der Pfadplanung erweitert.

Die Visualisierung der Trajektorie setzt sich aus drei Elementen zusammen: dem bereits durch die Fahrzeugregelung bestätigten Pfad, dem aktuell zu adaptierenden Segment sowie gegebenenfalls einem zuvor gesendeten aber noch nicht bestätigten Segment. Der Pfad, der tatsächlich an die Fahrzeugregelung übergeben wird, ist nur exakt auf dem Rechner

im Fahrzeug bekannt. Um diesen Pfad dem Operator am Operatorarbeitsplatz visualisieren zu können, muss demnach eine synchronisierte Kopie der Pfadverwaltung aus dem Fahrzeug auch auf dem Rechner am Operatorarbeitsplatz erstellt werden. Weil der Operator diskrete Parameter der Klothoiden an das Fahrzeug versendet, hängt es vom aktuellen Zustand der Pfadverwaltung im Fahrzeug ab, wie die Eingaben interpretiert werden. Je nachdem, welche Koordinaten das aktuelle Pfadende hat, welcher Krümmungswert anliegt und insbesondere welche numerische Genauigkeit beim Berechnen der Klothoiden erreicht wird, können die berechneten Pfade im Fahrzeug sowie am Operatorarbeitsplatz voneinander abweichen. Die notwendige Synchronisierung der beiden Systeme erfolgt mittels der Handshake-Nachrichten. Darin werden nicht nur der Identifier des nächsten Segmentes, sondern auch jeweils die aktuellen Statusinformationen übermittelt. Für die Pfadverwaltung werden somit nach jedem bestätigten Segment oder bei Neuinitialisierung die aktuellen Koordinaten des letzten Pfadpunktes sowie der Kurswinkel und die aktuelle Krümmung an den Operator gesendet. Das aktuell zu adaptierende Segment wird dann konsistent an das Pfadende angehängt.

Die strikte Sequenzialität der Segmentvorgaben erfordert es, dass das nächste Segment erst vorgegeben werden kann, wenn das letzte Element korrekt von der Pfadverwaltung im Fahrzeug bestätigt worden ist und der Segment Identifier für die folgende Eingabe mitgeteilt wurde. Der Operator bemerkt von diesen internen Abläufen nichts und kann bereits die Parameter des nächsten Segments direkt nach dem Versenden des letzten Segments an den Straßenverlauf adaptieren. Die Prädiktion dieses Segments beruht dann kurzzeitig auf einer Schätzung der Bestätigungswerte des Fahrzeugs, solange bis die Bestätigungsnachricht eintrifft. Solange die Unterschiede zwischen den Berechnungsgenauigkeiten im Fahrzeug und am Operatorarbeitsplatz klein sind, erfolgt die Korrektur für den Operator unmerklich. Abbildung 5.7 stellt das Visualisierungskonzept in der Simulationsumgebung dar. Es ist eine Kameraperspektive nachempfunden, wie sie auch im Realfahrzeug vorliegt. Im unteren Bildbereich ist die Motorhaube des Fahrzeugs ersichtlich. Der Operator adaptiert das gelb markierte Segment am Ende des Pfades und kann Länge und Krümmungsänderung wählen. Änderungen werden direkt visualisiert (1). Nach dem Senden an das Fahrzeug wird das

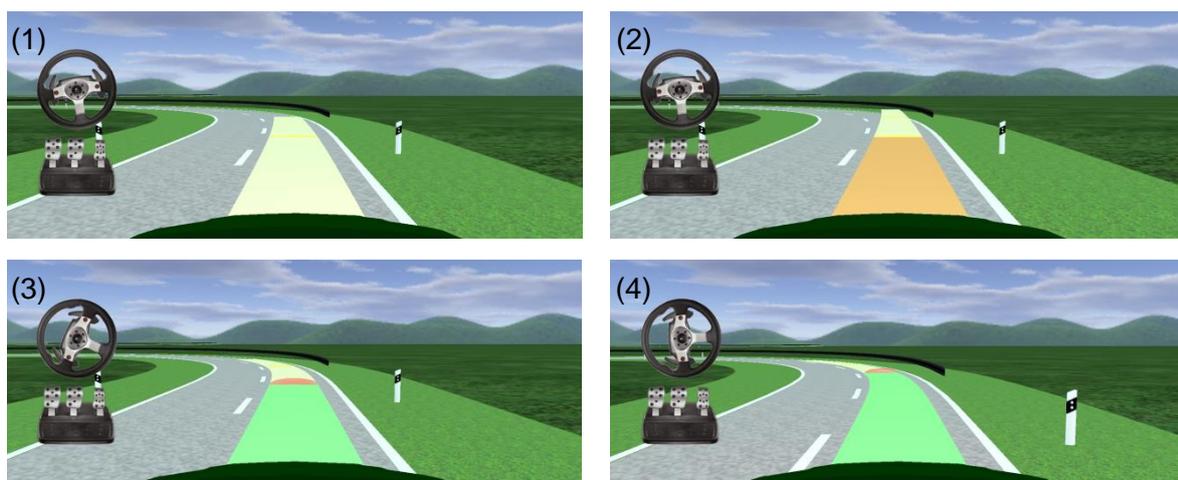


Abbildung 5.7: Visualisierung in der Simulationsumgebung: (1) Das zu adaptierende Segment am Ende des Pfades wird in Gelb dargestellt. (2) Ein temporär auf die Bestätigung wartendes Segment ist orange markiert. (3) Der bereits vom Fahrzeug bestätigte Pfad ist grün. (4) Das Fahrzeug fährt die grünen Segmente bis zum roten Balken am Ende des Pfades ab und hält dort an, wenn nicht zuvor ein weiteres Segment hinzugefügt wird.

Segment vorübergehend orange, um den noch unbestätigten Zustand hervorzuheben (2). Der Operator kann sofort das neue verschobene gelbe Segment am Ende des orangenen wieder an den Straßenverlauf anpassen. Das orangene Segment wird zur Bestätigung grün, wenn das Fahrzeug die Validität bestätigt hat (3). Solange ein Segment orange ist, kann der Operator kein weiteres Segment an das Fahrzeug senden. Das Fahrzeug fährt den grünen Pfad bis zum Haltepunkt ab (4). Der Haltepunkt, an dem das Fahrzeug wieder zum Stehen kommt, ist rot markiert. Diese Markierung befindet sich am Ende des Pfades und kann an diesem entlang verschoben werden. Wenn der Operator einen Querversatz einstellt, wird der gesamte Pfad orthogonal verschoben visualisiert und das Fahrzeug folgt dem Querversatz.

Für die korrekte perspektivische Darstellung der Trajektorie im realen Videobild ist eine Kalibrierung der Kamera im Realfahrzeug notwendig. Eine Kamera bildet die dreidimensionale Welt auf einer zweidimensionalen Bildfläche ab. Mit dieser Projektion ist ein entsprechender Informationsverlust verbunden. Das Sensormodell einer Kamera basiert auf dem Prinzip einer Lochkamera. Die Abbildung eines 3D-Weltpunktes erfolgt dann durch die Blendenöffnung auf einen Punkt in der Bildebene [Sti09, S. 200].

Die Beschreibung der 3D-Weltkoordinaten  $\mathbf{x}_C = (x_C, y_C, z_C)^T$  erfolgt in einem ortsfesten Kamerakoordinatensystem, dessen Ursprung in der Blendenöffnung und dessen Z-Achse senkrecht zur Bildebene verläuft. Der Bildhauptpunkt des 2D-Bildkoordinatensystems wird im Abstand 1 vor der Lochblende definiert (Abbildung 5.8). Auf Basis einer linearen Abbildung mittels Strahlensatz ergibt sich dann für homogene Pixel-Koordinaten  $\tilde{\mathbf{x}}_p = (\tilde{x}_p, \tilde{y}_p, \tilde{w})^T$  [Sti09, S. 200]:

$$\tilde{\mathbf{x}}_p = \mathbf{K} \mathbf{x}_C \quad \text{mit } \mathbf{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & x_0 \\ 0 & f_y & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{und } \mathbf{x}_C = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

Die nicht-homogenen Pixelkoordinaten werden durch Normierung von  $\tilde{w}$  auf 1 erreicht  $\mathbf{x}_p = (\frac{\tilde{x}_p}{\tilde{w}}, \frac{\tilde{y}_p}{\tilde{w}}, 1)^T$ . Die Kalibrierungsmatrix  $\mathbf{K}$  besteht aus den charakteristischen intrinsischen Parametern der verwendeten Kamera. Dabei sind  $f_x$  und  $f_y$  die bezogenen Brennweiten und  $(x_0, y_0)^T$  die Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes [Sti09, S. 200].

Zusätzlich zu den intrinsischen müssen noch die extrinsischen Parameter bestimmt werden. Diese beschreiben die Transformation des Kamerakoordinatensystems in ein allgemeineres fahrzeugfestes Koordinatensystem, in dem die zu transformierenden Daten vorliegen. Die extrinsischen Parameter beinhalten die Rotation und Translation des Fahrzeugkoordi-

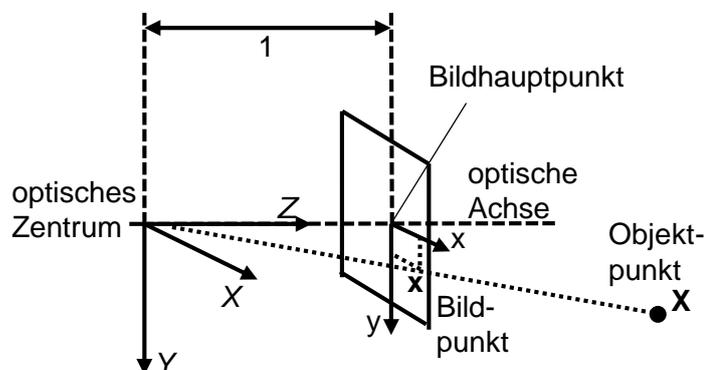


Abbildung 5.8: Geometrisches Kameramodell mit projektiver Abbildung eines Objektpunktes in die Bildebene [Sti09, S. 200].

natensystems in das Kamerakoordinatensystem [Käm07, S. 26 ff.]. Zur Bestimmung der intrinsischen und extrinsischen Parameter wird ein automatisiertes Kalibrierungsverfahren verwendet. Bouguet [Bou10] stellt hierzu eine Camera Calibration Toolbox for MATLAB zur Verfügung. Kalibrierungsverfahren verwenden üblicherweise ebene Kalibrierungsmuster wie Schachbrett-Muster, aus denen automatisiert charakteristische Punkte extrahiert werden [Han11, S. 110].

Das Verfahren nach Bouguet benutzt zunächst ein definiertes Schachbrettmuster, mit dem möglichst viele Kamerabilder aus unterschiedlichen Perspektiven aufgezeichnet werden. Das Muster sollte jeweils relativ formatfüllend im Bild sein. Aus jedem Bild werden die Eckpunkte des Musters extrahiert. Ein Optimierungsansatz errechnet dann das Set von intrinsischen Parametern, dessen Projektion des Schachbretts die geringste Abweichung mit den extrahierten Punkten aufweist [Bou10]. Für die Berechnung der extrinsischen Parameter wird das Bild eines Musters benötigt, das sich an einer bekannten Position relativ zum Fahrzeugkoordinatensystem befindet. Die MATLAB Toolbox bestimmt unter Berücksichtigung der intrinsischen Kalibrierung die Position des Musters in Kamerakoordinaten. Durch Kombination mit dem Wissen über die Position des Musters in Fahrzeugkoordinaten wird die Projektionsmatrix von Fahrzeugkoordinaten in Pixelkoordinaten berechnet.

Die Toolbox gibt die Rotation  $R_{C \rightarrow M}$  und Translation  $C_{C \rightarrow M}$  von Kamera- in Musterkoordinaten aus. Mit den am Versuchsaufbau gemessenen Matrizen für die Rotation  $R_{F \rightarrow M}$  und Translation  $C_{F \rightarrow M}$  von Fahrzeug- in Musterkoordinaten und der Kalibrierungsmatrix  $K$  ergibt sich die Projektionsvorschrift von homogenen Fahrzeugkoordinaten  $\tilde{\mathbf{x}}_F = (x_F, y_F, z_F, 1)^T$  in die Pixelkoordinaten  $\tilde{\mathbf{x}}_p$ :

$$\tilde{\mathbf{x}}_p = \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}}_F \quad \text{mit } \mathbf{P} = \mathbf{K} \left( \mathbf{R}_{C \rightarrow M}^{-1} \mathbf{R}_{F \rightarrow M} \begin{bmatrix} \mathbf{I}^{3 \times 3} & -\mathbf{C}_{F \rightarrow M} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{3 \times 3} & \mathbf{C}_{C \rightarrow M} \end{bmatrix} \right) \quad (5.16)$$

Jedes Kamerabild wird bei der Encodierung im Fahrzeug mit der jeweiligen Fahrzeugposition und -ausrichtung zum Aufzeichnungszeitpunkt markiert. Die Fahrzeugausrichtung berücksichtigt Gier- bzw. Heading-, Wank- und Nickwinkel. Die Daten werden im Fahrzeug vom GPS-gestützten Inertialmesssystem geschätzt und zur Verfügung gestellt. Bei der Visualisierung werden dann die Daten aus der Pfadverwaltung, die in globalen Koordinaten vorliegen, in das Fahrzeugkoordinatensystem zum Aufzeichnungszeitpunkt transformiert. Anschließend können die Pfaddaten mit der Projektionsmatrix perspektivisch in das Kamerabild eingezeichnet werden. Durch die Berücksichtigung von Wank- und Nickwinkel werden etwa Anfahrnicken oder Kurvenwanken des Fahrzeugs kompensiert (Abbildung 5.9).

Neben den beschriebenen Informationen, wird dem Operator ein gridbasierter Ansatz zur Darstellung der Historie der Lidarscanner-Daten angezeigt. Diese Belegungskarte kombiniert Eigenbewegung und Lidardaten zu einer vogelperspektivischen Darstellung des Fahrzeugumfelds [Wei11], [Thr05]. Damit kann der Operator vor allem das Nahfeld des Fahrzeugs überwachen, beispielsweise bei Rangiermanövern. Die Belegungskarte wird dem Operator auf einem weiteren Monitor dargestellt. Aus Untersuchungen zum teleoperierten Fahren ist bekannt, dass der Operator relativ schnell die Orientierung verliert und es kaum möglich ist, sich anhand von Landmarken zu orientieren [McG87, S. 6], [Kay97a, S. 10 f.]. Die Darstellung einer Karte ist daher essentiell [Ste04] und erfolgt ebenfalls auf einem weiteren Monitor. In beiden Karten werden ebenfalls die Daten der Pfadverwaltung über bestätigte und das aktuelle Segment angezeigt (Abbildung 5.10). Dabei entfällt die aufwändige und fehleranfällige perspektivische Transformation. Die Daten müssen lediglich um die aktuellen Schwerpunktskoordinaten verschoben und den Headingwinkel gedreht werden.

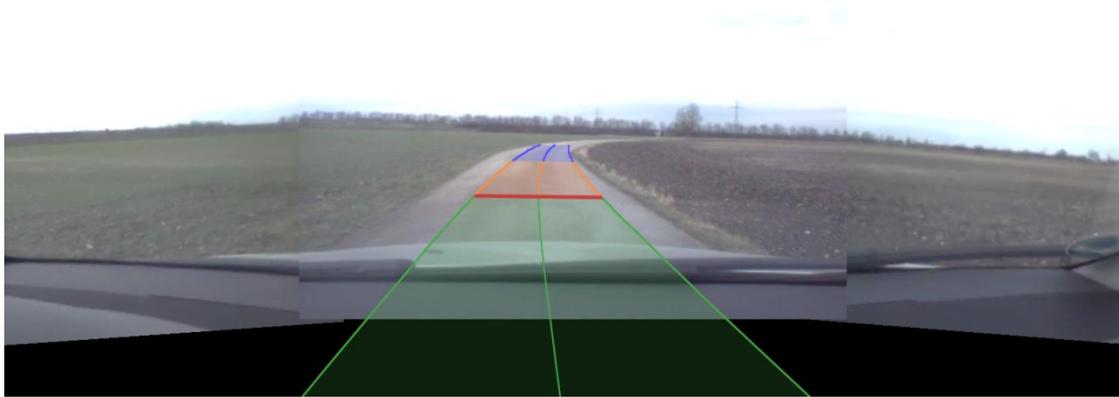


Abbildung 5.9: Dem Operator werden die aktuellen Kamerabilder (hier drei Frontkameras) mit dem perspektivisch überlagerten Pfad angezeigt. Der bereits bestätigte Pfad ist grün, ein gesendetes Segment ist in orange und das aktuell zu adaptierende in blau dargestellt. An der roten Linie hält das Fahrzeug wieder an.



Abbildung 5.10: Neben dem Kamerabild werden dem Operator eine Kartenansicht sowie eine Lidar-belegungskarte der aktuellen Situation dargestellt. Der Pfad wird jeweils perspektivisch überlagert.

### 5.3.2 Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle

Der Operator muss mit einem geeigneten Eingabegerät ausgestattet werden, um das trajektorienbasierte Fahren zu beauftragen. Hierzu stellen sich unterschiedliche Anforderungen an das Eingabegerät. Es ist notwendig, dass die Eingabe mindestens über zwei Achsen verfügt, damit Klothoidenkrümmung und -länge unabhängig voneinander vorgegeben werden können. Insbesondere der Wertebereich für die Krümmung ist relativ groß und sollte von kleinen Krümmungen bis zum minimalen Wendekreis des Fahrzeugs reichen. Eine dritte und vierte Achse des Eingabegerätes sind für die Vorgabe des Anhaltepunktes und des Querversatzes zum Pfad sinnvoll. Zusätzlich muss die Möglichkeit bestehen, eine Auswahl bestätigen und weitere diskrete Funktionen wie etwa eine Neuinitialisierung ausführen zu können.

Als oberstes Prinzip für die Gestaltung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle gilt im Allgemeinen die Eignung für die spezifische Aufgabe. Aus der Norm DIN EN 894-1 ergeben sich sechs Leitsätze der Ergonomie an die Gestaltung von Schnittstellen, Aufgabenangemessenheit, Selbsterklärungsfähigkeit, Steuerbarkeit, Erwartungskonformität, Fehlerrobustheit und Anpassungsfähigkeit / Erlernbarkeit [Bru09, S. 317 f.]. In [Ack11] wird ein allgemeines Bewertungskonzept für Eingabegeräte in der Teleoperation diskutiert. Dazu werden unterschiedliche Steuergeräte bezüglich der Kriterien Wirtschaftlichkeit und Darstellung von Feedback bewertet. Acker kommt zu dem Schluss, dass häufig eine Spiele-Controller-Lösung aus dem Consumer-Bereich ausreichend ist, weil sie kostengünstig und robust gegenüber Umgebungseinflüssen ist. Erst bei Spezialanwendungen mit sehr präziser Kraftrückkopplung sind höhere Investitionskosten notwendig [Ack11, S. 54 ff.].

Im Hinblick auf die Anforderungen des trajektorienbasierten Fahrens kamen als Eingabegeräte Gamepads mit zwei analogen Sticks, eine Maus-Keyboard-Kombination sowie die konventionelle Lenkrad-Pedal-Steuerung in Frage. Auf Basis eines Bewertungsprozesses, wurde die Lenkrad-Pedalkombination als am geeignetsten bestimmt. Gegenüber dem Gamepad ist die Auflösung des Wertebereichs sehr viel besser und somit die Präzision bei der Eingabe höher. Bei einer Maussteuerung fehlen das haptische Feedback sowie eine selbstständige Rückstellung. Ein positiver Aspekt der konventionellen Lenkrad-Pedal-Kombination ist zudem die Flexibilität beim Wechsel zwischen direkter und trajektorienbasierter Steuerung, weil beide Steuerungsarten mit demselben Eingabegerät beauftragt werden können [Ste04]. Dadurch kann die direkte Steuerung auch als Rückfallkonzept auf Stabilisierungsebene eingesetzt werden [Kau10].

Die Gestaltung der Lenkrad-Pedal-Eingabe orientiert sich an den ergonomischen Leitsätzen aus DIN EN 894-1. Die Krümmungsänderung der Klothoiden wird durch den Lenkradwinkel beeinflusst. Dabei wird über das Lenkrad nicht die Krümmungsänderung selber, sondern die Krümmung am Ende des Segments vorgegeben. Dies hat den Vorteil, dass der Einsatz des Lenkwinkels konform zum Lenken in einem konventionellen Fahrzeug erfolgt. Soll etwa eine konstante Kreisfahrt durchgeführt werden, muss das Lenkrad konstant gehalten werden.

Die Länge der Segmente wird durch das Gaspedal vorgegeben. Aus dem durchgedrückten Gaspedal resultiert die maximale Segmentlänge. Die Segmentlänge ergibt in Kombination mit der Eingabefrequenz die Sollgeschwindigkeit und ist somit wiederum konform mit der konventionellen Verwendung des Gaspedals. Der Anhaltepunkt wird mit dem Bremspedal entlang des Pfades verschoben. Wird das Bremspedal nicht betätigt, hält das Fahrzeug am Ende des Pfades. Bei Betätigung des Bremspedals bewegt sich der Anhaltepunkt auf den Operator zu bis zu einer Vollbremsung, bei der der minimale Bremsweg vorgegeben wird. Die Vorgabe eines Querversatzes zum Pfad kann mit der Lenkrad-Pedal-Kombination nicht mit einer analogen Achse belegt werden. Hier könnte zwar das Kupplungspedal verwendet

werden, dies würde vom Operator aber nur schwer mit einem Querversatz assoziiert werden. Stattdessen wird der Querversatz durch diskrete Vorgaben mittels Schaltwippen am Lenkrad vorgegeben. Die Diskretisierung erfolgt mit fünf Zentimetern. Eine Betätigung der linken Schaltwippe inkrementiert den Querversatz um die Diskretisierungsschrittweite nach links. Bei Betätigung der rechten Schaltwippe entsprechend umgekehrt. Der Nachteil der Diskretisierung wird durch den Vorteil der Richtungskompatibilität der Schaltwippen ausgeglichen. Das Bestätigen von Segmenten und die Beauftragung weiterer diskreter Aktionen erfolgt über Knöpfe direkt am Lenkrad.

## 5.4 Architektur des Gesamtsystems

Die in den obigen Abschnitten beschriebenen Module des Gesamtsystems verteilen sich entsprechend Abbildung 5.11 auf die Hardware-Komponenten der prototypischen Realisierung. Das Operator-Interface ist die Mensch-Maschine-Schnittstelle am Operatorarbeitsplatz. Hier werden die Videobilder dargestellt und mit den Augmented-Reality-Elementen der Pfadverwaltung perspektivisch überlagert. Zusätzlich zeigt die GUI eine Kartendarstellung der Umgebung und die Lidar-Belegungskarte an. Das Operator-Interface wurde in C++ in einer Visual Studio Entwicklungsumgebung programmiert und basiert hauptsächlich auf dem QT Framework. Die Daten werden mit dem Fahrzeug über UDP-Verbindungen ausgetauscht. Der Car-PC im Fahrzeug befindet sich durch eine verschlüsselte VPN-Verbindung im selben lokalen Netzwerk wie der Rechner am Operatorarbeitsplatz.

