

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Fahrverhaltensanalyse zur Parametrierung situationsadaptiver Fahrzeugführungssysteme

Sven Bernd Kraus

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. W.A. Günthner

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Lienkamp
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Diepold

Die Dissertation wurde am 01.12.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 26.06.2012 angenommen.

Prolog

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München unter dem Ordinariat von Prof. Dr.-Ing. B. Heißing und Prof. Dr.-Ing. M. Lienkamp. Teile dieser Arbeit wurden von der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs/Transregio 28 „Kognitive Automobile“ als Teilprojekt C01 mit dem Titel „Fahrzeugbereitstellung und Fahrzeugsicherheit“ gefördert.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. M. Lienkamp, der durch seine faire, offene und vertrauensvolle Art wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Als neuer Lehrstuhlleiter gewährte er mir die uneingeschränkte Freiheit zur Fortführung meiner Forschungstätigkeiten, die unter dem Ordinariat von Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Heißing begannen. Herr Heißing ermöglichte mir diese Arbeit, förderte die Selbständigkeit und stand jederzeit mit fachlichen und persönlichen Ratschlägen zur Seite. Ihm danke ich im Besonderen für das in mich gesetzte Vertrauen und die gewährten Freiheiten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Diepold möchte ich für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr.-Ing. W.A. Günthner für die Leitung der Prüfungskommission danken.

Für die gute und produktive Zusammenarbeit möchte ich mich bei allen Projektkollegen an den beiden Standorten der „Kognitiven Automobile“, in Karlsruhe und München, bedanken. Mein Dank gilt weiterhin Herrn Prof. Dr.-Ing. C. Stiller für die vorbildliche Leitung des Sonderforschungsbereichs.

Ich möchte mich ganz herzlich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik für das stets gute Arbeitsklima bedanken, das Kollegen zu Freunden machte. Ein besonderer Dank gilt hierbei meinem Mentor Dr.-Ing. Frank Diermeyer für die langjährige Unterstützung, die zahlreichen bereichernden Diskussionen und seine kontinuierliche Hilfsbereitschaft. Speziell hervorgehoben sei weiterhin mein Kollege Cheng Wang, der mir durch seine Herkunft das Tor zu einer anderen Welt geöffnet hat und mit dem ich zusammen so manche Nacht bei der Arbeit an unserem Versuchsträger verbracht habe. An dieser Stelle möchte ich auch dem kompletten Werkstattteam danken, das die technische Realisierung des Vorhabens ermöglichte.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei den zahlreichen Studenten, die durch ihr großes Engagement im Rahmen von Semester- und Diplomarbeiten maßgeblich zum Erfolg der Arbeit beigetragen haben, namentlich bei M. Ardelt, M. Bammer, T. Dirndorfer, S. Gnatzig, N. Hämmerle, G. Maurer, T. Mölgg, S. Rauch, A. Tegel und B. Weigl.

Für die fachliche Unterstützung in einzelnen Spezialthemen danke ich in besonderer Weise Herrn Dipl.-Math. Sebastian Albrecht vom Lehrstuhl für Mathematische Optimierung sowie Herrn Dipl.-Psych. Dipl.-Inf. Armin Eichinger vom Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München.

Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Freundin Christine für ihre liebevolle und aufmunternde Art, sowie meinen Eltern, die mir durch ihre bedingungslose Unterstützung die Grundlage für meine Ausbildung und meinen Werdegang ermöglichten.

Garching, Dezember 2011

Sven Kraus

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	1
1.3 Einbettung der Arbeit im Sonderforschungsbereich/Transregio 28	2
2 Stand der Technik	3
2.1 Autonome Fahrzeugführungssysteme	3
2.2 Adaptive Regelungsstrukturen	6
2.3 Situationsbegriff im Straßenverkehr	9
2.4 Mensch als Vorbild autonomer Systeme	12
2.4.1 Analyse menschlichen Fahrverhaltens	13
2.4.2 Fahrermodelle	14
2.5 Zusammenfassung	21
3 Untersuchungsmethodik	22
3.1 Vorgehen	22
3.2 Simulationsumgebung	24
3.3 Versuchsträger	24
3.3.1 Sensorik	25
3.3.2 Datenverarbeitung	29
3.3.3 Aktorik	31
3.4 Zusammenfassung	34
4 Situationsbeschreibung	35
4.1 Ableitung erforderlicher Situationsaspekte	35
4.1.1 Domänenübergreifende Betrachtung	35
4.1.2 Perzeptive Aspekte	41
4.1.3 Prädiktive Aspekte	43
4.1.4 Normative Aspekte	45
4.1.5 Zusammenfassung	46
4.2 Situationsanalyse	47
4.2.1 Erfassung statischer und dynamischer Objekte	47
4.2.2 Identifikation des Fahrverhaltens auf Manöverebene	52
4.3 Situationsinterpretation	73
4.3.1 Analyse und Auswahl von Emotionsmodellen	73
4.3.2 Modelltransfer in die Domäne Straßenverkehr	77
4.4 Zusammenfassung	89

5	Fahrverhaltensanalyse	91
5.1	Formulierung des Optimierungsproblems	91
5.1.1	Diskretisierung der Problemstellung	92
5.1.2	Reformulierung des Optimierungsproblems zum Bilevel Program	94
5.1.3	Skalierung der Gewichtungsfaktoren	95
5.1.4	Normierung der Abstandsminimierung	96
5.2	Modellierung der Fahrzeugdynamik	97
5.3	Identifikation menschlicher Fahrspurwechsel	100
5.3.1	Aufbereitung der Messdaten	100
5.3.2	Analyse und Auswahl von Kostenfunktionalen	103
5.3.3	Randbedingungen	107
5.3.4	Zustands- und Steuerbeschränkungen	110
5.3.5	Reidentifikation	112
5.3.6	Ergebnisse	114
5.4	Zusammenfassung	120
6	Situationsadaptive Fahrzeugführung	121
6.1	Grundfunktionalität	121
6.1.1	Konzept des Fähigkeitsnetzes	121
6.1.2	Fertigkeiten der Längsführung	124
6.1.3	Fertigkeiten der Querführung	128
6.2	Möglichkeiten der Adaption	135
6.2.1	Stabilisierungsebene	136
6.2.2	Bahnführungsebene	139
6.3	Mapping-Prozess	142
6.3.1	Sicherheitsorientierte Auslegung	142
6.3.2	Fahrerspezifische Auslegung	144
6.4	Zusammenfassung	149
7	Validierung des Verfahrens	152
7.1	Versuchsdesign	152
7.1.1	Versuchsgelände	152
7.1.2	Versuchspersonen	152
7.1.3	Versuchsdurchführung	153
7.1.4	Versuchsfaktoren	154
7.2	Ergebnisse	158
8	Zusammenfassung und Ausblick	162

Anhang

A	Taxonomie zur Aufgabenkomplexität von Verkehrssituationen	165
B	Parameter der Fahrdynamikmodellierung	165
C	Fragebogen der Validierungsfahrten	166
	Literaturverzeichnis	168

Abbildungsverzeichnis

1	Siegerfahrzeug der DARPA Urban Challenge 2007: „Boss“	6
2	Regelkreis mit Gain Scheduling	8
3	Segmentierung am Beispiel Linksabbiegen an einer T-Kreuzung	10
4	3-Ebenen-Modell von Rasmussen für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen	15
5	Struktureller Aufbau der Arbeit in Anlehnung an die Kognitionskette	22
6	Versuchsträger Audi Q7	24
7	Überblick der Systemarchitektur des Versuchsträgers	25
8	Lidarsensor und Visualisierung der Objekterkennung	26
9	Kameraplattform und Visualisierung der Fahrbahn- und Objekterkennung . .	28
10	Überblick der Softwarearchitektur des Versuchsträgers.	29
11	CAD-Schnittdarstellung und Realdarstellung der Gesamtbaugruppe Lenkaktuator im eingebauten Zustand im Fahrzeug	32
12	Idealisiert dargestellter Abdeckungsbereich der gewählten Sensorkombination	34
13	Aspekte der Anforderungsanalyse	40
14	Abläufe bei einer Sensordatenfusion auf Merkmalsebene	49
15	Konfliktsituation bei der Assoziation von Messwerten	51
16	Positionsraaster für die aktuelle Verkehrsszene um das Ego-Fahrzeug	52
17	Elementaraktionen für Manöver der Längsdynamik.	54
18	Elementaraktionen für Manöver der Querdynamik.	55
19	Hidden Markov Model für das Time Gap zum Führungsfahrzeug.	57
20	Hybrides Modell der Längsdynamik-Manöver	59
21	Aufgezeichnete Fahrscene des Spurwechsels eines Fremdfahrzeugs	60
22	Manöver der Längs- und Querdynamik, evaluiert aus dem hybriden Gesamtmodell.	61
23	Konzept der Planerkennung	63
24	Vergleich der Spurwechselprädiktionsansätze	66
25	Reduzierter Fehlerbaum Vorausfahrender/Nachfolgender	71
26	Konfliktwahrscheinlichkeit bei der Folgefahrt	72
27	Emotionsmodell nach ORTONY, CLORE & COLLINS	76
28	Struktur des Hauptziels „Zeiteffizientes Zielerreichen“	80
29	Intensitätsverlauf des Emotionspaares „joy-distress“	81
30	Unterziele des Hauptziels „Sicheres Zielerreichen“	82
31	Intensitätsverlauf des Emotionspaares „hope-fear“	83
32	Intensitätsverlauf des Emotionspaares „admiration-reproach“	86
33	Intensitätsverlauf des Emotionspaares „love-hate“	89
34	Problemstellung der Bilevel Optimierung zur Identifikation eines Fahrspurwechsels	93
35	Lineares Einspurmodell	97
36	Aufbereitung der Messsignale	102
37	Kostenoptimale Spurwechselverläufe von Basiskostenkriterien	106
38	Gewichtungsfaktoren in Abhängigkeit der Randbedingungen	109
39	Einfluss der Konfiguration des LLP-Gütekriteriums auf die ULP-Optimierung .	111
40	Gesamtverfahren der Analyse von Spurwechselvorgängen	114

41	Fahrscene 1 eines Spurwechselmanövers	115
42	Vergleich gemessener und identifizierter Signalverläufe für Spurwechsel 1 . . .	115
43	Fahrscene 2 eines Spurwechselmanövers	116
44	Vergleich gemessener und identifizierter Signalverläufe für Spurwechsel 2 . . .	117
45	Interpretierte Gewichtungsfaktoren ausgewählter realer Spurwechselvorgänge	118
46	Gemessene Spurwechselbahnkurven	118
47	Normierte Darstellung von Spurwechseltrajektorien	119
48	Fähigkeitenhierarchie	122
49	Exemplarischer Auszug aus dem Fähigkeitsnetz	123
50	Systemantwort auf Beschleunigungsvorgaben im Fahrversuch	126
51	Systemantwort auf Geschwindigkeitsvorgaben im Fahrversuch	127
52	Testzyklus für den Abstandsregler in der Simulationsumgebung	128
53	Verwendete Kaskadenregelungsstruktur im Überblick	129
54	Wurzelortskurve des Zustandsraummodells	130
55	Wurzelortskurven des geschlossenen Regelkreises	131
56	Querabweichungsverlauf der Regelung mit und ohne Totzeitkompensation . . .	132
57	Trajektorie eines asymmetrischen Spurwechsels	133
58	Spurwechsel bei 90 km/h: Vergleich Proband und Spurwechselautomat	134
59	Verwendete Querregelungsstruktur im Überblick	135
60	Ausprägungen des Fertigkeitenknotens „Spur wechseln“	136
61	Erweiterte Querregelungsstruktur im Überblick	137
62	Geschwindigkeits- und hybridadaptive Regelfaktoren	138
63	Spurwechsel mit dem Optimalitätskriterium $f = 0.5 \cdot f_{\delta} + 0.5 \cdot f_{y_{0.33T}}$	141
64	Ablaufplan zur situations- und fahreradaptiven Fahrzeugführung	150
65	Positionierung Proband und Versuchsbetreuer im Versuchsträger	153
66	Schematische Visualisierung der Versuchsszenarien	155
67	Bewertung der einzelnen Adaptionstufen	160

Tabellenverzeichnis

1	Durchschnittliche Spurwechselfdauer aus Untersuchungen	13
2	Charakteristische Merkmale der verbauten Sensoren	47
3	Untersuchte Verkehrskonflikte des Unfalltyps 6	68
4	Elemente des Fehlerbaums VK611 Konflikt „Vorausfahrender/Nachfolgender“	70
5	Taxonomie zur Aufgabenkomplexität von Verkehrssituationen	87
6	Randbedingungskonfiguration	108
7	Reidentifikation Basiskostenfunktionen	113
8	Reidentifikation einer synthetischen Kostenkombination	113
9	Identifizierte Gewichtungparameter für den Fahrspurwechsel 1	116
10	Identifizierte Gewichtungparameter für den Fahrspurwechsel 2	117
11	Untersuchte Parameter und ihre Variation	139
12	Ergebnisse der Korrelationsanalyse bei Spurwechseln nach rechts	146
13	Ergebnisse der Korrelationsanalyse bei Spurwechseln nach links	147
14	Probandencharakteristik	152
15	Parametrierung der Adaptionstufen	156
16	t-Test zwischen Adaptionstufe 4 und 5	161

Formelzeichen, Indizes und Abkürzungen

Formelzeichen

a_x, a_y	Fahrzeuginnenbeschleunigung, Fahrzeugquerbeschleunigung
A_{St}	Fahrzeugstirnfläche
c_v, c_h	Schräglaufsteifigkeit vorne/hinten
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
f	Kostenfunktion des Lower Level Problem
f_j	Basis-Kostenfunktion des Lower Level Problem
F	Kostenfunktion des Upper Level Problem
F_A, F_{Ax}	Luftwiderstandskraft
F_l, F_s	Längs-/Seitenkraft
h	Systemdynamik
H	Hybridfaktor der Adaption
$\tilde{h}(\bar{z}, \bar{u})$	Nebenbedingungen des Lower Level Problem in diskretisierter Form
i	Lenkübersetzung
I	Intensitätswert der virtuellen Emotion
J_{zz}	Massenträgheitsmoment im Schwerpunkt um die Hochachse
k_j, k_l	Skalierungsfaktoren im Upper-Level-Problem-Zielfunktional
K_i	Zustandsindividueller Regelfaktor
l_v, l_h	Abstand Fahrzeugschwerpunkt zum vorderen/hinteren Achsmittelpunkt
m	Anzahl der Basis-Kostenfunktionen
m_{Fzg}	Fahrzeugmasse
n_u, n_z	Anzahl der Steuergrößen/Zustandsgrößen
N	Anzahl diskreter Zeitpunkte
p	Wahrscheinlichkeit
p_{comp}	generierte kostenoptimale Fahrdaten
p_{data}	aufgezeichnete Fahrdaten
t_0, t_f	Zeitpunkt zu Beginn/Ende der Auswertung
t_k	diskretisierter Zeitpunkt
T	Spurwechseldauer
T_d	Totzeit
u	Steuergrößen
\bar{u}	Vektor zeitdiskretisierter Steuergrößen
v, v_v, v_h, v_x, v_y	Fahrzeuggeschwindigkeit (Schwerpunkt/vorne/hinten/in x-/y-Richtung)
w_j	Gewichtungsfaktor
\tilde{w}_j	skalierter Gewichtungsfaktor
W	Bewertungsmaß bei der virtuellen Emotionsbildung
x	Position in x-Richtung
y	Querabweichung zur Fahrbahnmitte bzw. Position in y-Richtung
z	Zustandsgrößen
\bar{z}	Vektor zeitdiskretisierter Zustandsgrößen
α_v, α_h	Schräglaufwinkel vorne/hinten
β	Schwimmwinkel
$\delta, \dot{\delta}$	Radwinkel, Radrade
$\delta_L, \dot{\delta}_L$	Lenkradwinkel, Lenkradrate
Δ	Zeitschrittweite
K_{ref}	Krümmung der Referenzbahn
λ	Langrange-Multiplikatoren
ρ	Luftdichte
$\psi, \dot{\psi}$	Gierwinkel, Gierrate
ψ_{ref}	Gierwinkel Fahrbahn
ψ_{rel}	relativer Gierwinkel zwischen Fahrzeuginnenachse und Bahntangente

Indizes

ego	Ego-Fahrzeug
max	Maximalwert
mean	Mittelwert
med	Median
min	Minimalwert
obj	Objekt
pred	Prädiktion

Abkürzungen

ACC	Adaptive Cruise Control
BAB	Bundesautobahn
BV	Bildverarbeitung
CAN	Controller Area Network
FB	Fahrzeugbedienung
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
ESM	Einspurmodell
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
GPS	Global Positioning System
HMM	Hidden Markov Model
IMU	Inertial Measurement Unit
IPOPT	Interior Point Optimizer
IV	Informationsverarbeitung
KKT	Karush-Kuhn-Tucker
LIDAR	Light Detection and Ranging
LLP	Lower Level Problem
LKW	Lastkraftwagen
LTI	Linear Time-Invariant
MMS	Mensch-Maschine-System
OCC	Ortony, Clore und Collins
PKW	Personenkraftwagen
RADAR	Radio Detection and Ranging
RB	Randbedingung
SI	Système international d'unités
SP	Schwerpunkt
SQP	Sequential Quadratic Programming
StVO	Straßenverkehrsordnung
SW	Spurwechsel
TG	Time Gap
TTA	Time To Accelerate
TTB	Time To Brake
TTC	Time To Collision
ULP	Upper Level Problem
VK	Verkehrskonflikt

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Mobilität stellt eines der wichtigsten Mittel zur Wahrung menschlicher Bedürfnisse dar. Individuelle Unabhängigkeit misst hier dem Automobil einen großen Stellenwert zu. Der Mensch in seiner Aufgabe als Fahrzeugführer fungiert dabei als Teil des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug-Umwelt. Er sieht sich im alltäglichen Straßenverkehr regelmäßig mit diversen Situationen konfrontiert. Diese können einen monotonen und unterfordernden Charakter, wie z.B. lange Autobahnfahrten, aufweisen oder den Fahrer bei der Fahrzeugbedienung oder der Informationsaufnahme überfordern. Beide Situationsklassen kennzeichnen sich durch eine geringe Fahrerperformance und bergen demzufolge ein erhebliches Gefahrenpotential in sich. Es werden daher komfort- und sicherheitsorientierte Assistenzsysteme in die Fahrzeuge integriert, um den Fahrer in den genannten Situationsklassen zu unterstützen und damit zu einer Reduktion der Unfallzahlen beizutragen.

Komfortsysteme, die den Fahrer in unterfordernden Situationen entlasten sollen, werden meist über höherklassige Fahrzeugmodelle in den Markt eingebracht. Wohingegen in der Vergangenheit vorwiegend Assistenzsysteme der Fahrzeuglängsführung, wie der Tempomat oder das ACC-System, ihren Weg in Serienfahrzeuge schafften, dringen zunehmend Systeme in den Markt, die sich auch mit der Querverführung oder sogar mit der kompletten Fahrzeugführungsaufgabe in Stausituationen beschäftigen. Derartige Systeme erfordern keinerlei Bedientätigkeiten vom Fahrer, dieser findet sich in einer rein überwachenden, beobachtenden Rolle wieder. Jedoch bedingt die Verbreitung derartiger Systeme die Akzeptanz durch den Fahrzeugführer, welche wiederum auch vom technischen Verhalten der Systeme abhängt. In diesem Zusammenhang spielt der erstmals in der Robotik in den 1970er-Jahren beobachtete Effekt des „Uncanny Valley“ eine Rolle, der sich auf das Akzeptanzverhalten von nonverbalen und technisch simulierten Systemen bezieht. Demnach steigt die Akzeptanz mit dem Grad der Menschenähnlichkeit des Systems, jedoch nicht stetig linear, sondern mit einem starken Einbruch innerhalb einer gewissen Spanne. Wird diese überschritten, so kann ein höheres Akzeptanzniveau erreicht werden, als bei Systemen mit rein artifiziellem Verhalten. Der Applikationsprozess bei dem die Reglerparameter letztendlich bestimmt werden, ist jedoch sehr ressourcenintensiv und kann durch die inter- und intraindividuellen Unterschiede der Applikationsingenieure im Ergebnis differieren.

1.2 Zielsetzung

Ziel in der Parametrierung (semi-)autonomer Fahrzeugführungssysteme muss daher sein, eine möglichst anthropomorphe Verhaltensumsetzung anzustreben, um eine hohe Akzeptanz derartiger Systeme zu erreichen. Dies bedingt, dass sich das Systemverhalten an dem sich in einer bestimmten Situation befindenden und agierenden Menschen orientiert. Weiterhin darf das Verhalten (semi-)autonomer Fahrzeuge für andere Verkehrsteilnehmer nicht überraschend sein, sondern es muss vielmehr so agieren, wie es die anderen Verkehrsteilnehmer in der gegenwärtigen Verkehrssituation erwartet hätten. Gerade in sicherheitskritischen Situationen mit großem Verkehrsaufkommen ist es maßgeblich, sich konform zu den anderen Verkehrsteilnehmern zu verhalten und die fahrdynamische Umsetzung transparent einzusetzen, so dass andere Verkehrsteilnehmer das Verhalten des (semi-)autonomen

Fahrzeuges nicht fehlinterpretieren. Somit soll vermieden werden, dass die anderen Verkehrsteilnehmer ihrerseits zu extremen Fahrmanövern verleitet werden. Die Reaktion des (semi-)autonomen Fahrzeuges muss also sowohl in ihrer Intensität als auch in ihrem chronologischen Ablauf den Erwartungen entsprechen und insbesondere für Außenstehende transparent sein. Daher soll ein Verfahren entwickelt werden, welches auf Grundlage eines kognitiven Fahrermodells eine Lösung des Problems der Verhaltensausprägung wählt, die der menschlichen Lösung in der jeweiligen Situation entspricht und eine an die konkrete Situation angepasste Modulation der Fahrzeugführungscharakteristik erlaubt.

1.3 Einbettung der Arbeit im Sonderforschungsbereich/Transregio 28

Teile der vorliegenden Arbeit wurden im Rahmen des von der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs/Transregio (SFB/TR) 28 „Kognitive Automobile“ ausgeführt. Die Projektpartner im Sonderforschungsbereich waren die Technische Universität München, die Universität der Bundeswehr München, die Technische Hochschule Karlsruhe sowie das Fraunhofer Institut IITB Karlsruhe. Der SFB/TR war in der ersten Förderperiode von 2006 bis 2009 in 3 Projektbereiche mit insgesamt 12 Teilprojekten untergliedert, deren wissenschaftliche Inhalte an 12 Instituten der beteiligten Projektpartner untersucht wurden [3].

Die Projektbereiche decken folgende Themenfelder ab:

- Projektbereich A: Verteilte sensorielle Wahrnehmung
- Projektbereich B: Verhaltensentscheidung, -planung, -ausführung
- Projektbereich C: Fahrzeuge und IT-Basissysteme

Die nachfolgend dargestellten Ausführungen befassen sich mit den Fragestellungen und der Umsetzung der Aufgaben aus dem Teilprojekt C01 mit dem Titel „Fahrzeuggestaltung und Fahrzeugsicherheit“. Aus strategischen Gründen wurden Inhalte zur Verhaltensausführung aus dem Teilbereich B in dieses Teilprojekt zusätzlich integriert, um die wissenschaftlichen Anteile dieser Inhalte nachhaltiger mit den infrastrukturellen zu verzahnen.

Die grundsätzliche Zielsetzung dieses Teilprojektes war es demnach, die Sollvorgaben und Steuerkommandos der Verhaltensentscheidung über eine geeignete Schnittstelle entgegenzunehmen und durch ein zu erarbeitendes Regelungskonzept sicher und zuverlässig im Fahrzeug umzusetzen. Zusätzlich galt es, den Bewegungszustand des Fahrzeugs und alle für die übergeordneten Instanzen und die Regelung relevanten fahrdynamischen Größen zu ermitteln. Weiterhin mussten sicherheitstechnische Aspekte bei der Konzeption der Hard- und Software-Architektur mit einfließen, die neben den Anforderungen an die Sicherheit auch der Zuverlässigkeit, der Verfügbarkeit und der Systemdiagnose Rechnung tragen.

Die dargelegte Arbeit spiegelt zum Einen die Umsetzung der genannten Ziele und Anforderungen aus dem Sonderforschungsbereich wider, geht jedoch zum Anderen über diese hinaus und stellt einen methodischen Ansatz zur situations- und fahreradaptiven Fahrzeugführung dar, der in dem Versuchsträger des SFB realisiert werden konnte.

2 Stand der Technik und Forschung

Entsprechend des Titels FAHRVERHALTENSANALYSE ZUR PARAMETRIERUNG SITUATIONSADAPTIVER FAHRZEUGFÜHRUNGSSYSTEME wird in umgekehrter Reihenfolge der Satzbausteine der Stand der Technik erläutert. Zunächst geht Kapitel 2.1 auf Meilensteine der Entwicklung autonomer Fahrzeugführungssysteme im europäischen und US-amerikanischen Raum ein. Daraufhin werden wichtige internationale Wettbewerbe dargestellt, welche die Forschungsergebnisse in diesem Bereich stark vorantrieben. Kapitel 2.2 zeigt die Hauptformen der Adaption und deren Anwendungsszenarien. Dem Stand der Technik zur begrifflichen Beschreibung einer Situation im Straßenverkehr widmet sich Kapitel 2.3. Schließlich wird in Kapitel 2.4 der Mensch als Vorbild für den Entwurf autonomer Fahrzeugführungssysteme herangezogen. Grundlage dafür bildet die Analyse des menschlichen Fahrverhaltens, welches in Form von Fahrermodellen wiederzugeben versucht wird.

2.1 Autonome Fahrzeugführungssysteme

Die Beschreibung autonomer Fahrzeugführungssysteme bedarf zuvor einer genaueren Beleuchtung des Begriffs der Autonomie und deren Abgrenzung zur Automation.

Die allgemeine Definition von Autonomie leitet sich aus der Übersetzung des altgriechischen Wortes „autonomia“ ab und bedeutet „sich selbst Gesetze gebend“. Dies lässt sich je nach Fachbereich und Ausprägung auch mit „Selbstständigkeit“, „Selbstbestimmung“ oder auch „Unabhängigkeit“ gleichsetzen. Im ethischen und auch juristischen Sinn wird es gleichbedeutend mit „Selbstverantwortlichkeit“ verwendet. Übertragen auf autonome Fahrzeugführungssysteme bedeutet dies, dass Systeme derart konzipiert sein müssen, dass sämtliche vom System selbst bestimmte Handlungen auch vom System verantwortbar sein müssen. Eine menschliche Rückfall- und Absicherungsebene ist bei autonomen Systemen im eigentlichen Sinne nicht erforderlich.

Im Gegensatz dazu verbieten automatisierte Systeme eine vollkommene Abwesenheit des Bedieners, da diese lediglich einen selbsttätigen Ablauf technischer Vorgänge nach festgelegten Plänen und unter definierten Umgebungsbedingungen vollziehen. Eine eigenständige Bewertung eingesetzter Mittel und Ziele findet jedoch nicht statt. Daher bedürfen die ausgeführten oder unterlassenen Aktionen automatischer Systeme einer menschlichen Überwachung. Der Bediener muss jederzeit in der Lage sein, korrigierend in das Systemverhalten einzugreifen oder sogar die Systemaufgabe wieder vollständig zu übernehmen, darf also gegenüber autonomen Systemen nicht komplett aus dem Regelkreis genommen werden.

Die Fahrzeugführung alleine kann erst im Zusammenspiel mit allen weiteren notwendigen Komponenten zum Teil eines autonomen Systems werden, so dass deren isolierte Betrachtung als automatische Fahrzeugführung zu bezeichnen ist. Da sich die angestrebte Situationsadaptivität als Funktion zwar im Umfeld autonomer Fahrzeuge bewegt, jedoch auch für automatische Fahraufgaben anwendbar ist, werden innerhalb dieser Arbeit die beiden Begrifflichkeiten „autonom“ und „automatisch“ nach diesem Kapitel synonym verwendet.

Wohingegen erste Vorrichtungen zur Automatisierung bereits im 18. Jahrhundert durch sich selbständig ausrichtende Windmühlen realisiert wurden, sind autonome Systeme erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts vorzufinden. Die folgenden Ausführungen widmen sich

den Meilensteinen der Entwicklung von Fahrzeugführungssystemen auf dem europäischen Kontinent und in den USA.

In Europa konzentrierten sich die Forschungsaktivitäten einerseits auf den Bereich der automatischen Fahrzeugführung und andererseits auf den Bereich der Steuerung des gesamten Verkehrsflusses [114]. Aus diesen beiden Forschungsrichtungen sind in den 90ern zwei große Verbundprogramme geschaffen worden. Dies ist zum einen das EUREKA-Projekt PROMETHEUS (Programme for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety). In diesem Programm wurden Problemstellungen analysiert, die zu einer Verbesserung des Fahrverhaltens und zu einer Erhöhung der Fahrsicherheit führen können [177]. Im Gegensatz dazu standen bei dem von der Europäischen Union geförderten Großprojekt DRIVE (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe) nicht die Beeinflussung des Fahrverhaltens einzelner Verkehrsteilnehmer im Vordergrund, sondern infrastrukturelle Eingriffe in das Verkehrsgeschehen [92].

Das PROMETHEUS-Programm war das bislang größte Forschungsprojekt auf dem Gebiet des autonomen Fahrens mit einem Fördervolumen von ca. 800 Millionen Euro. Bei der Abschlußpräsentation im Jahr 1994 konnten zwei Mercedes-Benz 500SEL eine Strecke von mehr als 1.000km längs- und quergeregelt im öffentlichen Straßenverkehr absolvieren. Eines dieser Fahrzeuge, VAMP (Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen im PKW) wurde von der Forschungsgruppe um Prof. Ernst Dickmanns an der Universität der Bundeswehr in München entwickelt [113]. Dieses stellte den Nachfolger des weltweit ersten Roboter-Autos VaMoRs (Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen) dar, einem Mercedes-Benz Kastenwagen vom Typ 508D, der ebenfalls von dem Team um Prof. Dickmanns aufgebaut und 1986 vorgestellt wurde [38, 157].

Das Artificial Vision and Intelligent Systems Laboratory (VisLab) der Universität Parma forscht an visuellen Algorithmen und intelligenten Systemen im automotiven Umfeld. Ebenfalls 1994 wurde im Rahmen des PROMETHEUS-Projekts der MobLab vorgestellt. Er ermöglichte bei autonomen Fahrten bis 50 km/h echtzeitfähiges Rechnersehen und Fahrspurerkennung. Die hier entwickelten visuellen Systeme fanden 1998 ihren Einsatz im ARGO-Projekt. Der gleichnamige Argo, ein Lancia Thema 2000, war das erste Fahrzeug weltweit, das in ungeschützter Umgebung eine Strecke von 2000km Länge zu 94% autonom meisterte.

Am 20. Juli 2010 startete VisLab die „Intercontinental Challenge“ mit dem Ziel einen neuen weltweiten Meilenstein im Bereich der Fahrzeugrobotik zu setzen. Zwei VisLab-Fahrzeuge sollten den 13.000km langen Landweg von Parma (Italien) nach Shanghai (China) auf einer dreimonatigen Reise vollautonom bewältigen. Der Zielort ergab sich durch das Bestreben an der EXPO 2010 in Shanghai teilzunehmen, um zu zeigen, dass Interkontinental-Transporte umweltfreundlich und ohne menschliche Eingriffe möglich sind. Neben der Fähigkeit zur autonomen Fahrt wurde dazu der Antrieb der Fahrzeuge elektrifiziert. Zudem stammte die Energie für die Fahrzeugführungssysteme aus Solarzellen, die auf dem Dach der Fahrzeuge montiert wurden. Das Projekt wurde zum Teil vom ERC (European Research Council) gefördert.

In den USA gibt es eine Vielzahl von Forschungsprojekten, die sich mit dem autonomen Fahren beschäftigen. Die bekanntesten sind das auf Bundesebene durchgeführte Projekt IVHS (Intelligent Vehicle Highway Systems) und das vom Bundesstaat Kalifornien unterstützte Programm PATH (Partners for Advanced Transportation Technology). Der Schwerpunkt dieser beiden Projekte liegt auf der Fahrzeugführung in Längsrichtung.

Das Projekt IVHS dient der Entwicklung neuer Technologien in den Bereichen der Fahrzeugtechnik und Verkehrsführung der Zukunft. Ziel ist unter anderen die Entwicklung eines Prototypen einer automatischen Fahrspur. Auf dieser Spur können kompatible Fahrzeuge teilautonom oder vollautonom fahren. Das AHS Programm, welches Bestandteil von IVHS ist, verfolgte die Zielsetzung eine erste automatische Teststrecke auf einer Schnellstraße zu entwickeln, die es erlaubt Fahrzeuge automatisch in die Spur zu leiten und diese dann sicher mit genügend Abstand zu den anderen Verkehrsteilnehmern über die Distanz zu führen [151].

Das kalifornische Projekt PATH wurde 1986 gestartet und vom kalifornischen Verkehrsministerium CALTRANS gefördert. Die Durchführung dieses Projektes wurde von kalifornischen Universitäten und Forschungseinrichtungen übernommen. Die Zielsetzung von PATH war, in den nächsten 10–20 Jahren ein System zu entwickeln, das dem ständig wachsenden Verkehrsaufkommen und dem drohenden Verkehrskollaps entgegenwirken kann [156]. Dies wurde unter anderem durch ein automatisches Abstandsregelsystem und eine geringere Spurbreite realisiert. Die Fahrspur wurde bei diesem System durch Magnete unter der Fahrbahn markiert. Entsprechende Sensoren in den Fahrzeugen maßen die magnetischen Signale und gaben die Abweichung an das Lenksystem weiter. Die Hauptarbeit in diesem Projekt wurde von der University of California in Berkeley durchgeführt.

Schon in der Vergangenheit hat sich oftmals der Nutzen von Wettbewerben zur Beschleunigung des Fortschritts herausgestellt. Neben der öffentlichkeitswirksamen Präsentation der eigenen Arbeiten bieten derartige Plattformen die Möglichkeit zum Vergleich mit anderen Forschergruppen. Der Sieg bei bedeutenden Wettbewerben bringt meist nicht nur die ausgeschriebenen Preisgelder, sondern auch internationales Renommee im jeweiligen Forschungsbereich mit sich.

Einen bedeutenden Fortschritt erhoffte sich auch die DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), eine Behörde des US Verteidigungsministeriums, als sie im Jahr 2002 einen Wettkampf autonomer Fahrzeuge ankündigte. Bereits 2003 versammelten sich 450 Personen aus der ganzen Welt auf der Grand Challenge Competitors Conference in Los Angeles. Sie wurden aufgerufen, ihr Können auf einem bis dato einzigartigen Wettkampf, der DARPA Grand Challenge, zu zeigen. Einen Anreiz stellte das ausgeschriebene Preisgeld von einer Million Dollar und die Teilnahme an einem wichtigen Abschnitt der automobilen Geschichte dar.

Im Jahr 2004 fand die erste DARPA Grand Challenge statt. Das Teilnehmerfeld setzte sich aus Hochschul- und Universitätsstudenten, Fahrzeugherstellern, Garagenschraubern, Computerprogrammierern, Softwareherstellern, Sensorexperten, Off-Road-Rennfahrern und Robotik-Spezialisten zusammen. Sie hatten die Aufgabe ein neues Zeitalter der autonomen Roboterfahrzeuge einzuläuten, um später Soldatenleben in den Kriegsregionen zu schützen. Ziel dieses Wettkampfes war es, autonom von Barstow in Californien nach Primm in Nevada zu fahren. Obwohl der erste Event seiner Art insofern, dass kein Fahrzeug ins Ziel kam, ein Misserfolg war, hatte die DARPA bereits eine Folgeveranstaltung - die Grand Challenge 2005 - angekündigt. Befürworter der Veranstaltung werteten die Veranstaltung jedoch in jeder Hinsicht als Erfolg, da sie Interesse und Innovationen gefördert hat.

Wie die Grand Challenge 2004 führte auch die Folgeveranstaltung im Jahr 2005 über befestigte und unbefestigte Straßen, Pfade, und Off-Road Wüstenregionen. Hindernisse wie Gräben, Böschungen, Felsen und Geröll, enge Unterführungen, Betonbegrenzungen, Strom-

masten und Stacheldrahtzäune mussten von den Fahrzeugen erkannt und automatisch umfahren werden ohne dabei von der Strecke abzukommen. Zusätzlich zu den natürlichen Hindernissen wurden von der DARPA künstliche Hindernisse auf die Strecke gebracht, die ein Fahrzeug außer Gefecht setzen können, falls sie nicht erkannt werden. Die Teilnehmer dieser Grand Challenge waren viel erfolgreicher als die des Jahres zuvor. Nur ein einziges Fahrzeug blieb bereits vor der Bestmarke von 7.3 Meilen aus dem Vorjahr stehen, fünf Fahrzeuge brachten das Rennen erfolgreich zu Ende.

Anders als die Grand Challenges im Jahr 2004 und 2005 fand die Urban Challenge 2007 nicht Off-Road, sondern im urbanen Umfeld statt. Ziel der Urban Challenge war es, in einer a priori unbekanntem urbanen Umgebung GPS-gestützt einen vorgegebenen Weg abzufahren und dabei Hindernissen auszuweichen, Verkehrsregeln zu befolgen, die Verkehrssituation zu interpretieren und mit anderen Verkehrsteilnehmern zu interagieren. Das Event verlangte von den Teilnehmern ein Auto, welches im Straßenverkehr mitfahren, selbstständig parken und wenden kann. Dieser Wettkampf war der erste, in dem autonome Fahrzeuge mit anderen Fahrzeugen, sowohl unbemannt als auch bemannt, interagieren mussten. Das Siegerfahrzeug „Boss“ vom Tartan Racing Team der Carnegie Mellon University zeigt Bild 1.



Bild 1: Siegerfahrzeug der DARPA Urban Challenge 2007: „Boss“ [2]

2.2 Adaptive Regelungsstrukturen

Unter Adaption versteht man die Veränderung einer Vorgehensweise, um sich einer neuen Situation anzupassen. Überträgt man diese Eigenschaft auf einen Regler, so passt dieser sein Verhalten selbständig an, um Änderungen in der Dynamik oder Störgrößen bestmöglich entgegen zu wirken. Da eine normale Regelung nur kleine Änderungen in der Prozessdynamik ausgleichen kann, werden für größere, langsame Änderungen adaptive Regler eingesetzt. Diese können ihre Struktur und Parameter dem zeitvarianten oder auch unbekanntem Regelstreckenverhalten durch ein dem Grundregelkreis überlagertes adaptives System anpassen.

Auch der Mensch als Regler ist in der Lage sich innerhalb seiner physiologischen Grenzen dem sich verändernden und zu regelnden System anzupassen. Diese Adaptionfähigkeit an sich ändernde Arbeitsbedingungen besitzt er sowohl für zeitvariante als auch zeitinvariante Regelstreckendynamiken. Zu den vier Hauptformen der Adaption zählen die Adaption an die Führungsgröße, an die Regelstrecke, an die Aufgabe und die programmierte Adaption [142]. Bekannte oder sich wiederholende Signalmuster der Eingangsgrößen können durch den Menschen wahrgenommen und vorhergesagt werden und in antizipatorische Steuerbewegungen ohne exakte Kenntnis der rückgekoppelten Regelgrößen umgesetzt werden. Durch diese Adaption an die Führungsgröße ist er in der Lage, sein Übertragungsverhalten an die sich ändernden Kennwerte instationärer Eingangsgrößen anzupassen. Als Beispiele seien hier die antizipatorische Steuerung bei Kurveneinfahrt oder bei Seitenwind zu nennen.

Bei der Adaption an die Regelstrecke geht man von der Fähigkeit des Menschen aus, sich an eine verändernde oder unbekannte Regelstrecke anzupassen. Der Adaptionsvorgang setzt sich hierbei meist aus drei Phasen zusammen. Dem Identifikationsprozess, der indirekt oder direkt erfolgen kann, folgt der Entscheidungsprozess, der über eine Modifikationsstufe die einstellbaren Parameter während des Prozessablaufs ändert. Als Beispiel für die Regelstreckenadaption kann das Fahren mit einem zuvor unbekanntem Fahrzeug aufgeführt werden.

Unter einer Adaption an die Aufgabe versteht man die Anpassung der Regelung an sich ändernde Regelziele. So kann z.B. bei konstanter Prozessdynamik in bestimmten Situationen eine verbrauchsoptimale Regelung einer verlaufsoptimalen bevorzugt werden oder vice versa. Übertragen auf das Fahrverhalten wird z.B. bei Engstellen eher eine fehlerminimale Regelstrategie ausgeführt werden, wohingegen auf monotonen Autobahnfahrten ein minimaler Regelaufwand präferiert wird.

Werden erlernte oder vorprogrammierte Regelstrategien in Abhängigkeit von Umweltbedingungen ausgewählt, so spricht man von einer programmierten Adaption. Diese mündet meist in einen Steuervorgang ohne Verwendung rückgekoppelter Informationen, wie z.B. bei der antizipatorischen Vorsteuerung beim Verlassen des Windschattens eines Lastkraftwagens.

Eine der wichtigsten Aufgaben adaptiver Regelungsstrukturen stellt jedoch die Anpassung an ein sich veränderndes Streckenverhalten dar. Zahlreiche Ansätze, von denen im Folgenden die wichtigsten vorgestellt werden, widmen sich diesem Problem.

Mit Hilfe einer sogenannten Gain-Scheduling Regelung lässt sich eine automatisch gesteuerte Anpassung der Regelparameter im laufenden Betrieb vornehmen [154]. Diese erfolgt in Abhängigkeit von internen oder externen Hilfszuständen, den Scheduling-Variablen. Die Hilfszustände, zu denen im Falle interner Variablen die gemessenen Systemzustände und Eingänge zählen, müssen den Prozesszustand widerspiegeln. Erfüllen diese gewisse Übergangsbedingungen, werden nach einem festgelegten Scheduling Plan die entsprechenden Regelparameter dem Regler zugeführt (Bild 2).

Die Gain-Scheduling Regelung ist eine gute Möglichkeit, um bekannte Veränderung der Prozessvariablen, aber auch bekannte Nichtlinearitäten auszugleichen. Bei nichtlinearen Eigenschaften der Regelstrecke kann die Systemdynamik vielfach in verschiedenen Arbeitspunkten durch lineare zeitinvariante Modelle approximiert werden, jedoch kann diese zwischen den Arbeitspunkten meist erheblich differieren. Für verschiedene Arbeitspunkte werden hier lineare Regler entworfen, die dann arbeitspunktsektiv aktiviert werden. Dabei kann ein diskreter Wechsel oder eine lineare Interpolationen zwischen mehreren Sätzen von Reglerparametern vorgenommen werden. Die Gesamtheit der einzelnen Modelle für jeden Be-

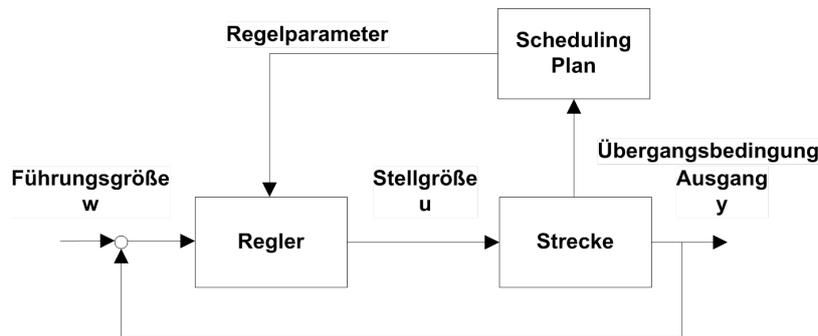


Bild 2: Regelkreis mit Gain Scheduling

triebspunkt bildet das sogenannte Multi-Modell. Jedes Teilmodell kann dabei experimentell durch ein Identifikationsverfahren bestimmt werden, wenn sich die Regelstrecke in dem entsprechenden Arbeitspunkt befindet. Der Vorteil dieser Methode liegt vor allem darin, dass bei einem Wechsel zu einem schon bekannten Betriebspunkt das entsprechende für diesen Arbeitspunkt gültige Modell der Regelstrecke bereits vorhanden ist und direkt für die Bestimmung der Regelparameter verwendet werden kann, nachdem es durch ein geeignetes Detektionsverfahren aus der Gesamtheit der Untermodelle ermittelt wurde. Die Adaptionsphase, die sich nach jedem Umschalten ergibt und während der das Regelverhalten meist ungünstig ist, entfällt dadurch oder wird gegenüber einem adaptiven Regler, der nach jedem Umschalten die Regelstreckenparameter neu bestimmen muss, entscheidend verkürzt. Ist die Arbeitspunktabhängigkeit durch exogene Parameter modellierbar, so lassen sich derartige Systeme häufig durch die nichtlineare Modellklasse der affin linearen parametervariablen Systeme (LPV) beschreiben [127]. Für diesen Ansatz existieren Entwurfsmethoden aus Erweiterungen der linearen optimalen Regelungstheorie, die neben der Einhaltung der Stabilität auch Vorgaben an die Regelgüte garantieren [10, 91].

Im Gegensatz zu den direkten Verfahren, bei denen die Reglerparameter unmittelbar durch den Adaptionsmechanismus vorgegeben werden, werden diese bei selbststellenden Reglern indirekt durch einen in den erweiterten Regelkreis verlagerten Entwurfsprozess generiert. Hierfür werden in einem Identifikationsprozess zunächst die Prozessparameter des zu regelnden Prozesses im geschlossenen Regelkreis geschätzt. Anhand dieser Schätzung werden daraufhin die Reglerparameter mit Hilfe zumeist einfacher Entwurfsregeln berechnet. Ein selbststellender Regler kennzeichnet sich also durch die Fähigkeit des Reglers die Parameter automatisch und selbständig entsprechend dem gewünschten Verhalten einzustellen. Der Regler besteht aus einem inneren Kreis mit Regler und Strecke, und einem äußeren zur Bestimmung der Reglerparameter. In letzterem findet die rekursive Parameterschätzung und der Adaptionsmechanismus statt. Selbststellende Regler können als Vorform adaptiver Systeme verstanden werden. Wird der Mechanismus der Selbststellung selbsttätig periodisch wiederholt, so lassen sich diese Regelungen zu Systemen mit adaptivem Verhalten ausbauen.

Die Regelung mit einem parallelen Bezugssystem ermöglicht die Spezifikation des Führungsverhaltens des geschlossenen Regelkreises durch ein Referenzmodell, welches das gewünschte Ein-/Ausgangsverhalten zeigt. Der Ausgangsfehler zwischen Modell und Pro-

zess liefert die Rückkopplung zur Adaptionseinrichtung. Das Adaptionsgesetz kann mit Hilfe der Gradienten-Methode (MIT-Regel) oder über Stabilitätsverfahren entworfen werden.

2.3 Situationsbegriff im Straßenverkehr

Der Begriff „Situation“ ist ein häufig verwendeter Ausdruck und lässt sich fast in allen naturwissenschaftlichen sowie geistlichen Fachbereichen wiederfinden. Dabei fungiert er in den meisten Forschungsgebieten als Analyseeinheit, um Rückschlüsse auf bestimmte Verhaltensmuster ziehen zu können. Jedoch dient er auch in manchen Domänen als reine Beschreibung der gegebenen Umstände.

Die begriffliche Beschreibung einer Situation findet in dieser Arbeit im Kontext der automatischen Fahrzeugführung in strukturierter Umgebung Anwendung und fokussiert sich daher auf den Straßenverkehr. Im Folgenden werden methodische Ansätze aus dieser Domäne vorgestellt und hinsichtlich relevanter Situationsaspekte untersucht.

FASTENMEIER [51] betrachtet mit v. BENDA, HOYOS und SCHAIBLE-RAPP [22] das Autofahren als eine Kette von Interaktionen zwischen dem System Fahrer-Fahrzeug und seiner sich kontinuierlich ändernden Umgebung. Wird diese Kette in Raum, Zeit und Verhalten zerlegt, so werden diese Kettenglieder von ERKE und WESSEL als „Verkehrssituationen“ [50] bezeichnet. Definiert werden sie von v. BENDA als „Umgebung des MMS Fahrer-Fahrzeug aus Fahrersicht“ [21, 22]. MAREK und STEN [112] heben die zentrale Bedeutung der Verkehrssituation als entscheidende „Analyseeinheit des Verkehrssystems“ [51, S.27] hervor.

Erste Klassifikationen nach räumlichen/zeitlichen Merkmalen einer Situation im verkehrstechnischem Sinn unterscheiden nach baulichen und betrieblichen Attributen der Verkehrsanlage und ihres Umfeldes, sowie nach Merkmalen des Verkehrsablaufes (z.B. [7], [105]).

Diese objektive Beschreibung reicht laut FASTENMEIER nicht aus, da das subjektive Verhalten des Fahrers nicht erfasst werden kann. Dies zeigt schon, dass ein gleiches Verhaltensmuster bei unterschiedlichen verkehrstechnischen Eigenschaften entstehen könnte. Laut FASTENMEIER müsse das Abdecken der subjektiven Bedeutung von Situationsvariablen ein wesentliches Ziel der Analyse von Fahrer-Umwelt-Interaktionen werden.

Ein empirischer Ansatz, der diese fahrerorientierte Betrachtungsweise in eine Taxonomie von Situationen umsetzt, ist das von v. BENDA entwickelte Klassifikationssystem [21]. Nach dem fahrerorientierten Ansatz gerichtet, gab v. BENDA keine Merkmallisten vor, sondern leitete diese aus der Befragung von Versuchspersonen ab. Aus Farbfotografien von Verkehrsszenen aus der Fahrerperspektive sollten die Versuchspersonen relevante Einzelheiten nennen. VON BENDA ging der Frage nach, durch welche Umgebungsvariablen einzelne Verkehrssituationen voneinander trennbar sind. Die durch diese Analyse extrahierten subjektiven Erlebniseinheiten wurden als Situation bezeichnet und durch v. BENDA zu dem nach ihr benannten Klassifikationsschema weiter entwickelt.

SANDKÜHLER und BENMIMOUN [150] entwickelten ein Situationserkennungsmodul, das eine situations- und fahreradaptive Verhaltensanpassung eines automatischen Längsführungssystems ermöglichen soll. Sie kombinieren dazu die objektiven Messgrößen der Fahrzeugsensorik mit den Aussagen aus Probandenversuchen, welche aus subjektiven Einschätzungen der Situation sowie den jeweils zu Grunde liegenden subjektiven Unterscheidungskriterien bestehen. Dadurch wird eine Klassifikation der Verkehrssituation möglich, bei der die datenbasierte Identifikation mit der fahrerbasierten zeitlich und inhaltlich korreliert. Die bei-

den ermittelten Situationsklassen sind zum einen der Hochgeschwindigkeitsbereich mit den Unterklassen Annähern, Beschleunigen, Folgen und Freie Fahrt, zum anderen der Niedriggeschwindigkeitsbereich mit den Unterklassen Anhalten, Folgen und Anfahren. Innerhalb der Unterklassen existieren zudem Diversifikationsstufen.

Eine weitere Möglichkeit zur Differenzierung von Situationen besteht in der Klassifikation auf Verhaltensebene. Die Gefährlichkeit einer Situation wird dabei als Wechselwirkung zwischen einer inneren und äußeren Verhaltensbedingung betrachtet und wird von der Interpretation physikalischer Bedingungen durch die Verkehrsteilnehmer bestimmt. Dies stellt die Interaktion zwischen dem Ego und seiner Umwelt in den Mittelpunkt der Betrachtung. Einen guten Überblick über situationsbezogenes Verhalten geben die Arbeiten von GIBSON und CROOKS [65]. Sie beschreiben die Situation als „Ausschnitt aus der Verkehrslage mit baulichen Merkmalen, anderen Verkehrsteilnehmern, Gefährdungsbedingungen, Anhaltewegen und Bereichen sicheren Fahrens“ [51, S.29].

Auch FREDERIKSEN [59] weist auf die Unzulänglichkeit der Beschreibung anhand ihrer objektiven Merkmale hin. Die Situation muss auch im Hinblick auf das von ihr geforderte Verhalten analysiert und taxonomisiert werden. Diese Betrachtung greift das Aufgabenkonzept von HACKMAN [75] auf, da es die verhaltensauslösenden Bedingungen berücksichtigt und daher eine verhaltenstheoretisch begründete Aufgabenanalyse nahe legt.

Dies veranlasste FASTENMEIER und GSTALTER [51] die Analyse der Fahraufgabe als Ausgangspunkt zur Klassifikation von Verkehrssituationen zu verwenden. Eine Fahraufgabe setzt sich dabei aus den Anforderungen zusammen, die von der Verkehrssituation ausgehen. Eine Grundlage zur Abschätzung der Aufgabenkomplexität stellt die Anforderungsanalyse dar, da sie sich zum einen mit der Aufgabenstellung an den Fahrer beschäftigt und zum anderen ein Maß der Arbeitsbelastung liefert. FASTENMEIER und GSTALTER übertragen daher die arbeitsanalytische Vorgehensweise auf die Ebene der Fahraufgaben. Das Ergebnis ihrer Arbeit stellt die Verknüpfung von Verkehrssituationen auf Basis einer modifizierten Variante des Klassifikationsschemas nach v. BENDA mit Indexwerten zur Quantifizierung der Fahrerbeanspruchung in der jeweiligen Situation dar. Weitere Ausführungen dazu finden sich in Kapitel 4.3.2.4 wieder.

In weiterführenden Arbeiten (z.B. [52]) detaillieren FASTENMEIER und GSTALTER ihre Methodik zur Fahraufgabenanalyse. Dabei wird eine ausgewählte Fahraufgabe – im Sinne einer Tätigkeitsanalyse – in zeitlich strukturierte Teilaufgaben zerlegt. Diese werden wiederum verketteten räumlichen Fahrbahnsegmenten (vgl. Bild 3) zugeordnet.

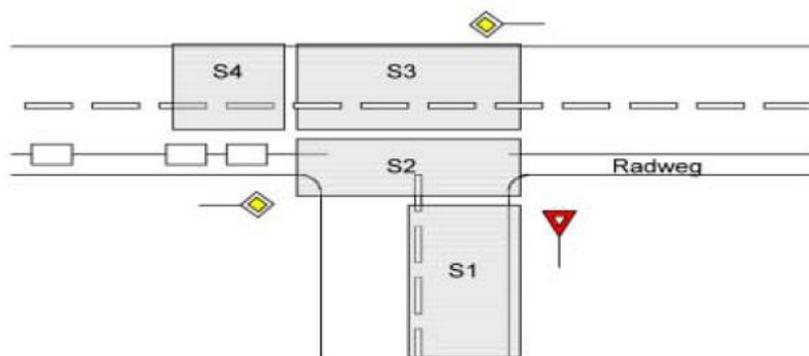


Bild 3: Segmentierung am Beispiel Linksabbiegen an einer T-Kreuzung [52]

Für jede Teilaufgabe erfolgt eine Anforderungsanalyse an die Informationsverarbeitungsprozesse (Wahrnehmung, Erwartungsbildung, Beurteilung, Gedächtnisprozesse, Entscheidung/Planung und Fahrzeugbedienung), die bei der Durchführung der Fahraufgabe im jeweiligen Segment vollzogen werden müssen. Die Verkehrssituation entspricht demnach einer Fahraufgabe, welche der Fahrer bzw. das System bewältigt. Weiterhin befassen sich FASTENMEIER und GSTALTER mit der Abschätzung des Sicherheitspotentials von Fahrerassistenzsystemen auf Basis des Risikobegriffes [53]. Diesen definieren sie als das Produkt aus Schadenshöhe und -wahrscheinlichkeit. Auf der Grundlage ihres situativen Ansatzes [51] entwickelten sie eine Taxonomie zur Bestimmung von Spurwechselklassen. Dieser Ansatz verknüpft das spezifische Fahrverhalten mit räumlich und zeitlich abgrenzbaren Einheiten, in welche die Verkehrssituation segmentiert wird. In diesem Zusammenhang wird auch der Begriff der Fahrzeugsituation definiert als die spurwechselrelevante Umgebung des Bezugsfahrzeuges und dessen Interaktionen mit Fremdfahrzeugen [54]. Die jeweiligen absoluten und relativen Bewegungsvariablen der Fremdfahrzeuge (Abstand, Geschwindigkeit, TG, TTC) werden mit Hilfe eines Messfahrzeuges erfasst und gehen in die Risikoabschätzung mit ein.