Im Fahrzeug verwaltet eine weitere grafische Bedienschnittstelle die Operatoreingaben. Diese dient maßgeblich der Kommunikationsüberwachung. Dort werden ebenfalls die Kameraperspektiven und Kartendaten visualisiert. Dies dient vor allem Entwicklungszwecken. Zusätzlich wird damit dem bei Testfahrten obligatorischen Sicherheitsfahrer der aktuelle Zustand der Trajektorienplanung visualisiert. Dadurch können Fehlfunktionen zeitnah erkannt werden. All diese Funktionen benötigen keine harten Echtzeitanforderungen, daher ist es ausreichend, diese auf einem automotivfähigen Car-PC mit Windows Betriebssystem-

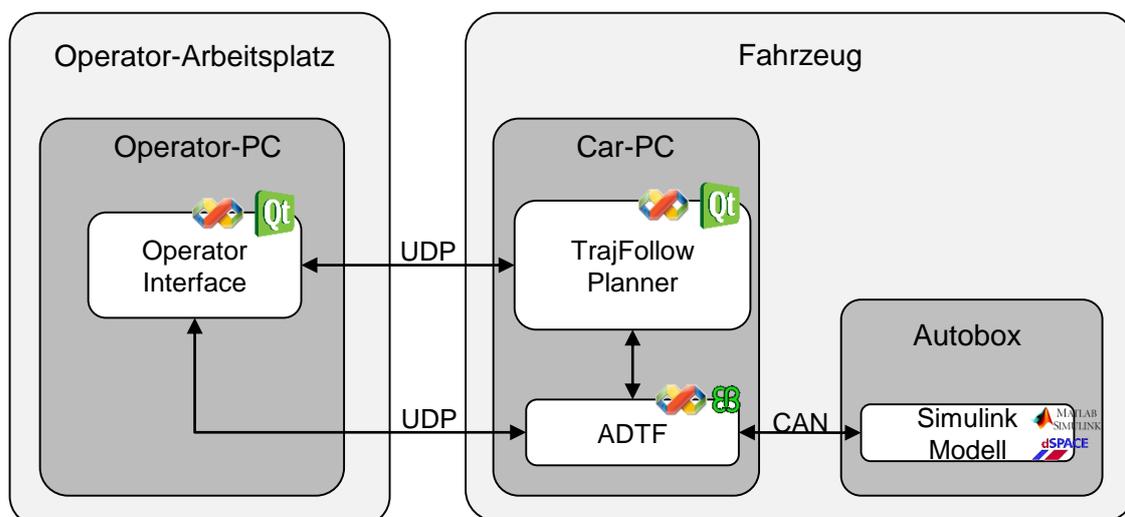


Abbildung 5.11: Die Architektur des Gesamtsystems gliedert sich in ein Interface auf dem Operator-PC, eine Schnittstelle im Fahrzeug auf dem Car-PC sowie die Regelungs- und Verwaltungsfunktionen auf der Rapid-Prototyping-Hardware.

tem auszuführen. Ein spezielles Automotive-Framework sorgt als Middleware dafür, dass die Latenzen bei der Sensordatenverarbeitung klein bleiben und Daten eventbasiert verarbeitet werden können. Als Framework wird ADTF (Automotive Data- and Time Triggered Framework) der Firma Elektrobit verwendet. Hierüber werden die Daten zwischen Ethernet und CAN-Bus weitergeleitet und etwa die Kameras sowie die Lidarscanner verwaltet. Zusätzlich dient ADTF der Aufzeichnung von Messdaten und der späteren Wiedergabe zur Offline-Entwicklung.

Die gesamte Pfadverwaltung sowie die Fahrzeugregelung werden auf einer echtzeitfähigen Rapid-Prototyping-Hardware vom Typ Autobox der Firma dSpace gerechnet. Dies garantiert Stelleingriffe mit konstanter Abtastrate und geringen Reaktionszeiten. Die Entwicklung der Regelungsalgorithmen erfolgte in einer auf MATLAB/Simulink basierten Entwicklungsumgebung mit angeschlossener Fahrdynamiksimulation. Die entwickelten Algorithmen werden mittels automatischer Codegenerierung auf die Autobox geflasht.

---

## 6 Ergebnisse: Erprobung und Validierung der prototypischen Umsetzung

In diesem Kapitel wird die Erprobung des entwickelten Konzeptes zur trajektorienbasierten Fahrzeugführung vorgestellt. Dazu erfolgten Versuchsfahrten in einer Simulationsumgebung sowie im Realfahrzeug. In Kapitel 6.1 werden zunächst die Ergebnisse einer Probandenstudie an einem statischen Fahrsimulator beschrieben. Anschließend wird der Steuerungsansatz im Realfahrzeug validiert (Kapitel 6.2).

### 6.1 Bewertung des Ansatzes in der Simulationsumgebung

Der Ansatz zur trajektorienbasierten Teleoperation von Straßenfahrzeugen wird an einem statischen Fahrsimulator erprobt. Dazu beschreibt dieses Kapitel zunächst die Simulationsumgebung (Kapitel 6.1.1) und Vorversuche zu Zeitverzögerungen (Kapitel 6.1.2). Danach werden in Kapitel 6.1.3 die Ergebnisse einer Probandenstudie vorgestellt.

#### 6.1.1 Simulationsumgebung

Die Erprobung in der Simulation findet an einem statischen Fahrsimulator statt, der ebenfalls als Operatorarbeitsplatz bei realen ferngesteuerten Testfahrten dient (Kapitel 2.2.2.3). Als Simulationsumgebung wird die Fahrdynamiksimulation veDYNA auf Basis von MATLAB/Simulink verwendet. Die Funktionalität der trajektorienbasierten Steuerung wurde in Simulink implementiert. Das Simulationsmodell verwendet dieselben Simulink-Bibliotheken, die auch auf die Rapid-Prototyping-Hardware im realen Versuchsfahrzeug geflasht werden. Die Funktionalität der Simulation entspricht somit dem Verhalten im Realfahrzeug. Zur Visualisierung der Fahrdynamiksimulation wird veDYNA an die 3D-Animation DYNAAnimation angebunden. Dadurch ist es möglich, das gleiche Visualisierungskonzept, das für die Operatorschnittstelle im Realfahrzeug entworfen worden ist (Kapitel 5.3), in der Animationsumgebung nachzustellen. Die Eingabegeräte werden ebenfalls in gleicher Weise in die Simulationsumgebung eingebunden, wie es an der Operatorschnittstelle für die reale Teleoperation erfolgt.

Entsprechend des beschriebenen Aufbaus des Operatorarbeitsplatzes verfügt die Simulationsumgebung über die gleichen Einschränkungen. So ist zum Zeitpunkt der Probandenuntersuchungen keine Audio-Simulation am Simulator verbaut. Der Fahrversuch wird als reine Sichtsimulation durchgeführt. Darüber hinaus gibt es kein weiteres haptisches Feedback außer den linearen Rückstellkräften an Lenkrad und Pedalen. Die linearen Rückstellkräfte sind rein federbasiert und repräsentieren nicht den aktuellen Fahrzustand des simulierten Versuchsfahrzeugs.

## 6.1.2 Vorversuche zur menschlichen Leistungsfähigkeit

Die Reduktion der menschlichen Leistungsfähigkeit bei Zeitverzögerungen ist abhängig von Aufgabentyp und -schwierigkeit [Pon08, S. 190]. Um Grenzwerte für die direkte Steuerung von teleoperierten Fahrzeugen zu bestimmen, sind Fahrversuche in der Simulation durchgeführt worden. Aus den theoretischen Betrachtungen in Kapitel 4.1.3 ist bekannt, dass theoretisch die Phasenreserve bei etwa 600 Millisekunden soweit reduziert ist, dass eine Instabilität der Fahrzeugführung droht. Zusätzlich wurden noch der halbe Wert, 300 Millisekunden, und zum Vergleich null Millisekunden Zeitverzögerung zur Verifikation verwendet. Zum Abtesten einer querdynamisch anspruchsvollen Fahrsituation diente ein Slalom, der mit konstanter Geschwindigkeit von 30 km/h durchfahren wurde. Während nahezu alle Probanden ohne Zeitverzögerung den Slalom beherrschten, mussten bei 300 Millisekunden Zeitverzögerung die gewählten Fahrtrouten schon stark korrigiert werden. Bei 600 Millisekunden Zeitverzögerung konnte kein Proband dem gesteckten Slalom noch sinnvoll folgen. Eine Zeitverzögerung von 600 Millisekunden wurde als sinnvolle Ausgangsgröße für weitere Untersuchungen am trajektorienbasierten Steuerungskonzept gewählt. Zum einen sind 600 Millisekunden eine Grenze, ab der die direkte Teleoperation bereits zunehmend schwierig bis unmöglich wird. Zum anderen entsprechen 600 Millisekunden in etwa dem Mittelwert der Zeitverzögerung, der bei realen Versuchsfahrten mit dem prototypischen Aufbau erreicht wird, wenn die Videodaten mit 500 Millisekunden gepuffert werden (Kapitel 2.3 und 2.2.2.2).

## 6.1.3 Durchführung einer Probandenstudie zum Vergleich von direkter und trajektorienbasierter Teleoperation

Zur Validierung des entwickelten trajektorienbasierten Steuerungsansatzes wurde eine Probandenstudie am statischen Fahrsimulator des Lehrstuhls durchgeführt. Ziel der Untersuchung ist es, den indirekten Steuerungsansatz mit der konventionellen direkten Steuerung unter möglichst realitätsnahen Bedingungen zu vergleichen. Eine prinzipielle Eignung des Konzepts zur Fahrzeugführung soll überprüft werden. Insbesondere wird der Einfluss von Zeitverzögerungen auf das Steuerungskonzept untersucht. Die Unabhängigkeit von Zeitverzögerungen gilt für Supervisory-Control-Ansätze nur unter gewissen Randbedingungen (Kapitel 4.2.2). Diese werden im Folgenden evaluiert.

### 6.1.3.1 Untersuchungsziel und Hypothesen

Im Rahmen der Probandenstudie werden Hypothesen zu folgenden Themenkomplexen untersucht:

**Sicherheit** Einerseits können die Zeitverzögerungen bei der Teleoperation zu instabilem Fahrzeugführungsverhalten führen. Andererseits muss zumindest bei der trajektorienbasierten Steuerung die Strecke vorausgesehen und der Pfad entlang der Strecke geplant werden. Beides kann zu einer kritischen Fahrsituation führen.

**Hypothese S** Die trajektorienbasierte Steuerung führt zu keinem höheren Risiko im Straßenverkehr als eine konventionelle Fahrzeugführung.

**Zeitverzögerung** Der Entwurfsprozess zur trajektorienbasierten Steuerung hat eine Unabhängigkeit der Leistungsfähigkeit gegenüber den Kommunikationszeitverzögerungen bei der Teleoperation zum Ziel.

**Hypothese Z** Der Operator erreicht mit der trajektorienbasierten Steuerung unabhängig von einer vorhandenen Zeitverzögerung die gleiche Leistung.

**Leistungsfähigkeit** Ein weiteres Ziel im Entwurfsprozess der trajektorienbasierten Steuerung ist der Erhalt der Leistungsfähigkeit gegenüber dem direkten Steuerungskonzept.

**Hypothese L** Mit der trajektorienbasierte Steuerung erzielt der Operator die gleiche Leistung wie mit einer direkten Steuerung.

**Beherrschbarkeit** Die Eignung eines indirekten Steuerungsansatzes zur teleoperierten Fahrzeugführung lässt sich daran bemessen, wie gut die Operatoren mit der Steuerung zurechtkommen und ob das Steuerungskonzept verständlich und intuitiv nutzbar ist. Als Vergleich dient das Konzept der klassischen direkten Teleoperation.

**Hypothese B** Die trajektorienbasierte Steuerung ist genauso gut beherrschbar wie die direkte Steuerung.

### 6.1.3.2 Versuchsdesign

Im Folgenden werden die Testszenarien beschrieben, um die Hypothesen detaillierter zu formulieren. Ferner werden das Probandenkollektiv beschrieben und der Versuchsablauf vorgestellt.

**6.1.3.2.1 Definition der Testszenarien** Im Hinblick auf das Anwendungsszenario der Teleoperation von Straßenfahrzeugen wird als Umgebung für die Fahrsimulator-Szenarien ein urbanes Umfeld gewählt. Der in der Simulationsumgebung aufgebaute Stadtparcours ist zwei Kilometer lang und beinhaltet stadttypische Elemente. Die Strecke besteht hauptsächlich aus einer Kombination von Geraden und Kurven mit mittleren bis kleinen Radien. Hinzu kommen Abbiegesituationen, Anhalten an Stoppschildern und ein Kreisverkehr. Zusätzlich versperren teilweise parkende Fahrzeuge die drei Meter breite Spur, so dass Spurwechsel durchgeführt werden müssen. Die Verkehrsumgebung ist statisch und erfordert keine Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern. Die Höchstgeschwindigkeit wird auf 50 km/h beschränkt. Das Ziel der Probanden ist das Bewältigen der Strecke, wobei der Fahrbahn genau gefolgt und möglichst wenig Zeit benötigt werden soll.

**6.1.3.2.2 Messgrößen** Die Erfassung der Messgrößen umfasst objektive und subjektive Werte. Die objektiven Messwerte, wie fahrdynamische Messgrößen sowie die Eingaben des Operators an den Bediengeräten, werden direkt in der Simulationsumgebung aufgezeichnet. Mit Hilfe eines Fragebogens werden die subjektiven Eindrücke der Versuchspersonen erfasst. Der Fragebogen ist zweiteilig und speziell an den Versuch angepasst (Anhang A). Der allgemeine Teil erfasst vor dem Versuch Angaben zur Person. Der spezielle Teil zur Bewertung des Steuerungskonzeptes wird nach jeder Testfahrt beantwortet.

**6.1.3.2.3 Probandenkollektiv** Die Versuchsreihe wird mit 32 Probanden durchgeführt. Sechs der Probanden sind weiblich, 70 Prozent sind zwischen 22 und 30 Jahre alt. Die übrigen Versuchsteilnehmer waren jünger. Alle Probanden verfügen über einen Führerschein, wobei der Großteil diesen vor fünf bis zehn Jahre erworben hat. Dabei gaben jeweils drei Versuchsteilnehmer an sehr vorsichtig bzw. sehr sportlich zu fahren. Alle weiteren schätzen ihren Fahrstil als normal ein. 15 Probanden verfügen bereits über Fahrerfahrung in einem Fahrsimulator und zwei Drittel zumindest über Computerspielerfahrung.

**6.1.3.2.4 Versuchsablauf** Der Versuchsleiter weist die Probanden vor ihrer Versuchsfahrt in den Ablauf ein. Mit dem allgemeinen Fragenbogen werden zunächst die persönlichen Informationen des Versuchsteilnehmers erfasst. Anschließend erklärt der Versuchsleiter die Untersuchungsziele sowie den statischen Fahrsimulator. Eine schriftliche Beschreibung des direkten und trajektorienbasierten Steuerungskonzeptes stellt eine einheitliche Einweisung der Probanden in die Steuerung sicher.

Danach werden die Testfahrten begonnen. Die Versuchsteilnehmer fahren mit dem trajektorienbasierten und dem direkten Steuerungskonzept jeweils ohne Zeitverzögerung sowie mit einer Zeitverzögerung von 600 Millisekunden. Zu Beginn haben die Probanden die Möglichkeit, sich mit allen vier Steuerungsvarianten auf einer Teststrecke vertraut zu machen. Im anschließenden aufgezeichneten Versuch werden die Steuerungsvarianten permutiert, um Reihenfolgeeffekte auszuschließen. Die Probanden füllen nach jeder Fahrt den jeweiligen Fragebogen zum Steuerungskonzept aus.

**6.1.3.2.5 Detaillierung der Hypothesen** Die in Kapitel 6.1.3.1 aufgestellten allgemeinen Hypothesen werden im Folgenden konkretisiert und in Bezug auf die erfassten objektiven und subjektiven Messgrößen bewertbar gemacht. Dabei wird jeweils der unbekanntes Mittelwert der Grundgesamtheit als  $\mu$  und die Standardabweichung als  $\sigma$  bezeichnet. Als geeignete Schätzgrößen werden das Stichprobenmittel  $\hat{\mu}$  und die Stichprobenstandardabweichung  $\hat{\sigma}$  angegeben:

**Sicherheit** Die Teleoperation darf zu keinem höheren Risiko im Straßenverkehr führen als eine konventionelle manuelle Steuerung. Daher werden die Fahrten mit beiden Steuerungsarten und mit Zeitverzögerung jeweils mit der konventionellen Fahrt mit direkter Steuerung und ohne Zeitverzögerung verglichen. Weil die Szenarien statisch sind und der Fokus auf dem Folgen der vorgegebenen Strecke liegt, entsteht eine Kritikalität beim Verlassen der Strecke. Als Maß für das Fahren in der eigenen Spur wird eine Spurtreue definiert, die den prozentualen Anteil des Testparcours angibt, in dem sich das Fahrzeug innerhalb der eigenen Fahrspur befand:

**Hypothese S01** Auf dem Stadtparcours ist die Spurhaltung bei Zeitverzögerung (600 ms) mit trajektorienbasierter Steuerung genauso gut wie bei direkter Steuerung ohne Zeitverzögerung (0 ms).

$$H_0 : \mu_{\text{Spurhaltung, 600 ms, trajektorienbasiert}} = \mu_{\text{Spurhaltung, 0 ms, direkt}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Spurhaltung, 600 ms, trajektorienbasiert}} \neq \mu_{\text{Spurhaltung, 0 ms, direkt}}$$

**Hypothese S02** Auf dem Stadtparcours ist die Spurhaltung bei Zeitverzögerung (600 ms) mit direkter Steuerung genauso gut wie bei direkter Steuerung ohne

Zeitverzögerung (0 ms).

$$H_0 : \mu_{\text{Spurhaltung, 600 ms, direkt}} = \mu_{\text{Spurhaltung, 0 ms, direkt}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Spurhaltung, 600 ms, direkt}} \neq \mu_{\text{Spurhaltung, 0 ms, direkt}}$$

**Zeitverzögerung** Der Operator erreicht mit der trajektorienbasierten Steuerung unabhängig von der vorhandenen Zeitverzögerung die gleiche Leistung. Als Maße für die Leistung werden zum einen die Spurhaltung, zum anderen die Fahrzeit im Testparcours verwendet. Darüber hinaus schätzen die Probanden subjektiv ein, wie stark der Einfluss der Zeitverzögerung ist.

**Hypothese Z01** Mit der trajektorienbasierten Steuerung ist die Gesamtleistung aus Spurhaltung und Fahrzeit mit Zeitverzögerung (600 ms) genauso gut wie ohne Zeitverzögerung (0 ms).

$$H_0 : \mu_{\text{Gesamtleistung, 600 ms, trajektorienbasiert}} = \mu_{\text{Gesamtleistung, 0 ms, trajektorienbasiert}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Gesamtleistung, 600 ms, trajektorienbasiert}} \neq \mu_{\text{Gesamtleistung, 0 ms, trajektorienbasiert}}$$

**Hypothese Z02** Der subjektive Einfluss der Zeitverzögerung auf die Leistungsfähigkeit bei der trajektorienbasierten Steuerung wird von den Probanden als gering (Skalenwert 3) bewertet.

$$H_0 : \mu_{\text{subjektiver Einfluss, trajektorienbasiert}} = 3$$

$$H_1 : \mu_{\text{subjektiver Einfluss, trajektorienbasiert}} \neq 3$$

**Leistungsfähigkeit** Der Operator erzielt mit der trajektorienbasierten Steuerung die gleiche Gesamtleistung wie mit einer direkten Steuerung. Weil hier nur die Anwendung der Teleoperation relevant ist, werden nur die Versuchsfahrten mit Zeitverzögerung (600 ms) betrachtet.

**Hypothese L01** Mit der trajektorienbasierten Steuerung ist die Gesamtleistung mit Zeitverzögerung (600 ms) genauso hoch wie bei direkter Steuerung mit Zeitverzögerung (600 ms).

$$H_0 : \mu_{\text{Gesamtleistung, 600 ms, trajektorienbasiert}} = \mu_{\text{Gesamtleistung, 600 ms, direkt}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Gesamtleistung, 600 ms, trajektorienbasiert}} \neq \mu_{\text{Gesamtleistung, 600 ms, direkt}}$$

**Beherrschbarkeit** Bei der Teleoperation ist die trajektorienbasierte Steuerung genauso gut beherrschbar wie die direkte Steuerung. Es ist nur das Teleoperationsszenario mit Zeitverzögerung relevant. Die Probanden werden um eine subjektive Einschätzung gebeten.

**Hypothese B01** Die trajektorienbasierte Steuerung ist genauso gut beherrschbar wie die direkte Steuerung, wenn jeweils eine Zeitverzögerung (600 ms) vorliegt.

$$H_0 : \mu_{\text{Beherrschbarkeit, 600 ms, trajektorienbasiert}} = \mu_{\text{Beherrschbarkeit, 600 ms, direkt}}$$

$$H_1 : \mu_{\text{Beherrschbarkeit, 600 ms, trajektorienbasiert}} \neq \mu_{\text{Beherrschbarkeit, 600 ms, direkt}}$$

### 6.1.3.3 Datenaufbereitung und Auswertungsmethodik

Die Aufbereitung der Daten zur Überprüfung mit den Hypothesen erfolgt hauptsächlich in MATLAB, weil die Daten bereits in der Simulink-Umgebung aufgezeichnet werden. Zur statistischen Auswertung dient SPSS.

**Fahrtzeit** Die Fahrtzeit zum Absolvieren der Fahraufgabe wird definiert als die reine Zeit, in der das Fahrzeug bewusst entlang des Parcours bewegt wird. Unterschiede zwischen den Probanden entstehen sowohl durch unterschiedliche Startzeiten nach Simulationsbeginn als auch durch unterschiedlich langes Anhalten an den Stoppschild-Situationen. Diese Standzeiten werden eliminiert.

**Spurhaltung** Die Spurhaltung wird definiert als prozentualer Anteil der Strecke, den das Fahrzeug innerhalb der eigenen Spur absolviert. Die Querablage ist der orthogonale Abstand vom Fahrzeugschwerpunkt zur Mittellinie der Spur. Das Fahrzeug befindet sich außerhalb der Spur, wenn die Querablage größer als der halbe Wert der Differenz von Fahrzeugbreite (1,98 m) und Fahrspurweite (3 m) ist.

**Gesamtleistung** Die Probanden werden zu Beginn eingewiesen, dass der Fokus der Untersuchung auf genauem Spurfolgen liegt und erst als weiterer Aspekt die Schnelligkeit berücksichtigt wird. Als Maß für die Gesamtleistungsfähigkeit wird die Spurhaltung zweifach zur Fahrtzeit gewertet. Die Gesamtleistung  $P_{\text{gesamt}}$  wird auf jeweils maximal und minimal erreichte Werte von Spurhaltung LK und Fahrtzeit  $T$  normiert:

$$P_{\text{gesamt}, i} = \frac{2}{3} \frac{LK_i - LK_{\min}}{LK_{\max} - LK_{\min}} + \frac{1}{3} \frac{T_i - T_{\max}}{T_{\min} - T_{\max}} \quad (6.1)$$

Die Gesamtleistung kann demnach Werte von null bis eins annehmen.

**Subjektive Messgrößen** Die Ergebnisse der subjektiven Messgrößen werden in einer SPSS-Datei codiert und gespeichert. Die Ergebnisse werden direkt in SPSS ausgewertet.

**Statistische Evaluation** Die statistische Auswertung der aufgestellten Hypothesen erfolgt durch statistische Testverfahren. Ein Schema zur Auswahl eines geeigneten Tests ist etwa in [Sch12, S. 89 f.] gegeben. Für den Vergleich zweier Mittelwerte von abhängigen Stichproben wird der t-Test verwendet [Bor05, S. 143]. Wenn der Stichprobenumfang größer oder gleich 30 ist, können mit Hilfe des zentralen Grenzwertsatzes die Mittelwerte als approximativ normalverteilt angesehen werden [Sib12, S. 368].

#### 6.1.3.4 Ergebnisdarstellung

Dieses Kapitel stellt die Ergebnisse der statistischen Auswertung der Probandenstudie vor. Proband Nr. 26 wird teilweise von der Bewertung ausgenommen, weil er mit der direkten Steuerung ohne Zeitverzögerung an den Haltepunkten nicht angehalten hat und somit keine vergleichbare Fahrtzeit erreicht hat. Der Freiheitsgrad einiger statistischer Tests reduziert sich damit auf 30.