Auch WELLER und SCHLAG [185] fordern zur Beurteilung von Fahrerassistenzsystemen nicht nur Kriterien zur Beschreibung der statischen Elemente einer Situation. Vielmehr noch müssen die dynamischen Aspekte berücksichtigt werden. Diese definieren sie als die „Abhängige aller Einflüsse, die sich innerhalb der gleichen statischen Verkehrssituation verändern können und einen Einfluss auf das Fahrverhalten des Fahrers haben“ [185, S. 4]. Dies umfasst im Wesentlichen die Witterung, die Verkehrsdichte sowie die Fahrmanöver vom Ego- und unmittelbar benachbarten Fremdfahrzeug.

WILTSCHKO führt in seiner Arbeit [188] eine Verkehrs- und Unfallanalyse durch, um jene Situationen erfassen zu können, bei denen ein erhöhtes Konfliktpotential besteht. Das dafür verwendete Klassifikationsschema beinhaltet die Situationselemente Straßentyp, Knotentyp und Fahrtrichtung und stellt eine starke Vereinfachung des Klassifikationsschemas von v. BENDA dar. Um nun eine Konflikt- und Unfallanalyse erstellen zu können, führt WILTSCHKO den Begriff der Konfliktsituation ein, die laut KLEBELSBERG [98] in Abhängigkeit der Ereignishäufigkeit in Fahrfehler, Verkehrsverstoß, Verkehrskonflikt, Beinaheunfall und Unfall eingeteilt wird. Die Kombination polizeilicher Unfalldaten mit der ermittelten Verkehrssituation ermöglicht dadurch eine Klassifizierung der Unfallsituation.

REICHART definiert in seiner Arbeit [138] normative Verhaltensmodelle in unfallträchtigen Fahrsituationen. Grundlage der Definition normativen Verhaltens bilden „gesetzliche Vorschriften, sozial akzeptiertes Verhalten, Merkmale der Straßenraumgestaltung, fahrphysikalische Eigenschaften eines Kfz und verallgemeinerbare Eigenschaften menschlicher Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung“ [185, S. 4]. Er unterscheidet zwischen den Begrifflichkeiten der Verkehrs-, der Fahr- und der Fahrersituation. Erstere stellt die objektive räumliche und zeitliche Konstellation verkehrsbezogener Elemente dar. Die Fahrsituation, welche als aus Fahrersicht prinzipiell wahrnehmbarer Teil der Verkehrssituation gilt, unterscheidet sich von der Fahrersituation durch den tatsächlich wahrgenommenen Ausschnitt der Verkehrssituation. Letztere wird stark von physischen und psychischen Eigenschaften des Fahrers geprägt. Die Unterscheidung zwischen einer objektiv vorliegenden Situation und deren subjektiven Erleben legen auch die Ausführungen von ZIMBARDO [194] nahe.

DAGLI versucht in seinem Ansatz [32] die Beschreibung der Situationen im Verkehr mit Hilfe der Motivation und der Ziele der Fahrzeuge in unmittelbarer Reichweite vorzunehmen. Dieser Vorgang basiert auf der Idee, dass das Fahrverhalten stark von der Motivation des Fahrers beeinflusst wird. Dies beinhaltet zudem die Annahme, dass alle Fahrer in der relevanten Umgebung eine Vielzahl von Motivationen besitzen. Des Weiteren hat der Fahrer situationsabhängige Ziele, die in Bezug zu den verschiedenen Motivationsaspekten stehen. Nach der Wahl der Ziele entwickelt der Fahrer Pläne diese Ziele zu erreichen. Er sollte jene Handlung wählen, die die höchste Erfolgsquote besitzt bzw. die höchste Sicherheit oder das geringste Risiko. Diese spezifischen Handlungsmuster werden anschließend erfasst, um schließlich auf spezifische Situationen schließen zu können, die auf den Handlungsmöglichkeiten basieren.

Der Situationsbegriff spielt zudem im Bereich der Unfallanalyse, der Unfallforschung sowie der Sicherheitsforschung eine tragende Rolle. Nach einem gemeldeten Unfall erfolgt in der Regel eine Unfallaufnahme durch die Polizei, in Sonderfällen jedoch auch durch Unfallsachverständige, Krankenhäuser oder spezielle Forschungsgruppen von Universitäten, Fahrzeugherstellern oder staatlichen Einrichtungen [11]. Die Polizei als wichtigste Institution zur Aufnahme eines Unfalls verfasst hierzu eine vereinfachte Verkehrsunfallanzeige, welche neben den Angaben zu Hindernissen, Beteiligten und Schäden auch Daten zur Unfallart, Unfallursache und zum Unfalltyp umfasst. Durch die drei Letztgenannten lassen sich Unfälle in der deutschen Unfallforschung kategorisieren [80]. Der Unfalltyp dient dabei zur Beschreibung der Konfliktsituation, aus der heraus ein Unfall entstand. Insgesamt lässt sich eine Unterteilung in sieben verschiedene Hauptklassen von Unfalltypen vornehmen: Fahrnfall, Abbiege-Unfall, Einbiegen/Kreuzen-Unfall, Überschreiten-Unfall, Unfall durch ruhenden Verkehr, Unfall im Längsverkehr sowie Sonstiger Unfall. Diese Klassen sind wiederum feiner untergliedert, so dass jeder Konfliktsituation ein spezifischer Unfalltyp zugeordnet werden kann. Die Konfliktsituation definiert sich nach [1] als die Phase der gleichzeitigen Annäherung von Konfliktpartnern an einen Punkt des möglichen Zusammenstoßes.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass trotz der vielfachen Betrachtungsweisen einer Situation in der Domäne Straßenverkehr bisher keine einheitliche Definition für diese existiert. Der Situationsbegriff wird jedoch oft im Zusammenhang mit der Situation als räumlich und zeitlich abgrenzbare aktuelle Ausprägung der Arbeitsumgebung verwendet.

2.4 Mensch als Vorbild autonomer Systeme

Analoge Problemstellungen bieten dem Menschen bei der Lösung von Aufgaben eine Orientierungshilfe. Für die wissenschaftliche Disziplin der Bionik dient die Natur als Quelle der Inspiration. Untersuchungsgegenstand stellt unter anderem die technische Umsetzung funktionaler Strukturen und interner Verarbeitungsabläufe von biologischen Systemen dar [119]. Bei seiner Tätigkeit als Fahrzeugführer bewältigt der Mensch tagtäglich komplexeste Aufgaben der Wahrnehmung, Wissensverarbeitung und Verhaltensumsetzung. Die Übertragung dieser Aufgaben auf ein technisches System legt daher eine der menschlichen Fahrzeugführung analoge Vorgehensweise nahe. Die Analyse seines Fahrverhaltens stellt daher einen wichtigen Baustein zur Ableitung von Aufgaben an ein technisches System zur autonomen Fahrzeugführung dar [118].

2.4.1 Analyse menschlichen Fahrverhaltens

Der Mensch als zentrale Mess-, Steuer- und Regelungsinstanz der Fahrzeugführung erfasst die Elemente der verkehrsrelevanten Umwelt und der dadurch bedingten Fahrsituation, auf die er reagiert und sein Fahrverhalten ausrichtet [180]. Dieses umfasst die Planung und Durchführung einer Abfolge einzelner Fahraufgaben [36], welche Gegenstand zahlreicher Forschungsvorhaben waren. Innerhalb der einzelnen Aufgaben werden gewisse Sollgrößen mit einer gewissen Dynamik vom Fahrer eingeregelt. Um künstliches Fahrverhalten möglichst menschlich zu gestalten, ist daher die Kenntnis dieser Reglerbestandteile vonnöten. Da die in dieser Arbeit vorgeschlagene Methodik zur Analyse menschlichen Fahrverhaltens beispielhaft am Manöver des Fahrspurwechsels vollzogen werden soll, erfolgt zunächst eine Darstellung der Erkenntnisse bisheriger Untersuchungen von Spurwechselmanövern.

EHMANNNS gliedert in [47] den Spurwechsellvorgang in zwei Phasen, das Ausscheren nach links auf die Überholspur und das Einscheren nach rechts auf die Fahrspur. Für die erste Phase ist die „Time To Collision“ (TTC) das Maß der Beeinflussung. EHMANNNS stellte fest, dass die TTC zum vorausfahrenden Fahrzeug auf der Ausgangsspur deutlich niedriger ist, als zu dem Hinteren auf der Überholspur. Beim Wiedereinscheren ist die Zeitlücke bezogen auf die Geschwindigkeit des Überholten die maßgebende Größe. Vergleicht man die beiden Spurwechselphasen miteinander, so zeigen sich merkbare Unterschiede. Beim Spurwechsel auf die Überholspur muss der Fahrer zukünftige Geschwindigkeiten und Beeinflussungen vorhersehen. Bei dieser komplexeren Aufgabe ergibt sich deshalb eine längere Spurwechselzeit von 2.6 Sekunden. Wechselt der Fahrer wieder zurück auf die Ausgangsspur, braucht er nur den notwendigen Raumbedarf für sein Fahrzeug abzuschätzen. Dadurch verkürzt sich die Spurwechseldauer auf 1.9 Sekunden.

Aus mehreren Untersuchungen resultieren weitere Angaben zur durchschnittlichen Spurwechseldauer. Dabei werden jedoch keine Angaben über die exakte Festlegung von Beginn und Ende gemacht, weshalb die Angaben aus Tabelle 1 somit nur als Anhaltswerte zu sehen sind.

Tabelle 1: Durchschnittliche Spurwechseldauer aus Untersuchungen

Untersuchung (Quelle)	Spurwechseldauer
Sporrer et al [161]	3.5 s- 6.5 s (min: 2 s)
Salvucci et al [149]	5.1 s
Olsen et al [125]	6.3 s
Freyer [60]	7.4 s

SPORRER [161] unterteilt Spurwechselmanöver in von der Verkehrssituation abhängige Kategorien. Die auftretenden Spurwechselzeiten liegen dabei in einem Intervall von 3.5 s bis 6.5 s, in Notfallsituationen bei minimal 2 s. Bei Untersuchungen von SALVUCCI [149] im Fahrsimulator stellte sich eine durchschnittliche Spurwechseldauer von 5.1 s heraus. Die durchschnittliche Dauer eines Spurwechsels von 6.3 s bei einer Standardabweichung von 2.0 s gemäß OLSEN [125] resultiert aus der Untersuchung von 7192 gültigen Spurwechseln durch 16 Probanden im Straßenverkehr. In von FREYER [60] durchgeführten Probanden-Fahrversuchen über die Veränderung des Fahrerhaltens unter dem Einfluß von ACC in

Spurwechselsituationen konnte anhand einer Datenbasis von 481 Spurwechseln eine durchschnittliche Spurwechseldauer von 7.4 s ermittelt werden.

Ausgehend von diversen Motivatoren (vgl. [79]) beginnt der Mensch einen Fahrspurwechsel, der sich neben der Spurwechselzeit auch durch die Spurwechselgeometrie kennzeichnet. Viele der bisher in der Literatur vorgestellten Konstruktionsverfahren von Spurwechselmanövern gehen dabei von einem vollsymmetrischen Verlauf aus. RUNKEL [147] geht von einer Bahnkurve aus, die sich aus zwei entgegengesetzten Kreisbögen zusammensetzt. Im Übergang der beiden Kreisbögen existiert ein Krümmungssprung, was einen technisch nicht umsetzbaren Lenkwinkelsprung zur Folge hat. SPINDLER [160] benutzt schräge Sinuslinien zur Approximation der mathematisch schwer handhabbaren doppelten Scheitelklothoide. Klothoiden zeichnen sich durch die Linearität des Krümmungsverlaufes aus. Sie kommen der zur realen Umsetzbarkeit notwendigen Forderung nach einem stetigen Lenkradwinkelverlauf nach. WEISS [183] ergänzt das System von SPINDLER um eine Totzeit, die sich durch ein verzögertes Reifeneinlaufverhalten beim Aufbau der Seitenführungskräfte und ein Spiel der Lenkanlage erklären lässt. MAYR [114] schlägt den Einsatz von einer stückweise konstanten Lenkratenvorgabe in Form von Rechteck-Dubletten vor. Dies kommt analytisch einer Klothoiden-Bahnkurve sehr nahe. Der Ansatz beschränkt sich auf die Berechnung der nötigen Lenkratenvorgabe und geht nicht auf die Berechnung der daraus resultierenden Bahnkurve bzw. des resultierenden Fahrzeugverhaltens ein. Folglich kann nach der Methode von MAYR nur eine rein gesteuerte Manöverausführung ohne Folgeregelung verwirklicht werden. BRÜDIGAM [24] erweitert die von MAYR vorgestellte Vorgabe der Lenkrate um Gleichungen zur Berechnung der sich daraus ergebenden Fahrzeugzustandsgrößen. Somit wird die Grundlage für eine zustandsgeregelte Manöverausführung geschaffen. Alle bisher vorgestellten Methoden gehen von vollsymmetrischen Spurwechseln aus, die ausschließlich in ihrer Längs- und Querausdehnung über die Vorgabe von Spurwechseldistanz bzw. Spurwechselquerversatz angepasst werden. Menschliche Aspekte und die spezifischen Anforderungen der momentanen Umwelt- bzw. Verkehrssituation bleiben komplett unberücksichtigt. In der Arbeit „Realsimulation von Spurwechselvorgängen im Straßenverkehr“ [161] wird das menschliche Verhalten bei Spurwechselvorgängen untersucht. Nach SPORRER kann das menschliche Fahrverhalten während des Fahrstreifenwechsels in von der Verkehrssituation abhängige Kategorien eingeteilt werden. Der so kategorisierte Manövercharakter wird über die Spurwechselzeit, den Spurwechselversatz und über die Spurwechselgeometrie beschrieben. Dabei zeigt sich, dass ein typischer Spurwechsel unter normalen Verkehrsbedingungen eine asymmetrische Geometrie aufweist. So folgt dem anfänglichen Einlenken bereits nach ca. einem Drittel der Manöverzeit das Ausrichten auf den Zielfahrstreifen.

2.4.2 Fahrermodelle

Zur Darstellung menschlichen Fahrverhaltens werden die gewonnenen Erkenntnisse aus den Fahrverhaltensanalysen in Fahrermodelle überführt. Allgemein kann eine Unterteilung von Fahrermodellen in zwei Bereiche erfolgen, die quantitativen und die qualitativen Fahrermodelle. Quantitative Modelle ahmen „das Verhalten eines realen Fahrers“ [90] nach. Zu den Anwendungsgebieten derartiger Modelle in der Automobilindustrie zählen die Fahrverhaltensoptimierung, die Verkehrssimulation, die Sicherheitsforschung, Fahrerassistenzsysteme, Verschleiß- und Lastuntersuchungen sowie Fahrsimulationen. In diesen Bereichen werden Fahrermodelle eingesetzt, um den Menschen und seinen Einfluss auf das Fahr-

zeug möglichst exakt nachzubilden. Daher kann in der Simulation ein äußerst realitätsnahes Szenario erreicht werden. Eine ausführliche Erläuterung der Anwendungsgebiete wird in der Arbeit von JÜRGENSOHN [90] gegeben. Qualitative Fahrermodelle hingegen dienen der Simulation des makroskopischen Verkehrsgeschehens. Sie beschäftigen sich mit der Interaktion von mehreren Fahrern untereinander und mit der Umwelt. Mit Hilfe dieser Modelle kann aus dem Fahrverhalten mehrerer einzelner Fahrer das gesamte Verkehrsgeschehen abgeleitet werden [90]. In der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich auf quantitative Fahrermodelle eingegangen, da die Anwendungsbereiche des autonomen Fahrens sowie die Fahrerassistenz im Vordergrund stehen.

Das „3-Ebenen-Modell“ von RASMUSSEN [136] beschreibt die Grundlagen des menschlichen Handelns. Danach lässt sich das Verhalten des Menschen in drei Hauptbereiche unterteilen: in wissensbasiertes, regelbasiertes und in fertigkeitsbasiertes Verhalten (vgl. Bild 4). Dieses Modell kann für die Modellierung menschlichen Fahrverhaltens herangezogen werden. Die Fahraufgabe für den Menschen lässt sich somit ebenfalls in drei Bereiche untergliedern: Navigation, Bahnführung und Stabilisierung. Der Navigation liegt das wissensbasierte Verhalten zu Grunde. Der Mensch plant während dieser Phase den Zielort der Fahrt und auf welchem Weg er diesen Ort erreichen kann. Die zweite Ebene ist die Bahnführungsebene. In dieser Phase zieht der Mensch alle drei Verhaltensmuster heran. Der Mensch steuert das Fahrzeug, um es auf der Fahrbahn zu halten. Die letzte Ebene ist schließlich die Stabilisierungsebene, welche fertigkeitsbasiertes Verhalten voraussetzt. Hier stabilisiert der Mensch das Fahrzeug, das durch Störgrößen, wie z.B. Seitenwind, ansonsten den Kurs verlassen würde (vgl. [43, 189]).

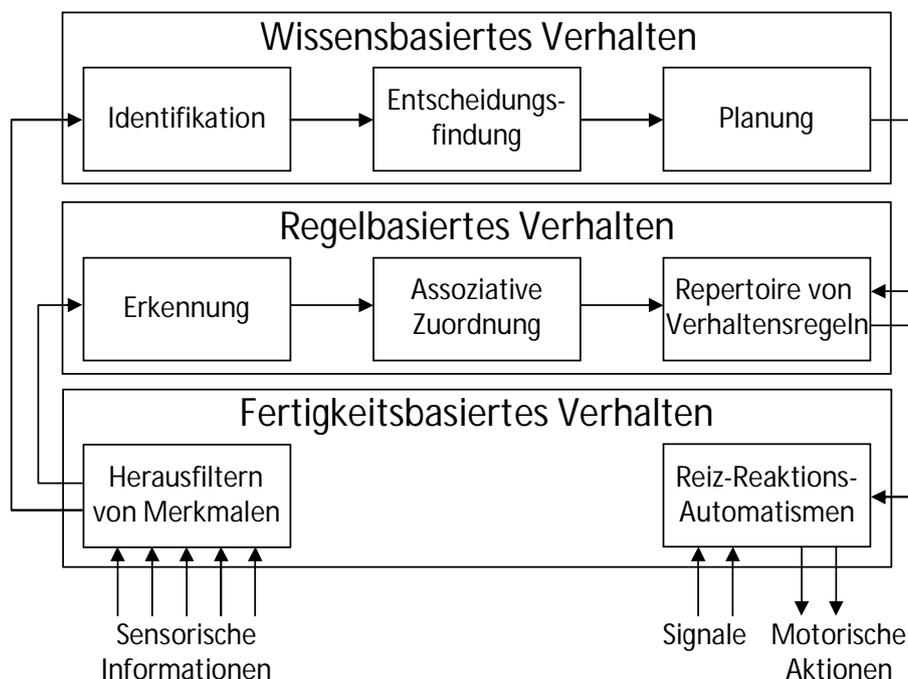


Bild 4: 3-Ebenen-Modell von Rasmussen für zielgerichtete Tätigkeiten des Menschen [189]

2.4.2.1 Längsdynamische Fahrermodellierung

In der Literatur finden sich viele verschiedene Modelle des Menschen für dessen Verhalten bei der Fahrzeuflängsführung. Während früher die Modellierung meist über eine regelungstechnische Darstellung erfolgte, versuchte man in späteren Untersuchungen das Fahrerverhalten durch moderne Ansätze wie Fuzzy-Logik oder neuronale Netze darzustellen. Die bekanntesten Verhaltensmodelle für die Längsführung werden nun in diesem Kapitel vorgestellt.

Bei seinen Untersuchungen in [45] befasste sich DREYER mit dem längsdynamischen Fahrerverhalten während der Folgefahrt. Er stellt hierfür einen kompensatorischen Regelkreis auf. Der Fahrer reagiert auf Änderungen des Abstandes zum Vorderfahrzeug, der Relativgeschwindigkeit oder der Beschleunigung. Er regelt mit Hilfe der Gas- bzw. Bremspedalstellung das Fahrzeug so, dass er dem Vorderfahrzeug mit dessen Geschwindigkeit folgt und einen Wunschabstand einhält. Die Regelgüte seiner vorgeschlagenen Führungsübertragungsfunktion als PIT1-Glied konnte durch die Formulierung in Anlehnung an das Präzisionsmodell von MCRUER [115] noch gesteigert werden.

CHEN modellierte 1992 in seiner Dissertation [30] das menschliche Fahrverhalten für die Längsdynamik, wobei er sich auf die Fahrsituationen Folgefahrt bzw. Annäherung und Kolonnenfahrt beschränkte. Grundsätzlich wird das Modell in drei Ebenen aufgeteilt: die Sollwertbildung, der Steuerung und der Regelung. Der Fahrer bestimmt in der ersten Ebene den gewünschten Abstand zum Vorderfahrzeug. In der Steuerungsebene generiert der Fahrer mit Hilfe seiner Fahrerfahrung und seiner Kenntnis des Fahrzeuges eine Änderung der Gaspedalstellung, so dass sich der gewünschte Fahrzeugzustand ergibt. Die Änderung des Straßenverlaufs stellt hierbei eine Störgröße dar, die der Fahrer jedoch leicht im Voraus wahrnehmen kann, so dass es ihm möglich ist, diese bereits bei der Steuerung auszugleichen. Da der Mensch jedoch die Steuerungsgrößen nur ungenau umsetzen kann, werden in der dritten Ebene die Differenz zwischen der gewünschten Sollgröße und dem Istzustand kompensiert.

APEL befasste sich bei seinen Untersuchungen in [9] im Gegensatz zu anderen Autoren nicht nur mit regulären, sondern auch mit kritischen Fahrsituationen. Für beide Situationsklassen entwirft er deshalb getrennte Regelkreise. Im Gegensatz zu den Untersuchungen von CHEN wird nur die Folgefahrt modelliert, nicht die Freifahrt. Es wird davon ausgegangen, dass bei einer normalen Fahrt der Fahrer einem Vorderfahrzeug folgt. Die Übertragungsfunktion der verwendeten Vorsteuerung setzt sich aus einem PT2-Glied und einem D-Glied zusammen. Dabei wird die Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs als Sollwert verwendet. Während einer normalen Fahrt wertet der Fahrer die Differenz der Beschleunigung $\Delta \dot{v}$ und den Abstand Δd zwischen seinem und dem Vorderfahrzeug sowie die Relativgeschwindigkeit Δv aus und generiert daraus einen Fahrpedalwert α_R zur Kompensation.

BUSCH [27] modelliert das Fahrverhalten mit Hilfe des regelungstechnischen Ansatzes der Kaskadenregelung. In der äußeren Regelschleife wird die Fahrgeschwindigkeit geregelt, in der inneren das SOLLantriebsmoment. Letzteres wird um eine Vorsteuerung und eine Störgrößenaufschaltung mittels PD-Gliedern erweitert. Der kompensatorische Regelanteil ist durch einen PI-Regler modelliert, dessen Parameter von der jeweiligen Getriebeübersetzung abhängen.

Eine andere Form der Vorgehensweise bei der Fahrermodellierung beschreibt NECULAU [120]. Ebenso wie bei DREYER oder CHEN besteht das Modell aus einem Vorsteuerungsan-

teil und einem Regelteil. Der Steueranteil der vom Fahrer generierten Gaspedalstellung wird mit Hilfe einer Fuzzy-Logik ermittelt, der Regelungsanteil wird auf Basis einer vereinfachten Form der optimaltheoretischen Modellierung bestimmt. Der Kompensationsregelkreis besteht aus einem linearen Zustandsregler und -beobachter. Hierbei nimmt man an, dass der Fahrer seine eigene Geschwindigkeit beobachtet. Diese Beobachtung ist allerdings infolge der begrenzten Wahrnehmungsfähigkeit des Menschen fehlerbehaftet. Dem Fahrer ist es jedoch aufgrund seines Wissens über die Dynamik des Fahrzeuges möglich, die Geschwindigkeit, mit der er sich bewegt, abzuschätzen. Diese nutzt er dann, um die Abweichung zu der gewünschten Geschwindigkeit mittels einer Änderung der Gaspedalstellung auszuregulieren.

Die bisher vorgestellten Fahrermodelle auf Basis der Regelungstechnik haben den Nachteil, dass sie sich aufgrund ihrer festen Parametrierung im Verlaufe einer Fahrt nicht an Änderungen des Fahrbahn- oder Fahrzeugzustandes anpassen können. Deshalb entwickelten JAMES, BOEHRINGER und BURNHAM [87] mit Hilfe von neuronalen Netzwerken ein adaptives Fahrermodell für die Längsführung. Die Modellierung erfolgt hierbei durch drei einzelne Regler. Ein Bremsregler erzeugt das gewünschte Bremsignal und ein stationärer sowie ein adaptiver Regler, jeweils aus neuronalen Netzwerken aufgebaut, generieren das Signal für die Beschleunigung.

JÜRGENSOHN beschäftigte sich in [90] mit zwei verschiedenen Ansätzen der hybriden Fahrermodellierung, zum einen mit der Fuzzy-Logik und zum anderen mit den neuronalen Netzen. Aus beiden Formen leitete er anschließend eigene Fahrermodelle ab. Mit Hilfe der Fuzzy-Logik erstellte er das Fahrermodell „CONFUZZIUS“, das das längsdynamische Verhalten des Fahrers beschreibt. Durch neuronale Netze beschrieb er ein Lenkmodell.

2.4.2.2 Querdynamische Fahrermodellierung

Ein sehr wichtiges Modellierungskriterium für ein Fahrermodell der Querführung ist das menschliche Lenkverhalten. Einen detaillierten Überblick querdynamischer Fahrermodelle zeigt WOLF [191] in seiner Arbeit auf. Im Folgenden werden nun aufbauend auf dem Basismodell nach DONGES [41] spezifische Erweiterungen dargestellt.

In den Anfängen der Fahrermodellbildung wurde der Fahrer als ein rein kompensatorisches Regelglied aufgefasst. Diese Annahme greift HORN [82] in seinen Untersuchungen auf und kommt zu dem neuen Ergebnis, dass bei Kurvenfahrten, deren Kreisbögen nicht mit zu engen Klothoiden verbunden sind, der Fahrer meist regelt und nicht steuert. Wie später JÜRGENSOHN [90] die Entwicklung der Fahrermodellierung zusammenfasst, wird ab den 90er Jahren auf dem Fachgebiet „Mensch als Regler“ nicht mehr geforscht, sondern im Mittelpunkt steht nun der beobachtende und kontrollierende Mensch.

DONGES [41] hat als erster diese Beobachtungen gemacht und das bestehende Modell für das Lenkverhalten von Kraftfahrern maßgeblich verbessert. Er hat neben der kompensatorischen Regelung ein neues Steuerglied, die antizipatorische Steuerung, integriert. Schon zu einem frühen Zeitpunkt der Forschung hat er mit diesem „Zwei-Ebenen-Modell“ die Grundstruktur der menschlichen Lenkaktivität sehr präzise nachgebildet, welches die Grundlage vieler nachfolgender Fahrermodelle bildet.

Während es sich bei DONGES um (quasi-)lineare und kontinuierliche Systeme handelt, stellen adaptive Fahrermodelle die nächste Evolutionsstufe dar. Diese haben den Vorteil, dass

sich die Parameter nicht an fest vorgegeben Auslegungskriterien orientieren, sondern gezielt, bei veränderten Zuständen der Strecke, beeinflussen lassen. REICHELT [139] nutzt diesen Fortschritt, um ein Fahrermodell für kritische Situationen zu erstellen. Hierfür wird ein zusätzliches Glied für die Schreckreaktion in den Regelkreis eingeführt. Dadurch wird das reale Fahrverhalten korrekter wiedergegeben, da das menschliche Lenkverhalten in kritischen Fahrsituationen differiert.

Dasselbe Modell benutzt RISSE [142] fast zeitgleich, wobei er sich mit der Fahrzeugführung in „Normalsituationen“ beschäftigt. Er verwendet die Erkenntnisse von REICHELT als Grundlage und widmet sich vor allem der Adaptionfähigkeit des Fahrers durch Lernen. Die Parameter des Reglers werden so ausgelegt, dass sie sich ständig den wechselnden Umweltbedingungen anpassen und somit eine Lernfähigkeit beim Fahrermodell erreicht wird.

In bestimmten Anwendungsbereichen von Fahrermodellen, wie z.B. der Beurteilung des Fahrerverhaltens, ist eine exakte Nachbildung des sensumotorischen Verhaltens des Fahrers von besonderem Interesse. Hier können Erkenntnisse aus der Psychomotorik in die Fahrermodellierung integriert werden. Dieser Fachbereich beschäftigt sich mit dem Wechselspiel zwischen der menschlichen Motorik und der sensorischen Erfassung der Umwelt durch den Menschen.

Schon 1947 versuchte TUSTIN [170] das menschliche Verhalten in Form eines regelungstechnischen Modells zu erfassen und durch einen linearen Ansatz möglichst gut zu approximieren. Sein Modell enthält bereits alle wesentlichen Elemente der später unter dem Begriff der „quasilinearen Modelle“ veröffentlichten Regler-Mensch-Modelle und berücksichtigte bereits den neuromuskulären Einfluss. Auch die Lenktätigkeiten des Fahrers können durch das Tustin-Modell beschrieben werden.

JÜRGENSOHN [90] hat versucht die grundlegenden Kenntnisse aus der Psychomotorik in ein menschliches Lenkmodell zu übertragen. Hierfür hat er gezeigt, dass man mit dem „Crossover-Modell“ die psychomotorischen Beobachtungen gut beschreiben kann. Dieses Modell entstand aus Untersuchungen zur systemtheoretischen Beschreibung des Menschen [115]. „Das Crossover-Modell ist Ausdruck der Tatsache, daß der Mensch einer inneren oder äußeren Vorgabe folgen kann, Bewegungen schnell und mit wenig Überschwingern ausführt und als generelle Strategie Bewegungen mit glockenförmigen Geschwindigkeitsverläufen bevorzugt.“ [90, S.111].

MACADAM [110] hat sich 2003 mit dem menschlichen Fahrverhalten und den daraus resultierenden Anforderungen an Fahrermodelle auseinandergesetzt. Neben einer variablen Vorausschau für die Längs- und Querregelung, adaptiven Fahrfähigkeiten, die sich ändernde Betriebszustände erkennen, sowie der Verwendung eines internen Fahrzeugmodells wird auch die Aufnahme eines neuromuskulären Übertragungsgliedes als Eigenschaft des Systemausgangs gefordert.

UNGOREN und PENG haben in [171] das Grundmodell der Spurplanung von MACADAM für unterschiedliche Fahrstile erweitert, um differentes Fahrverhalten von Durchschnittsfahrern und atypischen Fahrern im Entwurfsprozess von Fahrzeugen und aktiven Sicherheitssystemen abzubilden. Der Fahrer hat die Fähigkeit, die gewünschte Fahrspur und den zukünftigen Fahrzeugzustand zu präzisieren, um daraus dann die optimale Lenkbewegung zu ermitteln. An diese menschliche Vorgehensweise angelehnt, haben UNGOREN und PENG Parameter definiert, mit denen die Gewichtung von Querablage und Gierwinkelfehler relativ zur Fahrbahn in einer Kostenfunktion optimiert wird. Sie gehen von der Annahme aus, dass die Kon-

trolle des „Headings“ eine notwendige Voraussetzung für eine erfolgreiche laterale Querführung des Fahrzeugs darstellt (vgl. auch [181]).

Das Prädiktionsmodell nach SHARP [155] verwendet wie bei MACADAM den Querablagenfehler innerhalb des Vorausschauhorizonts und gibt zusätzlich eine unmittelbare Rückmeldung des Gierwinkelfehlers. Es wird so eine unabhängige Geschwindigkeitsregelung entlang der gewünschten Spur erreicht und über ein einfaches inverses Modell der Fahrzeugdynamik die nötige Fahrzeugbeschleunigung berechnet.

2.4.2.3 Optimaltheoretische Fahrermodellierung

„Der Regler Mensch besitzt die Fähigkeit der Selbsteinstellung seiner Struktur und Parameter mit dem Ziel der Optimierung der Übertragungseigenschaften des Regelkreises, in dem er als Regler eingesetzt ist. [...] Das Optimierungskriterium scheint hierbei das der Minimierung des mittleren Fehlerquadrates zu sein“ [126, S.64]. Auf dieser Aussage, die im Zuge der Forschungen auf dem Gebiet der quasilinearen Fahrermodellierung gemacht wurde, basiert das optimaltheoretische Modell des Fahrers. Dieses Modell zählt, neben dem quasilinearen Modell, bis heute zu den wichtigsten Ansätzen und dient deshalb vielen weiteren Untersuchungen als Grundlage.

Aktuelle Modellierungsansätze beschäftigen sich bereits mit der optimaltheoretischen Modellierung des Fahrers, deren wichtigste Aspekte in [28] zusammengestellt sind und hier nur kurz aufgegriffen werden. Weitergehende Details sind der entsprechenden Literatur zu entnehmen.

Das Konzept der optimaltheoretischen Modellierung beruht auf dem von BARON, KLEINMAN und LEVISON [15] veröffentlichten „BBN-Modell“. Dabei wird das menschliche Verhalten über ein Optimalitätskriterium erklärt. Ein gut trainierter, motivierter menschlicher Systemführer kann sich demnach an eine seinem Leistungsvermögen entsprechende Regelaufgabe anpassen und das Aufgabenziel optimal verfolgen. Das menschliche Regelverhalten ist als Optimierungsaufgabe durch die Minimierung eines Kostenfunktionalis beschreibbar [28, 162].

Das BBN-Modell [15] stellt das Regelverhalten des Fahrers auf der Stabilisierungsebene über Blöcke der Wahrnehmung, Verarbeitung und Handlung dar. Zunächst erfolgt die Wahrnehmung bzw. Bestimmung der Systemausgangsgrößen sowie deren erste Zeitableitung. Die Zeitverzögerung der menschlichen Wahrnehmung wird über ein Totzeitglied, die Beobachtungsunschärfe des Menschen über additives weißes Rauschen berücksichtigt. Auf Basis der wahrgenommenen Größen entwickelt der Fahrer eine optimale Regelstrategie. Die Bestimmung der optimalen Stellgröße erfolgt dabei über die Minimierung eines quadratischen Gütekriteriums und erfordert die Lösung einer Riccati-Gleichung. Mit additiv überlagertem Rauschen wird die Stellbewegung über ein neuromuskuläres Verzögerungsglied umgesetzt und ausgeführt.

Auf der Grundlage des BBN-Modells verwendet PHATAK [129] ein vereinfachtes optimaltheoretisches Modell, das eine eindeutige Parametrierung zur Nachbildung menschlichen Regelverhaltens ermöglicht. Darin werden die menschliche Wahrnehmung sowie die Ausführung von Bewegungen idealisiert betrachtet. Neben der Totzeit menschlicher Wahrnehmung wird das neuromuskuläre Verzögerungsglied sowie motorisches Rauschen vernachlässigt. Ferner wird auf die Bestimmung von Zeitableitungen von Systemgrößen durch den Menschen verzichtet, d.h. der Fahrer kann nur explizite Systemausgangsgrößen wahrnehmen. Die ver-

einfachten Annahmen reduzieren die Komplexität des Modells, erlauben jedoch eine eindeutige Parametrierung des menschlichen Regelverhaltens durch Systemidentifikation der Modellparameter anhand experimenteller Daten.

Aktuellere Fahrermodellierungen von PROKOP [132] und BUTZ [28] stellen optimaltheoretische Zwei-Ebenen-Modelle dar. Dabei plant der Fahrer zunächst eine optimale Trajektorie zur Fahrzeugführung, der er auf kompensatorischer Ebene zu folgen versucht.

Gemäß der Modellvorstellung nach PROKOP [132] baut der Fahrer mit zunehmender Fahrerfahrung Wissen und Kenntnis über das dynamische Verhalten des Systems Fahrzeug auf. In Kombination mit Informationen über den aktuellen Bewegungszustand durch die visuelle Wahrnehmung nutzt er das Systemverständnis zur Antizipation des künftigen Fahrverhaltens. Ferner werden mit Hilfe des inneren Modells des zu regelnden Fahrzeugs die Fahrzeugbewegung optimiert und Stellgrößen abgeleitet, um Zielvorgaben optimal zu erfüllen. Der Fahrer versucht dem optimalen Verhalten durch eine kompensierende Regelung zu folgen. Zur Planung der optimalen Trajektorie wird ein nichtlineares Optimierungsproblem formuliert und mit einem SQP-Algorithmus gelöst. Dabei setzt sich das Zielfunktional des Fahrers aus einer Kombination bestehend aus Optimalitätskriterien für minimale Fahrzeit, minimale Horizontalbeschleunigungen, minimalen Einsatz der Bremse, minimale Abweichung von der Fahrstreifenmitte sowie minimale Abweichungen zu einer Soll-Motordrehzahl bzw. Soll-Geschwindigkeit zusammen. Um die Zielvorgaben und somit das Fahrverhalten zu optimieren, werden die Stellgrößen des Fahrers – Lenkwinkel, Stellung des Gas- bzw. Bremspedals sowie Gangwahl – als Optimierungsparameter betrachtet. Der Erfahrungsstand des Fahrers kann berücksichtigt werden, indem die Systemdynamik über Modelle verschiedener Abbildungsgüte, wie Punktmodell und Einspurmodell, beschrieben wird. Zur Lösung werden die Zustands- und Steuergrößen mittels eines direkten Schießverfahrens ermittelt [28]. Auf der Stabilisierungsebene versucht der Fahrer der geplanten optimalen Trajektorie zu folgen. Regelabweichungen der Längsdynamik werden über einen PI-Regler korrigiert, die Kompensation der Querführung erfolgt über ein PID-Regelglied. Das Fahrermodell wird von PROKOP zur kostenoptimalen Bahnplanung in 90°-Kurven angewendet. Ferner erfolgt mit der Simulation des ISO-Doppelspurwechsels die Untersuchung eines standardisierten Ausweichmanövers.

Ein ähnlicher Ansatz findet sich bei BUTZ [28], der in seiner Arbeit ebenfalls ein optimaltheoretisches Zwei-Ebenen-Fahrermodell untersucht. Auf Bahnplanungsebene werden die für die Fahrzeugführung erforderlichen Sollgrößen Sollbahn und Sollgeschwindigkeit bestimmt, die auf Stabilisierungsebene durch den nichtlinearen Positionsregler „veDYNA Driver“ eingeregelt werden. Die Bestimmung der Sollgrößen auf Bahnplanungsebene erfolgt mit Methoden der Optimalsteuerung. Dazu wird die Fahraufgabe als Problem der optimalen Steuerung formuliert, bei dem ein parameterabhängiges Zielfunktional unterschiedliches Fahrerverhalten berücksichtigt. Die individuellen Fahrereigenschaften Sportlichkeit, Sicherheitsbewußtsein und Komfortbedarf werden für den betrachteten ISO-Doppelspurwechsel über die Optimalitätskriterien maximale Fahrdistanz, minimale Abweichung von der Fahrbahnmitte und minimale mittlere Querbeschleunigung abgebildet. Als Fahrdynamikmodell dient ein nichtlineares Einspurmodell. Die Lösung des Optimalsteuerungsproblems erfolgt mit einem direkten Kollokationsverfahren. Ferner führt BUTZ die Identifikation von fahrerspezifischen Gewichtungen für die Teilkriterien des parametrischen Zielfunktionals der optimalen Steuerung mit Referenzdaten aus Messungen durch. Als Abgleichskriterium zur Parameterschätzung wird die befahrene Bahnkurve herangezogen.

2.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde zunächst die begriffliche Abgrenzung der Autonomie von der Automation dargelegt und daraufhin die Meilensteine der Entwicklung autonomer Fahrzeugführungssysteme aufgezeigt. Allerdings liegt der Fokus dieser Entwicklungen sehr stark auf der Problemlösung kognitiver Aspekte. Viele Arbeiten befassen sich daher mit der Wahrnehmung und Interpretation der Umwelt, um daraus sichere Verhaltensentscheidungen generieren zu können, jedoch nicht, um die Dynamik der Verhaltensausführung zu adaptieren.

Eine anschließende Betrachtung von Adaptionsformen und -verfahren dient dem Ziel, ein grundlegendes Verständnis zur Auslegung adaptiver Systeme an eine Situation zu schaffen. Der Frage nach klassifizierbaren Situationsaspekten zur Adaption wurde durch eine Analyse methodischer Ansätze, die im Zusammenhang mit der Untersuchung einer Verkehrssituation stehen, nachgegangen. Eine einheitliche Definition der Situation in der Domäne des Straßenverkehrs existiert bisher noch nicht. Daher wird dies noch Gegenstand weiterer Betrachtungen im Laufe der Arbeit sein.

Die Verwendung des menschlichen Vorbildes zum Entwurf autonomer Systeme im Kontext der Fahrzeugführung rechtfertigt die Tatsache, dass sich der Mensch alltäglich mit ihm zum Teil neuartigen Situationen und Umgebungsbedingungen im Straßenverkehr konfrontiert sieht und sich an diese adaptieren kann. Die Analyse des menschlichen Fahrverhaltens und deren Rekonstruktion durch Fahrermodelle in der Längs- und Querverführung sind daher Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Speziell der menschliche Fahrspurwechsel steht in dieser Arbeit im Fokus der Betrachtung. Den mathematischen Ansätzen zur Modellierung der Bahnkurve fehlt eine differenzierte Analyse des Fahrstils unter Beachtung des Einflusses personen- und situationsspezifischer Aspekte. Die Spurwechselbahnkurven werden über rein analytisch-geometrische Ansätze approximiert und modelliert.

Im Gegensatz dazu soll in der vorliegenden Arbeit die Analyse der Ausführung von Spurwechselmanövern mit einem optimaltheoretischen Ansatz erfolgen. Es wird ein Fahrermodell der Bahnplanung entwickelt, dessen unbekannte Modellparameter durch Lösung eines Bilevel Problem identifiziert werden. Die Anwendung des Verfahrens erfolgt auf einen einfachen Fahrstreifenwechsel auf Autobahnen. Der Fahrspurwechsel stellt ein im realen, öffentlichen Straßenverkehr häufig auftretendes und charakteristisches Fahrmanöver der Querverführung dar, im Gegensatz zum in der Literatur oftmals betrachteten ISO-Doppelspurwechsel. Dieses standardisierte Manöver lässt aufgrund sehr restriktiver Manövervorgaben nur eingeschränkt individuelle Fahrstrategien zu und schließt Umgebungseinflüsse auf das Fahrverhalten komplett aus.

Zusammenfassend kann aus der Betrachtung zum Stand der Technik extrahiert werden, dass bisher noch kein Fahrzeugführungssystem auf Basis einer fahrerspezifischen Analyse des Fahrverhaltens und mit Hilfe eines an die menschliche Interpretation einer Situation angelehnten Verfahrens an die jeweilige Situation in der Art adaptiert wurde, das sie sich menschlichem Fahrverhalten annähert bzw. dieses darstellt. Darüber hinaus sind wenige Erkenntnisse darüber vorhanden, welche Optimierungskriterien der Mensch bei seiner Aufgabe als Fahrzeugregler situativ an den Tag legt. Diese Forderungen und Aspekte sollen in der vorliegenden Arbeit exemplarisch anhand des Fahrmanövers Spurwechsel vollzogen werden.

3 Untersuchungsmethodik

In diesem Kapitel wird die zu Grunde liegende Vorgehensweise der Arbeit vorgestellt. Darüber hinaus werden die zur Verfügung stehenden Untersuchungswerkzeuge, die Simulationsumgebung veDYNA und der Versuchsträger mit seinen Komponenten zur Informationserfassung und -weiterverarbeitung sowie zur Verhaltensumsetzung, genauer beleuchtet.

3.1 Vorgehen

Das grundsätzliche Vorgehen der Arbeit orientiert sich an der Arbeitsweise kognitiver Systeme, die an einen materiellen Körper, hier ein Fahrzeug, gekoppelt sind. Die Grundmotivation derartiger Systeme ist ein flexibles, sicheres und natürliches Zusammenwirken mit Menschen. Dabei werden fortwährend kognitive Schleifen, sogenannte „action-perception-loops“, durchlaufen, die hier um die Elemente Hintergrundwissen, Adaption und flexible Planausführung zwischen der Perzeption und der Aktion erweitert wurden. Einen strukturellen Überblick über das Vorgehen gibt Bild 5.

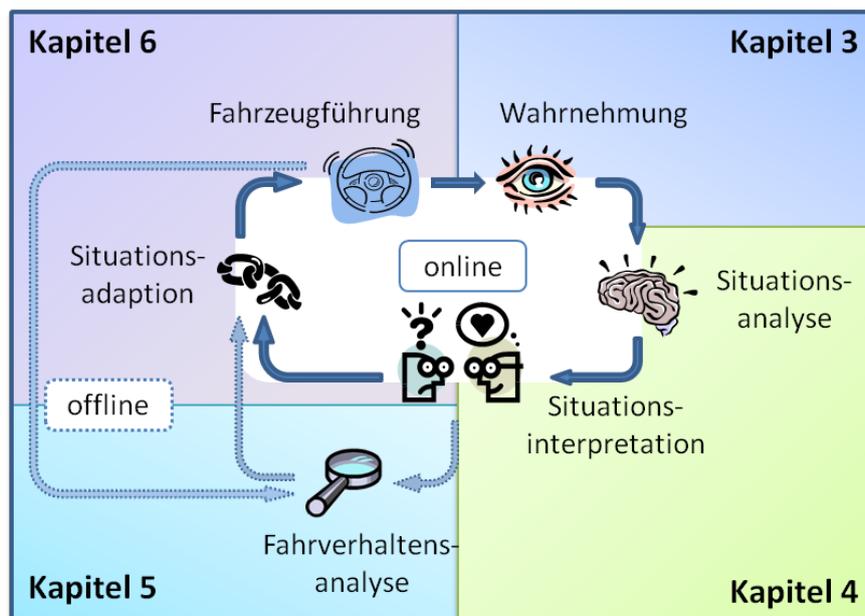


Bild 5: Struktureller Aufbau der Arbeit in Anlehnung an die Kognitions-kette

Um eine am Menschen orientierte Adaption des Fahrverhaltens an eine entsprechende Verkehrssituation vornehmen zu können, müssen zunächst die für den Menschen zur Fahrzeugführung relevanten Informationsinhalte aus der Szene extrahiert werden. Die für diese Aufgabe verwendeten Werkzeuge werden innerhalb des Kapitels 3.3 beschrieben. Es zeigt die zur Perzeption zur Verfügung stehenden Sensoren auf. Weiterhin werden in dem Kapitel die hardware-seitigen Umfänge erläutert, die zur Informationsverarbeitung und Verhaltensumsetzung im Versuchsträger zur Anwendung kommen.

Entsprechend der kognitiven Verarbeitungskette menschlicher Wahrnehmungs- und Verhaltensvorgänge werden die der Informationsaufnahme nachgeschalteten Prozesse der Informationsanalyse und -interpretation in Kapitel 4 behandelt.

Kapitel 4.1 beleuchtet die für eine Analyse der Verkehrssituation notwendigen Informationsdetails. Dafür wird zunächst über eine umfassende und domänenübergreifende Betrachtung des Situationsbegriffes eine Anforderungsanalyse an die zu erfassenden Situationsaspekte abgeleitet.

Aus dieser Analyse lassen sich folgende notwendige Arbeitspakete extrahieren:

- Robuste Erfassung von statischen und dynamischen Objekten mit Hilfe der Fusion mehrerer Sensoren (Kapitel 4.2.1)
- Erfassung von Handlungsmustern, die handlungsvorbereitende Maßnahmen abbilden und auf Basis derer eine Verkehrskonfliktanalyse durchgeführt werden kann (Kapitel 4.2.2)
- Bewertung von Interaktionen und Zielverfolgungsweisen der Handlungspartner, sowie statischen Gegebenheiten des Umfeldes (Kapitel 4.3)

Die Anwendung eines an die menschliche Interpretation angelehnten Verfahrens zur Situationsinterpretation und dessen Transfer in die Domäne des Straßenverkehrs erlaubt eine Abstraktion der Verkehrssituation auf einige wenige skalierte Intensitätswerte einer Metaebene. Diese lassen sich mit Hilfe eines geeigneten Adaptionplanes mit unterschiedlichen Regler- und Bahnplanauslegungen „online“ verknüpfen, so dass ein angepasstes Fahrverhalten bei der automatischen Fahrt ermöglicht wird. Um jedoch bestimmte Situationsklassen der Metaebene fahrerspezifisch mit Fahrverhalten verknüpfen zu können, muss eine vorherige Fahrverhaltensanalyse „offline“ durchgeführt werden. Sowohl das methodische Vorgehen als auch die erarbeiteten Ergebnisse werden in Kapitel 5 erläutert. Dabei wird die angestrebte Situationsadaptivität auf der Grundlage eines optimaltheoretischen Ansatzes zur Modellierung und Identifizierung von menschlichen Fahrereigenschaften vollzogen. Das Optimierungsverfahren ermittelt die Kombination von Gütekriterien, die der menschlichen Lösung innerhalb bestimmter Situationen entsprechen.

Aus der Kenntnis der gefundenen Gütefunktionale werden anschließend Parametrierungen des Fahrzeugführungssystems abgeleitet, welche beim Auftreten der entsprechenden Situationsklasse der Metaebene aktiviert werden und somit zu einem situationsadaptiven und fahrerspezifischen automatischen Fahrverhalten beitragen. Sowohl die zur Umsetzung der adaptiven Fahrzeugführung notwendigen regelungstechnischen Module als auch geeignete Adaptionpläne werden in Kapitel 6 aufgezeigt.

Eine Validierung des vorgestellten Verfahrens mit den Adaptionsstufen einer sicherheitsorientierten sowie einer fahrerspezifischen Fahrverhaltensanpassung erfolgt in Kapitel 7 anhand einer Probandenstudie.

Sowohl die Fahrverhaltensanalyse als auch die Validierung werden exemplarisch am Beispiel des Manövers „Spurwechsel“ durchgeführt, da eine Untersuchung des kompletten Spektrums menschlicher Fahreigenschaften den Rahmen der Arbeit sprengen würde. Eine Anwendung des Verfahrens auf weitere Bereiche kann jedoch in analoger Weise erfolgen.

3.2 Simulationsumgebung

Zur frühzeitigen und effizienten Funktionsentwicklung stellt die Simulation ein geeignetes Werkzeug dar. Sie erlaubt einen reproduzierbaren und gefahrlosen Test von Funktionskomponenten noch bevor ein physikalischer Prototyp vorhanden ist. Zu diesem Zweck wurde das von der Firma TESIS entwickelte Fahrdynamiksimulations-Tool veDYNA im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt. In veDYNA sind einzelne Fahrzeugkomponenten modelliert und zu einem Gesamtfahrzeug zusammengefügt. In Kombination mit einem Fahrer- und einem Umweltmodell lässt sich somit das Verhalten eines Fahrzeugs simulieren. Des Weiteren ermöglicht veDYNA durch die offene Architektur und die Modellierung in Matlab/SIMULINK eine einfache Implementierung von Funktionen sowie deren Test und Applikation auf Software- und Hardware-in-the-Loop Prüfständen. Speziell für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen eignet sich das veDYNA Traffic Modul, welches Fremdfahrzeuge und Hindernisse in die Simulationsumgebung integriert. Zur Berücksichtigung dieser Umweltinformationen können vorhandene oder eigens entwickelte Modelle von Umfeldsensoren integriert werden und somit frei konfigurierbare Verkehrssituationen erfasst werden [166].

3.3 Versuchsträger

Der für diese Arbeit zur Verfügung stehende Versuchsträger ist im Rahmen des Sonderforschungsbereichs/Transregio 28 „Kognitive Automobile“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) entstanden (Bild 6).



Bild 6: Versuchsträger Audi Q7

Ziel dieses Sonderforschungsbereichs ist es, die maschinelle Kognition mobiler Systeme zu erforschen, wobei die Fähigkeiten von kognitiven Automobilen über die eines allgemeinen autonomen Systems hinausgehen sollen. Das Fahrzeug soll nicht nur auf Situationen reagieren können, sondern auf Basis von Hintergrundwissen selbständig handeln. Hierfür muss einerseits hinreichendes Wissen über die Umwelt angesammelt werden, andererseits aber auch die Fähigkeit vorhanden sein, die Situation analysieren und interpretieren zu können. Darüber hinaus soll auch das eigene Handeln explizit mit in die Betrachtung eingehen und zusätzlich ein Wissensschatz aufgebaut werden, der bei zukünftigen Entscheidungen berücksichtigt wird [172].

Um diese Fähigkeiten realisieren zu können, ist es erforderlich, den Versuchsträger mit einer Vielzahl von Aktoren und Sensoren zu bestücken. Bild 7 stellt einen Überblick über die Verknüpfung der Hardware im Versuchsträger dar. Als Sensorik stehen eine aktive Kameraplattform, Lidarsensoren und ein inertiales GPS-gestütztes Navigationssystem zur Verfügung, welche direkt an ein zentrales Fahrzeugrechnersystem angeschlossen werden. Alle weiteren Fahrzeugsensoren sind über eine dSPACE AutoBox mit dem Rechnersystem verbunden. Die AutoBox steuert außerdem die Fahrzeug-Aktorik und dient darüber hinaus als Sicherheitselement bei Systemfehlern oder -ausfällen [167].

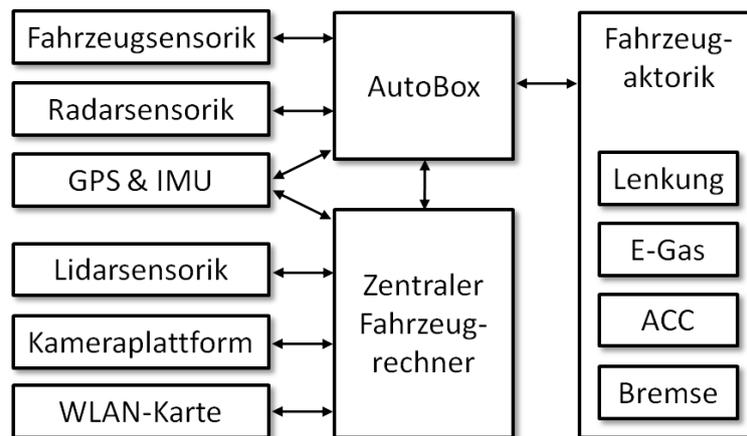


Bild 7: Überblick der Systemarchitektur des Versuchsträgers

3.3.1 Sensorik

Ein Fahrzeug, das sich autonom im Straßenverkehr bewegt, benötigt Informationen über seine Umwelt. Dazu gehören einerseits Informationen über die Straße, wie deren Topologie oder geltende Geschwindigkeitsbeschränkungen, und andererseits Daten über die anderen Verkehrsteilnehmer. Selbst wenn der Diskursbereich der autonomen Fahrt auf die gut strukturierte Umgebung eines Autobahnscenarios beschränkt wird, so ist die Komplexität der Verkehrsszene immer noch so hoch, dass diese nicht mittels eines einzelnen Sensors erfasst werden kann. Daher werden mehrere Sensoren in einem Netzwerk verwendet, um der Komplexität der Umgebung gerecht zu werden. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

3.3.1.1 Radar

Der im Versuchsträger verbaute Radar (Radio Detection and Ranging) gehört zum ACC-System des Fahrzeugherstellers. Die Rohdaten werden in einem eigenen Steuergerät verarbeitet und die extrahierten Merkmale per CAN-Bus weitergegeben. Der fest eingebaute Radarsensor befindet sich mittig hinter der Frontschürze des Versuchsträgers.