**6.1.3.4.1 Allgemeine Ergebnisdarstellung** Die statistischen Ergebnisse der relevanten Messgrößen sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Bei der Spurhaltung erreichen die Probanden mit der trajektorienbasierten Steuerung im Mittel die besten Ergebnisse. Ohne Zeitverzögerung beträgt die Spurhaltung  $\hat{\mu}=0,732$  ( $\hat{\sigma}=0,088$ ), mit Zeitverzögerung  $\hat{\mu}=0,731$  ( $\hat{\sigma}=0,087$ ). Mit der konventionellen direkten Steuerung verringert sich die Spurhaltung von  $\hat{\mu}=0,593$  ( $\hat{\sigma}=0,131$ ) ohne Zeitverzögerung auf  $\hat{\mu}=0,361$  ( $\hat{\sigma}=0,104$ ) mit Zeitverzögerung. Die Gesamtleistung der Probanden war im Mittelwert am höchsten beim direkten Steuerungskonzept

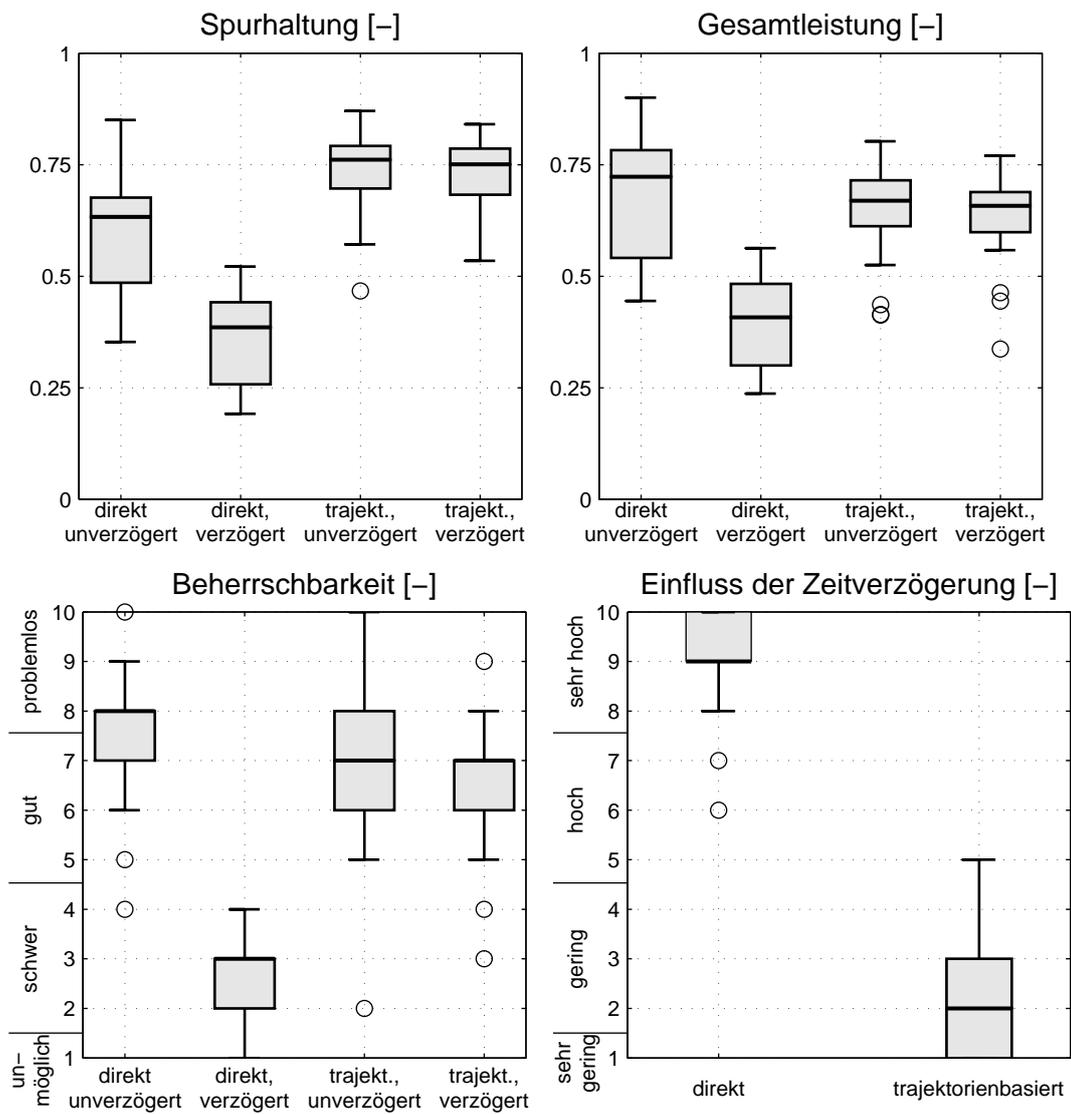


Abbildung 6.1: Darstellung der objektiven Ergebnisse, Spurhaltung und Gesamtleistung, sowie der subjektiven Ergebnisse, Beherrschbarkeit und Einfluss der Zeitverzögerung, der Probandenstudie. Die statistischen Daten sind jeweils als Box-Plot dargestellt. Ausreißer sind als Kreise dargestellt.

ohne Zeitverzögerung ( $\hat{\mu}=0,684$ ,  $\hat{\sigma}=0,131$ ), am niedrigsten beim direkten Steuerungskonzept mit Zeitverzögerung ( $\hat{\mu}=0,403$ ,  $\hat{\sigma}=0,094$ ). Die Probanden erzielten mit der trajektorienbasierten Steuerung relativ ähnliche Ergebnisse. Ohne Zeitverzögerung beträgt die Gesamtleistung  $\hat{\mu}=0,655$  ( $\hat{\sigma}=0,096$ ) und mit Zeitverzögerung  $\hat{\mu}=0,632$  ( $\hat{\sigma}=0,094$ ).

Gemäß der subjektiven Eindrücke der Probanden waren sowohl die direkte Steuerung ohne Zeitverzögerung ( $\hat{\mu}=7,41$ ,  $\hat{\sigma}=1,643$ ) als auch die trajektorienbasierter Steuerung ohne Zeitverzögerung ( $\hat{\mu}=6,75$ ,  $\hat{\sigma}=1,626$ ) und mit Zeitverzögerung ( $\hat{\mu}=6,47$ ,  $\hat{\sigma}=1,270$ ) gut beherrschbar. Lediglich die direkte Steuerung mit Zeitverzögerung wurde als schwer beherrschbar eingestuft ( $\hat{\mu}=2,56$ ,  $\hat{\sigma}=0,982$ ). Den subjektiven Einfluss der Zeitverzögerung auf die Leistungsfähigkeit mit dem jeweiligen Steuerungskonzept bewerten die Probanden durchschnittliche als sehr hoch bei direkter Steuerung ( $\hat{\mu}=8,97$ ,  $\hat{\sigma}=1,150$ ) und gering bei trajektorienbasierter Steuerung ( $\hat{\mu}=2,00$ ,  $\hat{\sigma}=1,164$ ).

**6.1.3.4.2 Überprüfung der Hypothesen** In diesem Kapitel werden die statistischen Auswertungen nun auf die Bewertungen der Hypothesen übertragen.

**Sicherheit** Die Kritikalität der Steuerungskonzepte wird durch Betrachtung der Spurhaltung im Stadtparcours bewertet. Die Spurhaltung zeigt signifikante Unterschiede zwischen trajektorienbasierter Steuerung mit Zeitverzögerung und der direkten Steuerung ohne Zeitverzögerung ( $t=6,591$ ,  $df=30$ ,  $p<0,001$ ). Die Spurhaltung ist auf dem Parcours bei trajektorienbasierter Steuerung mit Zeitverzögerung ( $\hat{\mu}=0,733$ ) besser als bei konventioneller Steuerung ohne Zeitverzögerung ( $\hat{\mu}=0,592$ ). Die Hypothese S01 wird demnach abgelehnt.

**Hypothese S01** Auf dem Stadtparcours ist die Spurhaltung bei Zeitverzögerung (600 ms) mit trajektorienbasierter Steuerung genauso gut wie bei direkter Steuerung ohne Zeitverzögerung (0 ms). **wird abgelehnt**

Der Mittelwertvergleich des direkten Steuerungskonzepts mit und ohne Zeitverzögerung zeigt ebenfalls einen signifikanten Unterschied ( $t=10,940$ ,  $df=30$ ,  $p<0,001$ ). Die Spurhaltung ist bei direkter Steuerung mit Zeitverzögerung ( $\hat{\mu}=0,361$ ) deutlich schlechter als ohne Zeitverzögerung ( $\hat{\mu}=0,592$ ). Die Hypothese S02 wird abgelehnt.

**Hypothese S02** Auf dem Stadtparcours ist die Spurhaltung bei Zeitverzögerung (600 ms) mit direkter Steuerung genauso gut wie bei direkter Steuerung ohne Zeitverzögerung (0 ms). **wird abgelehnt**

**Zeitverzögerung** Die Leistungsfähigkeit des trajektorienbasierten Steuerungskonzepts soll nicht von den Zeitverzögerungen abhängig sein. Die Auswertung ergibt, dass kein signifikanter Unterschied in der Gesamtleistung bei trajektorienbasierter Steuerung mit und ohne Zeitverzögerung vorliegt ( $t=2,035$ ,  $df=31$ ,  $p=0,050$ ). Ein Unterschied zwischen der Gesamtleistung ohne Zeitverzögerung ( $\hat{\mu}=0,655$ ) und mit Zeitverzögerung ( $\hat{\mu}=0,632$ ) ist nicht statistisch abgesichert. Die Hypothese Z01 kann nicht abgelehnt werden.

**Hypothese Z01** Mit der trajektorienbasierten Steuerung ist die Gesamtleistung aus Spurhaltung und Fahrtzeit mit Zeitverzögerung (600 ms) genauso gut wie ohne Zeitverzögerung (0 ms). **kann nicht abgelehnt werden**

Die subjektive Einschätzung der Abhängigkeit von Zeitverzögerungen bei trajektorienbasierter Steuerung zeigt einen signifikanten Unterschied zum angenommenen geringen Einfluss ( $t=29,371$ ,  $df=31$ ,  $p<0,001$ ). Der Einfluss der Zeitverzögerung wird für die trajektorienbasier-

te Steuerung ( $\hat{\mu}=2,00$ ) als sehr gering wahrgenommen. Die Hypothese Z02 wird abgelehnt.

**Hypothese Z02** Der subjektive Einfluss der Zeitverzögerung auf die Leistungsfähigkeit bei der trajektorienbasierten Steuerung wird von den Probanden als gering (Skalenwert 3) bewertet. **wird abgelehnt**

**Leistungsfähigkeit** Die Leistungsfähigkeit der Steuerungsansätze wird mit Hilfe des Kennwerts Gesamtleistung erfasst. Bei Anwesenheit von Zeitverzögerungen ist die mittlere Gesamtleistung der beiden Steuerungsansätze signifikant unterschiedlich ( $t=11,728$ ,  $df=31$ ,  $p<0,001$ ). Die trajektoriebasierte Steuerung erzielt bessere Ergebnisse ( $\hat{\mu}=0,632$ ) als die direkte Steuerung ( $\hat{\mu}=0,406$ ). Die Hypothese L01 wird abgelehnt.

**Hypothese L01** Mit der trajektorienbasierten Steuerung ist die Gesamtleistung als gewichtete Summe aus Spurhaltung und Fahrtzeit mit Zeitverzögerung (600 ms) genauso hoch wie bei direkter Steuerung mit Zeitverzögerung (600 ms) . **wird abgelehnt**

**Beherrschbarkeit** Die Beherrschbarkeit wird von den Probanden subjektiv bewertet. Mit Zeitverzögerung unterscheiden sich die Mittelwerte der Beherrschbarkeit signifikant zwischen beiden Steuerungskonzepten ( $t=14,428$ ,  $df=31$ ,  $p<0,001$ ). Die trajektorienbasierte Steuerung ( $\hat{\mu}=6,47$ ) wird als besser beherrschbar eingestuft als die direkte Steuerung ( $\hat{\mu}=2,56$ ). Die Hypothese B01 wird abgelehnt.

**Hypothese B01** Die trajektorienbasierte Steuerung ist genauso gut beherrschbar wie die direkte Steuerung, wenn jeweils eine Zeitverzögerung (600 ms) vorliegt. **wird abgelehnt**

### 6.1.3.5 Fazit

Die Probandenstudie hat insgesamt die Ergebnisse aus der Voruntersuchung bestätigt. Mit der für die Teleoperation relevanten Zeitverzögerung wird die Leistungsfähigkeit des Fahrers mit der direkten Fahrzeugsteuerung gegenüber einem konventionellen manuellen Fahren ohne Zeitverzögerung stark reduziert. Es können sicherheitskritische Situationen entstehen, weil die Spurhaltung deutlich schlechter wird (Hypothese S02). Das trajektorienbasierte Steuerungskonzept bringt hingegen einen Sicherheitszugewinn bei der Teleoperation. So wird die Spurhaltung mit Zeitverzögerung gegenüber einem konventionellen Führen des Fahrzeugs ohne Zeitverzögerung erhöht. Den Probanden gelang es besser, das Fahrzeug innerhalb der eigenen Fahrspur zu halten (Hypothese S01).

Zudem konnte nachgewiesen werden, dass die Entwicklungsziele des Shared-Control-Ansatzes erfüllt wurden. Der trajektorienbasierte Ansatz zeigt ein hohes Maß an Robustheit gegenüber Zeitverzögerungen. So haben die statistischen Untersuchungen gezeigt, dass kein signifikanter Unterschied zwischen der Gesamtleistung mit trajektorienbasierter Steuerung mit sowie ohne Zeitverzögerung nachgewiesen werden kann (Hypothese Z01). Dies stimmt mit den subjektiven Eindrücken der Probanden überein, die keinen Unterschied beim trajektorienbasierten Steuern zwischen den Fahrten mit und ohne Zeitverzögerung wahrgenommen haben. Der Einfluss der Zeitverzögerung auf das trajektorienbasierte Steuerungskonzept wird als sehr gering bewertet (Hypothese Z02).

Die Leistungsfähigkeit bei der Teleoperation ist signifikant unterschiedlich zwischen der direkten und der trajektorienbasierten Steuerung. Unter Zeitverzögerung wird mit der trajektorienbasierten Steuerung eine sehr viel höhere Gesamtleistung erreicht (Hypothese L01).

Dabei ist die Fahrtzeit mit direkter Steuerung zwar schneller, die Probanden waren aber nicht in der Lage das Fahrzeug bei der hohen durchschnittlichen Geschwindigkeit in der eigenen Spur zu halten. So sanken die Spurhaltewerte überproportional stark ab, so dass nahezu alle Probanden sich nur noch maximal die Hälfte der Strecke in der eigenen Spur befanden. Im Minimum lag dieser Wert bei unter 20 Prozent. Bei trajektorienbasierter Steuerung gelang es allen Probanden, mehr als die Hälfte der Strecke innerhalb der eigenen Spur zu fahren. Der Mittelwert war mit Zeitverzögerung doppelt so hoch wie bei der direkten Steuerung mit Zeitverzögerung. Bei der Interpretation der absoluten Spurhalte-Werte muss berücksichtigt werden, dass der Streckenverlauf und die Fahrspurbreite sehr anspruchsvoll waren und eine nicht hundertprozentige Spurhaltung vom Versuchsdesign vorgesehen war, um die Probanden differenzieren zu können. Die Werte bedeuten nicht, dass es mit den Steuerungskonzepten unmöglich ist, in der Spur zu bleiben. Nur unter den gegebenen Randbedingungen mit eingeschränktem auditiven und haptischen Feedback sowie der Vorgabe, möglichst schnell zu fahren, war die Aufgabe anspruchsvoll.

Abschließend sei noch auf die positiven Ergebnisse bei der Betrachtung der Beherrschbarkeit hingewiesen. Hierbei wird die trajektorienbasierte Steuerung bei Zeitverzögerung im Mittelwert als gut beherrschbar bewertet. Die direkte Steuerung wird als schwer beherrschbar eingestuft (Hypothese B01). Dies stimmt mit den bisherigen Ausführungen überein, wonach ein direktes Steuerungskonzept zur Teleoperation bei hohen Zeitverzögerungen nur bedingt geeignet ist.

## 6.2 Validierung des Ansatzes im Realfahrzeug

Der Ansatz der trajektorienbasierten Steuerung wurde wie in Kapitel 5 beschrieben in einem Versuchsträger implementiert. Dieser Versuchsträger sowie der Operatorarbeitsplatz und die allgemeine Systemarchitektur werden bereits in Kapitel 2.2.2 vorgestellt. Dieses Kapitel stellt nun die notwendigen Erweiterungen zum Durchführen trajektorienbasierter Testfahrten und die Ergebnisse dar. Dazu definiert Kapitel 6.2.1 zunächst die Randbedingungen der Versuchsfahrten. Kapitel 6.2.2 illustriert die Funktionsweise der trajektorienbasierten Steuerung. Abschließend werden Testfahrten mit direkter und trajektorienbasierter Steuerung verglichen (Kapitel 6.2.3).

### 6.2.1 Randbedingungen

Die verwendete Versuchsstrecke besteht aus einer Fahrspur ohne Fahrbahnmarkierungen. Die Gesamtlänge beträgt etwa 650 Meter und die Fahrspur ist 4,5 Meter breit. Die Form der Teststrecke entspricht einer langgezogenen S-Kurve mit minimalem Kurvenradius von etwa 200 Metern. Eine exemplarische Testfahrt ist in Abbildung 6.2 visualisiert. Bei den Versuchsfahrten wird durchgängig LTE als Übertragungstechnologie benutzt. Die gesamte Zeitverzögerung beträgt durch die Pufferung der Videobilder etwa 600 Millisekunden (Kapitel 2.3).

Bei den aufgezeichneten Testfahrten stand keine DGPS-Referenzstation zur Verfügung. Lediglich die satellitenbasierte EGNOS-Korrektur wurde zur Verbesserung der Positionsschätzung verwendet. Die Teststrecke ist relativ unverbaut und ermöglicht eine gute Sicht auf die Satelliten. Für diese Situationen wird von der Spezifikation der RT3003 eine Circular Error Probable (kurz CEP, Kreisfehlerwahrscheinlichkeit) von 0,6 m angegeben [Oxf11, S. 20]. Die

Standardabweichung der Position erreichte bei den Tests gemessene Werte um etwa 0,4 m je Richtung.

Ein wichtiges Kriterium zum Bewerten der Leistungsfähigkeit des Steuerungskonzeptes ist die Spurführungsaufgabe des Operators. Weil die Positionsmessung in der Realität im Gegensatz zur Simulation nicht exakt ist, kann die Spurführung nicht durch Abgleich von Istposition und Kartendaten erfolgen. Um die Spurführung objektiv erfassen zu können, wurde der Abstand der Fahrbahnränder vom Fahrzeug gemessen. Als Messeinrichtung kommt ein Lidarsensor vom Typ SICK LMS291-S05 zum Einsatz. Dieser wurde an einer Dachhalterung befestigt und um etwa 13 Grad auf die Fahrbahn geneigt, so dass die Laserstrahlen etwa sechs Meter vor dem Fahrzeug auf die Fahrbahn treffen. Zur Erkennung der Fahrbahn wird ein Douglas-Peucker-Algorithmus [Dou73] verwendet, der die einzelnen Messpunkte zu Geraden segmentiert. Es wird die wahrscheinlichste Geradenkombination ausgewählt, die die ebene Oberfläche der Fahrbahn repräsentiert. Ergebnisse der Fahrbahnrandsschätzung sind ebenfalls in Abbildung 6.2 dargestellt. Die Fahrbahnränder können subjektiv in guter Näherung mit der Fahrbahn im Satellitenbild zur Überdeckung gebracht werden.

### 6.2.2 Funktionsweise

In diesem Kapitel werden die allgemeinen Ergebnisse realer Testfahrten vorgestellt. Abbildung 6.3 zeigt eine Situation, in der der Operator das Fahrzeug zunächst am letzten Segment anhalten lässt, indem er keine weiteren Eingaben tätigt. Dann erfolgt das Reinitialisieren des Systems, wodurch das Fahrzeug in den Zustand *Stehen* übergeht, falls es nicht wie in diesem Fall bereits vorher stand (Abbildung 6.3, Sekunde 38). Die Bremse wird dabei dauerhaft betätigt, der Getriebe-Gangwahlhebel automatisch in Stellung *Drive* gebracht, um demnächst wieder losfahren zu können. Der Operator gibt unterschiedliche Segmente vor, wartet auf die entsprechende Bestätigungs-Nachricht und definiert dann das nächste Segment. Die Segment Identifier wird dabei inkrementiert. Zu einem beliebigen Zeitpunkt nach der Initialisierung kann der Operator das Abfahren des Pfades starten. Der Zustand *Stehen* wird aufgelöst (Abbildung 6.3, Sekunde 47). Der Operator kann Segmente zwischen zwei und 20 Metern Länge variieren. Die Krümmungsänderung variiert um null herum, weil die Teststrecke relativ gerade ist und nur einige leichte Bögen beinhaltet. Je nach Vorausschauweite passt der Operator die Länge der Klothoiden an. Bei größeren Krümmungsänderungen und somit reduzierter Vorausschauweite wählt der Operator eher kleinere Klothoiden um fünf Meter Länge. Bei geradem Streckenverlauf am Ende der Teststrecke werden auch Klothoiden mit der Maximallänge gelegt (Abbildung 6.4). Die Eingabe-Frequenz, mit der der Operator neue Segmente vorgibt, liegt bei etwa 1,0 Hz. Diese ist nach oben hin limitiert, weil die Sicherheitsprinzipien des Steuerungskonzeptes auf strikter Sequenzialität beruhen.



Abbildung 6.2: Das teleoperierte Fahren wurde auf der dargestellten Teststrecke validiert. In rot ist dabei der exemplarische Verlauf des Fahrzeugschwerpunkts bei einer Testfahrt dargestellt. Die detektierten Fahrbahnränder sind in weiß dargestellt (Satellitenbild: Google Earth).

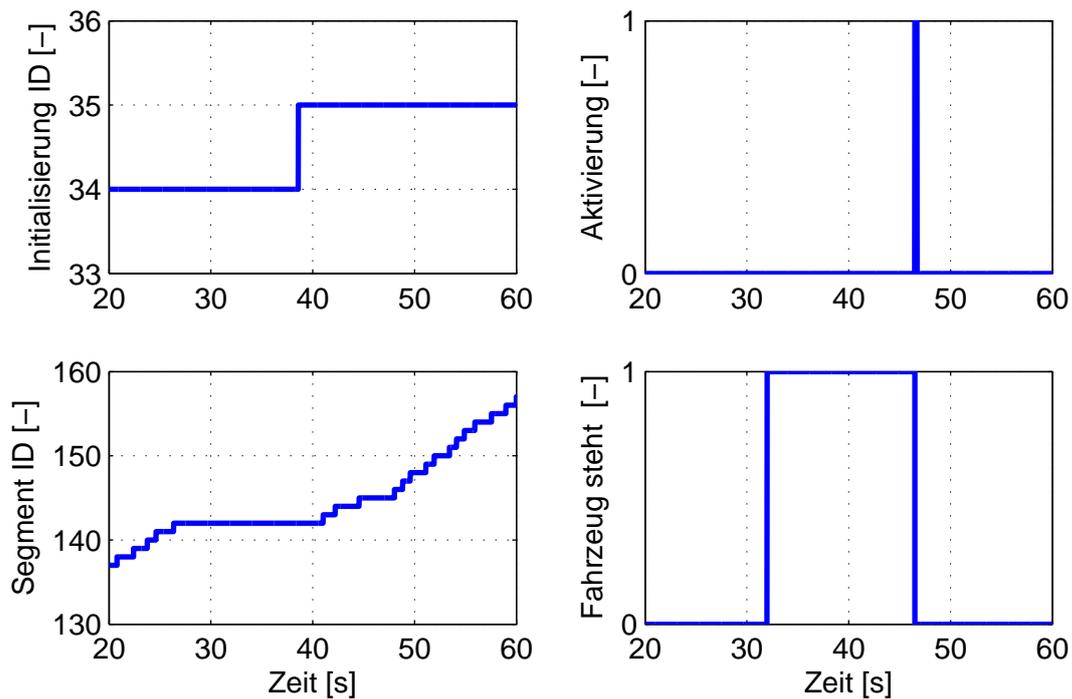


Abbildung 6.3: Initialisierungseingaben des Operators bei einer Testfahrt im Realfahrzeug.