Der Radar gehört zur Klasse aktiver Sensoren. Er sendet elektromagnetische Impulse in einem Frequenzbereich von 76–77 GHz aus, die an Objekten in der Umgebung reflektiert werden. Die Detektion der Reflektionen lässt Rückschlüsse über die Anzahl und die Entfer-

nung der Objekte in der Umgebung zu. Weiterhin wird mittels Dopplereffekt die Relativgeschwindigkeit der Objekte bestimmt.

Der vertikale Öffnungswinkel des Radarkegels liegt im Bereich von $\pm 3^\circ$ und soll vorrangig verhindern, dass durch Nickbewegungen des Fahrzeugs oder bei Steigungen und Gefällen der effektive Radarbereich eingeschränkt wird. Der horizontale Öffnungswinkel beträgt $\pm 8^\circ$ und ist vor allem bei Kurvenfahrten von Bedeutung. Der eingebaute Radar gehört zur Klasse der Fernbereichsradare und erreicht eine maximale Reichweite von ca. 200 Meter.

Das in den Radarsensor integrierte Objekt-Tracking-Modul wertet die Radarrohdaten aus und erkennt sowohl stehende als auch bewegte Objekte. Diese werden, wie beim Objekt-Tracking des Lidars, mit den bekannten Objekten aus dem letzten Zeitschritt abgeglichen, um dadurch bestehende Objekte weiter zu verfolgen und neue Objekte zu initialisieren. Für den Abgleich der aktuellen Objekte mit den alten Objekten wird eine Prädiktion benötigt, die schätzt, an welcher Position das alte Objekt im neuen Zeitschritt zu finden ist. Diese Objekt-Prädiktion geschieht mittels Kalman-Filter. Dadurch wird es zusätzlich möglich, Objekte weiterzuführen, die nur kurzzeitig für einige Abtastschritte nicht mehr detektiert werden können, was zu einer Steigerung von Robustheit und Verlässlichkeit der Objekterkennung des Radarsystems führt (vgl. [143, S. 26ff.]).

3.3.1.2 Lidar

Lidarsensoren (Light Detection and Ranging) sind aktive Sensoren, die einen für das menschliche Auge nicht sichtbaren Lichtimpuls aussenden. Dieser Lichtimpuls wird an anderen Objekten reflektiert und fällt wieder im Sensor ein. Aus der Dauer zwischen Aussenden und Einfallen sowie dem Einfallswinkel kann anschließend die relative Position des Objektes zum Sensor ermittelt werden. Dieses Verfahren wird als Pulslaufzeitmessung bezeichnet.

Der Versuchsträger ist mit zwei SICK LMS291-S05 Lidarsensoren zur Objektwahrnehmung ausgestattet, wovon sich einer an der Fahrzeugfront und der andere am Heck befindet. Der Erfassungswinkel jedes einzelnen Lidars beträgt 180° , die Winkelauflösung 0.25° und die typische Reichweite auf 10% Remission ist 30m.

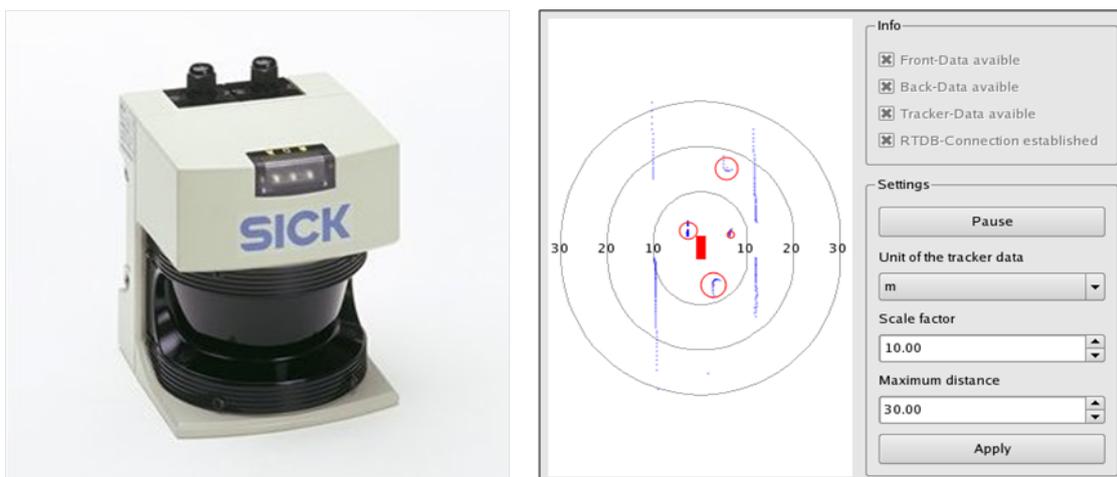


Bild 8: Lidarsensor SICK LMS291-S05 (links) und Visualisierung der Objekterkennung (rechts)

Der interne Algorithmus zur Identifikation von Objekten beruht auf einer Segmentierung zusammenhängender Bereiche (vgl. [167]). Durch die Abtastung mittels Lichtimpulsen entsteht eine Wolke von Abtastpunkten. Es wird nun davon ausgegangen, dass die Winkelauflösung genügend klein ist und somit jede zusammenhängende geometrische Form von Abtastpunkten genau einem physischen Objekt in der Umgebung entspricht. Aus der geometrischen Form können außerdem der Schwerpunkt und die Umrisse des Objektes bestimmt werden.

Nach der Segmentierung werden die identifizierten Objekte mit den bereits aus dem vorherigen Abtastschritt bekannten Objekten abgeglichen und nachgeführt. Das Tracking erfolgt mittels eines nichtlinearen multimodalen Partikelfilter-Ansatzes [168]. Wird ein neues Objekt detektiert, werden seine Schwerpunkt-Koordinaten mit denen der Partikelfilter verglichen, um so ein bereits bekanntes Objekt mit dem neuen zu assoziieren. Findet hier keine Übereinstimmung statt, wird für dieses neue Objekt ein neues Partikelfilter initiiert.

Die Lidarsensoren fusionieren ihre Daten und stellen diese über einen CAN-Bus zur Verfügung. Als Messdaten geben die Lidarsensoren die relativen Abstände und Geschwindigkeiten, jeweils längs und quer zur Fahrzeugachse, sowie die Breite des Zielobjekts aus. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Geschwindigkeiten nicht gemessen, sondern durch das Partikel-Filter nur geschätzt werden.

3.3.1.3 Bildverarbeitung

Zur Erfassung von statischen und dynamischen Objekten der vorausliegenden Umgebung mit Hilfe von bildverarbeitenden Algorithmen wurde im Versuchsträger die aktive Kamera-Plattform ViSKA [33] mittig hinter der Frontscheibe angebracht. Die Plattform besteht aus zwei unabhängig voneinander um die Gierachse drehbaren Weitwinkelkameras und einer zur Blickstabilisierung zusätzlich um die Nickachse schwenkbaren Telekamera. Die beiden Weitwinkelkameras ermöglichen eine aktive Blickrichtungssteuerung und vergrößern damit v.a. den Sichtbereich im Nahfeld. Ein an der Plattform angebrachter miniaturisierter Drehratensensor liefert die erforderlichen Daten, um die durch das Fahrzeugnicken verursachte Lageänderung der Plattform teilweise zu kompensieren. Durch eine entgegengerichtete Bewegung der Telekamera kann der Einfluss des Nickens bereits beim Bildeinzug geschmälert werden.

Die in den entsprechenden Arbeitsgruppen des Sonderforschungsbereichs eingesetzten Bildverarbeitungsalgorithmen basieren auf dem rekursiven 4D-Ansatz nach DICKMANN'S [37, 39]. Dieser ermöglicht eine robuste Erkennung auch bei sakkadisch bewegten Kameras. Durch die Rückkopplung von zeitlichen und räumlichen Modellen für Objektdynamik und -form zurück auf die Merkmalsebene wird eine erwartungsbedingte und damit sehr effiziente Positionierung von Messfenstern auf kleinen Suchbereichen im 2D-Bildraum ermöglicht.

Die Erkennung unterscheidet zwischen drei Objektklassen: Fahrspuren, statische und dynamische Objekte. Die Fahrspurerkennung liefert Daten über die Fahrspurbreite, die Fahrbahnkrümmung und deren Änderung sowie über die Anzahl und relative Lage an befahrbaren Nachbarspuren. Weiterhin werden die Querablage zur Eigenspurmitte und die relative Ausrichtung des Versuchsträgers zur Spurtangente ausgegeben. Die Spurparameter werden aus dem Videobild durch 2D-Kantenmerkmale identifiziert und durch ein Kalman-Filter präzisiert.



Bild 9: Kameraplattform ViSKA [33] (links) und Visualisierung der Fahrbahn- und Objekterkennung (rechts)

Statische Objekte werden durch ihre geometrische Form und relative Position zum Ego-Fahrzeug beschrieben, dynamische Objekte sind zusätzlich durch ein dynamisches Modell gestützt.

Die Radardaten werden von der Bildverarbeitung zur Initialisierung von Objekthypothesen verwendet, um Fahrzeuge schneller zu detektieren. Bestätigt sich die Hypothese des Radars visuell, wird das Objekt durch die Bildverarbeitung unabhängig vom Radarsignal weiter nachgeführt. Im Gegenzug kann ein visuell nicht bestätigtes stehendes Radarobjekt als Geisterobjekt deklariert werden.

Im Anschluss werden die Signale per CAN-Bus an die dSPACE AutoBox weitergeleitet (vgl. [167, S. 4f.]).

3.3.1.4 Inertiales GPS-gestütztes Navigationssystem

Zur Bestimmung von Eigenposition und Eigenbewegungsdaten wurde das inertielle GPS-gestützte Navigationssystem OXTS RT3003 eingesetzt. Dieses zeichnet sich durch eine Koppelnavigation mit Odometrie und Satellitennavigation aus und kann dadurch Positionsgenauigkeiten bis auf wenige Zentimeter in Echtzeit ermöglichen. Durch dieses Verfahren werden die Nachteile einer reinen Trägheitsnavigation sowie die einer rein GPS-basierten Lösung kompensiert.

Die Positionsbestimmung bei einem inertialen Navigationssystem erfolgt durch die Integration von Beschleunigungen und Drehraten, welche mit Hilfe von Inertialsensoren erfasst werden. Bei bekannten Anfangsbedingungen kann somit der Ort bestimmt werden. Zwar schränken systemimmanente Fehler (z.B. Drift) eine verlässliche Positionierung auf kurze Messperioden ein, jedoch können dadurch zumindest temporäre Signalausfälle einer reinen Satellitennavigation (z.B. in Tunneln) überbrückt werden. Andererseits können über Einbeziehung der GPS-Daten die zuvor genannten Positionierungsfehler der Trägheitsnavigation kompensiert werden. Durch die Kopplung mit den odometrischen Sensoren der im nachfolgend beschriebenen Fahrzeugbordsensorik wird eine weitere Erhöhung der Positionsgenauigkeit ermöglicht. Das System liefert Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, sowie Winkel und Drehraten in allen drei Raumrichtungen.

3.3.1.5 Fahrzeugbordsensorik

Der Versuchsträger verfügt bereits über eine Reihe an bordeigenen Sensoren, die für das automatische Fahren erforderlich bzw. zusätzlich von Interesse sind. Dies sind zum einen die redundanten Daten des ESP-Sensorclusters, welche die Längs- und Querbeschleunigung sowie die Gierrate des Fahrzeugs über CAN-Bus kommunizieren. Zur Querregelung des Fahrzeugs (siehe Kap.6.1.3) sind zudem die Daten des Lenkradwinkelsensors notwendig. Für die Längsregelung (siehe Kap.6.1.2) werden mehrere motorinterne Größen sowie die Daten des Drucksensors im Hauptbremszylinder herangezogen, welche ebenfalls per CAN-Bus verfügbar sind. Des Weiteren sind die Daten der Raddrehzahlsensoren zur bereits erwähnten Performancesteigerung des Navigationssystems nutzbar.

3.3.2 Datenverarbeitung

Einen strukturellen Überblick über die für diese Arbeit relevanten Software-Module gibt Bild 10. Ausgehend von den einzelnen Sensoren werden auf dem Fahrzeugrechnersystem sowohl die Module der bildverarbeitenden Algorithmen als auch die der Objekterkennung und -verfolgung auf Basis der Lidar-Rohdaten ausgeführt. Die Module zur Auswertung der Daten des Radarsensors, der Fahrzeugbordsensorik sowie des inertialen GPS-gestützten Navigationssystems werden auf der dSPACE AutoBox gerechnet. Auch alle nachfolgenden Software-Module, angefangen von der Sensordatenfusion bis hin zur Fahrzeugregelung und der Ansteuerung der Fahrzeugaktuatorik, werden auf der AutoBox vollzogen.

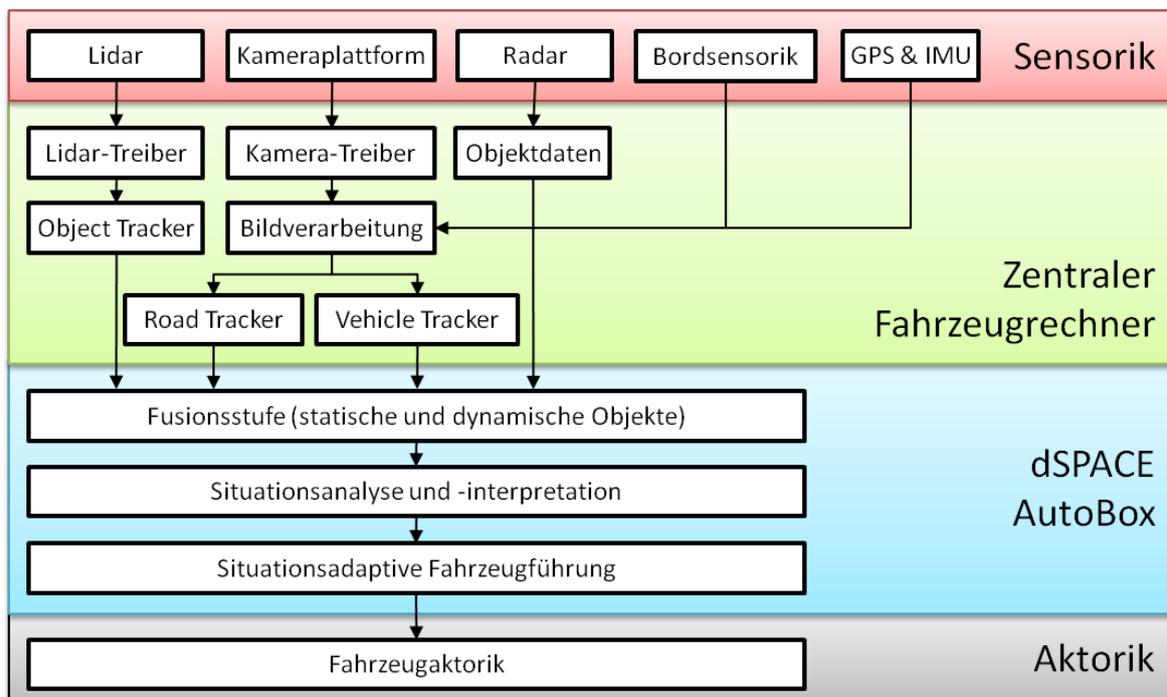


Bild 10: Überblick der Softwarearchitektur des Versuchsträgers.

3.3.2.1 Fahrzeugrechnersystem & Realzeitdatenbasis

Das Fahrzeugrechnersystem stellt die zentrale Plattform für die Sensordaten- und Wissensverarbeitung dar. Die kognitiven Funktionen, die in den einzelnen Software-Modulen gekapselt sind, stellen dabei unterschiedliche Anforderungen an das Fahrzeugrechnersystem (vgl. [69]):

- kurze Latenzzeiten für eine stabile videobasierte Spurregelung
- hohe durchgängig verfügbare Bandbreite für mehrere Kameras
- hohe Datenraten bei der Datenaufzeichnung auf Festplatte
- schnelle Durchsuchung großer Speicherbereiche für die Wissensverarbeitung
- parallele Ausführbarkeit mehrerer kognitiver Funktionen
- effiziente und schnelle Interprozesskommunikation für eine optimale Kooperation aller Module

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde ein Mehrkern-Mehrprozessor-Rechner (*multicore-multinode*) in Form eines AMD Opteron NUMA-Systems ausgewählt. Dieses weist eine in [94] gemessene Latenzzeit von 110 ns für einen Speicherzugriff auf und verfügt dadurch über klare Zeitvorteile gegenüber einem Rechnernetzwerk. Bei Letzterem liegen bereits bei unbelastetem Ethernet Latenzzeiten in einem Bereich von 100 µs bei einer nominalen Bandbreite von maximal $10 \cdot 10^9 \text{ bit/s}$ vor.

Als zentrales Element der Software-Architektur wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs die „Realzeitdatenbasis für kognitive Automobile“ [71, 72] entwickelt. Sie dient als Integrations-Framework der Software-Module und ist inzwischen als OpenSource [68] verfügbar. Um eine bestmögliche Transparenz der Interprozesskommunikation zu gewährleisten, laufen sämtliche Kommunikationsverbindungen zwischen Modulen einzig über die Echtzeitdatenbasis. Sie ermöglicht zudem eine Speicherung sämtlicher Daten einschließlich ihres zeitlichen Verlaufs sowie ein beliebiges Abrufen dieser Daten.

3.3.2.2 dSPACE AutoBox

Alle Fahrzeugaktoren und -sensoren sind über eine dSPACE AutoBox angebunden. Diese stellt eine Rapid-Prototyping-Umgebung dar, mit der es möglich ist, aus Simulink heraus mit Hilfe eines automatischen Codegenerators C-Code zu erzeugen, der anschließend auf der echtzeitfähigen Plattform ausgeführt wird. Dadurch ist eine einfache und flexible Implementierung der entwickelten Regelalgorithmen möglich. Die speziell für den automotiven Anwendungsfall benötigten Schnittstellen sowie eine ausgereifte Entwicklungsumgebung sind bei diesem System verfügbar. Der Austausch und die Einbindung entwickelter Softwaremodule ist dadurch unkompliziert möglich. Die dSPACE AutoBox wird von nahezu allen Automobilherstellern verwendet und bildet dadurch die Grundlage für eine effiziente Kommunikation mit den Fachabteilungen.

Die dSPACE AutoBox ist über redundante CAN-Bus-Netze mit der verbauten Fahrzeugsensorik und -aktuatorik verbunden und übernimmt sowohl die Auswertung der Sensordaten als auch die Regelung und entsprechende Ansteuerung der Stellglieder. Dabei kann die AutoBox auch auf Signale aus dem Fahrzeug-CAN zugreifen. Neben der Datenerfassung dient das dSPACE System auch zur Datenspeicherung im Versuchsfahrzeug. Die dSpace AutoBox stellt zudem das zentrale Modul zur Steuerung und Regelung der Sollvorgaben und Steuerkommandos dar.

3.3.3 Aktorik

Um ein Fahrzeug zur automatischen Fahrt zu befähigen, müssen die Basisfertigkeiten Beschleunigen, Verzögern sowie Richtungswechsel umgesetzt werden. Am plausibelsten erscheint die Erweiterung der vorhandenen Standardkomponenten zur Fahrzeugbedienung (Lenkung, Bremse und Gas) durch zusätzliche Systeme derart, dass externe Vorgaben zur Realisierung der geforderten Basisfertigkeiten führen.

Oberste Prämisse bei der konzeptionellen Auslegung der einzelnen Stellsysteme war die jederzeitige und sofortige Möglichkeit der Übernahme der Systemgewalt durch den menschlichen Fahrer. Dadurch wird der Forderung des Wiener Straßenverkehrsübereinkommens vom 08.11.1968 Rechnung getragen, dass der Fahrzeuglenker immer die Verantwortung für die Führung des Fahrzeugs inne hat. Darüber hinaus bedingt die Sicherstellung eines gefahrlosen Versuchsbetriebs eine derartige Auslegung.

3.3.3.1 Lenkaktorik

Zur Realisierung einer automatischen Querführung ist eine aktive Beeinflussung der Fahrzeugquerdynamik erforderlich. Die einfachste Möglichkeit dies zu realisieren stellt die Integration eines Aktors in das Lenksystem des Versuchsträgers dar. Unter Berücksichtigung von sicherheitsrelevanten und fahrdynamischen Nebenbedingungen besteht die Aufgabe des Aktors darin, aufgrund eines elektrischen Steuersignals einen Lenkwinkel an den Vorderrädern zu stellen.

Die gesetzlichen Vorschriften zum Betrieb eines Kraftfahrzeugs im Straßenverkehr sind in der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung geregelt. Insbesondere an Lenksysteme stellt der Gesetzgeber hohe Anforderungen, da bei einem Versagen ein erhebliches Sicherheitsrisiko besteht. Ein reines Steer-by-Wire-System oder eine pneumatische Übertragung sind derzeit nicht genehmigungsfähig. Zudem muss bei Versagen bzw. bei gezielter Deaktivierung der Lenkhilfe die Lenkbarkeit des Fahrzeugs auf jeden Fall erhalten bleiben. Eine mechanische Verriegelung der Lenkung ist aus diesem Grund in jedem Fall zu vermeiden. Außerdem sollen zusätzliche, das Lenken erschwerende Momente, die bei Ausfall oder Abschalten des Aktors bestehen bleiben, kleiner als 20% des im Serienzustand benötigten Lenkmoments sein. In diesem Fall wäre zwar ein erschwertes Einlenken für den Fahrer spürbar, aber dennoch ohne erheblichen Kraftaufwand zu bewältigen. In einer akuten Gefahrensituation ist unter Umständen keine Zeit für eine kontrollierte Übernahme des Fahrzeugs. Der Fahrer wird in diesem Fall intuitiv ans Lenkrad greifen und eine Kurskorrektur durchführen wollen. Im schlimmsten Fall muss er dazu ein Lenkmoment entgegen der Wirkung des Aktuators aufbringen. Um auch in diesem Fall ein Eingreifen zu ermöglichen, soll das vom Aktuator

maximal erzeugbare Drehmoment so begrenzt werden, dass es dem Fahrer möglich ist, wenn auch mit erhöhtem Kraftaufwand, gegen die Wirkung des Aktors den gewünschten Lenkradwinkel einzustellen.

Die dynamischen Anforderungen an den Lenkaktor, wie z.B. die Maximalwerte von Lenkrate und aufgebrachtem Lenkmoment, wurden durch ein im Fahrzeug verbautes Messlenkrad bei diversen standardisierten Fahrversuchen ermittelt.

Nach einer Konzeptbewertung bezüglich Leistung, Package und Sicherheit wurde daher als Lösung ein Hohlwellenmotor gewählt, der direkt auf der Lenkstange montiert werden kann. Der ausgewählte Hohlwellenmotor HT05004 der Firma MACCON mit Steuergerät SWM048-25 und Absolutwertgeber SCM-KIT 101 der Firma Stegmann mit Multi-Turn-Option und Hiperface-Schnittstelle erfüllt dabei die gestellten Anforderungen. Die bürstenlose Bauart überträgt das Drehmoment ohne mechanische Verbindung ausschließlich durch das elektromagnetische Feld vom Stator auf den Rotor, der kraftschlüssig mit der Lenkstange verbunden ist. Der Eingriff des Fahrers wird durch eine Momentenbeschränkung des Motors ermöglicht. Durch Abschalten der Stromversorgung ist im Falle eines Not-Aus der Aktor ohne Funktion.

Das Steuergerät weist eine CAN-Schnittstelle zur Übernahme von Drehzahlanforderungen an den Elektromotor auf, welche vom Querregler der AutoBox generiert werden.

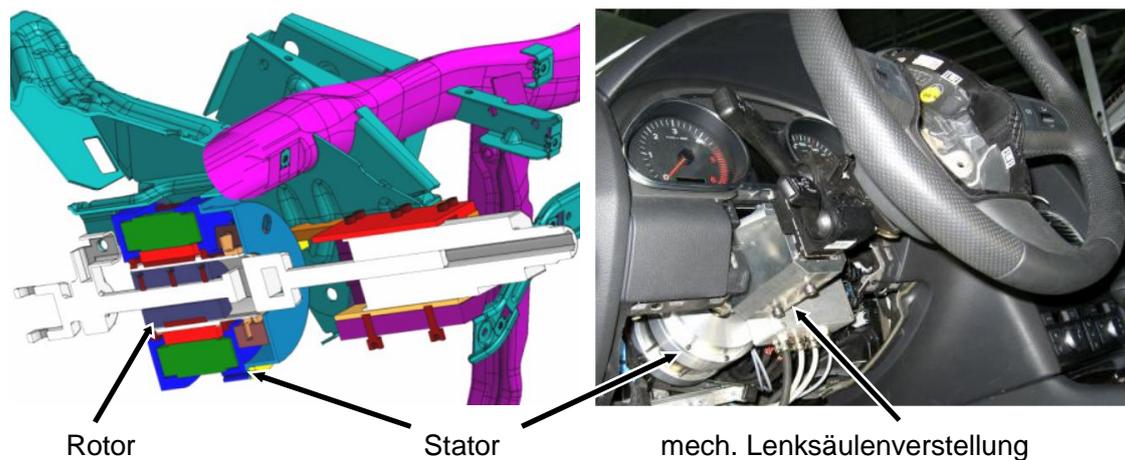


Bild 11: CAD-Schnittdarstellung (links) und Realdarstellung (rechts) der Gesamtbaugruppe Lenkaktuator im eingebauten Zustand im Fahrzeug

3.3.3.2 Verzögerungsaktorik

Die Regelqualität für die Fahrzeuglängsdynamik ist besonders von der Qualität der Umsetzung einer angeforderten Beschleunigung abhängig. Speziell bei einer sicherheitskritischen Verzögerungsanforderung ist ein möglichst dynamisches und schnelles Ansprechverhalten zu präferieren. Ruckfreies und komfortables Verhalten beim Bremsen und beim Übergang in die Verzögerung sind ebenfalls Anforderungen, die realisiert werden sollen.

Für das umgesetzte Brake-by-Wire-System bleibt das serienmäßig verbaute Bremssystem komplett erhalten, wodurch manuelles Bremsen weiterhin ermöglicht wird. Eine automatische Bremsung wird durch ein elektro-pneumatisches System realisiert, das direkt auf das Bremspedal wirkt. Die Kraft wird oberhalb des Fußeingriffs auf das Bremspedal eingeleitet, so dass die herkömmliche Pedalbetätigung durch den menschlichen Fahrer erhalten bleibt. Durch das System lassen sich Drücke im Hauptbremszylinder von bis zu 200 bar erreichen, was einer menschlichen Schreckbremsung entspricht.

Um die Auswirkungen von Ausfällen in die integrierten Systeme minimal zu halten, wurden redundante, fehlertolerante Architekturen ausgelegt. Ein serienmäßiges ACC-System wurde integriert, das auf der einen Seite der Ergänzung der Systemfunktionalität dient, auf der anderen Seite zur Realisierung der Forderung nach Systemsicherheit beiträgt. Im Fehlerfall des Primärsystems wird dadurch ein fail-operational-Verhalten erreicht. Die Systemgrenzen beim Eingriff in die Verzögerungseinheit des ACC-System zeigen sich in einer geringeren Dynamik sowie einem maximal anforderbaren Verzögerungswunsch von -3.9 m/s^2 .