Daher ist es erst möglich, das nächste Segment vorzugeben, wenn das letzte bereits vom Fahrzeug bestätigt wurde. Durch die Verarbeitungszeit auf der Rapid-Prototyping-Hardware (Zykluszeit 200 ms) vergehen im Worst-Case 400 ms. Wenn man von einer durchschnittliche Round-Trip-Time der Datenübertragung von etwa 100 ms ausgeht, ergibt sich eine maximale Eingabefrequenz von 2 Hz. Dies kann als ausreichend angenommen werden, weil etwa die ergonomische Grenze von Lenkbewegungen des Menschen bei 1,5 Hz liegt [Mit04, S. 607]. Abbildung 6.4 zeigt, dass je größer die Längen der Klothoiden gewählt werden, desto langsamer tätigt der Operator Eingaben.

Wenn der Operator das Start-Signal emittiert, beginnt das Fahrzeug selbstständig den vorgegebenen Pfad abzufahren (Abbildung 6.5, Sekunde 47). Dabei gibt der Operator dem

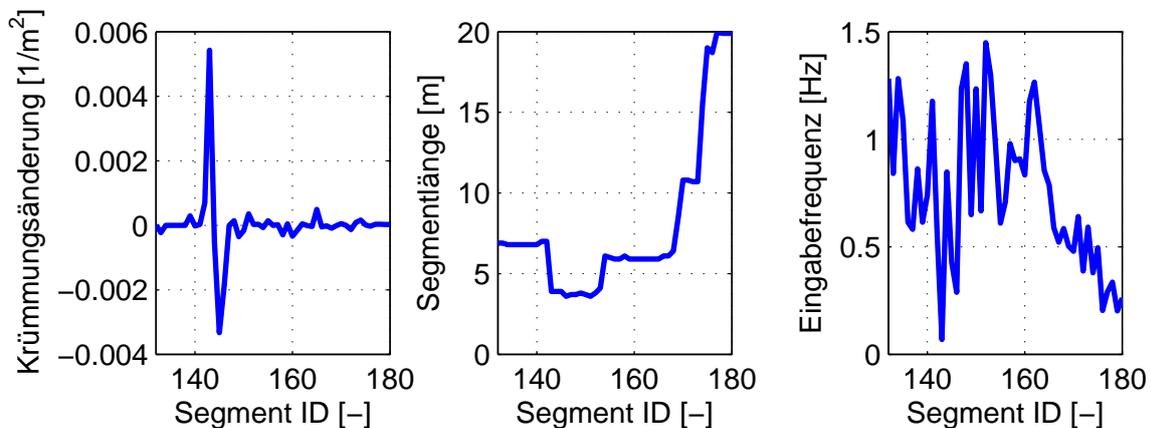


Abbildung 6.4: Steuerungseingaben des Operators bei einer Testfahrt im Realfahrzeug.

Fahrzeug implizit durch die Frequenz und die Länge seiner Segmente die gewünschte Fahrgeschwindigkeit vor. Wenn der Operator kein Segment mehr vorgibt oder einen Haltepunkt setzt, hält das Fahrzeug entsprechend vor dem Ende des Pfades oder vor dem Haltepunkt an.

Abbildung 6.5 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf einer Testfahrt. Als maximal mögliche Geschwindigkeit wird diejenige Geschwindigkeit bezeichnet, die das Fahrzeug fahren könnte, wenn es zum Pfadende nur den minimalen Bremsweg als Abstand vorhält. Würde das Fahrzeug demnach schneller als diese Geschwindigkeit fahren, könnte es nicht mehr am Pfadende anhalten. Die maximale Geschwindigkeit wurde hier auf 30 km/h limitiert. Ferner werden die Vorgabegeschwindigkeit des Operators und die letztendliche Sollgeschwindigkeit an den Regler dargestellt. Am Sollgeschwindigkeitsverlauf ist ersichtlich, dass das Fahrzeug sowohl die gewünschte Geschwindigkeit des Operators berücksichtigt als auch versucht, einen Sollabstand zum Ende des Pfades einzuregeln (Abbildung 6.5, unten). Die Sollgeschwindigkeit ist daher etwas höher als nur durch die implizite Segmentvorgabe des Operators, weil der Istabstand meist größer als der für komfortables Anhalten notwendige Sollabstand ist. Entsprechend des Entwurfs der Längsdynamik-Regelung (Kapitel 5.2.3) wird eine möglichst schnelle, aber auch gleichmäßige Annäherung an den Sollabstand bevorzugt. Bei Sekunde 70 sind die Eingaben des Operators zu langsam. Der Regler erkennt dies und reduziert bereits vorher die Geschwindigkeit. Die Reduktion reicht aber nicht aus, die Sollgeschwindigkeit wird letztendlich durch den maximalen Geschwindigkeitsverlauf beschränkt. Bei weiter ausbleibenden Operatoreingaben würde das Fahrzeug mit maximal eingestellter Verzögerung bis in den Stand abbremsen und unmittelbar am Pfadende zum Stehen kommen. Durch weitere Eingaben wendet der Operator dies ab und die Sollgeschwindigkeit orientiert sich wiederum an den neuen Operatoreingaben.

Der Querregler folgt dem vorgegebenen Pfad. Dabei werden maximale Querablagen von et-

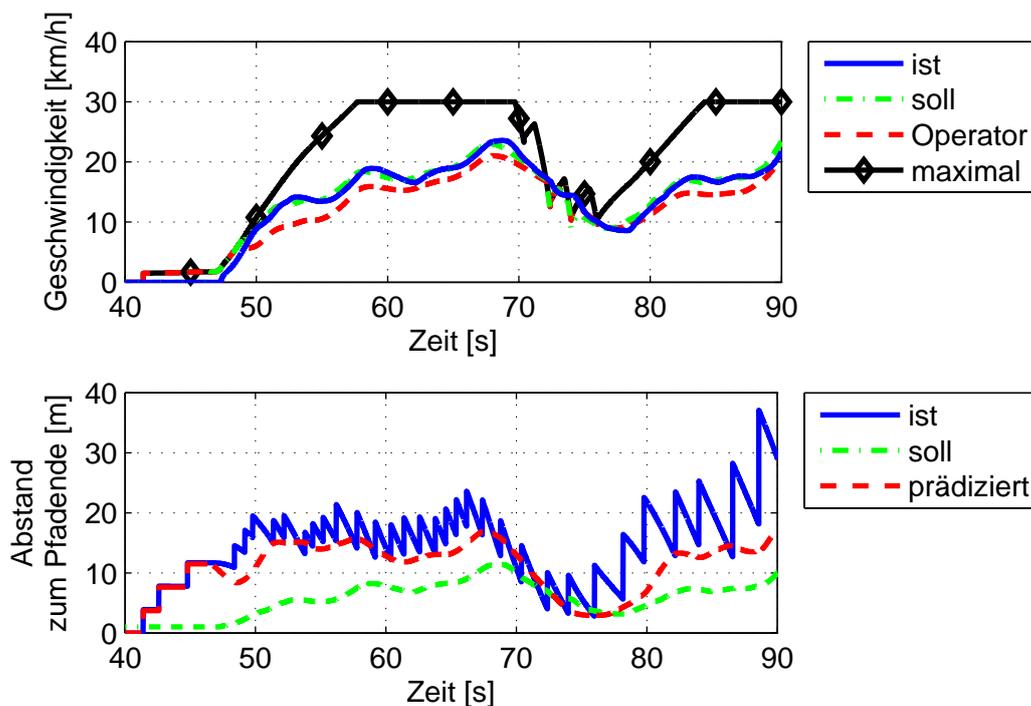


Abbildung 6.5: Längsregelung während der Bahnfolge.

wa 20 cm erreicht, der Mittelwert liegt unter 10 cm (Abbildung 6.6). Der Lenkwinkel verläuft ruhig und gleichmäßig. Die etwas höheren Querablagen bei Sekunde 50 ergeben sich aus dem Anfahren in einer Kurve. Danach wird eine höhere Regelgüte erreicht. Die Güte liegt im Bereich der Leistungsfähigkeit von anderen Querführungssystemen. So gibt etwa Waldmann [Wal09, S. 100] an, im mitteldynamischen Bereich unterhalb von 20 cm zu bleiben. Bei Söhnitz [Söh01, S. 145] werden sogar maximale Querablagen von 60 cm angegeben (Kapitel 3.1.2). Einschränkend muss gesagt werden, dass das hier beschriebene System nicht im höher dynamischen Bereich getestet wurde, weil dies außerhalb der Spezifikationen für den Stadtverkehr liegt. Die Sollvorgaben der Längsdynamik-Regelung basieren auf einer maximalen Querschleunigung, die für die Testfahrten mit  $2 \text{ m/s}^2$  parametrisiert wurde. Der Querregler wurde wie der Längsregler auf robustes und komfortables Folgen der Führungsgrößen ausgelegt. Dies hat sich aus den Testfahrten, die üblicherweise mit Sicherheitsfahrer erfolgten, als sinnvoller Kompromiss zwischen maximalem Regelfehler und ruhigem Lenkverhalten erwiesen. Im Hinblick auf eine fahrerlose Fahrzeugführung könnte die Regelung noch etwas schärfer und präziser ausgelegt werden, mit entsprechenden Einbußen im Komfort. Im Gegensatz zur Längsregelung, bei der ein vorhersehbares und gleichmäßiges Verhalten nicht nur den optionalen Insassen, sondern auch den anderen Verkehrsteilnehmern zu Gute kommt, sind bei einer unkomfortableren Querführung keine Auswirkungen auf die anderen Verkehrsteilnehmer zu erwarten.

### 6.2.3 Vergleichsfahrten

Zum Vergleich zu den Testfahrten mit der trajektorienbasierten Steuerung wurden teleoperierte Fahrten mit dem konventionellen direkten Steuerungskonzept durchgeführt. Das Versuchsssetup war dabei identisch. Die Steuerung erfolgte über LTE und die Videodaten wurde gepuffert, so dass eine effektive Zeitverzögerung von 600 Millisekunden resultierte. Mit beiden Steuerungskonzepten hatte der Operator keine Schwierigkeiten der vorgegebenen Strecke zu folgen, weil die Fahrbahnbreite relativ breit ist und nur aus einer Fahrspur besteht. Zudem war sich der Operator der Situation bewusst, dass er ein reales Fahrzeug bewegt, und verhielt sich entsprechend umsichtig bei der Spurführung. Im Gegensatz zu der Probandenstudie im Simulator war der Operator bei der Realfahrt besonders geschult und verfügte über mehrjährige Erfahrung mit dem Versuchsfahrzeug und der teleoperierten Steuerung. Die Geschwindigkeit wurde demnach entsprechend dem Szenario und dem

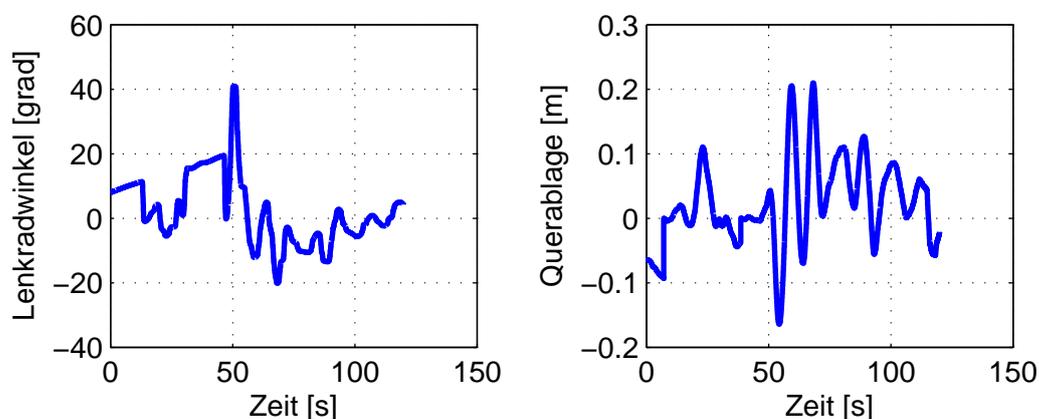


Abbildung 6.6: Querregelung während der Bahnfolge.

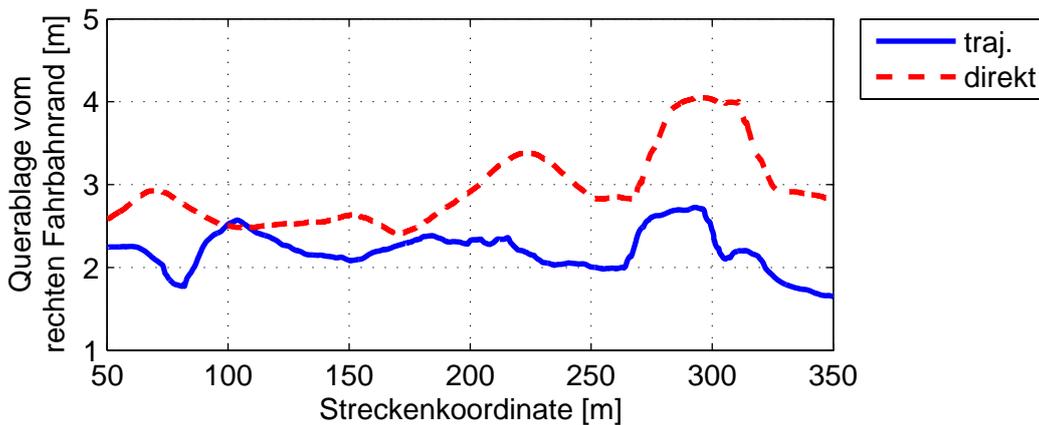


Abbildung 6.7: Querführung des Operators bei direkter und trajektorienbasierter Steuerung.

operator-individuellen Sicherheitsempfinden gewählt. Entsprechend dieses Vorgehens erreichte der Operator mit jedem Steuerungskonzept eine hundertprozentige Spurhaltung, so dass sich diese nicht zur Differenzierung der Steuerungsansätze eignet.

Dennoch unterscheiden sich die gewählten Fahrtrouten mit beiden Steuerungskonzepten. Die Standardabweichung der Querablage betrug im Mittel mit dem direkten Steuerungskonzept 0,42 m, mit dem trajektorienbasierten 0,29 m (Abbildung 6.7). Aufgrund der hohen Zeitverzögerung imitiert der Operator beim direkten Steuern bereits eine Variante der Move-and-wait-Strategie. Dabei versucht der Mensch, die Fahrzeugführungsaufgabe eher durch die antizipatorische Vorsteuerung als durch die kompensatorische Regelung zu lösen. Es werden Stellbefehle getätigt und mit einer entsprechenden Korrektur solange gewartet, bis eine Fahrzeugreaktion im zeitverzögerten Videobild ersichtlich wird. Dies führt in diesem Fall zu periodischen Lenkwinkleingaben mit etwa 0,25 Hz (Abbildung 6.8, rechts, Sekunde 45-70). Offensichtlich resultiert dieses bei der aktuellen Geschwindigkeit noch nicht in Stabilitätsproblemen, kann aber bei unvorhergesehenen Ereignissen oder höheren Geschwindigkeiten problematisch werden. Mit der trajektorienbasierten Steuerung ist der Verlauf gleichmäßiger und durch keine Schwingungen unterlagert (Abbildung 6.8, links).

Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt bei den direkt gesteuerten Testfahrten 24,65 km/h ( $\hat{\sigma}=5,03$  km/h). Mit dem trajektorienbasierten Steuerungskonzept erreicht das Fahrzeug eine mittlere Geschwindigkeit von 16,97 km/h ( $\hat{\sigma}=5,34$  km/h). Die erreichte Höchstgeschwindigkeit

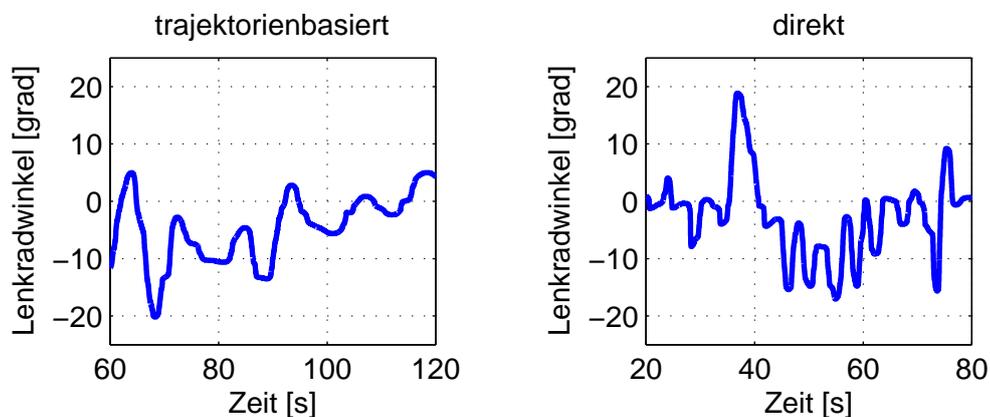


Abbildung 6.8: Lenkradwinkel bei direkter und trajektorienbasierter Steuerung.

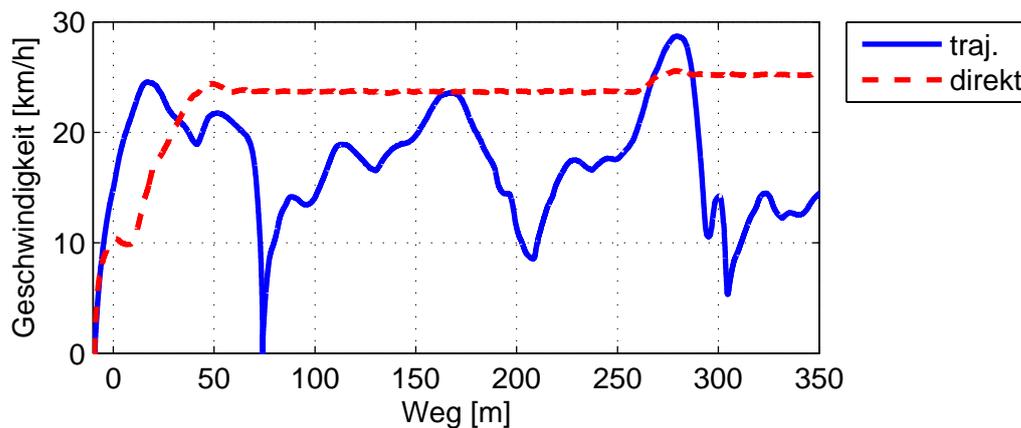


Abbildung 6.9: Geschwindigkeiten im Vergleich: direkte und trajektorienbasierte Steuerung.

keit ist mit beiden Steuerungskonzepten gleich hoch und liegt bei etwa 30 km/h (Abbildung 6.9). Die Geschwindigkeit bei direkter Fahrweise ist im Mittel höher und etwas weniger variabel. Der Grund ist, dass der Operator eine Tempomat-Geschwindigkeit vorgibt. Solange er sich zutraut mit dieser Geschwindigkeit zu fahren, führt er keine weiteren Anpassungen durch. Die trajektorienbasierte Steuerung passt die Geschwindigkeit jederzeit der impliziten Vorgabe durch den Operator an. Wenn der Operator nicht genügend Pfad vorgegeben hat, verringert das Fahrzeug die Geschwindigkeit, um gegebenenfalls am aktuellen Pfadende anzuhalten. Dies passiert dem Operator bei Sekunde 75 in Abbildung 6.9. Die Geschwindigkeit ist somit zwar der spezifischen Vorausschauweite des Operators angepasst, bei der direkten Steuerung scheint der Operator allerdings eine Geschwindigkeit einzustellen, deren Anhalteweg er noch nicht komplett überblicken kann. Dieses Risiko scheint der Operator zu akzeptieren. Generell bilden sich zwei unterschiedliche Verhaltensmuster beim Operator aus. Bei der direkten Steuerung wird eine konstante Geschwindigkeit durch Verwendung eines Tempomaten bevorzugt, weil das manuelle Einregeln der Geschwindigkeit sehr anstrengend ist. Um das Fahrzeug innerhalb der Fahrspur zu halten, werden dann schnelle, korrigierende Lenkbewegungen durchgeführt. Bei der trajektorienbasierten Steuerung wählt der Operator die Pfadsegmente mit Bedacht, um möglichst exakt der Fahrspur zu folgen. Ein stärkeres Schwanken der Geschwindigkeit nimmt er in Kauf.

---

## 7 Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der trajektorienbasierten Teleoperation diskutiert. Dazu vergleicht Kapitel 7.1 zunächst die Probandenstudie und den Realversuch. Danach werden die Sicherheitsaspekte der Fahrzeugführung erörtert (Kapitel 7.2) und die Eignung des beim Shared-Control-Ansatz gewählten Automatisierungsgrades bewertet (Kapitel 7.3).

### 7.1 Probandenstudie und Realfahrten

Die mit 32 Probanden durchgeführten Versuchsfahrten an einem statischen Fahrsimulator belegen die Einflüsse der Zeitverzögerung auf die beiden Steuerungskonzepte. So konnte mit dem direkten Steuerungskonzept sowohl subjektiv als auch objektiv eine starke Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von der Zeitverzögerung festgestellt werden. Die Probanden waren nicht mehr in der Lage, der Spur zu folgen und bemerkten dies auch. Das trajektorienbasierte Steuerungskonzept zeigte, wie vom Entwurfsprozess vorgesehen, hierbei keinerlei Einflüsse von der Zeitverzögerung. Die Probanden erzielten nahezu identische Ergebnisse mit und ohne Zeitverzögerung und gaben auch subjektiv an, nur eine sehr geringe Abhängigkeit bemerkt zu haben.

Beim Vergleich beider Steuerungskonzepte mit Zeitverzögerung erzielten die Probanden mit der trajektorienbasierten Steuerung die bessere Gesamtleistung. Dabei wurde aber nicht die Gesamtleistung der Basisfahrt mit direkter Steuerung und ohne Zeitverzögerung erreicht. Auch wenn sich die Gesamtleistung nur gering unterscheidet, so sind vor allem die Abweichungen bei der Fahrtzeit offensichtlich. Die Probanden benötigten mit der trajektorienbasierten Steuerung im Mittel fast doppelt so lange wie bei der Basisfahrt. Die Spurtreue war aber um etwa ein Viertel höher.

Die Ursachen hierfür scheinen nicht in generellen Problemen der Probanden mit dem trajektorienbasierten Steuerungskonzept zu liegen. Sowohl die Beherrschbarkeit des direkten Steuerungskonzeptes ohne Zeitverzögerung als auch der trajektorienbasierten Steuerung allgemein wurde von den Probanden im Mittel als gut bewertet. Es ist allerdings zu hinterfragen, weshalb der Mittelwert der Spurhaltung der Probanden in der Basisfahrt ohne Zeitverzögerung und mit konventioneller Steuerung unterhalb von 60 Prozent liegt. Dies ist umso erstaunlicher, weil die Probanden vom Versuchsleiter explizit darauf hingewiesen wurden, dass nicht das schnelle Befahren des Kurses, sondern das Spurhalten und das sichere Fahren im Vordergrund der Fahraufgabe standen. Die Probanden waren nicht in der Lage, diese Vorgaben entsprechend umzusetzen.