3.3.3.3 Beschleunigungsaktorik

Um dem Fahrzeug durch externe Vorgaben eine positive Beschleunigung zu ermöglichen, wurde eine elektronische Schaltung realisiert, die die entsprechenden Steuersignale der AutoBox an das Motorsteuergerät weiterleitet. Bei der Umsetzung der Ansteuerung verbleibt die serienmäßige Ausführung des E-Gas-Systems überwiegend erhalten. Die eigens entwickelte Schaltungseinheit wurde zwischen dem Gaspedalsensor und dem Motorsteuergerät integriert. Dieses Modul erhält die Signale, die sie an die Motorsteuerung weitergibt, entweder von dem Reglermodul der AutoBox oder – wenn manuell betätigt – vom originären Gaspedal. Dadurch ist es auch im automatischen Fahrbetrieb möglich, dass von der AutoBox kommandierte Gaspedalvorgaben durch den menschlichen Sicherheitsfahrer übersteuert werden können. Auch bei Betätigung des Bremspedals durch den Fahrer werden die Stellbefehle der AutoBox durch das Modul blockiert und die Signale der manuellen Betätigungseinheit weitergegeben. Dies ist sogar bei einem Energieausfall oder einem Not-Aus sichergestellt. Durch die Emulation des originären Gaspedalsignals werden auch im automatischen Modus dessen Stellgrenzen verwendet. Dies wiederum bedeutet, dass durch die Verwendung der Schaltungseinheit bei der Fahrzeuglängsführung eine maximal mögliche Beschleunigungsanforderung realisiert werden kann.

Auch im Falle positiver Beschleunigungen wird als redundantes System auf die Schnittstellen des serienmäßigen ACC-Systems zugegriffen. Neben der Berücksichtigung von unplausiblen Stellkombinationen zwischen Gas- und Bremsanforderungen ist der eingeschränkte Anforderungsbereich des Motormoments auf 96% des Maximalwertes zu beachten.

3.4 Zusammenfassung

Die Verwendung einer durchgängigen Tool-Kette in Hard- und Software erlaubt eine sichere und effiziente Funktionsentwicklung. Der Test der implementierten Komponenten erfolgt zunächst in der Simulation anhand des auf Matlab/SIMULINK-basierten Fahrdynamiksimulations-Tools veDYNA. Durch den Einsatz einer dSpace Autobox als mobile, echtzeitfähige Rapid-Prototyping-Hardware kann daraufhin der bereits in der Simulation getestete und abgesicherte Code in den Versuchsträger transferiert werden.

Dieser ist mit einer Vielzahl an Sensoren zur Erfassung von Umfeldinformationen ausgerüstet. Bild 12 zeigt in etwa relationsgetreu (Fahrzeug ist leicht vergrößert dargestellt; dreispurige Fahrbahn im Hintergrund) die erzielte Sensorabdeckung. Gut zu erkennen sind die überlappenden Erfassungsbereiche der Sensoren im relevanten Abschnitt vor dem Ego-Fahrzeug. Weiterhin lassen sich die sensoriell nicht abgedeckten Lücken links und rechts neben dem Versuchsträger ausmachen. Durch eine Prädiktion der Fremdfahrzeugbewegung lässt sich dieser Mangel jedoch beheben. Lediglich zur Detektion von Fahrzeugen mit hohen Relativgeschwindigkeiten die aus dem rückwärtigen Bereich kommen, ist die gewählte Sensorkonfiguration nicht ausreichend. Dies könnte jedoch durch die Integration der Daten der bereits serienmäßig im Versuchsträger verbauten Radarsensoren des Spurwechselassistenten (Überwachungsbereich von 50m nach hinten) behoben werden. Die Aufgaben und Ziele des Sonderforschungsbereichs für "Kognitive Automobile" machten dies jedoch nicht erforderlich.

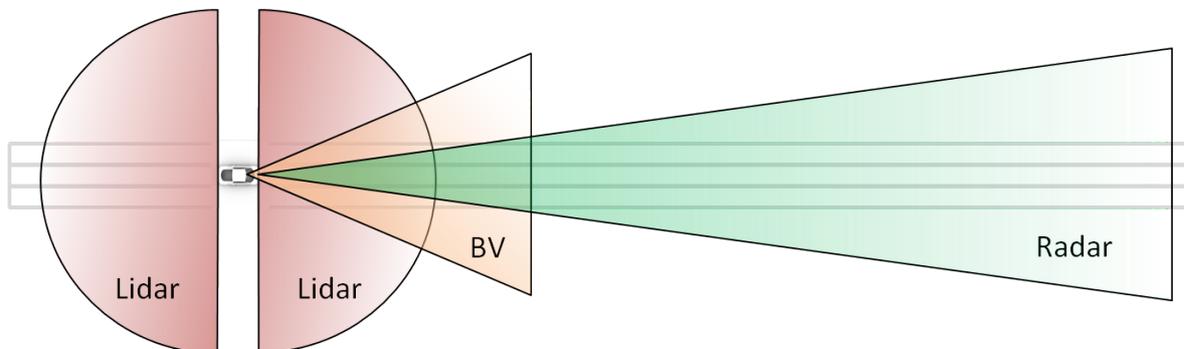


Bild 12: Idealiert dargestellter Abdeckungsbereich der gewählten Sensorkombination

Durch eine sicherheitsorientierte Auslegung der Aktoren zur Beeinflussung der Längsdynamik konnte ein fail-operational-Verhalten erzielt werden. Neben der aktiven Beeinflussung des serienmäßigen ACC-Systems, welches zum einen das Bremsensteuergerät und zum anderen das Motorsteuergerät anspricht, wurden diversitäre Systeme sowohl zur Beschleunigung als auch zur Verzögerung des Fahrzeugs integriert. Dies äußert sich in einem zusätzlichen pneumatischen Bremsaktor sowie einer weiteren Schnittstelle zum Fahrpedalwertgeber (E-Gas).

Die konzeptionelle Auslegung der Lenkaktorik berücksichtigt zahlreiche Sicherheitsaspekte und gewährleistet eine jederzeitige Übernahme durch den Versuchsfahrer.

4 Situationsbeschreibung

Der Stand der Technik zur begrifflichen Beschreibung einer Verkehrssituation wurde bereits im Kapitel 2.3 erläutert. Eine darüber hinausgehende Betrachtung situativer Aspekte in fachfremden Domänen soll den bisherigen Definitionsraum erweitern und strukturieren. In diesem Kapitel sollen daher alle erforderlichen Komponenten einer umfassenden Situationsbeschreibung zunächst extrahiert (Kapitel 4.1) und anschließend umgesetzt werden (Kapitel 4.2 und 4.3).

4.1 Ableitung erforderlicher Situationsaspekte

Unter einer Analyse versteht man laut Duden [40] die „systematische Untersuchung eines Gegenstandes oder Sachverhaltes hinsichtlich aller einzelner Komponenten oder Faktoren, die ihn bestimmen.“ Davon ausgehend soll sich dieses Kapitel einer möglichst breit gefächerten Analyse der Begriffsdefinition einer Situation widmen.

Auf diese Weise wird erstmals versucht, eine Situationsdefinition für die Domäne des Straßenverkehrs umfassend mit fachfremden Aspekten (Kapitel 4.1.1) anzureichern, um dadurch ein möglichst vollständiges Situationsbild zu erhalten. Diese Vorgehensweise erfordert jedoch eine Rücktransformation der extrahierten Aspekte aus den betrachteten Domänen in ihrer allgemeingültigen oder auch fachspezifischen Ausprägung in die begriffliche Welt des Straßenverkehrs. In den Kapiteln 4.1.2 bis 4.1.4 wird diese erarbeitet.

4.1.1 Domänenübergreifende Betrachtung

Eine Betrachtung des Situationsbegriffes in fachübergreifenden Domänen erlaubt neue Kenntnisse über die Definition der Situation, fernab von den konventionellen Vorgehensweisen und unabhängig von bereits existierenden Definitionen (vgl. Kapitel 2.3), zu erlangen. Die Betrachtung soll dabei so viele Domänen wie möglich enthalten, um ein möglichst breites Informationsspektrum abdecken zu können. Aus den Domänen werden spezifische Eigenschaften extrahiert, die in ihrer Summe einer allgemeinen Situationsbeschreibung genügen. Die einzelnen Elemente der allgemeinen Situationsbeschreibung werden auf die Domäne Straßenverkehr übertragen und auf Sinnhaftigkeit für die Anwendung sowie Umsetzbarkeit im Versuchsträger untersucht. Eine Kategorisierung der einzelnen Elemente erlaubt eine Ableitung von Anforderungen, welche an eine umfassende Situationsbeschreibung gestellt werden müssen.

4.1.1.1 Philosophie

Die Philosophie beschäftigt sich mit der Deutung der Welt und der menschlichen Existenz. In dieser Domäne taucht der Begriff der Situation vor allem bei dem deutschen Psychiater Karl JASPERS und dem französischen Schriftsteller und Philosophen Jean-Paul SARTRE auf.

In [89] unterscheidet JASPERS zwischen einer unbewusst und bewusst wahrgenommenen Situation. Die unbewusst eintretende Situation tritt in Kraft, ohne dass Wahrnehmungs-, Vorstellungs- oder Denkvorgänge mobilisiert werden. Die bewusst wahrgenommene Situation ruft zu einem Verhalten auf. Des Weiteren teilt JASPERS das Sein des Menschen in

soziologische, ökonomische und politische Situationen ein, von deren Realität alles andere abhängt. JASPERS erwähnt, im Bezug zur soziologischen Situation, die Gebundenheit des Menschen an seine soziale Lage.

Jean-Paul SARTRE setzt den Begriff der Situation in eine starke Verbindung mit dem Begriff der Freiheit [193]. Die menschliche Realität begegnet überall Widerständen und Hindernissen. Diese machen nur in der Möglichkeit zur freien Entscheidungswahl des Menschen Sinn. Damit beschreibt SARTRE das freie Handeln des Menschen, das schlussendlich zu Situationen führt. Des Weiteren schließt SARTRE die anderen Menschen in die Situationsdefinition mit ein.

4.1.1.2 Psychologie

Die Psychologie befasst sich mit der Beschreibung und Erklärung des Erlebens und Verhaltens von Menschen und ihrer Entwicklung sowie den dafür maßgeblichen inneren und äußeren Ursachen und Bedingungen. Der Psychologe Kurt LEWIN ist der wichtigste Vertreter dieser Domäne, der den Situationsbegriff in seinen Werken geprägt hat.

Laut LEWINS „Feldtheorie“ geht das individuelle Verhalten aus einer Anordnung psychologisch relevanter Kräfte hervor, die in einer konkreten Umwelt wirken [108]. Diese Umwelt ist nicht die objektivierte oder soziale Umwelt, sondern ein psychologisch beschreibbarer Lebensraum, den das Individuum in einer bestimmten Situation wahrnimmt. Das Individuum enthält Personenkonstrukte, die eine Ansammlung von Bedürfnissen (biologischer Art) und Quasibedürfnissen (Ziele und Vorhaben) darstellen und das Selbstbild wiedergeben. Die Valenz eines Objektes oder Ziels repräsentiert dabei dessen Potential zur Erfüllung eines Bedürfnisses. Dadurch können die Ziele in der jeweiligen Situation klassifiziert werden, die zur Bestimmung der passenden Handlung aus seinen Alternativen führen. Hingegen beschreiben die Konstrukte der Umwelt das Weltbild und enthalten verschiedene Teilhandlungen oder Regionen, die für die aktuellen Handlungen relevant sind. Diese Regionen werden differenziert nach „frei zugänglich“ und „nicht erreichbar“. Letzteres kann sich durch Hindernisse oder durch Beschränkungen der eigenen Fähigkeiten ausdrücken.

Um eine geeignete Definition der Situation zu finden, versucht FRIEDMANN, verschiedene Theorien zu vereinen und daraus einen sinnvollen Schluss zu ziehen. Dem „operativen Abbildsystem“ von HACKER [74] entnimmt er, dass die Definition der Situation durch Handlungsziele determiniert ist. Dies kommt einer funktionalen Analyse der Realität unter dem Aspekt der Realisierungsmöglichkeiten für die Ziele nahe [61]. Personen- und Objektmerkmale sowie die Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen der Situation bilden einen wichtigen Bestandteil der Definition der Situation und werden in den Zusammenhang von Merkmalsverknüpfungen (Klassen) gestellt. Dabei werden vor allem in interpersonalen Situationen ständig neue Information verarbeitet, sodass sich die Situation im Verlaufe des Interaktionsprozesses zunehmend wandeln kann.

4.1.1.3 Systemtheorie

Unter dem Begriff der Systemtheorie wird in diesem Zusammenhang der heterogene Rahmen für ein interdisziplinäres Erkenntnismodell verstanden, das das „System“ als Grundlage

zur Beschreibung und Erklärung unterschiedlicher Phänomene verwendet. In dieser Domäne lassen sich zwei Definitionen der Situation finden, die sich in ihrer Aussage decken.

ROPOHL [144] definiert die Situation als das Handlungssystem und dessen Umgebung. Diese Definition bezieht auch das Handeln eines Handlungssystems auf sich selbst mit ein.

Die Situation nach KEMPSKI [95] ist eine Verknüpfung von Relationen zwischen den Personen und Gegenständen. Auch hier wird der Handlungsträger mit in die Situation einbezogen [163].

4.1.1.4 Soziologie

Die Domäne der Soziologie beinhaltet eine Vielzahl von Definitionen und Theorien, die die Handlungsabläufe der verschiedenen Interaktionspartner und Zusammenhänge zwischen Personen und Objekten auf verschiedenste Art und Weise beschreiben.

In der Soziologie wird der Situationsbegriff allgemein als die Umstände angesehen, unter denen die Akteure handeln. Dies wird im Zusammenhang zwischen Akteuren und Ressourcen klar, bei dem verschiedene Beziehungsmöglichkeiten, wie das Interesse an Ressourcen und die Kontrolle über Ressourcen, beschrieben werden können. Dadurch entstehen Verknüpfungsmöglichkeiten bei gegebenen Sachverhalten, die zu verschiedenen Handlungs- oder Entscheidungsalternativen führen können.

Die „Rollentheorie“ (vgl. [122]) betrachtet den Menschen als Person in einem sozialen System, welcher eine bestimmte soziale Position und soziale Rolle einnimmt. Die soziale Position einer Person ist dessen Stellung in einem sozialen System. Die soziale Rolle wird dagegen über die Erwartungen der Bezugsgruppen an die jeweilige Person in seiner Position definiert. Diese werden in die zwei Arten der antizipatorischen und der normativen Erwartungen unterteilt. Des Weiteren können die Erwartungen eingeteilt werden in Kann-, Soll- und Muss-Erwartungen. Die Nichterfüllung von Soll- und Muss-Erwartungen führt in der Regel zu negativen Sanktionen, wobei die Erfüllung von Kann-Erwartungen meist zu positiven Sanktionen führt. Es sei noch angemerkt, dass die Erwartungen nicht subjektiv und beliebig sind, sondern gesellschaftlich normiert.

Der „Rational Choice Ansatz“ (vgl. [117]) steht für verschiedene Ansätze in der Soziologie sowie auch in der Wirtschaftswissenschaft. Allgemein schreibt er den Akteuren rationales Verhalten vor, wie z.B. die Nutzenmaximierung. Diese wird meist als Handlungsregel im Rational Choice Ansatz angenommen. Darüber hinaus ist sich der Handelnde dem Zweck, den Mitteln und den Folgen seiner Handlungen bewusst. Zudem folgen die Rational Choice Ansätze vier heuristischen Regeln: der Konstanz der menschlichen Natur, der Interdependenz sozialer Akteure, den unbeabsichtigten Folgen absichtsvollen Handelns und den sozialen Institutionen als relevanter sozialer Kontext. Unter der Konstanz der menschlichen Natur wird angenommen, dass sich Akteure in ähnlichen Situationen und unter ähnlichen Handlungsbedingungen gleich verhalten. Soziale Akteure sind oftmals gegenseitig voneinander abhängig, d.h. das Erreichen ihrer Ziele hängt oftmals vom Handeln anderer Akteure ab. Die Annahme, dass Akteure sich ihrer individuellen Ziele, Mittel und Folgen bewusst sind, verstößt nicht gegen die dritte Regel. Hiermit ist vielmehr gemeint, dass rationales (absichtsvolles) Handeln nicht geplante Effekte auf der Makroebene, z.B. einen Verkehrsstau, hervorrufen kann. Schließlich stellen soziale Institutionen wie Verbandsstrukturen, rechtli-

che Regelungen und Gepflogenheiten einen nicht zu unterschätzenden Rahmen dar, der die Handlungen der Akteure bedingt.

Talcott PARSONS entwickelte eine allgemeine Handlungstheorie (vgl. [46]), die sich auf den Sinnzusammenhang von individuellem Handeln bezieht. In dieser Theorie handeln Menschen nicht nach der Nutzenmaximierung, sondern nach ihren Werten und Normen. Diese beeinflussen dabei auf zweierlei Weise die Richtung des Handelns: Sie wirken erstens selektiv auf die Handlungsmittel und zweitens bestimmen sie unsere Entscheidung hinsichtlich der Handlungsziele. Dadurch lässt sich die soziale Welt als geordnet betrachten, da das menschliche Handeln fundamental durch gemeinsame Normen und Werte geprägt wird.

Die PARSONS'sche Handlungstheorie kann als eine Überleitung zum „Strukturfunktionalismus von Parsons“ angesehen werden. Hier wird die Gesellschaft als umfassendes Handlungssystem aufgefasst, das in Subsysteme unterteilt wird. Diese müssen, um ihre Existenz erhalten zu können, die vier Funktionen der Selbsterhaltung erfüllen: die Anpassung an die Umwelt, die Zieldefinition und -verfolgung, die Integration von Handlungen verschiedener Akteure und die Aufrechterhaltung der zu Grunde liegenden Strukturen.

4.1.1.5 Kommunikationswissenschaften

Diese Domäne wird hauptsächlich von Kommunikationsmodellen vertreten, die den Weg einer Botschaft vom Sender zum Empfänger beschreiben. Es wird aber auch auf die Elemente Sprecher und Hörer bzw. auf den Unterschied zwischen Monolog, Dialog und Gruppenkonversation eingegangen [64].

Der Soziologe Erving GOFFMANN eröffnete die These, dass das Gespräch zwischen Sprecher und Hörer nicht eigenständig betrachtet und analysiert werden kann [133]. Vielmehr gilt es die soziale Situation, in der sich die Personen sprachlich oder leiblich begegnen, zu betrachten.

In [186] entwickelten WESTLEY und MCLEAN ein Modell, um den Prozess der Nachrichtenvermittlung als einen mehrfach selektiven und dynamisch rückgekoppelten Vorgang darzustellen. Der Kommunikator formt eine Botschaft aus einer von seinen eigenen Interessen determinierten Auswahl von Ereignissen. Diese wird durch ein Medium übernommen, selektiert und für das Publikum zugänglich gemacht. Der Rezipient empfängt letztlich eine Darstellung des Ereignisses, welche aber nicht mehr dem eigentlichen Ausgangsereignis entsprechen muss, da es bereits mindestens zwei Mal bearbeitet worden ist.

Die Geschwister RILEY entwickelten ein ähnliches Modell, das als „Kommunikationsmodell von Riley und Riley“ bekannt wurde. Sie inkludieren Gruppenzugehörigkeiten von Kommunikator und Rezipienten in ihr Modell. Daraus folgt, dass weder Kommunikator noch Rezipient als isolierte Individuen zu betrachten sind, sondern gewisse Abhängigkeiten zu anderen besitzen [190].

4.1.1.6 Gruppendynamik

Die Theorien der Gruppendynamik beschäftigen sich hauptsächlich mit der Bildung einer Gruppe, der damit verbundenen Rollenverteilung und dem individuellen Verhalten innerhalb der Gruppe.

Eine gleichberechtigte Gruppe kennzeichnet sich meist durch eine Ansammlung von gleichrangigen Personen, die sich für ein festgelegtes Sachziel zusammenschließen und für die Erreichung dieses Ziels gemeinsam Verantwortung übernehmen. Das Geschehen in der Gruppe, speziell in der Gruppenentwicklung, lässt sich in vier voneinander separierbare Phasen unterteilen. Mit fortschreitendem Verlauf der Gruppenbildung verfestigt sich innerhalb der einzelnen Phasen die Stellung oder Position in der Gruppe, die dadurch ihre Ordnung finden kann. Je größer eine Gruppe ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass sich Untergruppen bilden, die die jeweiligen Phasen unabhängig durchlaufen. Erst eine geordnete Gruppe kann zusammenarbeiten und die vereinbarten Ziele erreichen [109].

4.1.1.7 Wirtschaftswissenschaften

Diese Domäne beschäftigt sich mit dem rationalen Umgang mit beschränkten Gütern.

Im „situativen Ansatz“ der Betriebswirtschaftslehre wird der Begriff der Situation mit dem der Umwelt gleichgesetzt. Die Umwelt stellt dabei eine Variable von verschiedenen Bedingungen dar. Bei jeder Überlegung wird diese in die Entscheidungen von Personen und Unternehmen mit einbezogen und beeinflusst, je nach Entscheidungssituationen, das Ergebnis der Entscheidung [63]. Die Entscheidungssituation beinhaltet das Risiko, die Ungewissheit und die Sicherheit von Entscheidungen [96]. Sie lässt auf die Wahrscheinlichkeit des zielgerechten Erreichens schließen.

Schließlich erfolgt eine weitere Definition der Situation durch NEUGEBAUER [121]. In dieser Definition fällt wiederum der Begriff der Entscheidungssituation an. Sie beinhaltet im Wesentlichen Informationen über die zur Verfügung stehenden Alternativen und deren zu erwartenden Konsequenzen. Weiterhin werden die bei der Entscheidung zu beachtenden Werte, Ziele, Nebenbedingungen und Gegebenheiten sowie über das bei der Auswahl der Alternativen zur Anwendung kommende Problemlösungsprogramm mit integriert.

4.1.1.8 Geografie

Die Geografie befasst sich mit der räumlichen Struktur und Entwicklung der Erdoberfläche, sowohl in ihrer physikalischen Beschaffenheit als auch als Lebensraum.

Diese Domäne beinhaltet drei Definitionen aus der Geografie, der Kartografie und dem Bergbau. Den Ursprung bildet die geografische Situation und bedeutet die Einbettung eines Objektes auf der Erdoberfläche in eine Region oder Landschaft. Die Situation repräsentiert damit den räumlichen Zusammenhang der topografischen Sachverhalte, innerhalb derer das Objekt liegt [83]. Die zweite Definition stammt aus der Kartografie, die zwischen dem Gelände (die Erdoberfläche als solche) und der Situation (die auf ihr befindlichen Objekte) unterscheidet. Die Gegebenheiten der Erdoberfläche im Grundriss, die durch Signaturen in Form von Punkten, Linien oder Flächen dargestellt werden können [123], definieren hier die Situation. Im Bergbau wird die Situation mit Hilfe des Situationsplans beschrieben, der die Lage gewisser Punkte an der Gebirgsoberfläche, die bzgl. allgemein bekannter, unverrückbarer Objekte eingemessen werden, darstellt [141].

4.1.1.9 Zusammenfassung und Kategorisierung aller Eigenschaften

Aus der Analyse der Situationsdefinitionen innerhalb der einzelnen Domänen lassen sich die jeweiligen spezifischen Eigenschaften in den Bereich Straßenverkehr transferieren. Zudem werden die Ergebnisse der Recherche zum Stand der Technik des Situationsbegriffes im Straßenverkehr (Kapitel 2.3) mit einbezogen. Die Summe an Eigenschaften enthält eine Vielzahl an Begriffen und Definitionen, die von Domäne zu Domäne unterschiedlich sind, jedoch eine äquivalente Aussage in sich tragen. Deshalb gilt es als nächsten Schritt, alle Eigenschaften zu klassifizieren, um einheitliche Begriffe und Definitionen zu erhalten, die den Eigenschaften eine allgemein gültige Bezeichnung verleihen. Dadurch können inhaltlich gleiche Eigenschaften zusammengefasst werden.

Die für die automatische Fahrzeugführung relevanten Eigenschaften einer Situation, welche von einer maschinellen Situationsanalyse aus der aktuellen Verkehrsszene extrahiert werden müssen, lassen sich in die Kategorien der perzeptiven, der prädiktiven und der normativen Situationsaspekte gliedern (siehe Bild 13). Mit anderen Worten müssen bestimmte Elemente der verkehrlichen Umwelt sensorisch vom Versuchsträger erfasst werden. Die den Elementen zu Grunde liegenden Merkmalsmuster können daraufhin als Basis einer Vorhersage der Situationsentwicklung dienen. Sowohl die aktuelle als auch eine möglich zukünftige Situation können anschließend mit Hilfe normativer Modelle bewertet werden. Nicht umsetzbare oder systembedingt a priori erfüllte Aspekte finden sich in der Grafik nicht wieder und werden auch nicht weiter betrachtet. Dies betrifft die Sicht aus der Perspektive anderer sowie die subjektive Perspektive und Deutung.

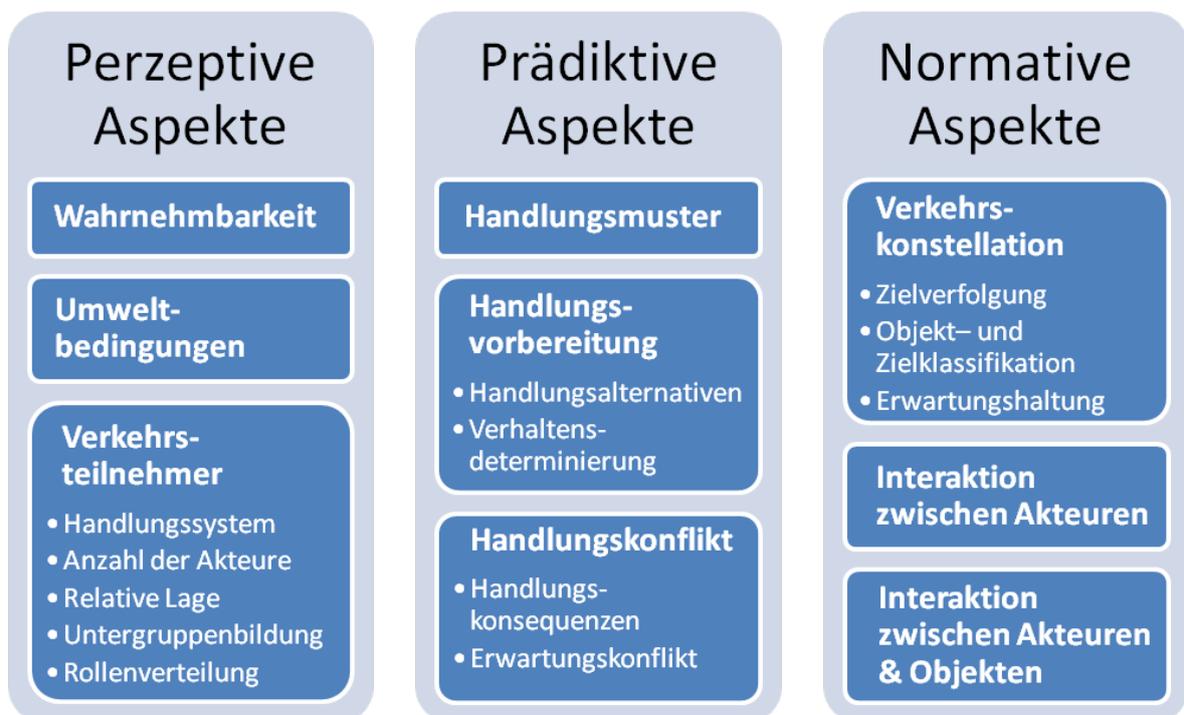


Bild 13: Aspekte der Anforderungsanalyse

4.1.2 Perzeptive Aspekte

Aus der Anforderungsanalyse lassen sich die perzeptiven Aspekte in die Klassen „Wahrnehmung der Situation“, „Umweltbedingungen“ und „Verkehrsteilnehmer“ unterteilen. Innerhalb dieser Klassen werden die einzelnen Eigenschaften in die Domäne des Straßenverkehrs transferiert und speziell im Hinblick auf deren Anwendung im Versuchsträger interpretiert.