Die Komplikationen beim Spurhalten mit der direkten Steuerung resultieren aus einer sehr dynamischen Fahrweise der Probanden. Auch wenn 26 der 32 Probanden subjektiv ihren Fahrstil der Klasse der Normalfahrer zuordneten, zeigten sie bei den Versuchen eine deutlich sportlichere Charakteristik. Bei den Basisfahrten mit dem konventionellen Steuerungskonzept und ohne Zeitverzögerung nutzten die Probanden die Dynamik des Simulationsfahrzeugs komplett aus. Selbst der 95-Perzentil-Bereich erreicht Querbeschleunigungen bis

6  $\text{m/s}^2$ . Dies entspricht nahezu der maximalen Querb beschleunigung des simulierten Fahrzeugmodells. Verzögerungen erfolgten mit den als Maximalwert für die Regelung eingestellten 4  $\text{m/s}^2$ , beschleunigt wurde mit maximal 3  $\text{m/s}^2$  (Abbildung 7.1). In der Abbildung ist ebenfalls das gg-Diagramm eines Normalfahrers als schraffierte Fläche visualisiert. Es ist normalerweise davon auszugehen, dass der Normalfahrer im Stadtverkehr maximale Querb beschleunigungen von etwa 3,5  $\text{m/s}^2$  einstellt. Darüber hinaus meidet dieser kombinierte Längs- und Querb beschleunigungen. Längsdynamisch werden höhere Verzögerungen als Beschleunigungen gefahren. Verzögerungen bleiben unter 3  $\text{m/s}^2$  [Hac82].

Das gewählte Fahrverhalten der Probanden, das offensichtlich nicht ihrem üblichen Fahrstil entspricht, zeigt die Defizite des aktuellen Fahrmodulators auf. Das fehlende auditive und haptische Feedback erlauben den Probanden nicht, ein Gefühl für den Grenzbereich der Querdynamik zu erhalten. Sie bewegen sich damit an der Stabilitätsgrenze des Fahrzeugs, ohne dies zu bemerken. Die Spurführungsaufgabe wird damit deutlich erschwert, wodurch sich die geringen Spurhaltewerte bei direkter Steuerung erklären lassen. Das Verhalten der Probanden entspricht dem bekannten Verhalten aus anderen Studien. Auch hier führte der Verzicht auf akustisches Feedback zu einem starken Unterschätzen der Geschwindigkeit [Eva70]. Die Problematik verschärft sich bei direkter Steuerung und Zeitverzögerung. Abbildung 7.1 zeigt, dass dann noch häufiger hohe Verzögerungen mit hohen Querb beschleunigungen kombiniert werden. Das Spurfolgen wird damit weiter erschwert. Die schlechten Ergebnisse der Probanden verdeutlichen dies.

Die trajektorienbasierte Steuerung zeigt hier ein anderes Verhalten, das die Parametrierung der Pfadplanung und die Reglerauslegung vorgibt. So wird die Pfadplanung auf komfortables Fahren im Straßenverkehr ausgelegt und verwendet eine maximale Querb beschleunigung von 2  $\text{m/s}^2$  sowie eine maximale Längsb beschleunigung von 2  $\text{m/s}^2$  und eine Verzögerung von 4  $\text{m/s}^2$ . Der Regler weicht davon nur minimal ab, wenn etwa ein Geschwindigkeits-Regelfehler ausgeregelt werden muss.

Die Ausnutzung vollkommen unterschiedlicher fahrdynamischer Bereiche des Fahrzeugs

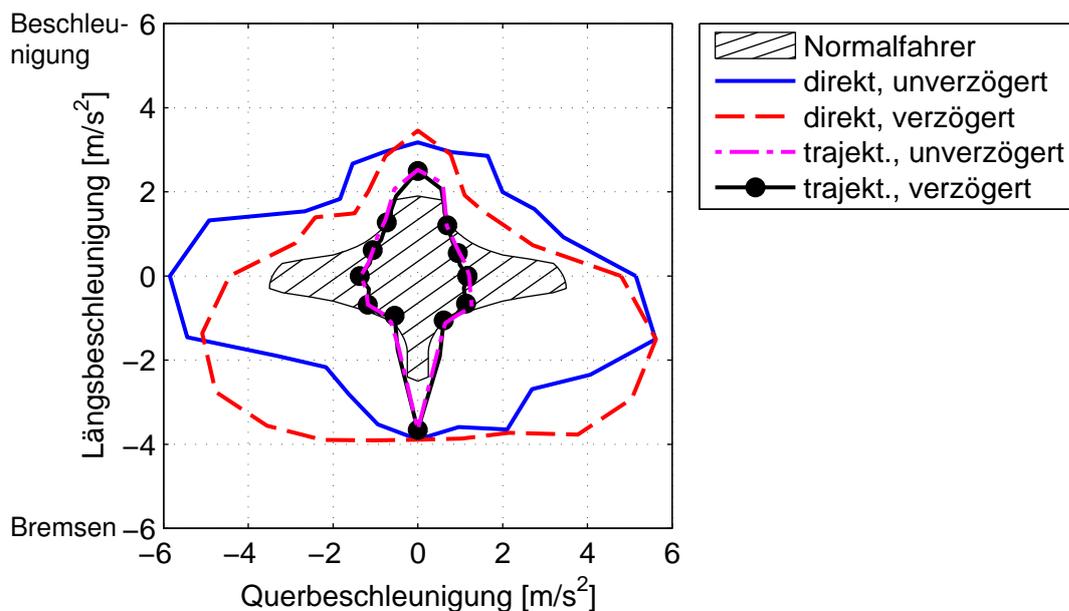


Abbildung 7.1: gg-Diagramm der Längsb beschleunigung über der Querb beschleunigung für alle Probanden aus dem Fahrmodulatorversuch. Dargestellt ist jeweils der 95-Perzentil-Bereich. Zum Vergleich werden Messergebnisse von Normalfahrern aus realen Versuchsfahrten von Wegscheider [Weg05] unterlagert.

und das Verwenden nahezu komplementärer Fahrstile erschweren einen Vergleich zwischen den Steuerungskonzepten. Dennoch ist die verminderte Wahrnehmung von Geschwindigkeit und Querschleunigung durchaus Teil des Problems bei direkter Teleoperation mit eingeschränktem Feedback. So lässt sich konstatieren, dass mit einem direkten Steuerungskonzept jegliches Gefühl für eine angemessene und sichere Fahrweise verloren geht. Zumindest für das hier vorgestellte Konzept einer direkten Teleoperation von Straßenfahrzeugen mit ausschließlich visuellem Feedback. Die Tendenz der Ergebnisse ist durchaus plausibel, auch wenn die quantitativen Unterschiede zwischen den Steuerungskonzepten den unterschiedlichen Fahrstilen geschuldet sind. So kann dennoch aus der Probandenstudie abgeleitet werden, dass das trajektorienbasierte Steuerungskonzept tendenziell eine bessere Erfüllung der Spurführungsaufgabe als die direkte Teleoperation ermöglicht, zu Lasten einer etwas höheren Fahrtzeit.

Diese grundsätzlichen Ergebnisse konnten durch die realen Testfahrten bestätigt werden. Eine grundsätzliche Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem Probandenversuch ist möglich, weil der stationäre Fahr Simulator zugleich als Operatorarbeitsplatz bei den realen Testfahrten diente und hier ebenfalls ausschließlich visuelles Feedback vorhanden war. So zeigte sich auch in den realen Testfahrten eine Vereinfachung der Spurführungsaufgabe mit trajektorienbasierter Steuerung gegenüber der direkten Steuerung. Wie in der Probandenstudie waren die direkt gesteuerten Testfahrten aber generell etwas schneller. Im Gegensatz zur Probandenstudie fahren nur geschulte Operatoren das Realfahrzeug, wodurch sichergestellt ist, dass der Operator mit dem System vertraut ist und über ein hohes Situationsbewusstsein verfügt bzw. sich der Kritikalität bei der Führung eines realen Fahrzeugs bewusst ist. In den realen Fahrversuchen ist das Fahrzeug nie von der Spur abgekommen, weil dies für den Operator höchste Priorität hat. Die Geschwindigkeit wird eher etwas geringer gewählt.

In Ansätzen ist aber auch im realen Fahrversuch wie in der Simulatorstudie das fehlende Geschwindigkeitsgefühl erkennbar. So steuert der Operator das Fahrzeug bereits nahe den Stabilitätsgrenzen des offenen Regelkreises, was durch das Imitieren einer Move-and-Wait-Strategie ersichtlich wird. Der Operator versucht mehr vorzusteuern und weniger zu regeln. Dies könnte in kritischen Situationen, etwa beim dynamischen Spurwechsel, zu fahrdynamischer Instabilität führen. Die Geschwindigkeit sollte daher eigentlich etwas geringer gewählt werden. Wie in der Probandenstudie scheint der Operator dies aber nicht zu bemerken oder wenigstens nicht als kritisch einzuschätzen.

Die Untersuchungen legen nahe, dass es auch dem realen Systemdesign der Teleoperation an auditivem und haptischem Feedback mangelt, das aktuell allein durch die Umsicht des erfahrenen Operators ausgeglichen wird. Beide Defizite werden zukünftig durch einen neu aufgebauten Operatorarbeitsplatz behoben [Tan15, S. 75 f.]. Ob die Probanden damit den Grenzbereich erfahren können und ihr Fahrverhalten anpassen, muss in weiteren Untersuchungen validiert werden.

## 7.2 Sicherheit bei der Fahrzeugführung

Der trajektorienbasierte Ansatz zeigt auch in der Realität die erwartbaren Ergebnisse, die auf Basis des Entwurfs mittels Shared-Control-Ansatz implementiert wurden. So weist er keine Abhängigkeit von der Zeitverzögerung auf, die Spurführung erfolgt ohne Probleme. Dabei stellt der Ansatz sicher, dass der Operator den Pfad nur soweit vorgibt, wie er den Weg im Videobild überblicken kann. Gerade in Kurven sind die Vorausschauweite und somit

auch die Fahrgeschwindigkeit beschränkt. Dieser Sicherheitsaspekt ist besonders aufgrund des beschränkten Feedbacks bei der Teleoperation von großer Bedeutung. Während mit der trajektorienbasierten Steuerung die automatische Regelung eine angemessene Geschwindigkeit wählt, wird mit direkter Steuerung deutlich schneller gefahren. Es muss davon ausgegangen werden, dass der Operator dabei nicht den gesamten Anhalteweg überblicken konnte. Wenn er den Anhalteweg hätten sicher überblicken können, hätte er auch den Pfad entsprechend weit vorausgelegt und das trajektorienbasierte Fahren wäre ähnlich schnell gewesen. Dies lässt den Rückschluss zu, dass Fahrer in Kauf nehmen, nicht den gesamten Anhalteweg überblicken zu können, in dem Wissen, dass sie im Falle eines plötzlich auftretenden Hindernisses noch beispielsweise ausweichen können. Diese Verhaltensweise mag bei der konventionellen Fahrzeugführung möglich sein, bei der Teleoperation kann aber durch hohe Kommunikationszeitverzögerungen oder kompletten Kommunikationsverlust der Operator die Möglichkeit der späteren Einflussnahme verlieren. Bei direkter Steuerung muss das Fahrzeug in dem Fall die Notfallstrategie autonom ausführen. Die trajektorienbasierte Steuerung hat hierbei den Vorteil, dass die Notfallstrategie implizit vom Operator bereits beauftragt wurde. Weil der Operator bereits kurz zuvor den Pfad geplant und somit einen gültigen Fahrraum spezifiziert hat, kann das Fahrzeug diesen immer sicher nutzen, um etwa bei einem Kommunikationsverlust anzuhalten. Auch im Falle eines Kommunikationsverlustes bleibt die Fahrzeugführung demnach teleoperiert und von einem Menschen vorgegeben. Bei einer fahrerlosen Fahrzeugführung durch eine direkte Steuerung ergibt sich das Dilemma, dass gerade im Notfall das Fahrzeug autonom Entscheidungen treffen muss, weil die Verbindung zum Operator nicht mehr besteht. Die Teleoperation wurde aber gegenüber der Autonomie bevorzugt, weil die autonome Fahrzeugführung noch nicht zuverlässig realisierbar ist. Es ist zu bezweifeln, ob eine autonome Notfallstrategie anwendbar ist, wenn schon die normale Fahrzeugführung nicht ausreichend beherrscht wird.

Die trajektorienbasierte Fahrzeugführung verwendet A-priori-Eingaben des Operators und erkaufte sich diesen Sicherheitsvorteil durch eine erhöhte Fahrdauer, weil die automatische Fahrzeugregelung immer nur so weit nach vorne schaut wie der Operator den Pfad bereits vorgegeben hat. Gerade bei hohen Geschwindigkeiten wird der Anhalteweg unter Umständen länger als die mögliche Vorausschauweite des Operators, die unter anderem auch von dem eingesetzten Kamerasystem und der Straßentopologie abhängt. Die implizite Berücksichtigung eines Sicherheitskonzeptes in den Eingaben des Operators stellt aber die einzige Möglichkeit dar, im Notfall ohne autonome Entscheidungen des Fahrzeugs auszukommen.

Die Validierungsergebnisse haben gezeigt, dass das trajektorienbasierte Steuerungskonzept die Anforderungen an ein Supervisory-Control-System erfüllen. So sorgt die Funktionsteilung der Mensch-Maschine-Interaktion zwischen Führungs- und Stabilisierungsebene für eine Entkopplung von den Zeitverzögerungen. Die verbleibenden Zeitverzögerungen sind nach Sheridan [She93] akzeptabel, wenn die Ausführungsdauer der Zwischenziele größer ist. Dies wird durch die Vorgabe der Segmente erreicht. Die Längsregelung passt die Geschwindigkeit entsprechend an, so dass ein kontinuierliches Fahren entlang der Segmente möglich wird. Die Zwischenziele stellen auch einen nennenswerten Anteil am Gesamtziel dar. Der Mensch muss nur Eingaben im Sekundenbereich tätigen, dennoch fährt das Fahrzeug mit Geschwindigkeiten bis 30 km/h. Als weiteren Punkt haben sich die unterlagerten autonomen Basisfunktionen als robust entsprechend ihrem Entwurfsprozess gezeigt. Das automatische Fahren entlang vorgegebener Pfade hat sich vielfach bewährt. Einzig Sheridans Forderung nach einer prädizierbaren Umgebung des Teleroboters kann im dynamischen Stadtverkehr nicht vollständig entsprochen werden. Das Steuerungskonzept wurde bislang vorwiegend in statischen Umgebungen getestet. Bei den realen Testfahrten konnte aber auch die erfolgreiche Interaktion mit Fußgängern getestet werden. Es ist davon aus-

zugehen, dass die trajektorienbasierte Steuerung auch in dynamischeren Situationen eine sichere Fahrzeugführung erlaubt. Der Pfad wird vornehmlich auf Basis der statischen Fahrbahntopologie geplant. Auf dynamische Hindernisse kann dann durch Geschwindigkeitsanpassungen bis hin zum Anhalten oder durch einen Querversatz zum Pfad reagiert werden. Die Unabhängigkeit der trajektorienbasierten Steuerung von Zeitverzögerungen bezieht sich ausschließlich auf die Stabilisierungsaufgabe. Bei der Trajektorienvorgabe können keine latenzinduzierten Instabilitäten der Querregelung auftreten, weil der Regelkreis nicht wie im direkten Steuerungskonzept über die zeitverzögerte kabellose Datenübertragung geschlossen wird. Dennoch ist natürlich jedes teleoperierte System von Zeitverzögerungen abhängig, wenn kontinuierliche oder reaktionsschnelle Aktionen des Operators benötigt werden, etwa beim Auftauchen eines plötzlichen Hindernisses. Dies erfordert mit beiden Konzepten kurzfristige Eingaben, die immer bei der Teleoperation um die aktuelle Kommunikationstotzeit verzögert sind. Dies ist ein Defizit von jedem teleoperierten System - und es gibt hierfür nur eine Lösung: Wenn die Kommunikationszeitverzögerung gegenüber der Operator-Reaktionszeit nicht vernachlässigbar ist, dann kann nur eine automatische Reaktion des Teleroboters die Handlung beschleunigen.

Die trajektorienbasierte Steuerung bietet eine einfache Möglichkeit, die Reaktionsschnelligkeit auf Hindernisse mittels einer automatischen Notbremsfunktion zu erhöhen. Klassische Fahrerassistenzsysteme lösen eine Vollbremsung erst dann aus, wenn die Unvermeidbarkeit der Kollision erkannt und der Fahrer keine weiteren Handlungsoptionen mehr hat [Win09a, S. 523 f.]. Ein weiterer Grund für das sehr späte Auslösen von Notbremsungen ist die Unsicherheit in der Fahrspurzuordnung. Die Auswahl der Zielobjekte erfolgt auf Basis der Prädiktion des eigenen Fahrschlauchs. Diese ist mit einigen Unsicherheiten verbunden [Win09b, S. 498 ff.]. Beide Argumente entfallen bei der trajektorienbasierten Steuerung. Da der Pfad vorab spezifiziert wird, ist der zukünftige Verlauf der eigenen Trajektorie den Regelsystemen im Fahrzeug bekannt. Hierdurch kann ein sehr einfaches Gefahrenbremsystem integriert werden, das den bestehen Pfad auf Hindernisse überprüft. Wenn ein Hindernis detektiert wird, kann unverzüglich, ohne weitere Operatoreingaben abzuwarten, eine automatische Zielbremsung eingeleitet werden (Abbildung 7.2). Da der Operator diesen Pfad zuvor als Fahrraum vorgegeben hatte, ist sicher anzunehmen, dass das Hindernis übersehen wurde. Hierdurch ist bei der trajektorienbasierten Teleoperation eine einfache Möglichkeit integrierbar, um die Reaktionszeit auf dynamische Hindernisse deutlich zu reduzieren und damit kein erhöhtes Risiko gegenüber einem konventionellen Fahrer im Fahrzeug darzustellen.

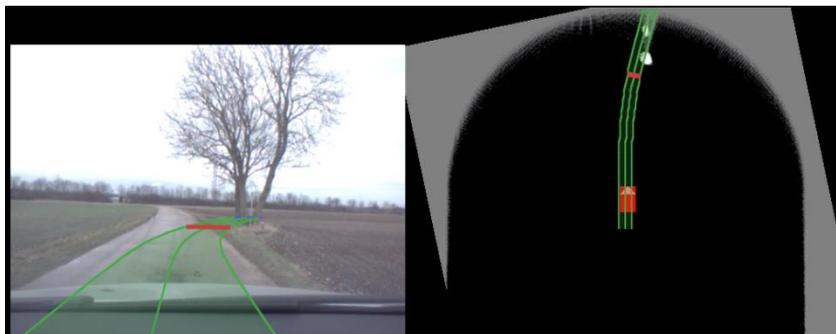


Abbildung 7.2: Der Operator hat den Pfad so gelegt, dass er mit dem Baum im Bild kollidiert. Auf Basis der Lidardaten kann das Hindernis erkannt und der Anhaltepunkt entsprechend automatisch angepasst werden.

### 7.3 Automatisierungsgrad

Der Ansatz einer trajektorienbasierten Steuerung wird generell von einer weiteren Automatisierung profitieren. Die Validierung des trajektorienbasierten Steuerungsansatzes hat die grundsätzliche Eignung der Funktionsteilung unterhalb der Führungsebene gezeigt. Nach aktuellem Stand der Technik ist die Stabilisierungsebene gut geeignet, um vollständig automatisiert zu werden. Die Beauftragung der Maschine auf Führungsebene mittels Trajektorien führt allerdings zu langsameren Geschwindigkeiten als mit direkter Steuerung. Durch die diskrete Beauftragung der Fahrzeugführung im Sinne einer seriellen Fahrerassistenz ist der trajektorienbasierte Steuerungsansatz sehr gut für eine weitere Automatisierung geeignet. So kann die Fahrzeugführung beschleunigt werden, wenn die Mensch-Maschine-Funktionsteilung auf die Führungsebene ausgeweitet wird. Der Mensch wird dabei mehr und mehr eine reine Überwachungstätigkeit übernehmen und nur noch in wenigen Situationen eingreifen.

Im Rahmen dieser Arbeit ist bereits ein Konzept erarbeitet worden, das eine höhere Automatisierung vorsieht. Dabei wird die zu fahrende Strecke als GPS-Punkte vorher spezifiziert. Ein automatischer Bahnplanungsalgorithmus, der operatorseitig läuft, berechnet ausgehend vom aktuellen Pfadende das nächste Pfadsegment, das dem GPS-Pfad geeignet folgt. Der Operator kann die Länge der Segmente und die Eingabefrequenz dynamisch anpassen. Somit gibt er wiederum implizit die Sollgeschwindigkeit der Trajektorie vor. Die spezifizierten GPS-Punkte berücksichtigen nur den allgemeinen Streckenverlauf und keine dynamischen Hindernisse. Außerdem ist je nach Qualität der aktuellen globalen Positionsschätzung und der Qualität der Positionsgenauigkeit der GPS-Streckenpunkte nicht gesichert, dass die festgelegte Strecke mit der realen Streckenführung übereinstimmt. Daher kann der Operator einen lateralen Versatz dynamisch vorgeben, mit dem er den Pfad entsprechend dem gewünschten Sollspurverlauf verschieben kann. Bei dieser Funktionsteilung übernimmt die Maschine Teile der Bahnführung, indem zumindest geeignet gekrümmte Pfadsegmente selektiert werden. Der Operator kann dann Länge und Eingabefrequenz der Segmente sowie den Querversatz auf der Straße einstellen. Zusätzlich kann der Operator jederzeit die Eingabe unterbrechen oder einen Haltepunkt setzen.

Abbildung 7.3 zeigt den Geschwindigkeitsverlauf einer Testfahrt. Der Operator variierte dabei maßgeblich die Eingabefrequenz der automatisch geplanten Segmente, die Länge verbleibt bei konstant zehn Metern. Diese Art der automatischen Trajektoriensteuerung ermöglicht durch die Entlastung des Operators höhere Geschwindigkeiten. So wurden bei Testfahrten bereits Geschwindigkeiten von 50 km/h erreicht, was bereits schneller als die direkte Steuerung in den bisherigen Testfahrten ist. Der Verlauf der Geschwindigkeit ist dabei gleichmäßiger, weil der automatische Algorithmus mit der Sollfrequenz die Vorgaben tätigt. Auch bei dieser automatischen Variante der Trajektoriensteuerung bleiben die Vorteile erhalten. Da die Segmente weiterhin operatorseitig vorgegeben werden, hält das Fahrzeug bei Kommunikationsstörungen unmittelbar am Pfadende an. Der Operator kann die Pfadlänge seiner Vorausschauweite anpassen, dadurch kann er den Pfad sinnvoll entlang eines geeigneten Fahrraums legen. Das Fahrzeug wählt dann wiederum die Geschwindigkeit entsprechend der maximalen Längs- und Querschleunigungsvorgaben sowie in Bezug zum gewünschten Anhaltepunkt.