4.1.2.1 Wahrnehmung der Situation

Die Eigenschaft der „Wahrnehmung der Situation“ ist ausschließlich in der Philosophie enthalten. Hierbei wird zwischen unbewusst und bewusst wahrgenommener Situation unterschieden. Im verkehrstechnischen Bereich kann dies als sensorielle Erkennungsmöglichkeit der relevanten Situationsaspekte interpretiert werden. Bedingt durch sensorielle Einschränkungen (Messprinzip, Reichweite etc.) sind nicht immer alle Informationen über die Umgebung zugänglich. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass die Sensoren zwar die messbaren Eigenschaften der Umgebung erfassen, aber sich die relevanten Objektmerkmale aus den Rohdaten nicht extrahieren lassen. Dies führt zu einem unvollständigen Abbild der Situation. Die Eigenschaft der Wahrnehmbarkeit von Situationsaspekten bildet somit die Grundbedingung für alle nachfolgenden Klassen.

4.1.2.2 Umweltbedingungen

In der Klasse der „Umweltbedingungen“ werden alle quasi-statischen Elemente einer Situation gebündelt. Diese werden auf verschiedenste Weise durch die Philosophie, die Wirtschaft, die Systemtheorie, die Soziologie und die Psychologie definiert.

Die Philosophie integriert Widerstände und Hindernisse in die Entscheidungswahl und schließt andere in die Situationsdefinition mit ein. Übertragen auf den Verkehr kommt dies der Berücksichtigung von Wettereinflüssen und Verkehrsregeln sowie des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer gleich. Diese Elemente lassen sich auch im situativen Ansatz der Wirtschaftswissenschaften erkennen, der die Umwelt als eine Variable verschiedener Bedingungen betrachtet, die bei jeder Entscheidung berücksichtigt werden müssen. Darunter fallen nicht nur Wettbewerber, sondern auch zu beachtende Werte, Ziele und Nebenbedingungen. In der Systemtheorie werden die Umgebung sowie die Auswirkungen von Handlungen auf das Handlungssystem mit einbezogen. Diese beiden Aspekte können durch weitere Verkehrsteilnehmer sowie die Fahrbahn abgebildet werden. In den beiden Domänen der Soziologie und der Psychologie lassen sich alle bisher genannten Elemente wiederfinden. Hier werden die Umweltbedingungen als alle Umwelteinflüsse definiert, die auf den Akteur einwirken bzw. als die Umstände, unter denen die Akteure handeln. Speziell in der Psychologie wird der Begriff des hodologischen Raums geprägt, der den Wegeraum darstellt, in dem Entscheidungen möglich sind. Dies stellt somit den befahrbaren Teil der Fahrbahn dar.

Die zu erfassenden Eigenschaften der Umweltbedingungen sind demnach die Fahrbahn, die Verkehrsregelung, die Wetterverhältnisse und die anderen Verkehrsteilnehmer. Da letztere jedoch in einer eigenen Klasse Berücksichtigung finden und weiterhin dem Versuchsträger sensorisch nur die Merkmale der Straße zugänglich sind, beschränkt sich die Eigenschaft „Umweltbedingungen“ auf die Erkennung der Fahrspuren.

Eine technische Realisierung zur Erfassung von Witterungseinflüssen könnte jedoch durch den Einsatz von Klimasensoren erfolgen. Einige finden sich in modernen Fahrzeuge meist in Form von Regen- und Temperatursensoren wieder. Weitere Möglichkeiten stellen der Abruf von Wetterdaten im Internet sowie spezielle Bildverarbeitungsalgorithmen in Kombination mit einer Videokamera im Fahrzeug dar. Letztere kann auch zur Verkehrszeichenerkennung eingesetzt werden und im Zusammenspiel mit einer digitalen Karte die Erfassung der Verkehrsregelung ermöglichen.

4.1.2.3 Verkehrsteilnehmer

In diese Klasse werden alle Eigenschaften mit einbezogen, die sich inhaltlich auf Verkehrsteilnehmer beziehen. Alle nachfolgenden Eigenschaften repräsentieren Informationen, die sich auf Fahrzeuge auf der Fahrbahn beziehen.

Handlungssystem: In den meisten Domänen existieren Definitionen für diese Eigenschaft. In der Philosophie kann als Handlungssystem jenes Fahrzeug bezeichnet werden, das die Situation erkennt und wandelt. In der Systemtheorie kann zwischen einem Fahrzeug, das eine Handlung ausführt oder den gesamten Verkehrsteilnehmern als Handlungssystem ausgegangen werden. Das Handlungssystem in der Soziologie ist ein Fahrzeug, das unter bestimmten Umständen handelt. In der Kommunikationswissenschaft wird zwischen dem Handelnden und den Handlungsbeteiligten unterschieden. Sind an der Handlung mehr als ein Fahrzeug beteiligt, so besteht das Handlungssystem aus dem Kollektiv, andernfalls nur aus dem Handelnden. Die Gruppendynamik definiert das Handlungssystem demgegenüber als die gesamte Gruppe. In der Psychologie hingegen besteht das Handlungssystem aus nur einem Fahrzeug, das ein bestimmtes Verhalten zeigt. Die gesamten Domänen haben zwei unterschiedliche Definitionen des Handlungssystems hervorgebracht. Ein Handlungssystem kann demnach aus einem handelnden Fahrzeug oder aus einer gesamten Gruppe von Fahrzeugen bestehen. Eine treffende Definition ist jene, die keine feste Anzahl an Fahrzeugen vorgibt, sondern all jene Fahrzeuge in das Handlungssystem mit einbezieht, die an der Handlung beteiligt sind. Das Handlungssystem besteht demnach immer aus mindestens einem Fahrzeug, dem Versuchsträger, und ist in seiner Größe limitiert durch die sensorischen Einschränkungen in der Wahrnehmung. Alle erfassbaren physikalischen Eigenschaften der einzelnen Systemmitglieder werden zusätzlich zu den nachfolgenden Aspekten dieser Klasse in der Beschreibung des Handlungssystems mit berücksichtigt.

Anzahl der Akteure: Die Kommunikationswissenschaften erfassen diese Eigenschaft. Es wird zwischen einem Teilnehmer (Monolog), zwei Teilnehmern (Dialog) und mehr als zwei Teilnehmer (Gruppenkonversation) unterschieden. Die Übertragung dieser Eigenschaft auf den Verkehr bedeutet eine exakte Erfassung der Anzahl an Teilnehmern innerhalb des Handlungssystems.

Geometrische Beziehungen: Die Anforderung der Abbildung von „geometrischen Beziehungen“ stammt aus der Geografie und Soziologie. Der Aspekt beschreibt die relative Lage der Fahrzeuge zueinander und damit auch deren Positionierung innerhalb des Handlungssystems. Dabei wird von einem Bezugsfahrzeug ausgegangen, von dem aus alle relativen Daten erfasst werden.

Einteilung in Subsysteme: Aus der Gruppendynamik ist eine Unterteilung in Subsysteme bekannt. Sind mehrere Fahrzeuge in der aktuellen Situation beteiligt, wird es dadurch möglich, die Verkehrsteilnehmer in Untergruppen aufzuteilen. Die beiden dafür anwendbaren Parameter sind „Nähe“ und „Ähnlichkeit“. Ersteres bezieht sich auf Fahrzeuge, die einen gewissen Abstand zueinander unterschreiten und so eine Untergruppe bilden. Letzteres verknüpft all jene Fahrzeuge, die vergleichbare Abmaße oder gleichartige Eigenschaften (z.B. Lastkraftwagen) besitzen.

Soziale Rolle: Mit Hilfe dieses Situationsaspekts aus der Soziologie und der Gruppendynamik kann die Rollenverteilung innerhalb eines Verkehrsgeschehens beschrieben werden. Eine Rollenverteilung kann jedoch nur in einem handelnden System erfolgen. Besteht dieses System aus Fahrzeugen, welche bestimmte Handlungsabläufe vollziehen, so existieren „Handelnde“, „an der Handlung beteiligte“, „nicht Beteiligte“ und möglicherweise „Konflikt-auslöser“.

4.1.3 Prädiktive Aspekte

Die prädiktiven Aspekte der Anforderungsanalyse lassen sich in die Klassen „Handlungsmuster“, „Handlungsvorbereitung“ und „Handlungskonflikt“ unterteilen. Innerhalb dieser Klassen weisen die Eigenschaften einen unsicheren Charakter auf, da zukünftiges Handeln anderer Verkehrsteilnehmer aus Beobachtungen nicht mit absoluter Sicherheit vorhergesagt werden kann.

4.1.3.1 Handlungsmuster

Die Klasse „Handlungsmuster“ beinhaltet den Aspekt von Entscheidungsmerkmalen, mit Hilfe derer die Identifikation eines aktuell möglichen Handlungsablaufs zum Erreichen eines Zieles möglich ist. Diese Eigenschaft besitzt in der Wirtschaft und in der Soziologie eine wichtige Rolle. Sind mehrere Handlungsmöglichkeiten gegeben, um ein gewisses Ziel zu erreichen, so ist eine Entscheidung nötig. Diese wird in der Wirtschaft von den Merkmalen Risiko, Sicherheit und Ungewissheit geprägt. Übertragen auf die Verkehrswelt lassen sich diese Begriffe durch physikalische Gegebenheiten beschreiben, wie gefahrene Geschwindigkeiten, räumliche und zeitliche Abstände zwischen Fahrzeugen usw. Durch Interpretation derartiger Merkmale können Rückschlüsse auf geplante Handlungen erfolgen und dadurch Situationen klassifiziert werden. In der Soziologie wird die Entscheidung zum Handeln geprägt durch das Interesse an und die Kontrolle über Ressourcen. Derartige Ressourcen können z.B. bestimmte Positionen auf den Fahrspuren sein. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Entscheidungsmerkmale mit Hilfe der Klassifikation physikalischer Gegebenheiten beschrieben werden können.

4.1.3.2 Handlungsvorbereitung

Es werden all jene Eigenschaften in diese Klasse inkludiert, die Informationen beinhalten, die vor einem Handlungsablauf wichtig sind. Diese Eigenschaften reichen von der Anzahl und Art der Handlungsalternativen bis hin zur Beeinflussung des Verhaltens eines Fahrzeuges.

Handlungsalternativen: Die Definition der „Handlungsalternativen“ kann auf direktem Weg von der Wirtschaft und der Soziologie übernommen werden. Handlungsalternativen sind dann gegeben, wenn in der vorliegenden Situation mehr als eine Möglichkeit besteht das aktuelle Ziel zu erreichen. Existiert nur eine Möglichkeit, so ist der Konflikt der Handlungswahl nicht gegeben. Im Gegensatz zu den Entscheidungsmerkmalen charakterisieren sich Handlungsalternativen durch Aktionen auf Fahrmanöverebene (z.B. Überholmanöver).

Verhaltensdeterminierung: Da das Verhalten auf verschiedenste Arten beeinflusst werden kann, lässt sich auch erklären, dass sehr viele Domänen (Philosophie, Soziologie, Kommunikationswissenschaft und Psychologie) diesen Aspekt betrachten. Überträgt man die Thesen der Philosophie auf die verkehrliche Welt, so ist das Verhalten von dem Fahrzeug abhängig, das die Situation als erstes erkennt. Dieses kann als erstes reagieren und die Situation wandeln. In der Soziologie wird das Verhalten allgemein durch die Nutzenmaximierung (z.B. kürzester Weg, schnellstes Vorankommen) oder von Werten und Normen (moralische und gesetzliche Vorschriften) getrieben. Die Kommunikationswissenschaften postulieren, dass das Verhalten davon abhängt, ob man in der jeweiligen Situation einer Gruppe angehört der man sich anpasst oder nicht. Gemäß den Ausführungen der Psychologie hängt das Verhalten einerseits von den physikalischen Eigenschaften eines Fahrzeuges (Größe, Leistung usw.) und andererseits von der subjektiven Deutung der Situation und damit auch vom Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer ab. Zusätzlich wird das Verhalten von dem Ziel des sicheren Fahrens (als Bedürfnis) oder des schnellen Vorankommens (als Quasibedürfnis) getrieben.

4.1.3.3 Handlungskonflikt

Die Klasse des „Handlungskonfliktes“ enthält die Eigenschaften, die Verkehrskonflikte als negative Folgen von Handlungskonsequenzen darstellen oder einen Konflikt beschreiben, der entsteht, falls bestimmte Erwartungen an die Weiterentwicklung der Situation nicht erfüllt werden.

Handlungskonsequenzen: Diese Eigenschaft wurde von den Domänen Philosophie, Wirtschaftswissenschaften und Soziologie vorgegeben. Befinden sich in einer Situation mehr als ein Fahrzeug, so können Fehlhandlungen eines Fahrzeuges zu negativen Handlungskonsequenzen nicht nur für das konfliktauslösende Fahrzeug, sondern auch für die anderen beteiligten Verkehrsteilnehmer führen (Philosophie). Diese Konsequenzen reichen von der Beeinträchtigung des Fahrverhaltens bis hin zum Unfall. Die Soziologie und die Wirtschaftswissenschaften verbinden die Handlungskonsequenzen mit den Handlungsalternativen, die zu einem Konflikt führen können, sofern mehr als ein Teilnehmer in der aktuellen Situation vorhanden ist.

Erwartungskonflikt: Die Soziologie beschäftigt sich mit der Thematik des „Erwartungskonflikts“. Dieser entsteht genau dann, wenn konträre Erwartungen an die Weiterentwicklung einer Situation von den verschiedenen Verkehrsteilnehmern vorliegen. Wird eine Erwartung zugunsten einer anderen aufgeben, kann eine Deeskalation möglich werden. Eine Klassifizierung der Erwartungen nach Wichtigkeit und eine Quantifizierung hinsichtlich der Konfliktgefahr kann als Maß der Kritikalität einer Situation dienen.

4.1.4 Normative Aspekte

Die Eigenschaften dieser Kategorie beschreiben all jene Ereignisse, die die Wechselwirkungen zwischen statischen und dynamischen Objekten auf der Fahrbahn interpretieren. Sie können in die Klassen zur Bewertung der „Verkehrskonstellation“, der „Interaktionen zwischen Akteuren“ und der „Interaktion zwischen Akteuren und Objekten“ gegliedert werden.

4.1.4.1 Verkehrskonstellation

In jeder Situation existieren Ziele, die entweder von einem Einzelnen oder von der gesamten Verkehrsgemeinschaft angestrebt werden. Zusätzlich enthält diese Klasse Anforderungen zur Beschreibung der Valenz, die von einem Ziel oder einem Objekt auf der Fahrbahn ausgeht sowie gewisse Erwartungshaltungen der Verkehrsteilnehmer.

Zielverfolgung: Diese Eigenschaft wird von der Soziologie und der Gruppendynamik geprägt. Da die Gruppendynamik voraussetzt, dass sich mehr als ein Fahrzeug auf der Fahrbahn befindet, kann zwischen subjektiver und objektiver Zielverfolgung unterschieden werden. Dabei steht die subjektive Zielverfolgung für das bewusste Erreichen des individuellen Zieles jedes Verkehrsteilnehmers. Derartige Ziele können eine bestimmte Position auf der Fahrbahn und/oder eine angestrebte Fahrgeschwindigkeit sein. Als objektive Zielverfolgung kann das Erreichen eines gemeinsamen Zieles der gesamten Verkehrsteilnehmer in der Situation angesehen werden. Die Konfliktfreiheit, Unfallfreiheit und Verkehrssicherheit stellen solche Ziele der Gemeinschaft dar.

Objekt- und Zielklassifikation: Diese Eigenschaft wird ausschließlich in der Psychologie beschrieben und ermöglicht den Wert oder Reiz eines Objektes oder Zieles anzugeben. So lassen sich Ziele oder Objekte nach ihrem Anreiz zur Erreichung oder Vermeidung klassifizieren.

Erwartungshaltung: Diese Eigenschaft wird von der Soziologie geprägt und lässt sich laut soziologischer Ansätze in gesetzlich-moralische und antizipatorische Erwartungen unterteilen. Erstere sind jene Erwartungen, die von einer Orientierung aller Verkehrsteilnehmer an den gesetzlichen (z.B. StVO) und moralischen Regelwerken ausgeht. Sie sind vom Handelnden zu den Beteiligten und umgekehrt gerichtet. Die antizipatorischen Erwartungen beinhalten das vorwegnehmende Reagieren auf bestimmte Handlungsabläufe von Verkehrsteilnehmern, wie z.B. das Freimachen der rechten Spur bei Autobahneinfahrten.

4.1.4.2 Interaktion zwischen Akteuren

Auf verschiedenste Art und Weise beschreiben die Domänen Systemtheorie, Soziologie und Gruppendynamik die Interaktion zwischen Akteuren. Da das Handlungssystem in der Systemtheorie aus mehreren Fahrzeugen bestehen kann, beschreibt die Interaktion die Wechselwirkungen innerhalb dieses Systems, also die Handlungen zwischen den Fahrzeugen. In der Soziologie wird die Interaktion zwischen den Akteuren mit den objektiven Umständen in Verbindung gebracht, die die Akteure zum Handeln veranlassen. Diese können sich im Interesse der Verfolgung gemeinsamer Ziele manifestieren und so zu Interaktionen der Handlungspartner führen. Erweitert wird die Eigenschaft durch die Begrenzung der Handlungsmöglichkeiten durch die anderen Akteure. Die Gruppendynamik beschreibt die Inter-

aktion als jene Handlungsabläufe, die sich auf das Erreichen bestimmter Positionen auf der Fahrbahn (Ziele) beziehen.

4.1.4.3 Interaktion zwischen Akteuren und Objekten

Die „Interaktion zwischen Akteuren und Objekten“ beschreibt in der Systemtheorie die Wechselwirkungen, die zwischen diesen zwei Elementen entstehen. Übertragen auf die Verkehrswelt lässt sich dies als die Wechselwirkungen zwischen einem Fahrzeug und einem unverrückbaren Objekt auf der Fahrbahn sowie der Fahrbahn selbst charakterisieren. Die Wechselwirkung beschreibt dabei eine bestimmte, erforderte Handlung des Fahrzeuges. Diese ist einseitig vom Objekt zum Akteur gerichtet, da nur das Fahrzeug aktiv handeln kann.

4.1.5 Zusammenfassung

Ein umfassende Sammlung von Aspekten, die einer Situation inne wohnen können, wurde durch die Betrachtung des Situationsbegriffes in fachfremden Domänen erarbeitet. Diese Menge an Aspekten wurde mit den Eigenschaften bereits existierender Verfahren der Situationsanalyse (vgl. Kapitel 2.3) fusioniert und anschließend kategorisiert.

Die durch diese Vorgehensweise erreichte hohe Informationsdichte der Situationsbeschreibung erlaubt eine hohe Aussagekraft des technischen Moduls zur Situationsanalyse und -interpretation. Die dazu notwendigen Schritte lassen sich in folgende notwendige Arbeitspakete bündeln und werden in den nachfolgenden Kapiteln algorithmisch erarbeitet:

- Perzeptive Aufgabe: robuste sensorielle Erfassung von Fahrspuren und Verkehrsteilnehmern sowie deren physikalischen Eigenschaften
- Prädiktive Aufgabe: Identifikation charakteristischer Handlungsmerkmale und handlungsvorbereitender Maßnahmen für potentielle Fahrmanöver aller Verkehrsteilnehmer, welche hinsichtlich ihres Verkehrskonfliktpotentials untersucht werden
- Normative Aufgabe: Beurteilung der aktuellen Verkehrskonstellation hinsichtlich dessen Beitrag zur eigenen Zielerfüllung der Fahrzeugführung sowie Bewertung der Verkehrsteilnehmer und des Verkehrsumfeldes hinsichtlich eigener Werte und Normen

4.2 Situationsanalyse

In diesem Kapitel werden die verwendeten Algorithmen zur Wahrnehmung der relevanten Umweltaspekte (Kapitel 4.2.1) und zur Identifikation, Prädiktion und Konfliktdanalyse von Fahrmanövern der Verkehrsteilnehmer (Kapitel 4.2.2) erläutert.

4.2.1 Erfassung statischer und dynamischer Objekte

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Umsetzung der perzeptiven Aufgaben (vgl. Kapitel 4.1.2 und Bild 13) aus der Anforderungsanalyse aus Kapitel 4.1. Dafür werden die Eigenschaften der in Kapitel 3.3.1 eingeführten Sensoren beleuchtet (Kapitel 4.2.1.1) und die Notwendigkeit einer Sensordatenfusion abgeleitet. Die Aufgaben betreffen zum einen die Erfassung von unverrückbaren Objekten, wie z.B. der Fahrbahn. Diese ist, sowohl durch die sensorielle Ausrüstung als auch durch die software-technische Umsetzung bedingt, die einzig wahrnehmbare statische Umgebungsvariable. Da sich das Fahrzeug jedoch unmittelbar an den strukturellen Elementen der Fahrbahn orientiert, ist deren robuste Erfassung ein wichtiger Bestandteil der Perzeption (Kapitel 4.2.1.2). Eine weitere Hauptaufgabe besteht zum anderen in der robusten Erfassung der Verkehrsteilnehmer und deren physikalischen Eigenschaften (Kapitel 4.2.1.3).

4.2.1.1 Sensoreigenschaften

Die Sensoren zur maschinellen Wahrnehmung, welche im Versuchsträger verbaut sind, wurden bereits in Kapitel 3.3.1 näher beschrieben. An dieser Stelle sollen diese Sensorsysteme nun gegenüber gestellt werden und die Vor- und Nachteile sowie die Notwendigkeit einer Fusion diskutiert werden. Die charakteristischen Eigenschaften der verwendeten Sensorsysteme zur maschinellen Wahrnehmung sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Charakteristische Merkmale der verbauten Sensoren (vgl. [164])

Sensor	Radar	Bildverarbeitung	Lidar
Reichweite	++	+	0
Öffnungswinkel	-	+	++
Objektstand	+ (Nahbereich 0)	0	++
Objektgeschwindigkeit	++	nicht messbar	nicht messbar
Objektbreite	nicht messbar	++	++
Objektlänge	nicht messbar	nicht messbar	+ (*)
Objekthöhe	nicht messbar	+	nicht messbar

* abhängig vom Betrachtungswinkel

Aus der Gegenüberstellung der drei Sensorsysteme wird deutlich, dass für eine umfassende Umfeldwahrnehmung ein einzelner Sensor nicht ausreichend ist. Um der in Kapitel 4.1.2.1 geforderten Eigenschaft der Wahrnehmbarkeit der Situation weitmöglichst nachzukommen, müssen die Sensoren daher in einer Art kombiniert werden, dass die positiven Eigenschaften des einen Sensors die negativen Aspekte eines anderen Sensors kompensieren.

4.2.1.2 Erfassung der Fahrspur

Eine weitere Anforderung der Situationsbeschreibung besteht gemäß Kapitel 4.1.2.2 in der robusten Erkennung der Fahrspuren als einzig sensoruell erfassbarer Bestandteil der Umweltbedingungen. Diese Information ist nicht nur essentiell für die automatische Fahrzeugführung, sondern auch für die Situationsanalyse von besonderem Interesse. Um eine sinnvolle Bewertung der Verkehrsteilnehmer vornehmen zu können, ist die Kenntnis von deren relativer Lage zum eigenen Fahrschlauch nötig.

Es gibt dabei unterschiedliche Möglichkeiten, um Informationen über die Topologie der Straße zu erhalten. Neben hochauflösenden digitalen Karten lassen sich visuelle Verfahren und auf der Fahrdynamik beruhende Methoden unterscheiden. Vor allem die Methoden der Fahrschlauchprädiktion, die auf den Fahrdynamikdaten des eigenen Fahrzeugs beruhen, werden bereits in ACC-Systemen verwendet.

Im Versuchsträger soll die Fahrspurprädiktion primär mittels der Daten des in Kapitel 3.3.1.3 vorgestellten Bildverarbeitungssystems durchgeführt werden. Dieses bietet den Vorteil einer gewissen Vorausschauweite und beschreibt daher auch das zukünftige Straßenkrümmungsverhalten, wohingegen eine Prädiktion auf Basis von fahrdynamischen Größen lediglich den aktuellen Zeitpunkt beschreibt. Bei einem geringen Konfidenzmaß oder einem Ausfall der Bildverarbeitung wird die Fahrspurprädiktion jedoch auf Basis fahrdynamischer Größen fortgeführt und die Situationsanalyse damit aufrecht erhalten.

4.2.1.3 Erfassung von Verkehrsteilnehmern

In diesem Abschnitt werden die Struktur und das Verhalten des Algorithmus, der die Daten der Sensorik fusioniert, diskutiert. Der Ansatz verwendet eine Fusion auf Merkmalsebene, da sich diese am besten für die Kombination der heterogenen Sensoren des Versuchsträgers eignet. Die Sensorsysteme Radar, Lidar und Bildverarbeitung sind vollkommen eigenständig und führen sensornah ihre eigene Datenverarbeitung zur Erzeugung der Merkmalsvektoren durch. Die Fusion erfolgt somit für ein hybrides Sensornetzwerk, welches die teilweise komplementären und redundanten Erfassungsbereiche der Sensoren bei der Fusion berücksichtigen muss.

Das Vorgehen orientiert sich weniger an den üblichen Vorteilen einer Sensordatenfusion, welche zumeist der Ausnutzung redundanter Daten zur Verbesserung der Qualität der Messung dient. Der Fokus liegt vor allem auf dem Produkt der Fusion, einer einheitlichen, konsistenten Darstellung der Umgebung und ihrer Objekte. Denn nur die Ausnutzung aller drei Sensorsysteme zur maschinellen Wahrnehmung ermöglicht durch den resultierenden aufgeweiteten Erfassungsbereich eine umfassende Übersicht der Fahrszene. Erst dadurch wird ein ausreichendes Maß an Daten über andere Verkehrsteilnehmer detektierbar, welches für weitere Analyse- und Interpretationsstufen unabdingbar ist. Eine einfache Superposition der Objektdaten ist in diesem Fall aber nicht zielführend, da sich die Erfassungsbereiche von Radar und Lidar überschneiden. Die Hinzunahme der Bildverarbeitung führt zusätzlich zu einer weiteren Überlagerung, so dass eine Superposition darin mündet, dass einem physischen Objekt der realen Welt ein bis drei gemessene Objektdatensätze gegenüberstehen. Da nachfolgende Verarbeitungsstufen jedoch eine exakte Szenenbeschreibung erfordern, ist es zwingend notwendig, dass jeder reale Verkehrsteilnehmer eindeutig durch ein Objekt

repräsentiert wird. Der eingesetzte Fusionsalgorithmus erfüllt genannte Kriterien und wird im Folgenden anhand der Darstellung in Bild 14 erläutert.

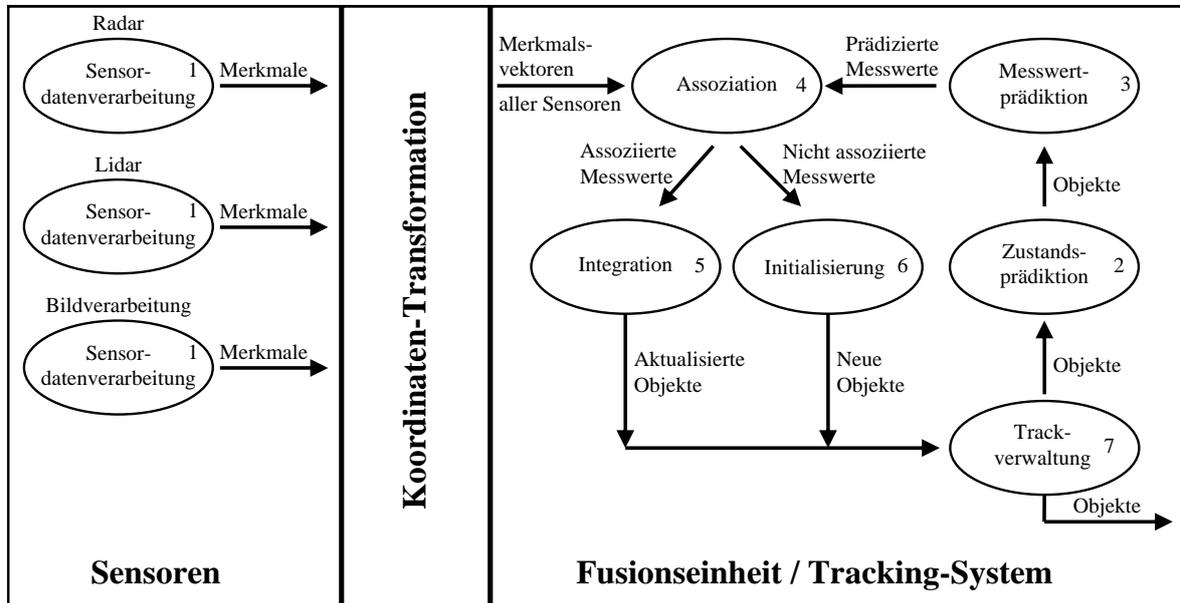


Bild 14: Abläufe in einem Sensornetzwerk bei einer Sensordatenfusion auf Merkmalsebene (vgl. [164, S. 17]).