Auf diesem Konzept aufbauend sind weitere Varianten der trajektorienbasierten Steuerung möglich, etwa durch die Hinzunahme von bordeigener Sensorik im Fahrzeug zur maschinellen Umfeldwahrnehmung. Die automatisch geplanten Trajektorien könnten dann auch statische und dynamische Hindernisse berücksichtigen. Je weiter der Automatisierungsgrad der trajektorienbasierten Steuerung gesteigert wird, desto weiter nähert sich das Konzept etwa

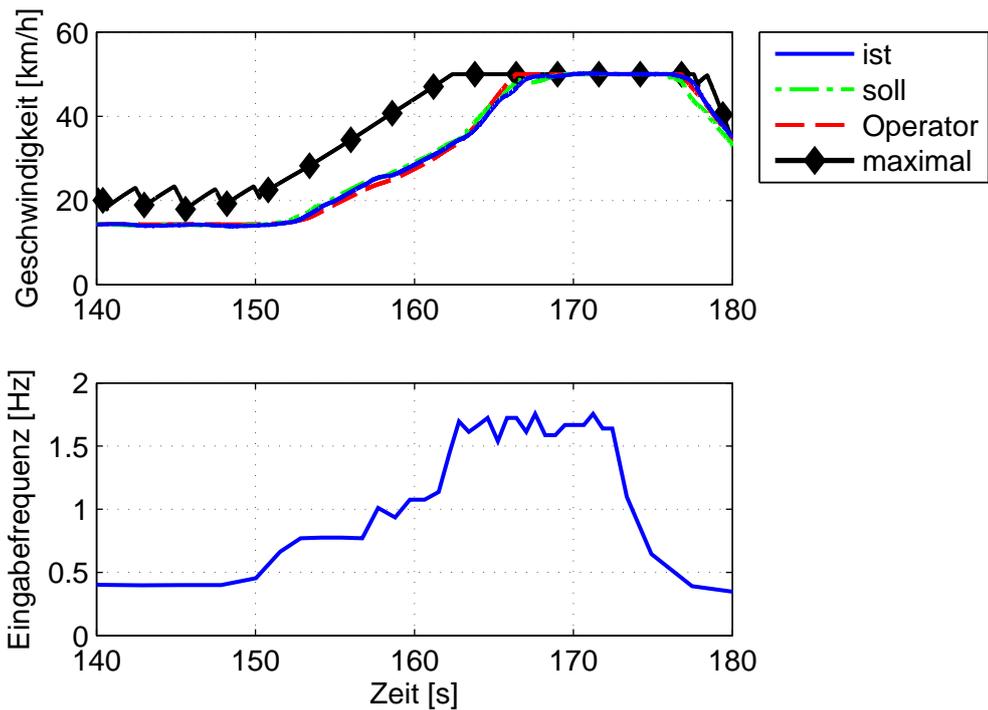


Abbildung 7.3: Verlauf der Geschwindigkeit bei automatisch geplanten Segmentvorgaben. Die Eingabefrequenz und damit die Sollgeschwindigkeit wird vom Operator vorgegeben.

einem manöverbasierten Fahren, mit den gleichen hohen Anforderungen an die maschinelle Wahrnehmung [Gey12].

## 8 Zusammenfassung

Die Teleoperation kann die Schlüsseltechnologie zu einer neuen Individualmobilität werden. Im Rahmen von integrierten Mobilitätskonzepten wird das Automobil zukünftig im urbanen Raum ein Verkehrsmittel von vielen sein. Wir nähern uns aber keiner postautomobilen Gesellschaft, lediglich der eigentumsrechtliche Charakter des Automobils ändert sich. Eine fahrerlose Bereitstellung von Car-Sharing-Fahrzeugen unterstützt die Eingliederung des Automobils in den Umweltverbund. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es gewesen, ein geeignetes Steuerungskonzept für die fahrerlose innerstädtische Fahrzeugführung zu erforschen und zu erproben. Es stellte sich die Frage, in wie weit diese Aufgabe durch reine Automation gelöst werden kann oder ob der Mensch als Fernsteuerer eingreifen muss.

Die Teleoperation hat sich in der Historie der Robotik stets als Lösung empfohlen, wenn eine Aufgabe zu komplex für die Automatisierung war und ein Mensch die Aufgabe vor Ort nicht ausführen konnte oder sollte [Win00, S. 148]. Dies galt in der Vergangenheit etwa für die Weltraumerkundung oder Tiefseeforschung. Aus dem diskutierten Stand der Technik kann man konstatieren, dass sich autonomes Fahren im innerstädtischen Bereich ebenfalls in diesen Bereich eingliedert. Auch wenn Wettbewerbe autonomer Fahrzeuge wie etwa die DARPA Challenges suggerieren, dass autonome innerstädtische Fahrzeugführung möglich ist, so muss man diese Ergebnisse relativieren. Diese Demonstrationen lassen nicht auf Funktionssicherheit sowie Robustheit der Systeme schließen, sie repräsentieren nicht einmal ansatzweise die Komplexität unseres täglichen Verkehrs [Ber08], [Fle08]. Eine fahrerlose urbane Fahrzeugführung ist aktuell nur mittels Teleoperation realisierbar.

Die konventionelle direkte Teleoperation ist dabei nicht robust gegenüber Zeitverzögerungen durch die Datenübertragung, weil die Stabilisierungsebene der Fahrzeugführung instabil werden kann. Der Schlüssel zu einer effizienten Teleoperation ist die Mensch-Maschine-Interaktion durch eine geeignete Kombination menschlicher Fähigkeiten und maschineller Intelligenz. Auf Basis einer Betrachtung der Fähigkeiten zur Fahrzeugführung von Mensch und Maschine schlägt die vorliegende Arbeit eine Funktionsteilung zwischen Stabilisierungs- und Führungsebene der Fahraufgabe vor. Supervisory Control wird als geeignete Methode vorgestellt, die die Regelungsaufgabe der Fahrzeugführung im Sinne einer seriellen Assistenz unterteilen kann. Der Ansatz folgt dem Shared-Prinzip, wobei sich Mensch und Maschine die Gesamtaufgabe aufteilen und auf getrennte Variablen Einfluss nehmen. Als geeignete Zielgrößen für den Shared-Control-Ansatz konnten Trajektorien aus dem aktuellen Stand der Technik abgeleitet werden. Trajektorien sind eindeutiger als wegpunktbasierte Vorgaben, benötigen aber ein deutlich geringeres Maß an autonomen Basisfähigkeiten als manöverbasierte Steuerungskonzepte.

Der Systementwurf stellt eine robuste Kommunikationsarchitektur zur diskreten Vorgabe der Trajektorien vor. Dazu werden stückweise parametrierbare Kurvensegmente mit eindeutigen Kennungen versehen. Ein Pfadverwaltungsmodul überwacht die Konsistenz und referenziert die aktuelle Fahrzeugposition auf den Sollpfad. Durch die Vorgabe der Pfadsegmente gibt der Operator implizit einen Geschwindigkeitsverlauf vor, den er durch die Länge der Segmente und die Eingabefrequenz variieren kann. Der Entwurf der Operator-Schnittstelle orientiert sich an Design-Richtlinien für die Entwicklung semi-autonomer und autonomer Ro-

---

boter. Dazu wird neben der klassischen Kameraperspektive auch eine Belegungskarte der Umgebung aus der Vogelperspektive dargestellt. Durch die perspektivisch korrekte Transformation der Trajektorie in das Videobild kann der Operator die Vorgabe manipulieren.

Die Validierung des trajektorienbasierten Steuerungskonzeptes erfolgte in einer Simulatorstudie an einem statischen Fahrsimulator, der gleichzeitig bei den realen Testfahrten als Operatorarbeitsplatz diente. Es nahmen 32 Probanden an der Studie teil und es wurden sowohl objektive als auch subjektive Messgrößen erfasst. Als Ergebnis konnte nachgewiesen werden, dass die trajektorienbasierte Steuerung mit Zeitverzögerung gegenüber der Vergleichsfahrt mit konventioneller Steuerung ohne Zeitverzögerung zu keinem erhöhten Risiko bei der Fahrzeugführung führt. Für die direkte Steuerung gilt dies erwartungsgemäß nicht. Die Zeitverzögerung von 600 Millisekunden führt zu einer signifikanten Leistungsreduktion beim Menschen, der weniger präzise fährt. Die trajektorienbasierte Steuerung ist gemäß dem Supervisory-Control-Prinzip unabhängig von Zeitverzögerungen, allerdings benötigen die Probanden deutlich länger zum Befahren der Strecke als mit der konventionellen Steuerung.

Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen direkter und trajektorienbasierter Steuerung wird durch die Konzeption des statischen Fahrsimulators beeinträchtigt. So zeigen alle Probanden mit der direkten Steuerung entgegen ihrer eigenen Einschätzung sehr sportliches Fahrverhalten. Dies liegt wahrscheinlich an der ausschließlichen Sichtsimulation im Fahrsimulator, der weder auditives noch haptisches Feedback liefert. Die Probanden können daher ihre Geschwindigkeit und Querschleunigung im direkten Fahrmodus nicht einschätzen. Bei der trajektorienbasierten Steuerung werden diese Aspekte von der Regelung übernommen, die auf moderates Verhalten ausgelegt wurde. Trotz der eingeschränkten Vergleichbarkeit zwischen den Steuerungskonzepten erlaubt diese Art der Umsetzung eine gute Übertragbarkeit auf den realen Prototyp, weil auch bei realen Testfahrten kein auditives und haptisches Feedback für den Operator verfügbar ist.

Der Operator musste auch bei den realen Testfahrten mit ähnlichen Problemen zur Geschwindigkeitswahrnehmung umgehen. Dies gelang allerdings besser als im Fahrsimulatorversuch, weil nur geschulte Operatoren am Realversuch teilnahmen. Die Ergebnisse der realen Testfahrten entsprechen denen aus dem Fahrsimulator. Die direkte Steuerung ist abhängig von Zeitverzögerungen mit Tendenzen zur Instabilität, die trajektorienbasierte Steuerung zeigt keinerlei Einschränkungen hinsichtlich der Zeitverzögerung. Die direkte Steuerung bleibt aber auch hier das schnellere Steuerungskonzept. Dies liegt vornehmlich am unterlagerten Sicherheitskonzept der trajektorienbasierten Steuerung. Die Fahrzeugregelung passt die Geschwindigkeit in der Art an, dass spätestens am Ende des Pfades das Fahrzeug angehalten wird. Somit ist die Vorausschauweite des Operators der limitierende Aspekt. Dies hat unter sicherheitskritischen Gesichtspunkten den Vorteil, dass, wenn die Verbindung unterbrochen wird oder der Operator keine neuen Segmente plant, das Fahrzeug den verbliebenen Pfad nutzt, um automatisch anzuhalten. Da der Operator diesen Pfad noch kurz zuvor als gültigen Fahrraum vorgegeben hat, kann das Fahrzeug diesen verwenden, um sicher anzuhalten. Auch im Notfall wird die Pfadplanung somit vom Operator durch A-priori-Eingaben vorgegeben und nicht von einem autonomen System bestimmt.

## 9 Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat einen neuen trajektorienbasierten Steuerungsansatz entwickelt, der eine Funktionsteilung von Mensch und Maschine oberhalb der Stabilisierungsebene erlaubt, ohne dass ein hohes Maß an On-Board-Autonomie im Fahrzeug notwendig ist. Die Ergebnisse belegen zwar Unabhängigkeit von Zeitverzögerung und Sicherheit bei Kommunikationsausfall, das Steuerungskonzept ist aber langsamer als die direkte Steuerung und erreicht auch in den realen Testfahrten bislang nicht die geforderten 50 km/h für den innerstädtischen Verkehr. Hierzu wird eine Steigerung des Automatisierungsgrades notwendig sein. Es wurden bereits mögliche Lösungsansätze diskutiert. Durch den Entwurfsprozess bietet die trajektorienbasierte Steuerung gute Möglichkeiten einer weiteren Automatisierung, weil die Trajektorienplanung Bestandteil jedes autonomen Systems ist und der Steuerungsansatz von bestehenden Ansätzen zum autonomen Fahren inspiriert wurde [Hun08]. Die diskrete Vorgabe von Trajektoriensegmenten kann im Rahmen von kooperativen Ansätzen durch maschinelle Vorgaben einfach ersetzt werden. Der Operator muss dann immer noch die Eingaben überwachen und gegebenenfalls adaptieren.

In den bisherigen Testszenarien wurde noch keine Interaktion mit anderen dynamischen Verkehrsteilnehmern erprobt. Nach den bisherigen Ergebnissen ist davon auszugehen, dass auch solche Situationen mit dem Konzept beherrscht werden können, dies müsste aber noch nachgewiesen werden. Vor allem in Bezug auf eine Verdeckung des Pfades durch dynamische Objekte und reaktives Verhalten ist auch hier eine weitere Automatisierung des Ansatzes sinnvoll.

Das entwickelte Konzept der Operator-Schnittstelle durch Visualisierung des geplanten Pfades zur Überwachung und Anpassung sowie Darstellung des möglichen nächsten Segments, ob manuell oder automatisch geplant, lässt sich unter Umständen auch auf weitere Anwendungsbereiche abseits der Fahrzeugführung übertragen. So könnte der Ansatz auch in der allgemeinen Robotik Anwendung finden.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Klassifizierung der Entwicklungen in der Robotik nach Grad der Autonomie und Komplexität. . . . .	3
1.2	Struktureller Aufbau der Arbeit. . . . .	4
2.1	Unterschiedliche teleoperierte Roboter. . . . .	5
2.2	Unbemannte Bodenfahrzeuge. . . . .	6
2.3	Systementwurf für ein klassisches Teleoperationsschema, übertragen auf Straßenfahrzeuge (eigene Darstellung nach [Die11]). . . . .	9
2.4	Sensorkonzept des Versuchsträgers. . . . .	10
2.5	Operatorarbeitsplatz zur Fahrzeugteleoperation. . . . .	12
3.1	Roadmap zum hochautomatisierten Fahren . . . . .	16
3.2	Konzepte zum hochautomatisierten Fahren. . . . .	17
3.3	Autonome Versuchsträger von deutschen Forschungseinrichtungen. . . . .	19
3.4	Autonome Versuchsträger US-amerikanischer Forschungseinrichtungen. . . . .	21
3.5	Systemmodell Fahrer-Fahrzeug-Umgebung nach Abendroth [Abe09, S. 4]. . . . .	23
3.6	Kombination der Modelle nach Rasmussen und Donges. . . . .	24
3.7	Allgemeiner Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis zu Querführung . . . . .	25
3.8	Abhängigkeit der menschlichen Aufgabenleistung von der Zeitverzögerung (eigene Darstellung nach [Pon08, S. 201]). . . . .	28
3.9	Darstellung unterschiedlicher Automatisierungsgrade bei der Steuerung. . . . .	29
3.10	H-Mode. . . . .	33
3.11	Benutzerschnittstelle zum manöverbasierten Fahren im Rahmen des Conduct-by-Wire [Kau10]. . . . .	34
4.1	Einteilung der Automatisierungsstufen nach Definition der BAST. . . . .	38
4.2	Roadmap der Fahrerassistenzsysteme-Entwicklung und der verwendeten Sensorik [Ben14](Übersetzung v. Verf.). . . . .	42
4.3	Leistungsfähigkeit von Mensch und Maschine zur Erfüllung der drei Ebenen der Fahraufgabe: Für die bestmögliche Arbeitsteilung ergibt sich ein adaptiertes Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe für eine Fahrzeugsteuerung auf Führungsebene [Win06, S. 5]. . . . .	46
4.4	Abbildung des geschlossenen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises. . . . .	47
4.5	Bodediagramm eines exemplarischen offenen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises. . . . .	48
4.6	Allgemeine Definition eines Supervisory-Control-Ansatzes mit drei geschlossenen Regelkreisen. . . . .	52
4.7	Der Computer kann im Rahmen der Supervisory Control entweder teilende oder tauschende Funktionen übernehmen [She78, S. 4-6] (Übersetzung v. Verf.). . . . .	54
4.8	Vorgabe von drei Klothoidensegmenten mit unterschiedlicher Länge und Krümmungsänderung. . . . .	57
5.1	Entwurf eines Steuerungskonzeptes auf Basis der Shared Control. . . . .	59

---

5.2	Alle positionsbezogenen Daten werden auf ein kartesisches Koordinatensystem bezogen. . . . .	60
5.3	Das Einspurmodell wird um die kinematischen Zusammenhänge in Bezug auf die Sollbahn ergänzt [Wal09, S. 68]. . . . .	63
5.4	Querführung als Kombination aus Zustandsregelung und Vorsteuerung (eigene Darstellung nach [Wal09, S. 83]). . . . .	65
5.5	Aufbau der Querführung zur trajektorienbasierten Teleoperation. . . . .	66
5.6	Aufbau der Längsführung zur trajektorienbasierten Teleoperation. . . . .	67
5.7	Visualisierung in der Simulationsumgebung. . . . .	68
5.8	Geometrisches Kameramodell mit projektiver Abbildung eines Objektpunktes in die Bildebene [Sti09, S. 200]. . . . .	69
5.9	Operatorperspektive im Realfahrzeug. . . . .	71
5.10	Kartenansicht und Lidarbelegungskarte. . . . .	71
5.11	Die Architektur des Gesamtsystems. . . . .	73
6.1	Darstellung der objektiven und Subjektiven Ergebnisse der Probandenstudie . . .	81
6.2	Das teleoperierte Fahren wurde auf der dargestellten Teststrecke validiert. . . .	85
6.3	Initialisierungseingaben des Operators bei einer Testfahrt im Realfahrzeug. . . .	86
6.4	Steuerungseingaben des Operators bei einer Testfahrt im Realfahrzeug. . . . .	86
6.5	Längsregelung während der Bahnfolge. . . . .	87
6.6	Querregelung während der Bahnfolge. . . . .	88
6.7	Querführung des Operators bei direkter und trajektorienbasierter Steuerung. . .	89
6.8	Lenkradwinkel bei direkter und trajektorienbasierter Steuerung. . . . .	89
6.9	Geschwindigkeiten im Vergleich: direkte und trajektorienbasierte Steuerung. . .	90
7.1	gg-Diagramm der Längsbeschleunigung über der Querschleunigung für alle Probanden aus dem Fahr Simulatorversuch. . . . .	92
7.2	Automatisches Anpassen des Anhaltepunktes. . . . .	95
7.3	Verlauf der Geschwindigkeit bei automatisch geplanten Segmentvorgaben. . . .	97

## Tabellenverzeichnis

4.1 Ursprüngliche MABA-MABA-Liste nach Fitts von 1951 [Fit51, S. 10] (Übersetzung v. Verf.) . . . . .	36
4.2 Vergleich der Realisierungs- und Einsatzmöglichkeiten autonomer und teleoperierter Fahrzeuge zur fahrerlosen Fahrzeugführung. . . . .	41
4.3 Gegenüberstellung und Bewertung der Fähigkeiten von Mensch und Maschine bezüglich der Informationsverarbeitung zur Fahrzeugführung. . . . .	44

## Literaturverzeichnis

- [Abe01] ABENDROTH, B.: *Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen*. Zugl. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt. Stuttgart: Ergon, 2001.
- [Abe09] ABENDROTH, B. und BRUDER, R.: *Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S. und WOLF, G. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S. 4–14.
- [Ack11] ACKER, A.: *Anwendungspotential von Telepräsenz- und Teleaktionssystemen für die Präzisionsmontage*. Diss. Technische Universität München, 2011.
- [Ant93] ANTSAKLIS, P. J. und PASSINO, K. M., Hrsg.: *An Introduction to intelligent and autonomous control*. Boston: Kluwer Academic, 1993.
- [App07] APPELQVIST, P.; KNUUTTILA, J. und AHTIAINEN, J.: *Development of an Unmanned Ground Vehicle for task-oriented operation - considerations on teleoperation and delay*. In: *2007 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. Zürich: IEEE, 2007, S. 1–6.
- [App10] APPELQVIST, P.; KNUUTTILA, J. und AHTIAINE, J.: *Mechatronics Design of an Unmanned Ground Vehicle for Military Applications*. In: *Mechatronic Systems Applications*. Hrsg. von DI PAOLA, A. M. D. und CICIRELLI, G. InTech, 2010, S. 237–262.
- [Aud13] AUDI AG, Hrsg.: *Elektroniktrends des kommenden Jahrzehnts – Audi auf der CES 2013*. Pressemitteilung. Ingolstadt/Las Vegas, 8.01.2013.
- [Bäh10] BÄHRING, H.: *Anwendungsorientierte Mikroprozessoren: Mikrocontroller und Digitale Signalprozessoren*. 4. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer, 2010.
- [Baj08] BAJRACHARYA, M.; MAIMONE, M. und HELMICK, D.: *Autonomy for Mars Rovers: Past, Present, and Future*. In: *Computer* 12, S. 44–50, 2008.
- [Bar08] BARTELS, A.: *Roadmap Automatisches Fahren*. In: *AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig: GZVB, 2008.
- [Ben14] BENGLER, K.; DIETMAYER, K.; FÄRBER, B.; MAURER, M.; STILLER, C. und WINNER, H.: *Three Decades of Driver Assistance Systems: Review and Future Perspectives*. In: *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE* 4, S. 6–22, 2014.
- [Ber08] BERGER, C. und RUMPE, B.: *Autonomes Fahren-Erkenntnisse aus der DARPA Urban Challenge (Autonomous Driving-Insights from the DARPA Urban Challenge)*. In: *IT-Information Technology* 4/2008, S. 258–264, 2008.
- [BMW11] BMW GROUP, Hrsg.: *Der Lehrer im Lenkrad*. Pressemitteilung. 21.03.2011.

- [BMW13] BMW GROUP, Hrsg.: *Mit dem BMW hochautomatisiert auf den Autobahnen Europas. Die BMW Group und Continental gehen gemeinsam einen nächsten konsequenten Schritt in Richtung Realisierung des hochautomatisierten Fahrens.* Pressemitteilung. 26.02.2013.
- [Bor05] BORTZ, J.: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler.* 6. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2005.
- [Bou10] BOUGUET, J.-Y.: *Camera Calibration Toolbox for Matlab.* URL: [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/index.html](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html), abgerufen am 06.07.2013.
- [Bru09] BRUDER, R. und DIDIER, M.: *Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen.* In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme.* Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S. und WOLF, G. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S. 313–324.
- [Brü94] BRÜDIGAM, C.: *Intelligente Fahrmanöver sehender autonomer Fahrzeuge in autobahnähnlicher Umgebung.* Diss. Universität der Bundeswehr München, 1994.
- [Bub01] BUBB, H.: *Haptik im Kraftfahrzeug.* In: *Kraftfahrzeugführung.* Hrsg. von JÜRGENSOHN, T. und TIMPE, K.-P. Berlin [u.a.]: Springer, 2001, S. 155–175.
- [Bub77] BUBB, H.: *Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug.* In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft,* S. 103–112, 1977.
- [Can09] CANZLER, W. und KNIE, A.: *Grüne Wege aus der Autokrise: Vom Autobauer zum Mobilitätsdienstleister ; ein Strategiepapier.* Berlin: Heinrich-Böll-Stiftung, 2009.
- [Can12] CANZLER, W. und KNIE, A.: *Vom Batteriefahrzeug zur Elektromobilität.* In: *Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität.* Hrsg. von PROFF, H.; SCHÖNHARTING, J.; SCHRAMM, D. und ZIEGLER, J. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012, S. 5–20.
- [car15] CAR2GO, Hrsg.: *car2go Webseite.* URL: <https://www.car2go.com/de>, abgerufen am 25.01.2015.
- [Car83] CARD, S. K.; MORAN, T. P. und NEWELL, A.: *The Psychology of Human-Computer Interaction.* Hillsdale, NJ [u.a.]: Erlbaum, 1983.
- [Cav01] CAVALLO, V.; COLOMB, M. und DORÉ, J.: *Distance Perception of Vehicle Rear Lights in Fog.* In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 3, S. 442–451, 2001.
- [Chu13] CHUCHOŁOWSKI, F.; BÜCHNER, S.; REICHENEDER, J. und LIENKAMP, M.: *Prediction methods for the teleoperation of road vehicles.* In: *Conference on Future Automotive Technology.* München, 2013.
- [Coh91] COHEN, A. S. und HIRISG, R.: *The Role of Foveal Vision in the Process of Information Input.* In: *Vision in Vehicles–III.* Hrsg. von GALE, A. G. Amsterdam: North-Holland, 1991, S. 153–163.
- [Con13] CONTINENTAL AG, Hrsg.: *Continental und BMW Group entwickeln gemeinsam hochautomatisiertes Fahren für die Autobahn.* Pressemitteilung. 26.02.2013.
- [Coo98] COOPER, B.: *Driving on the surface of Mars using the Rover Control Workstation.* In: *Proceedings of SpaceOps 1998.* Tokyo, 1998.
- [Cor04] CORRIDORI, C. und ZANIN, M.: *High curvature two-clothoid road model estimation.* In: *The 7th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.* Washington, D.C.: IEEE, 2004, S. 630–635.
- [Dai13] DAIMLER AG, Hrsg.: *Die Zukunft des Automobils.* Pressemitteilung. 9.09.2013.

- [Dam11] DAMBÖCK, D.; KIENLE, M.; BENGLER, K. und BUBB, H.: *The H-metaphor as an example for cooperative vehicle driving*. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction: Towards Mobile and Intelligent Interaction Environments - Volume Part III*. HCII'11. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, S. 376–385.
- [Dic02] DICKMANN, E.: *The development of machine vision for road vehicles in the last decade*. In: *2002 IEEE Intelligent Vehicle Symposium*. Versailles, Frankreich: IEEE, 2002, S. 268–281.
- [Dic05] DICKMANN, E. D.: *Vision: Von Assistenz zum Autonomen Fahren*. In: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Hrsg. von MAURER, M. und STILLER, C. Berlin: Springer, 2005, S. 203–237.
- [Dic94] DICKMANN, E.; BEHRINGER, R.; DICKMANN, D.; HILDEBRANDT, T.; MAURER, M.; THOMANEK, F. und SCHIEHLEN, J.: *The seeing passenger car 'VaMoRs-P'*. In: *1994 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Paris: IEEE, 1994, S. 68–73.
- [Die11] DIERMEYER, F.; GNATZIG, S.; CHUCHOŁOWSKI, F.; TANG, T. und LIENKAMP, M.: *Der Mensch als Sensor - Der Weg zum teleoperierten Fahren*. In: *AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig: ITS Niedersachsen, 2011.
- [Don09] DONGES, E.: *Fahrerverhaltensmodelle*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S. und WOLF, G. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S. 15–23.
- [Don77] DONGES, E.: *Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern bei simulierter Straßenfahrt*. Diss. Technische Hochschule Darmstadt, 1977.
- [Don82] DONGES, E.: *Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. In: *Automobil-Industrie 2*, S. 183–190, 1982.
- [Dou73] DOUGLAS, D. und PEUCKER, T.: *Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature*. In: *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization 2*, S. 112–122, 1973.
- [Dri15] DRIVENOW, Hrsg.: *DriveNow: Carsharing von BMWi, MINI und Sixt*. URL: <https://de.drive-now.com/>, abgerufen am 25.01.2015.
- [End01] ENDSLEY, M. R.: *Designing for Situation Awareness in Complex System*. In: *Proceedings of the Second International Workshop on Symbiosis of Humans, Artifacts and Environment*. Kyoto, Japan, 2001.
- [End88] ENDSLEY, M. R.: *Design and evaluation for situation awareness enhancement*. In: *Human Factors Society 32nd Annual Meeting*. Anaheim, USA: HFES, 1988, S. 97–101.
- [Eva70] EVANS, L.: *Speed Estimation from a Moving Automobile*. In: *Ergonomics 2*, S. 219–230, 1970.
- [Far10] FARR, N.; BOWEN, A.; WARE, J.; PONTBRIAND, C. und TIVEY, M.: *An integrated, underwater optical /acoustic communications system*. In: *Proceedings of the OCEANS 2010 IEEE Conference & Exhibition*. Sydney: IEEE, 2010.

- [Fer67] FERRELL, W. R. und SHERIDAN, T. B.: *Supervisory control of remote manipulation*. In: IEEE Spectrum 10, S. 81–88, 1967.
- [Fit51] FITTS, P., Hrsg.: *Human Engineering for an Effective Air-navigation and Traffic-control System*. Washington, D.C.: National Research Council, 1951.
- [Fla13] FLADE, A.: *Der rastlose Mensch: Konzepte und Erkenntnisse der Mobilitätspsychologie*. Wiesbaden: Springer VS, 2013.
- [Fle03] FLEMISCH, O.; ADAMS, A.; CONWAY, S. R.; GOODRICH, K. H.; PALMER, M. T. und SCHUTTE, P. C.: *The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction*. Techn. Ber. 2003-212672. Technical Memorandum. NASA, 2003.
- [Fle08] FLETCHER, L.; TELLER, S.; OLSON, E.; MOORE, D.; KUWATA, Y.; HOW, J.; LEONARD, J.; MILLER, I.; CAMPBELL, M.; HUTTENLOCHER, D.; NATHAN, A. und KLINE, F.-R.: *The MIT-Cornell collision and why it happened*. In: Journal of Field Robotics 10, S. 775–807, 2008.
- [Fle11] FLEMISCH, F.; SCHIEBEN, A.; SCHOEMIG, N.; STRAUSS, M.; LUEKE, S. und HEYDEN, A.: *Design of human computer interfaces for highly automated vehicles in the eu-project HAVEit*. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Universal Access in Human-Computer Interaction: Context Diversity - Volume Part III*. UAHCI'11. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, S. 270–279.
- [Fon01a] FONG, T. W.: *Collaborative Control: A Robot-Centric Model for Vehicle Teleoperation*. Diss. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 2001.
- [Fon01b] FONG, T. und THORPE, C.: *Vehicle Teleoperation Interfaces*. In: Autonomous Robots 1, S. 9–18, 2001.
- [Fon01c] FONG, T.; THORPE, C. und BAUR, C.: *A safeguarded teleoperation controller*. In: *IEEE International Conference on Advanced Robotics (ICAR)*. Budapest, Ungarn: IEEE, 2001.
- [Fon01d] FONG, T.; THORPE, C. und BAUR, C.: *Advanced Interfaces for Vehicle Teleoperation: Collaborative Control, Sensor Fusion Displays, and Remote Driving Tools*. In: Autonomous Robots 1, S. 77–85, 2001.
- [Fou12] FOURNIER, G.; WÜRZER, D.; SEIGN, R. und HINDERER, H.: *Der Weg zur emissionsfreien Mobilität*. In: *Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität*. Hrsg. von PROFF, H.; SCHÖNHARTING, J.; SCHRAMM, D. und ZIEGLER, J. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012, S. 406–423.
- [Fra01] FRANKE, S.: *Car-Sharing: vom Ökoprojekt zur Dienstleistung*. Berlin: Edition Sigma, 2001.
- [Fra12a] FRANKE, U.; GEHRIG, S. und RABE, C.: *Gefahrenerkennung schneller als der Mensch: Hazard identification faster than humans*. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 7/8, S. 618–621, 2012.
- [Fra12b] FRANZ, B.; KAUER, M.; BRUDER, R. und GEYER, S.: *pieDrive - a New Driver-Vehicle Interaction Concept for Maneuver-Based Driving*. In: *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops*. Alcala de Henares, Spanien: IEEE, 2012.
- [Fri09] FRICKE, N.: *Zeit- und sicherheitskritische Warnungen im Fahrzeug*. Diss. Technischen Universität Berlin, 2009.

- [Fro12] FROST & SULLIVAN: *Business Models and Opportunities in the European Traditional and Peer-to-Peer Carsharing Market*. Techn. Ber. M813. Studie zur Entwicklung des Car-Sharing Markts in Europa. 2012.
- [Gag95] GAGE, D. W.: *UGV HISTORY 101: A Brief History of Unmanned Ground Vehicle (UGV) Development Efforts*. In: *Unmanned Systems* 3, S. 9–32, 1995.
- [Gas12] GASSER, T. M.; ARZT, C.; AYOUBI, M.; BARTELS, A.; BÜRKLE, L.; EIER, J.; FLEMISCH, F.; HÄCKER, D.; HESSE, T.; HUBER, W.; LOTZ, C.; MAURER, M.; RUTH-SCHUMACHER, S.; SCHWARZ, J. und VOGT, W.: *Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung: Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*. Techn. Ber. F 83. Bremerhaven: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2012.
- [Gay09] GAYKO, J.: *Lane Keeping Support*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S. und WOLF, G. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S. 554–561.
- [Gel09] GELAU, C.; GASSER, T. M. und SEECK, A.: *Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S. und WOLF, G. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S. 24–32.
- [Gey12] GEYER, S.; HAKULI, S.; WINNER, H.; FRANZ, B. und KAUER, M.: *Ermittlung der Anforderungen an die Umfelderkennung für Conduct-by-Wire*. In: *5. Tagung Fahrerassistenz*. München: TÜV Süd Akademie, 2012.
- [Gna10] GNATZIG, S.; BAMMER, M.; KRAUS, S. und HEISSING, B.: *Manoeuvre Recognition and Prediction for Driver Assistance Systems using Hidden Markov Models and Modifiers*. In: *AVEC 10, the 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control*. Loughborough, England: Loughborough Univ. Dep., 2010, S. 201–206.
- [Gna12a] GNATZIG, S.; HAAS, E. und LIENKAMP, M.: *Die Teleoperation als Ansatz zur fahrerlosen Fahrzeugführung*. In: *5. Tagung Fahrerassistenz*. München: TÜV Süd Akademie, 2012.
- [Gna12b] GNATZIG, S.; SCHULLER, F. und LIENKAMP, M.: *Human-Machine Interaction as Key Technology for Driverless Driving - A Trajectory-Based Shared Autonomy Control Approach*. In: *21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. Paris: IEEE, 2012, S. 913–918.
- [Gna13] GNATZIG, S.; CHUCHOŁOWSKI, F.; TANG, T. und LIENKAMP, M.: *A System Design for Teleoperated Road Vehicles*. In: *10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*. Reykjavík, Island, 2013.
- [Goe08] GOEBL, M.; ALTHOFF, M.; BUSS, M.; FÄRBER, G.; HECKER, F.; HEISSING, B.; KRAUS, S.; NAGEL, R.; FERNANDO PUENTE, L.; RATTEI, F.; RUSS, M.; SCHWEITZER, M.; THUY, M.; WANG, C. und WÜNSCHE, H. J.: *Design and Capabilities of the Munich Cognitive Automobile*. In: *2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Eindhoven, Niederlande: IEEE, 2008.
- [Goe09] GOEBL, M.: *Eine realzeitfähige Architektur zur Integration kognitiver Funktionen*. Diss. Technische Universität München, 2009.
- [Gro12] GROTZINGER, J. P.; CRISP, J.; VASAVADA, A. R.; ANDERSON, R. C.; BAKER, C. J.; BARRY, R.; BLAKE, D. F.; CONRAD, P.; EDGETT, K. S.; FERDOWSKI, B.; GEL-

- LERT, R.; GILBERT, J. B.; GOLOMBEK, M.; GÓMEZ-ELVIRA, J.; HASSLER, D. M.; JANDURA, L.; LITVAK, M.; MAHAFFY, P.; MAKI, J.; MEYER, M.; MALIN, M. C.; MITROFANOV, I.; SIMMONDS, J. J.; VANIMAN, D.; WELCH, R. V. und WIENS, R. C.: *Mars Science Laboratory Mission and Science Investigation*. In: *Space Science Reviews* 1-4, S. 5–56, 2012.
- [Gui11] GUIZZO, E.: *How google's self-driving car works*. In: *IEEE Spectrum Online*, October, 2011.
- [Hac82] HACKENBERG, U. und HEISSING, B.: *Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr*. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 7/8, S. 341–345, 1982.
- [Hak09] HAKULI, S.; BRUDER, R.; FLEMISCH, F. O.; LÖPER, C.; RAUSCH, H.; SCHREIBER, M. und WINNER, H.: *Kooperative Automation*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S. und WOLF, G. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S. 647–656.
- [Han11] HANNING, T.: *High Precision Camera Calibration*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [Han93] HANCOCK, P.: *On the future of hybrid human-machine systems*. In: *Verification and validation of complex systems*. Hrsg. von WISE, J. A.; HOPKIN, V. D. und STAGER, P. Bd. 110. NATO ASI series. Series F, Computer and System sciences. Berlin, New York: Springer-Verlag, 1993, S. 61–85.
- [Han96] HANCOCK, P. A. und SCALLEN, S. F.: *The Future of Function Allocation*. In: *Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications* 4, S. 24–29, 1996.
- [Has13] HASCHEK, B.: *Reportage Carsharing - Wie machen die das bei Car2go?*. In: *Auto Motor und Sport* 19, S. 196–198, 22.11.2013.
- [Hee05] HEERS, R.: *Being There: Untersuchungen zum Wissenserwerb in virtuellen Umgebungen*. Diss. Universität Tübingen, 2005.
- [Hen04] HENZE, R.: *Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells*. Bd. 7. Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig. Zugl. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig. Aachen: Shaker, 2004.
- [Hen79] HENRICI, P.: *Zur numerischen Berechnung der Fresnelschen Integrale*. In: *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP* 2, S. 209–219, 1979.
- [Hen94] HENDRIX, C. M.: *Exploratory Studies on the Sense of Presence in Virtual Environments as a Function of Visual and Auditory Display Parameters*. Masterarbeit. University of Washington, 1994.
- [Him11] HIMMELSBACH, M.; LÜTTEL, T.; HECKER, F.; HUNDELSHAUSEN, F. v. und WÜNSCHE, H.-J.: *Autonomous Off-Road Navigation for MuCAR-3 – Improving the Tentacles Approach: Integral Structures for Sensing and Motion*. In: *Künstliche Intelligenz* 2, S. 145–149, 2011.
- [Hör11] HÖRWICK, M.: *Sicherheitskonzept für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme*. Diss. Technische Universität München, 2011.

- [Hun08] HUNDELSHAUSEN, F. v.; HIMMELSBACH, M.; HECKER, F.; MÜLLER, A. und WÜNSCHE, H.-J.: *Driving with tentacles: Integral structures for sensing and motion*. In: *Journal of Field Robotics* 9, S. 640–673, 2008.
- [Ina03] INAGAKI, T.: *Adaptive Automation: Sharing and Trading of Control*. In: *Handbook of cognitive task design*. Hrsg. von HOLLNAGEL, E. Human factors and ergonomics. Mahwah, N.J: Lawrence Erlbaum Publishers, 2003, S. 147–169.
- [Jor63] JORDAN, N.: *Allocation of functions between man and machines in automated systems*. In: *Journal of Applied Psychology* 3, S. 161–165, 1963.
- [Jür97] JÜRGENSOHN, T.: *Hybride Fahrermodelle*. 1. Aufl. Sinzheim: Pro-Universitats-Verl., 1997.
- [Kam07] KAMPCHEN, N.: *Feature-level fusion of laser scanner and video data for advanced driver assistance systems*. Diss. Universität Ulm, 2007.
- [Kam08] KAMMEL, S.; ZIEGLER, J.; PITZER, B.; WERLING, M.; GINDELE, T.; JAGZENT, D.; SCHRÖDER, J.; THUY, M.; GOEBL, M.; HUNDELSHAUSEN, F. v.; PINK, O.; FRESE, C. und STILLER, C.: *Team AnnieWAY’s autonomous system for the 2007 DARPA Urban Challenge*. In: *Journal of Field Robotics* 9, S. 615–639, 2008.
- [Kam09] KAMMEL, S.: *Autonomes Fahren*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S. und WOLF, G. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S. 657–663.
- [Kau10] KAUER, M.; SCHREIBER, M. und BRUDER, R.: *How to conduct a car? A design example for maneuver based driver- vehicle interaction*. In: *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. San Diego, USA: IEEE, 2010, S. 1214–1221.
- [Kay95] KAY, J. und THORPE, C.: *Operator Interface Design Issues In A Low-Bandwidth And High-Latency Vehicle Teleoperation System*. In: *International Conference on Environmental Systems*. San Diego, USA: SAE, 1995.
- [Kay97a] KAY, J.: *STRIPE: Remote Driving Using Limited Image Data*. Diss. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, 1997.
- [Kay97b] KAY, J. und THORPE, C.: *An examination of the STRIPE vehicle teleoperation system*. In: *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Grenoble, Frankreich: IEEE, 1997, S. 1152–1157.
- [Keh07] KEHL, S.: *Querregelung eines Versuchsfahrzeugs entlang vorgegebener Bahnen*. Zugl. Dissertation an der Universität Stuttgart. Aachen: Shaker, 2007.
- [Kel06] KELSCH, J.; FLEMISCH, F.; LÖPER, C.; SCHIEBEN, A. und SCHINDLER, J.: *Links oder rechts, schneller oder langsamer? Grundlegende Fragestellungen beim Cognitive Systems Engineering von hochautomatisierter Fahrzeugführung*. In: *Cognitive Systems Engineering in der Fahrzeug- und Prozessführung*. Hrsg. von GRANDT, M. Bd. 2006,02. DGLR-Bericht. Bonn: DGLR, 2006, S. 227–240.
- [Kem03] KEMENY, A. und PANERAI, F.: *Evaluating perception in driving simulation experiments*. In: *Trends in Cognitive Sciences* 1, S. 31–37, 2003.
- [Kis13] KISHIYAMA, Y.; BENJEBBOUR, A.; NAKAMURA, T. und ISHII, H.: *Future steps of LTE-A: evolution toward integration of local area and wide area systems*. In: *IEEE Wireless Communications* 1, S. 12–18, 2013.

- [Koc10] KOCH, T.: *Untersuchungen zum Lenkgefühl von Steer-by-Wire Lenksystemen*. Diss. Technische Universität München, 2010.
- [Kra12] KRAUS, S.: *Fahrverhaltensanalyse zur Parametrierung situationsadaptiver Fahrzeugführungssysteme*. Diss. Technische Universität München, 2012.
- [Kri12] KRITAYAKIRANA, K. und GERDES, J. C.: *Autonomous vehicle control at the limits of handling*. In: *International Journal of Vehicle Autonomous Systems* 4, S. 271, 2012.
- [Krü07] KRÜGER, K.: *Nutzen und Grenzen von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen*. Diss. Humboldt-Universität zu Berlin, 2007.
- [Löp08] LÖPER, C.; KELSCH, J. und FLEMISCH, F. O.: *Kooperative, manöverbasierte Automation und Arbitrierung als Bausteine für hochautomatisiertes Fahren*. In: *AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig: GZVB, 2008, S. 215–237.
- [Lun13] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 1*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [Lut12] LUTZ, L.; TANG, T. und LIENKAMP, M.: *Analyse der rechtlichen Situation von teleoperierten und autonomen Fahrzeugen*. In: *5. Tagung Fahrerassistenz*. München: TÜV Süd Akademie, 2012.
- [Man04] MANSFELD, W.: *Satellitenortung und Navigation: Grundlagen und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2004.
- [Mau00] MAURER, M.: *Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen*. Düsseldorf: VDI Verl., 2000.
- [McG78] MCGILL, R.; TUKEY, J. W. und LARSEN, W. A.: *Variations of Box Plots*. In: *The American Statistician* 1, S. 12–16, 1978.
- [McG87] MCGOVERN, D.: *Experiences in teleoperation of land vehicles*. Techn. Ber. N90-22918. Sandia National Labs., Albuquerque NM (USA), 1987.
- [McR59] MCRUER, D. T. und KRENDEL, E. S.: *The human operator as a servo system element*. In: *Journal of the Franklin Institute* 5-6, 1959.
- [McR62] MCRUER, D. T. und KRENDEL, E. S.: *The Man-Machine System Concept*. In: *Proceedings of the IRE* 5, S. 1117–1123, 1962.
- [Mei12] MEINEL, C. und SACK, H.: *Internetworking: Technische Grundlagen und Anwendungen*. Heidelberg, New York: Springer, 2012.
- [Mer13] MERTZ, C.; NAVARRO-SERMENT, L. E.; DUGGINS, D.; GOWDY, J.; MACLACHLAN, R.; RYBSKI, P.; STEINFELD, A.; SUPPE, A.; URMSON, C.; VANDEPEL, N.; HEBERT, M. und THORPE, C.: *Moving object detection with laser scanners*. In: *Journal of Field Robotics* 1, S. 17–43, 2013.
- [Mil88] MILLER, D.: *Evaluation of vision systems for teleoperated land vehicles*. In: *IEEE Control Systems Magazine* 3, S. 37–41, 1988.
- [Mit04] MITSCHKE, M. und WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. 4. Aufl. VDI. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004.
- [Mit91] MITSCHKE, M. und CHEN, Z.: *Der Fahrer als adaptiver Regler*. Bd. 91. FAT Schriftenreihe. Frankfurt am Main: Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), 1991.

- [Mon08] MONTEMERLO, M.; BECKER, J.; BHAT, S.; DAHLKAMP, H.; DOLGOV, D.; ETTINGER, S.; HAEHNEL, D.; HILDEN, T.; HOFFMANN, G.; HUHNKE, B.; JOHNSTON, D.; KLUMPP, S.; LANGER, D.; LEVANDOWSKI, A.; LEVINSON, J.; MARCIL, J.; ORENSTEIN, D.; PAEFGEN, J.; PENNY, I.; PETROVSKAYA, A.; PFLUEGER, M.; STANEK, G.; STAVENS, D.; VOGT, A. und THRUN, S.: *Junior: The Stanford entry in the Urban Challenge*. In: *Journal of Field Robotics* 9, S. 569–597, 2008.
- [Mül06] MÜLLER-BESSLER, B.; STOCK, G. und HOFFMANN, J.: *Reproduzierbares Fahren im Grenzbereich*. In: *race.tech 2006*. München, 2006.
- [Neg07] NEGELE, H. J.: *Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung*. Diss. Technischen Universität München, 2007.
- [Oxf11] OXFORD TECHNICAL SOLUTIONS (OXTS), Hrsg.: *User Manual: Covers RT2000, RT3000 and RT4000 products*. URL: <http://www.oxts.com/Downloads/Products/RT3000/rtman.pdf>, abgerufen am 15.11.2011.
- [Pas07] PASENAU, T.; SAUER, T. und EBELING, J.: *Aktive Geschwindigkeitsregelung mit Stop&Go-Funktion: im BMW 5er und 6er*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 10, S. 900–909, 2007.
- [Pin12] PINTO, C.: *How autonomous vehicle policy in california and nevada addresses technological and non-technological liabilities*. In: *Intersect: The Stanford Journal of Science, Technology and Society*, 2012.
- [Pon08] PONGRAC, H.: *Gestaltung und Evaluation von virtuellen und Telepräsenzsystemen an Hand von Aufgabenleistung und Präsenzepfinden*. Diss. Universität der Bundeswehr München, 2008.
- [Ras83] RASMUSSEN, J.: *Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models*. In: *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on* 3, S. 257–266, 1983.
- [Rau09] RAUCH, N.: *Ein verhaltensbasiertes Messmodell zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext*. Diss. Universität Würzburg, 2009.
- [Rau12] RAUCH, S.; AEBERHARD, M.; ARDELT, M. und KÄMPCHEN, N.: *Autonomes Fahren auf der Autobahn – Eine Potentialstudie für zukünftige Fahrerassistenzsysteme*. In: *5. Tagung Fahrerassistenz*. München: TÜV Süd Akademie, 2012.
- [Rei96] REICHARDT, D.: *Kontinuierliche Verhaltenssteuerung eines autonomen Fahrzeugs in dynamischer Umgebung*. Diss. Universität Kaiserslautern, 1996.
- [Sar95] SARTER, N. B. und WOODS, D. D.: *How in the World Did We Ever Get into That Mode? Mode Error and Awareness in Supervisory Control*. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 1, S. 5–19, 1995.
- [Sch04] SCHWIEGER, B.: *International developments towards a "second generation" car-sharing*. Diss. Technischen Universität Berlin, 2004.
- [Sch09a] SCHALLER, T.: *Stauassistenz: Längs- und Querführung im Bereich niedriger Geschwindigkeit*. Zugl. Dissertation an der Technischen Universität München. München: Verl. Dr. Hut, 2009.
- [Sch09b] SCHRAMM, D.; BARDINI, R. und HILLER, M.: *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Berlin: Springer Berlin, 2009.

- [Sch10a] SCHILP, J.: *Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz*. Zugl. Dissertation an der Technischen Universität München. München: Utz, 2010.
- [Sch10b] SCHLICK, C. M.; BRUDER, R. und LUCZAK, H.: *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010.
- [Sch11] SCHÖNER, H. P.; HURICH, W.; LUTHER, J. und HERRTWICH, R. G.: *Koordiniertes automatisiertes Fahren für die Erprobung von Assistenzsystemen: Coordinated automated driving for testing of assistance systems*. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 1, S. 40–45, 2011.
- [Sch12] SCHREIBER, M.: *Konzeptionierung und Evaluierung eines Ansatzes zu einer manöverbasierten Fahrzeugführung im Nutzungskontext Autobahnfahrten*. Diss. Technische Universität Darmstadt, 2012.
- [Sei13] SEIGN, R.: *Prescriptions for the Successful Diffusion of Carsharing with Electric Vehicles*. In: *Conference on Future Automotive Technology*. München, 2013.
- [She00] SHERIDAN, T. B.: *Function allocation: algorithm, alchemy or apostasy?*. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 2, S. 203–216, 2000.
- [She02] SHERIDAN, T. B.: *Humans and automation: System design and research issues*. Santa Monica, CA, USA: Human Factors und Ergonomics Society, 2002.
- [She60] SHERIDAN, T. B.: *The human metacontroller*. In: *Proceedings of the Annual Conference on Manual Control*. 1960.
- [She63] SHERIDAN, T. B. und FERRELL, W. R.: *Remote Manipulative Control with Transmission Delay*. In: *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics* 1, S. 25–29, 1963.
- [She78] SHERIDAN, T. B. und VERPLANK, W. L.: *Human and computer control of under-sea teleoperators*. Techn. Ber. N00014-77-C-0256. Massachusetts Institute of Technology, 1978.
- [She86] SHERIDAN, T. B.: *Human supervisory control of robot systems*. In: *Proceeding 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, USA: IEEE, 1986, S. 808–812.
- [She92] SHERIDAN, T. B.: *Telerobotics, automation, and human supervisory control*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1992.
- [She93] SHERIDAN, T. B.: *Space teleoperation through time delay: review and prognosis*. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 5, S. 592–606, 1993.
- [Shi97] SHIRLEY, D. L. und MATIJEVIC, J. R.: *Mars Rovers: Past, Present and Future*. In: *Princeton Space Studies Institute's 20th Anniversary Conference*. Princeton, USA, 1997.
- [Sib12] SIBBERTSEN, P. und LEHNE, H.: *Statistik: Einführung für Wirtschafts- und Sozialwissenschaftler*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- [Smi97] SMITH, S. W.: *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. San Diego, USA: California Technical Pub., 1997.
- [Söh01] SÖHNITZ, I.: *Querregelung eines autonomen Strassenfahrzeugs*. Bd. Nr. 882. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8. Zugl. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig. Düsseldorf: VDI-Verl., 2001.

- [Stä08] STÄMPFLE, M. und BRANZ, W.: *Kollisionsvermeidung im Längsverkehr - die Vision vom unfallfreien Fahren rückt näher*. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München: TÜV Süd Akademie, 2008.
- [Ste04] STEINFELD, A.: *Interface lessons for fully and semi-autonomous mobile robots*. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. New Orleans, USA: IEEE, 2004, S. 2752–2757.
- [Sti05] STILLER, C.: *Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr*. In: *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Hrsg. von MAURER, M. und STILLER, C. Berlin: Springer, 2005, S. 1–20.
- [Sti09] STILLER, C.; BACHMANN, A. und DUCHOW, C.: *Maschinelles Sehen*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S. und WOLF, G. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S. 198–222.
- [Stü04] STÜKER, D.: *Heterogene Sensordatenfusion zur robusten Objektverfolgung im automobilen Straßenverkehr*. Diss. Universität Oldenburg, 2004.
- [Tan15] TANG CHEN, T. L.: *Methods for Improving the Control of Teleoperated Vehicles*. Diss. Technische Universität München, 2015.
- [Tho91] THORPE, C.; HEBERT, M.; KANADE, T. und SHAFER, S.: *Toward Autonomous Driving: The CMU Navlab. Part II: System and Architecture*. In: *IEEE Expert* 4, S. 44–52, 1991.
- [Tho97] THORPE, C.; JOCHEM, T. und POMERLEAU, D.: *The 1997 Automated Highway Free Agent Demonstration*. In: *Proceedings of 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation System*. Boston, USA: IEEE, 1997, S. 496–501.
- [Thr05] THRUN, S.; BURGARD, W. und FOX, D.: *Probabilistic robotics*. Cambridge, Mass: MIT Press, 2005.
- [Thr06] THRUN, S.; MONTEMERLO, M.; DAHLKAMP, H.; STAVENS, D.; ARON, A.; DIEBEL, J.; FONG, P.; GALE, J.; HALPENNY, M.; HOFFMANN, G.; LAU, K.; OAKLEY, C.; PALATUCCI, M.; PRATT, V.; STANG, P.; STROHBAND, S.; DUPONT, C.; JENDROSSEK, L.-E.; KOELEN, C.; MARKEY, C.; RUMMEL, C.; NIEKERK, J. van; JENSEN, E.; ALESSANDRINI, P.; BRADSKI, G.; DAVIES, B.; ETTINGER, S.; KAEHLER, A.; NEFIAN, A. und MAHONEY, P.: *Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge*. In: *Journal of Field Robotics* 9, S. 661–692, 2006.
- [Thu08] THUY, M.; ALTHOFF, M.; BUSS, M.; DIEPOLD, K.; EBERSPÄCHER, J.; FÄRBER, G.; GOEBL, M.; HEISSING, B.; KRAUS, S.; NAGEL, R.; NAOUS, Y.; OBERMEIER, F.; LEON, F. P.; RATTEI, F.; WANG, C.; SCHWEITZER, M. und WÜNSCHE, H.-J.: *Kognitive Automobile - Neue Konzepte und Ideen des Sonderforschungsbereiches/TR-28*. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. München: TÜV Süd Akademie, 2008.
- [Tza07] TZAFESTAS, C. S.: *Virtual and Mixed Reality in Telerobotics: A Survey*. In: *Industrial robotics*. Hrsg. von LOW, K.-H. Mammendorf: Pro-Literatur-Verl, 2007, S. 437–470.

- [Uni12] UNITED NATIONS: *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*. Techn. Ber. ESA/P/WP/224. Statistischer Bericht zur Wohnsituation der Weltbevölkerung. 2012.
- [Uni68] UNITED NATIONS: *Convention on Road Traffic - Done at Vienna on 8 November 1968*. 1968.
- [Urm04] URMSON, C.; ANHALT, J.; CLARK, M.; GALATALI, T.; GONZALEZ, J. P.; GOWDY, J.; GUTIERREZ, A.; HARBAUGH, S.; JOHNSON-ROBERSON, M.; KATO, H.; KOON, P.; PETERSON, K.; SMITH, B.; SPIKER, S.; TRYZELAAR, E. und WHITTAKER, W. ‘: *High speed navigation of unrehearsed terrain: Red team technology for grand challenge 2004*. Techn. Ber. CMU-RI-TR-04-37. Pittsburgh: The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, 2004.
- [Urm08] URMSON, C.; ANHALT, J.; BAGNELL, D.; BAKER, C.; BITTNER, R.; CLARK, M. N.; DOLAN, J.; DUGGINS, D.; GALATALI, T.; GEYER, C.; GITTLEMAN, M.; HARBAUGH, S.; HEBERT, M.; HOWARD, T. M.; KOLSKI, S.; KELLY, A.; LIKHACHEV, M.; MCNAUGHTON, M.; MILLER, N.; PETERSON, K.; PILNICK, B.; RAJKUMAR, R.; RYBSKI, P.; SALESKY, B.; SEO, Y.-W.; SINGH, S.; SNIDER, J.; STENTZ, A.; WHITTAKER, W. ‘; WOLKOWICKI, Z.; ZIGLAR, J.; BAE, H.; BROWN, T.; DEMITRISH, D.; LITKOUHI, B.; NICKOLAOU, J.; SADEKAR, V.; ZHANG, W.; STRUBLE, J.; TAYLOR, M.; DARMS, M. und FERGUSON, D.: *Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge*. In: *Journal of Field Robotics* 8, S. 425–466, 2008.
- [Wal09] WALDMANN, P.: *Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems zum Erlernen der Ideallinie auf Rennstrecken*. Bd. 1. Schriftenreihe des Lehrstuhls Fahrzeugtechnik und -antriebe der BTU Cottbus. Zugl. Dissertation an der Technischen Universität Cottbus. Aachen: Shaker, 2009.
- [Wal11] WALLENTOWITZ, H. und FREIALDENHOVEN, A.: *Strategien zur Elektrifizierung des Antriebsstranges: Technologien, Märkte und Implikationen*. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.
- [Weg05] WEGSCHEIDER, M. und PROKOP, G.: *Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrerassistenzsystemen*. In: *Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung*. Düsseldorf: VDI-Verl., 2005, S. 17–36.
- [Wei11] WEISS, T.-T.: *Hochgenaue Positionierung und Kartographie mit Laserscannern für Fahrerassistenzsysteme*. Diss. Universität Ulm, 2011.
- [Wen11] WENDEL, J.: *Integrierte Navigationssysteme*. München: Oldenbourg Verlag, 2011. DOI: 10.1524/9783486705720.
- [Wew07] WEWETZER, C.; CALISKAN, M.; MEIER, K. und LUEBKE, A.: *Experimental Evaluation of UMTS and Wireless LAN for Inter-Vehicle Communication*. In: *7th International Conference on ITS Telecommunications*. Sophia Antipolis, Frankreich: IEEE, 2007, S. 1–6.
- [Wie96] WIERDA, M.: *Beyond the eye : cognitive factors in drivers' visual perception*. In: *Vision in Vehicles - V*. Hrsg. von GALE, A. G. Amsterdam [u.a.]: North-Holland, 1996, S. 97–105.

- [Wil05] WILKIE, R. M. und WANN, J. P.: *The Role of Visual and Nonvisual Information in the Control of Locomotion*. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 5, S. 901–911, 2005.
- [Wil12] WILLE, J. M.: *Manöverübergreifende autonome Fahrzeugführung in innerstädtischen Szenarien am Beispiel des Stadtpilotprojekts*. Diss. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2012.
- [Win00] WINFIELD, A. F. T.: *Future Directions in Tele-operated Robotics*. In: *Telerobotic applications*. Hrsg. von SCHILLING, T. London: Professional Engineering Pub., 2000, S. 147–163.
- [Win05] WINNER, H. und HEUSS, O.: *X-by-Wire Betätigungselemente. Überblick und Ausblick*. In: *Cockpits für Straßenfahrzeuge der Zukunft*. Hrsg. von WINNER, H. und LANDAU, K. Stuttgart: Ergonomia-Verl., 2005.
- [Win06] WINNER, H.; HAKULI, S.; BRUDER, R.; KONIGORSKI, U. und SCHIELE, B.: *Conduct-by-Wire - ein neues Paradigma für die Entwicklung der Fahrerassistenz*. In: *4. Workshop Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von STILLER, C. Karlsruhe: Fmrt, 2006.
- [Win09a] WINNER, H.: *Frontalkollisionsschutzsysteme*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S. und WOLF, G. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S. 522–542.
- [Win09b] WINNER, H.; DANNER, B. und STEINLE, J.: *Adaptive Cruise Control*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S. und WOLF, G. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S. 478–521.
- [Win09c] WINNER, H. und WOLF, G.: *Quo vadis, FAS?* In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Hrsg. von WINNER, H.; HAKULI, S. und WOLF, G. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009, S. 664–673.
- [Win11] WINTER, J. C. F. und DODOU, D.: *Why the Fitts list has persisted throughout the history of function allocation*. In: *Cognition, Technology & Work*, 2011.
- [Win99] WINFIELD, A. F. T.: *Wireless Video Tele-operation using Internet Protocols*. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Unmanned Air Vehicle Systems*. Bristol, England, 1999.
- [Wol09] WOLF, H.: *Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen*. Diss. Technische Universität München, 2009.
- [Wol12] WOLTER, S.: *Smart Mobility- Intelligente Vernetzung der Verkehrsangebote in Großstädten*. In: *Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität*. Hrsg. von PROFF, H.; SCHÖNHARTING, J.; SCHRAMM, D. und ZIEGLER, J. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012, S. 527–548.
- [Wri05] WRIGHT, J.; HARTMAN, F.; COOPER, B.; MAXWELL, S.; YEN, J. und MORRISON, J.: *Driving on the surface of Mars with the rover sequencing and visualization program*. In: *International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology*. Okayama, Japan: SICE, 2005.
- [Zac11] ZACHER, S. und REUTER, M.: *Regelungstechnik für Ingenieure: Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen*. 13. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011.

- [Zap88] ZAPP, A.: *Automatische Straßenfahrzeugführung durch Rechnersehen*. Diss. Universität der Bundeswehr München, 1988.
- [Zie14] ZIEGLER, J.; BENDER, P.; SCHREIBER, M.; LATEGAHN, H.; STRAUSS, T.; STILLER, C.; THAO DANG; FRANKE, U.; APPENRODT, N.; KELLER, C.; KAUS, E.; HERRT-WICH, R.; RABE, C.; PFEIFFER, D.; LINDNER, F.; STEIN, F.; ERBS, F.; ENZWEILER, M.; KNÖPPEL, C.; HIPPE, J.; HAUEIS, M.; TREPPE, M.; BRENN, C.; TAMKE, A.; GHANAAT, M.; BRAUN, M.; JOOS, A.; FRITZ, H.; MOCK, H.; HEIN, M. und ZEEB, E.: *Making Bertha Drive: An Autonomous Journey on a Historic Route*. In: *Intelligent Transportation Systems Magazine*, IEEE 2, S. 8–20, 2014.

## Studentische Arbeiten

Während der Anfertigung dieser Dissertation wurden diverse studentische Arbeiten betreut. Im Folgenden sind die für die Entwicklung eines trajektorienbasierten Steuerungskonzeptes relevanten Studienarbeiten aufgeführt. Vielen Dank an die Bearbeiterinnen und Bearbeiter für die Unterstützung im Rahmen dieses Forschungsprojektes.

- [Ber10] BERNST, S.: *Entwurf und Implementierung eines Operator-Interfaces für teleoperierte Fahrzeuge*. unveröffentlichte Diplomarbeit. Technische Universität München, 2010.
- [Bol12] BOLLENGIER, C.: *Positionsschätzung für hochautomatisierte Fahrzeuge*. unveröffentlichte Diplomarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [Bra12] BRANDSTETTER, D.: *Wirtschaftlichkeitsanalyse des Mobilitätskonzepts Car-On-Demand*. unveröffentlichte Semesterarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [Fis12] FISCHER, M.: *Experimentelle Untersuchung eines trajektorienbasierten Steuerungskonzeptes auf Bahnführungsebene*. unveröffentlichte Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [För12] FÖRTH, M.: *Parametrierung eines Fahrzeugmodells an Hand realer Fahrversuche*. unveröffentlichte Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [Gol11] GOLD, C.: *Spezifikation zusätzlicher Informationen für den Operator-Arbeitsplatz eines teleoperierten Fahrzeugs*. unveröffentlichte Semesterarbeit. Technische Universität München, 2011.
- [Gre12] GRESSMANN, T.: *Positionsschätzung für hochautomatisierte Fahrzeuge auf Basis von Laser-Distanzmessungen*. unveröffentlichte Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [Haa11] HAAS, E.: *Trajektorienplanung für die indirekte Steuerung von teleoperierten Fahrzeugen*. unveröffentlichte Diplomarbeit. Technische Universität München, 2011.
- [Maa13] MAAS, M.: *Parametrierung einer Querregelung für hochautomatisiertes Fahren*. unveröffentlichte Semesterarbeit. Technische Universität München, 2013.
- [Mic12] MICHNIEWICZ, J.: *Sensorfusionsbasierte Benutzeroberfläche für die trajektorienbasierte Fahrzeug-Teleoperation - Verwaltung und Visualisierung von Klothoiden im Kontext des Gesamtsystems*. unveröffentlichte Diplomarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [Mül12] MÜLLER, M.: *Planung einer kollisionsfreien Trajektorie auf Basis von Lidar-Daten*. unveröffentlichte Semesterarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [Ope13] OPELA, R.: *Experimentelle Untersuchung eines neuartigen Steuerungskonzeptes auf Bahnführungsebene mit Hinblick auf die Auswirkungen von Zeitverzögerungen*. unveröffentlichte Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2013.
- [Ruz12] RUZOK, T.: *Planung einer kollisionsfreien Trajektorie für das automatische Fahren auf Basis von Laser-Distanzmessungen*. unveröffentlichte Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2012.

- [Sch10a] SCHMALHOFER, J.: *Visualisierung des Bremsweges in Videobildern unter Berücksichtigung wechselnder Reibwerte*. unveröffentlichte Semesterarbeit. Technische Universität München, 2010.
- [Sch10b] SCHULLER, F.: *Entwicklung und Implementierung einer fahrzeugseitigen Programmstruktur für das teleoperierte Fahren unter Verwendung des Frameworks ADTF*. unveröffentlichte Semesterarbeit. Technische Universität München, 2010.
- [Sch11] SCHNELLER, R.: *Experimentelle Untersuchung des Einflusses von Zeitverzögerungen auf die Fahrleistung beim teleoperierten Fahren*. unveröffentlichte Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2011.
- [Sch12] SCHULLER, F.: *Entwurf und Realisierung eines indirekten Steuerungs- und Regelungskonzepts für ein teleoperiertes Straßenfahrzeug*. unveröffentlichte Diplomarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [Str12] STROHM, J.: *Planung einer befahrbaren Trajektorie auf Basis von GPS-Straßendaten*. unveröffentlichte Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [Ung10] UNGERMANN, S.: *Entwurf und Implementierung eines indirekten Regelungskonzeptes für teleoperierte Fahrzeuge*. unveröffentlichte Semesterarbeit. Technische Universität München, 2010.
- [Vog12] VOGT, K.: *Erkennung und Verfolgung von Fahrbahnbegrenzungen auf Basis von Laser-Entfernungsmessungen*. unveröffentlichte Semesterarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [Völ12] VÖLKL, M.: *Sensorfusionsbasierte Benutzeroberfläche für die trajektorienbasierte Fahrzeug-Teleoperation - Auswertung und Visualisierung von Laser-Distanzmessungen im Kontext des Gesamtsystems*. unveröffentlichte Diplomarbeit. Technische Universität München, 2012.
- [Wal11] WALLNER, J.: *Sicherheitsstrategien für teleoperierte Straßenfahrzeuge*. unveröffentlichte Bachelorarbeit. Technische Universität München, 2011.
- [War12] WARTHENPFUHL, J. P.: *Längsregelung für ein sequentielles, trajektorienbasiertes Steuerungskonzept für teleoperierte Fahrzeuge*. unveröffentlichte Masterarbeit. Technische Universität München, 2012.

## Eigene Veröffentlichungen

Im Rahmen meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik sind folgende Veröffentlichungen im Kontext des Promotionsthemas entstanden.

- [Chu13] CHUCHOLOWSKI, F.; GNATZIG, S.; TANG, T.; HOSSEINI, A. und LIENKAMP, M.: *Teleoperiertes Fahren: Aktuelle Entwicklungen*. In: *6. Tagung Fahrerassistenz*. München: TÜV Süd Akademie, 2013.
- [Die11] DIERMEYER, F.; GNATZIG, S.; CHUCHOLOWSKI, F.; TANG, T. und LIENKAMP, M.: *Der Mensch als Sensor - Der Weg zum teleoperierten Fahren*. In: *AAET - Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel*. Braunschweig: ITS Niedersachsen, 2011.
- [Gna10] GNATZIG, S.; BAMMER, M.; KRAUS, S. und HEISSING, B.: *Manoeuvre Recognition and Prediction for Driver Assistance Systems using Hidden Markov Models and Modifiers*. In: *AVEC 10, the 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control*. Loughborough, England: Loughborough Univ. Dep., 2010, S. 201–206.
- [Gna12a] GNATZIG, S.; HAAS, E. und LIENKAMP, M.: *Die Teleoperation als Ansatz zur fahrerlosen Fahrzeugführung*. In: *5. Tagung Fahrerassistenz*. München: TÜV Süd Akademie, 2012.
- [Gna12b] GNATZIG, S.; SCHULLER, F. und LIENKAMP, M.: *Human-Machine Interaction as Key Technology for Driverless Driving - A Trajectory-Based Shared Autonomy Control Approach*. In: *21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*. Paris: IEEE, 2012, S. 913–918.
- [Gna13] GNATZIG, S.; CHUCHOLOWSKI, F.; TANG, T. und LIENKAMP, M.: *A System Design for Teleoperated Road Vehicles*. In: *10th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)*. Reykjavík, Island, 2013.

---

# A Probandenstudie

## Allgemeiner Fragebogen

Name / Vorname(freiwillig)	
Proband-Nr.:	
Alter <input type="checkbox"/> 18 – 22 Jahre <input type="checkbox"/> 22 – 30 Jahre <input type="checkbox"/> 30 – 45 Jahre <input type="checkbox"/> > 45 Jahre	Geschlecht <input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich
Dauer des Führerscheinbesitzes <input type="checkbox"/> < 2 Jahre <input type="checkbox"/> 2 – 5 Jahre <input type="checkbox"/> 5 – 10 Jahre <input type="checkbox"/> > 10 Jahre	
Jährliche Fahrleistung <input type="checkbox"/> < 5000km <input type="checkbox"/> 5000 – 10000km <input type="checkbox"/> 10000 – 20000km <input type="checkbox"/> > 20000km	
Fahrstil <input type="checkbox"/> sehr vorsichtig <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> sehr sportlich	
Fahrsimulatorerfahrung <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
Computerpielerfahrung <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	

## Spezieller Fragebogen zum Steuerungskonzept

Proband Nr.: \_\_\_\_\_

Auf dem Stadtparcours ohne Zeitverzögerung stufe ich die Beherrschbarkeit der konventionellen Steuerung wie folgt ein	Unmöglich schwer gut problemlos <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Auf dem Stadtparcours mit Zeitverzögerung stufe ich die Beherrschbarkeit der konventionellen Steuerung wie folgt ein	Unmöglich schwer gut problemlos <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Auf dem Stadtparcours ohne Zeitverzögerung stufe ich die Beherrschbarkeit der trajektorienbasierten Steuerung wie folgt ein	Unmöglich schwer gut problemlos <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Auf dem Stadtparcours mit Zeitverzögerung stufe ich die Beherrschbarkeit der trajektorienbasierten Steuerung wie folgt ein	Unmöglich schwer gut problemlos <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Im Slalom ohne Zeitverzögerung stufe ich die Beherrschbarkeit der konventionellen Steuerung wie folgt ein	Unmöglich schwer gut problemlos <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Im Slalom mit Zeitverzögerung stufe ich die Beherrschbarkeit der konventionellen Steuerung wie folgt ein	Unmöglich schwer gut problemlos <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Im Slalom ohne Zeitverzögerung stufe ich die Beherrschbarkeit der trajektorienbasierten Steuerung wie folgt ein	Unmöglich schwer gut problemlos <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Im Slalom mit Zeitverzögerung stufe ich die Beherrschbarkeit der trajektorienbasierten Steuerung wie folgt ein	Unmöglich schwer gut problemlos <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Den Einfluss der Zeitverzögerung bei konventioneller Steuerung stufe ich auf dem Stadtparcours wie folgt ein	Sehr gering gering hoch sehr hoch <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Den Einfluss der Zeitverzögerung bei trajektorienbasierter Steuerung stufe ich auf dem Stadtparcours wie folgt ein	Sehr gering gering hoch sehr hoch <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Den Einfluss der Zeitverzögerung bei konventioneller Steuerung stufe ich im Slalom wie folgt ein	Sehr gering gering hoch sehr hoch <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Den Einfluss der Zeitverzögerung bei trajektorienbasierter Steuerung stufe ich im Slalom wie folgt ein	Sehr gering gering hoch sehr hoch <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Die trajektorienbasierte Steuerung empfinde ich mit dem Lenkrad als intuitiv bedienbar	Gar nicht eher nicht eher ja ja <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Mit etwas Übung traue ich mir mit der trajektorienbasierten Steuerung auch komplexere Szenarien zu	Gar nicht eher nicht eher ja ja <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Das legen der Segmente bereitete mir im Slalom Probleme	Gar nicht eher nicht eher ja ja <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
Das legen der Segmente bereitete mir beim Abbiegen im Stadtparcours Probleme	Gar nicht eher nicht eher ja ja <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>