Zu Beginn jedes Zeitschrittes erfolgt die Sensordatenverarbeitung unabhängig voneinander in allen drei Sensorsystemen, welche jeweils einen eigenen individuellen Merkmalsvektor erstellen. Da die Fusion bei der bearbeiteten Problemstellung hauptsächlich die geometrischen Komponenten der Merkmalsvektoren kombiniert, also die relative Entfernung der Objekte längs und quer zur eigenen Fahrzeugachse, folgt auf die Sensordatenverarbeitung eine Transformation auf ein einheitliches fahrzeugfestes Koordinatensystem. Per Konvention wird das sensorinterne Koordinatensystem des Radars als das Referenz-Koordinatensystem festgelegt.

Die Objekte aus dem vorangegangenen Zeitschritt werden mittels Zustandsprädiktion auf den aktuellen Zeitschritt abgebildet. Als Tracking-Algorithmen können dazu unterschiedliche Filter, wie Varianten des Kalman-Filters oder Partikel-Filter, verwendet werden (vgl. [164, S. 24ff.]). Aufgrund dessen, dass die Fusion rein als Grundlage für eine einheitliche, konsistente Umgebungsbeschreibung dient, wurde sich für stationäre Kalman-Filter entschieden. Kalman-Filter stellen einen guten Kompromiss bezüglich Rechenzeit und Datenmenge dar. Dies ist besonders im Hinblick auf die echtzeitfähige Ausführung der Algorithmen im Versuchsträger relevant, da für jedes detektierte Objekt ein eigenständiges Filter aufgesetzt werden muss.

Nach der Zustandsprädiktion wird der prädizierte Zustand auf die Messwerte abgebildet. Dies ist erforderlich, wenn der Zustandsraum und der Merkmalsraum differieren, etwa, wenn nur die Position gemessen wird, aber der Zustandsvektor die Position und die Geschwindigkeit beinhaltet. Dieser Schritt entfällt jedoch, da auch die Lidarsensoren und die Bildverarbeitung zu ihren Objekten neben der Position die Quer- und Längsgeschwindigkeiten ausgeben.

Diese Informationen werden von den Sensoren zwar nicht direkt gemessen, lassen sich aber trotzdem im Assoziationsverfahren berücksichtigen.

Durch die anschließende Assoziation wird bestimmt, ob die neuen Messwerte einem prädierten Objekt zugeordnet werden können. Nur die assoziierten Messwerte werden zur Aktualisierung der Objekte verwendet. Die nicht assoziierten Messwerte initialisieren neue Objekte. Prinzipiell kann man die Assoziation aus zwei Teilschritten zusammensetzen. Zunächst muss mit Hilfe von Suchbereichen ein Zuordnungskriterium zwischen Messwert und Prädiktion definiert werden und anschließend kann über ein Zuweisungsverfahren bestimmt werden, welche Zuordnungen für ein gewähltes Gütekriterium optimal sind (vgl. [164, S. 46ff.]).

Ziel des Zuordnungskriteriums durch Suchbereiche ist es, dass unwahrscheinliche Zuordnungen bereits frühzeitig ausgeschlossen werden, um Unplausibilitäten zu vermeiden und den Rechenaufwand für die Optimierung im Zuweisungsverfahren zu verringern. Mit Hinblick auf die bereits für die Zustandsprädiktion gemachten Einschränkungen bezüglich der Komplexität des implementierten Fusionsalgorithmus werden Suchbereiche mit konstanter Größe verwendet, da diese in ihrer Handhabung wesentlich einfacher und weniger rechenintensiv sind als statistische Abstandsmaße. Bei klar strukturierten Umgebungen wie dem zu Grunde liegenden Autobahnzenario und gut abschätzbaren Sensorunsicherheiten kann mit den konstanten Suchbereichen eine gute Qualität der Fusion erreicht werden. Für die geometrische Zuordnung werden dazu elliptische Bereiche verwendet. Für diese Suchbereiche wird ein elliptisches Abstandsmaß zwischen dem i -ten Messwert und der j -ten Prädiktion definiert:

$$d_{ij} = \frac{(x_i - x_j)^2}{K_x^2} + \frac{(y_i - y_j)^2}{K_y^2} \quad (1)$$

Die Positionen sind in x - und y -Richtung des fahrzeugfesten Koordinatensystems angegeben, K_x und K_y sind die konstanten Halbachsen des elliptischen Suchbereichs. Falls d_{ij} kleiner oder gleich eins ist, liegt der i -te Messwert im Suchbereich um die j -te Prädiktion (vgl. [19, S. 34ff.]).

Nach der Aufstellung von Zuordnungshypothesen durch die Suchbereiche muss ein Zuweisungsverfahren die optimalen Zuordnungen bestimmen. Dazu wird im Allgemeinen ein Gütefunktional oder eine Kostenfunktion aufgestellt und maximiert respektive minimiert. Für diese Arbeit wurde unter dem Aspekt der Rechenkomplexität auf ein Optimierungsverfahren verzichtet und stattdessen ein suboptimaler Ein-Nachbar-Algorithmus in der Art eines iterativen Nearest Neighbour Algorithmus implementiert. Die Kombination mit der vorherigen Zuordnung über Suchbereiche hat bei einem Ein-Nachbar-Verfahren den Vorteil, dass dieses nur angewendet werden muss, wenn die Zuordnung über die Suchbereiche nicht bereits eindeutig ist (vgl. [19, S. 40ff.]). Nur bei mehrfachen Zuordnungshypothesen sucht der Nearest Neighbour Algorithmus iterativ für jeden Messwert nach dem kleinsten Abstand zu einer Prädiktion und weist den Messwert dieser Prädiktion zu. Als Abstandsmaß wird das bereits definierte elliptische Abstandsmaß d_{ij} verwendet (vgl. Bild 15).

Falls weiterhin mehrere Messwerte einer Prädiktion zugeordnet sind, wird von dem Vorgehen des Nearest Neighbour Algorithmus abgewichen und nicht mehr nur das Abstandsmaß interpretiert. Stattdessen entscheidet eine Logik über die geeignete Zuweisung, wobei unter Zuhilfenahme von zusätzlichen Gütekriterien entschieden wird, welche Messwerte zur Zustandsschätzung verwendet werden sollen.

Als Gütekriterien dienen der wahrnehmende Sensor und der aktuelle Erfassungszustand. Beim Sensorkriterium wird zum Beispiel der Radar aufgrund der durch das physikalische Messprinzip höheren Genauigkeit gegenüber der Bildverarbeitung bevorzugt. Durch den aktuellen Erfassungszustand wird der Umstand berücksichtigt, dass die Sensoren bei der internen Sensordatenverarbeitung bereits ein Tracking der Messwerte vornehmen und bei kurzzeitigem Verlust des Messobjektes einen prädizierten Messwert ausgeben. Die Logik berücksichtigt diese Prädiktion der Sensoren in der Art, dass ein vom Sensor gemessener Wert einem prädizierten vorzuziehen ist, auch wenn der prädizierte Messwert näher an der Prädiktion liegt als der eigentliche Messwert.

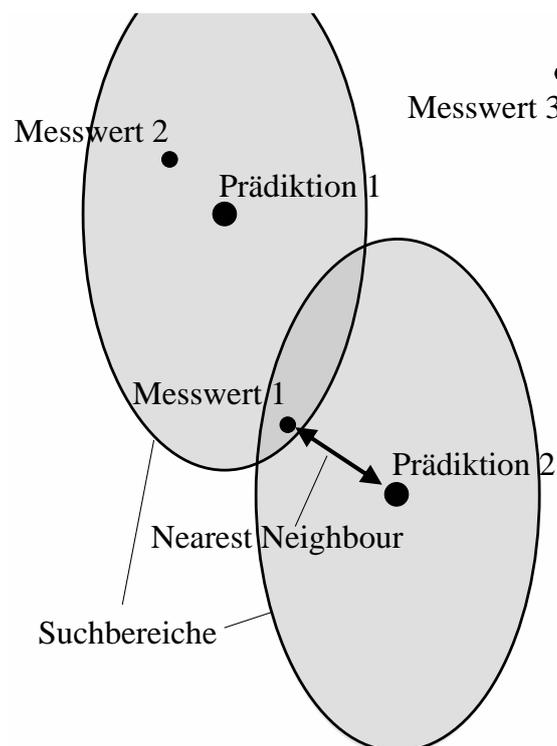


Bild 15: Konfliktsituation bei der Assoziation von Messwerten

Die nächste Verarbeitungsstufe, die Integration, führt ein prädiziertes Objekt fort. Dazu werden die in der Assoziation zugewiesenen Messwerte in ein Kalman-Filter geführt. Dieses Filter dient gleichzeitig dem Tracking Algorithmus, so dass einerseits ein aktualisierter gefilterter Messwert für den aktuellen Zeitschritt und andererseits eine Prädiktion für den nächsten Zeitschritt berechnet werden. Zusätzlich werden bei der Integration die Messwerte auf den Zustandsvektor erweitert, falls sich dieser nicht im selben Merkmalsraum befindet. Diese Erweiterung der Messwerte entspricht einer Umkehrung des Schrittes zur Messwertprädiktion.

Alle Messwerte, die mit keinem prädizierten Objekt assoziiert werden konnten, initialisieren ein neues Objekt. Dazu wird ein neues Kalman-Filter aufgesetzt, wobei bereits im ersten Zeitschritt berücksichtigt wird, dass auch mehrere nicht assoziierte Objekte ein gemeinsames neues Objekt initialisieren können. Dieser Vorgang wird durch teilweise paralleles Ausführen von Initialisierung und Assoziation erreicht.

Aufgabe der Trackverwaltung ist die Organisation der gefundenen Objekte. Hauptsächlich müssen dazu nicht bestätigte Objekte entfernt und sich überlagernde Objekte zusammengefasst werden. Objekte, die in einem Zeitschritt keine assoziierten Messwerte erhalten, werden allerdings nicht direkt verworfen, sondern erst noch eine definierte Anzahl an Zeitschritten prädiert, um kurzzeitige Ausfälle zu kompensieren. Die Trackverwaltung definiert somit diejenigen Objekte, die im nächsten Zeitschritt wiederum mit neuen Messwerten assoziiert werden (vgl. [164, S. 59f.]).

Die somit einheitlich erfassten Objektdaten werden mit der Spurprädiktion (vgl. Kapitel 4.2.1.2) kombiniert, wodurch jedes Objekt einem Fahrstreifen der Fahrbahn zugeordnet werden kann und entsprechende Eigenschaften, wie etwa Querablage, Entfernung oder Längs- und Quergeschwindigkeit, berechnet werden können. Ferner werden Objekte in das in Bild 16 dargestellte Positionsraster eingeordnet. Das Positionsraster stellt eine Sortierung der Verkehrsobjekte unter rein geometrischen Gesichtspunkten dar, bei der grundsätzlich drei Bereiche unterschieden werden, in denen sich Fremdfahrzeuge befinden können: hinter, neben und vor dem Ego-Fahrzeug.

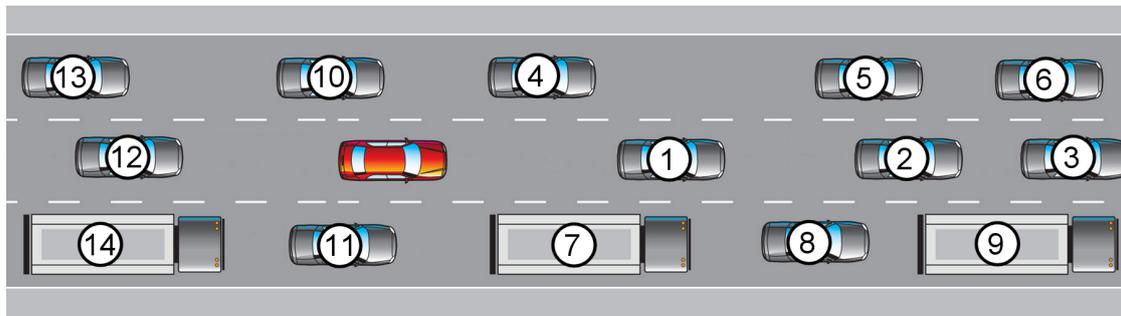


Bild 16: Positionsraster für die aktuelle Verkehrsszene um das Ego-Fahrzeug (rot)

Dadurch konnten alle geforderten Eigenschaften zur Beschreibung von Verkehrsteilnehmern gemäß Kapitel 4.1.2.3 abgebildet werden. Somit sind alle perceptiven Situationsaspekte berücksichtigt.

4.2.2 Identifikation des Fahrverhaltens auf Manöverebene

Dieses Kapitel widmet sich der algorithmischen Umsetzungen der prädiktiven Anforderungen an die Situationsanalyse (vgl. Kapitel 4.1.3 und Bild 13). Dazu werden in Kapitel 4.2.2.1 zunächst diejenigen charakteristischen Handlungsmerkmale der Verkehrsteilnehmer identifiziert, aus denen Elementaraktionen und schließlich Fahrmanöver generiert werden können. Die dadurch ermittelten aktuellen Teilpläne der jeweiligen Objekte bilden jedoch nur einen sehr kurzfristigen Zeithorizont ab und beinhalten keine Aussagen über das zukünftige Verhalten. Sie können jedoch als handlungsvorbereitende Maßnahmen für eine Planprädiktion herangezogen werden (Kapitel 4.2.2.2) und beziehen sowohl Handlungsalternativen als auch den Einfluss externer Faktoren auf das eigene Verhalten mit ein. Letztendlich werden in Kapitel 4.2.2.3 die zu erwartenden Konsequenzen der Handlungen auf ihr Verkehrskonfliktpotential hin untersucht.

4.2.2.1 Fahrmanövererkennung mit Hidden Markov Models

Bei der Manöverprädiktion soll die aktuelle Verkehrssituation mittels der im Fahrzeug vorhandenen Sensorik in der Art analysiert werden, dass bevorstehende Fahrmanöver anderer Verkehrsteilnehmer frühzeitig erkannt werden können. Dazu wird zunächst eine Hierarchie von potentiellen Manövern ermittelt, welche von anderen Verkehrsteilnehmern durchgeführt werden können und welche durch charakteristische Merkmale differenzierbar sind. Auf dieser Basis werden anschließend sogenannte „Hidden Markov Models“ modelliert. Die Manöverhierarchie und die Hidden Markov Models werden schließlich zu einem hybriden Gesamtmodell kombiniert. Anschließend werden Möglichkeiten diskutiert, die entwickelten Hidden Markov Models mit realen Fahrszenen zu trainieren. Am Ende dieser Sektion werden die Ergebnisse der vorgestellten Methode zur Manöverprädiktion anhand einer beispielhaften Fahrszene aufgezeigt.

Identifikation von Fahrmanövern

Als Manöver wird im Folgenden eine Sequenz von mehreren Elementaraktionen bezeichnet. Die Verkehrsszene wird dazu in unterschiedlichen Abstraktionsebenen dargestellt. Ein großer Teil des Verhaltensrepertoires der Teilnehmer des Straßenverkehrs kann durch eine endliche Anzahl an Manövern beschrieben werden, wenn man die Manöver von einer quantitativen auf eine qualitative Ebene abstrahiert und aus Elementaraktionen kombiniert (vgl. [192, S. 34]).

Es kann davon ausgegangen werden, dass der Fahrer bei der Fahrzeugführung die zwei Freiheitsgrade der ebenen Bewegung frei nutzen kann, womit die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs entkoppelte Systeme darstellen. Dadurch können die Längsregelung (die Regelung der Fahrgeschwindigkeit) und die Querregelung (das Führen entlang einer Trajektorie) unterschieden werden (vgl. [192, S. 44f.]). Die Definition von Manövern der Längs- und Querdynamik stellt somit eine parallele Dekomposition dar. Im Folgenden werden nun die unterschiedlichen Teilmanöver in den Bereichen der Längs- und Querdynamik identifiziert.

Im Allgemeinen gibt es zwei grundsätzliche Manöver, die ein Fahrer hinsichtlich der Längsdynamik des Fahrzeuges durchführt. Zum einen kann er sich, wenn es die Gegebenheiten der Verkehrssituation zulassen und er nicht durch andere, vorausfahrende Fahrzeuge beeinflusst wird, frei auf der Fahrbahn fortbewegen und somit seine Wunschgeschwindigkeit einstellen respektive auf seine Wunschgeschwindigkeit beschleunigen. Diese Fahrsituation wird als „freie Fahrt“ bezeichnet. Wenn die Verkehrsdichte hingegen zunimmt, wird das Verhalten des Fahrers zunehmend von den vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern beeinflusst. Dadurch kann die eigene Wunschgeschwindigkeit unter Umständen nicht mehr erreicht werden, vielmehr müssen die notwendigen Sicherheitsabstände zum vorausfahrenden Fahrzeug eingestellt und gehalten werden. Das durchgeführte Teilmanöver entspricht dann dem Folgen eines Führungsfahrzeuges und wird als „Folgefahrt“ bezeichnet (vgl. [55, S. 6ff.]). Ferner existiert eine Übergangsphase zwischen der „freien Fahrt“ und der „Folgefahrt“. Diese ist durch ein Annähern an ein vorausfahrendes Fahrzeug oder das Zurückfallen lassen gekennzeichnet.

Die Teilmanöver der Längsdynamik haben einen exklusiven Charakter und können daher nicht gleichzeitig auftreten, sondern nur nacheinander. Damit bilden die Längsdynamik-Manöver eine alternative Spezialisierung in der Manöverhierarchie.

Die Teilmanöver der Längsdynamik müssen nun weiter abstrahiert werden, so dass sie sich aus Elementaraktionen zusammensetzen. Elementaraktionen sollen hierbei die kleinsten Einheiten in der Manöverhierarchie darstellen. Damit die Manöverhierarchie sinnvoll im Zuge der Manövererkennung verwendet werden kann, werden folgende Anforderungen an die Elementaraktionen gestellt: Zunächst müssen die Elementaraktionen als solche durch die vorhandene Sensorik am Fahrzeug detektierbar und vor allem unterscheidbar sein. Ferner sollen Elementaraktionen den Zustand des betreffenden Verkehrsteilnehmers charakterisieren, dabei erhalten sie diesen Zustand entweder aufrecht oder sie führen ihn herbei (vgl. [192, S. 43ff.]). Im Folgenden sollen nun zu der alternativen Spezialisierung der Längsdynamik-Manöver entsprechende Elementaraktionen identifiziert werden, welche die oben genannten Anforderungen erfüllen (vgl. Bild 17).

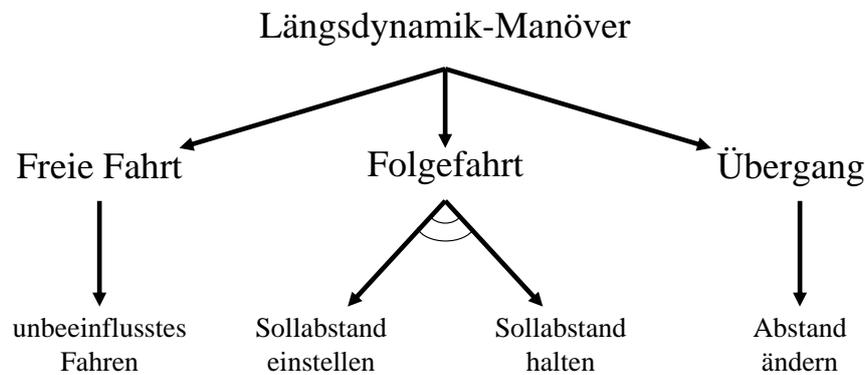


Bild 17: Elementaraktionen für Manöver der Längsdynamik.

Bei der „freien Fahrt“ wird die Elementaraktion bereits per Definition festgelegt. Da die „freie Fahrt“ als Fahrzustand beschrieben wird, der von anderen vorausfahrenden Verkehrsteilnehmern unbeeinflusst ist, wird die Elementaraktion als „unbeeinflusstes Fahren“ bezeichnet.

Die „Folgefahrt“ ist dadurch gekennzeichnet, dass der Fahrer einem Führungsfahrzeug in einem definierten Abstand folgt. Wenn der Abstand mit Hilfe der Geschwindigkeit auf eine Zeitlücke normiert wird, dann variiert diese Zeitlücke eines Fahrers nur sehr leicht mit seiner gefahrenen Geschwindigkeit (vgl. [55, S. 49ff.]). Daher werden für die „Folgefahrt“ als Elementaraktionen „Sollabstand einstellen“ und „Sollabstand halten“ definiert. Erstere soll dabei berücksichtigen, dass generell über die gesamte Dauer des Fahrmanövers ein Abstand gewählt wird, der im Bereich eines Folgeabstandes liegt. Die zweite Elementaraktion beschreibt die Dynamik des Folgens, wobei kontinuierlich das Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverhalten an das Führungsfahrzeug angepasst wird.

Die Übergangssituation repräsentiert die Übergänge zwischen „freier Fahrt“ und „Folgefahrt“ sowie vice versa. Sie ist damit per Definition durch eine Änderung des Abstandes charakterisiert und erhält demnach die Elementaraktion „Abstand ändern“.

Analog zum Vorgehen bei den Manövern der Längsdynamik kann auch für die Querdynamik eine alternative Spezialisierung durchgeführt werden. Dazu wird das Verhalten des Verkehrsteilnehmers innerhalb seiner Spur betrachtet. Hierbei können die Teilmanöver „Spur

halten“ und „Spur wechseln“ unterschieden werden. Für diese Teilmanöver müssen nun wiederum entsprechende Elementaraktionen definiert werden, mit deren Hilfe sich die Teilmanöver beschreiben lassen.

Für den Spurwechsel werden in der vorliegenden Arbeit drei Elementaraktionen definiert, wie sie in ähnlicher Weise auch in den Modellen von ZELLER zur Planerkennung [192] und DAGLI zur Einscherer-Erkennung [31] verwendet werden: In dieser Arbeit wird eine sequentielle Dekomposition verwendet, bei welcher der Fahrer zuerst nach freiem Platz auf der Wunschspur sucht. Dieses wird durch die Elementaraktion „passende Lücke suchen“ abgebildet. Wenn eine akzeptable Lücke gefunden wurde, wird zunächst die Elementaraktion „Spurwechsel vorbereiten“ ausgeführt. Im weiteren Verlauf findet dann die Elementaraktion „Spurwechsel durchführen“ statt (vgl. Bild 18). Dabei endet der Spurwechsel mit dem mittleren Positionieren des Fahrzeugs in der neuen Spur.

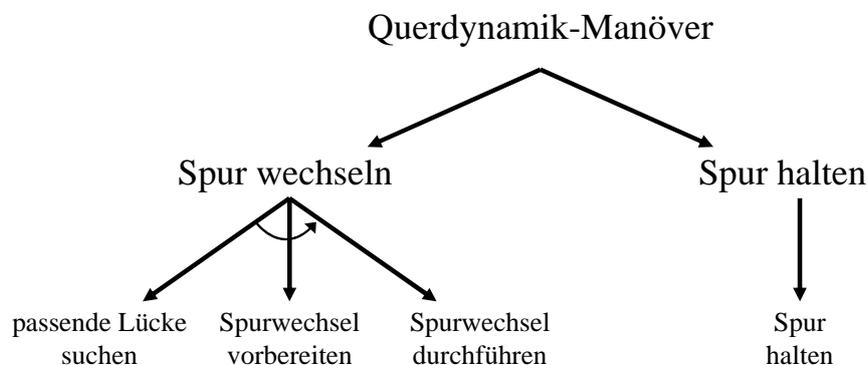


Bild 18: Elementaraktionen für Manöver der Querdynamik.

Da sich die Querdynamik-Manöver in lediglich zwei alternative Teilmanöver, „Spur wechseln“ und „Spur halten“, gliedern, folgt daraus, dass das Teilmanöver „Spur halten“ immer dann ausgeführt wird, wenn die Spur nicht gewechselt wird und vice versa.

Im folgenden Kapitel sollen nun Merkmale hergeleitet werden, mit Hilfe derer die definierten Elementaraktionen auf Basis der Sensordaten charakterisiert werden können.

Charakteristische Manövermerkmale

Zur Beschreibung einer Situation und möglicher Manöver eignen sich Zeitreserven für das vorgestellte Vorgehen besser als physikalische Messgrößen wie etwa Geschwindigkeiten oder relative Abstände. Zeitreserven haben den Vorteil, dass sie zumeist allgemein gültigere Aussagen liefern, da sie unabhängig von der aktuellen Geschwindigkeit sind. Dadurch lässt sich die Erkennung von Fahrmanövern deutlich einfacher und sinnvoller parametrieren, da die funktionale Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bereits eliminiert ist.

Die Zeitlücke (Time Gap, TG) zwischen dem eigenen und dem vorausfahrenden Fahrzeug ist eine in der Literatur weit verbreitete Größe, um den Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen unabhängig von der Geschwindigkeit beschreiben zu können. Den Hintergrund bildet die Annahme, dass der Abstand in vielen Fällen vom Fahrer proportional zur eigenen Geschwindigkeit gewählt wird (vgl. [57, S. 9ff.]). Diese statistischen Grundlagen über das Verhalten bei Folgefahrten können nun als Differenzierungsmerkmal zwischen den Elementaraktionen der

Längsdynamik-Manöver – „freie Fahrt“ und „Folgefahrt“ – verwendet werden. Somit wird die Zeitlücke als charakteristisches Merkmal für die Elementaraktionen „unbeeinflusstes Fahren“ und „Sollabstand einstellen“ definiert.

Ferner wurde in den Untersuchungen gezeigt, dass im Allgemeinen die gewählte Zeitlücke über der Geschwindigkeit nur wenig variiert. Die absolut eingestellte Zeitlücke ist zwar sehr stark vom individuellen Fahrer abhängig, diese wird dann aber relativ konstant über der Geschwindigkeit beibehalten (vgl. [55, S. 49ff.]). Daher kann davon ausgegangen werden, dass ein hoher Grad an Variation der Zeitlücke auf einen Übergang zwischen „Folgefahrt“ und „freier Fahrt“ oder vice versa schließen lässt. Die zeitliche Differentiation der Zeitlücke ist damit ein Kriterium für die Elementaraktion „Abstand ändern“. Gleichzeitig identifiziert die Veränderung der Zeitlücke auch die komplementäre Elementaraktion „Sollabstand halten“.

Damit die Manöver der Querdynamik näher untersucht werden können, soll ein Zeitmaß definiert werden, welches den Spurwechsel charakterisiert. Ziel der Beschreibung eines Spurwechsels muss die Detektion des Zeitpunktes sein, bei dem der betreffende Verkehrsteilnehmer seine ursprüngliche Spur verlässt und auf die Zielspur einschert. Als Zeitreserve für Spurwechsel soll in dieser Arbeit die Dauer bis zum Überfahren der Spurmarkierung verwendet werden. Diese wird im Allgemeinen als Time To Line Crossing (TLC) bezeichnet und wird in der Manövererkennung als das grundlegenden Zeitmaß für die Charakterisierung von Spurwechselvorgängen verwendet. Durch Falsifikation der Spurwechsel-Hypothese ist es auch möglich, das Spurhalten zu identifizieren.

Ein Zeitmaß, welches im Besonderen die Kritikalität einer Verkehrssituation repräsentiert, ist die Zeitreserve bis zu einer möglichen Kollision (Time To Collision, TTC). Die Time To Collision soll bei der Manövererkennung als charakteristische Größe für die Suche nach einer passenden Lücke beim Spurwechsel verwendet werden. Die Lücke sei in diesem Zusammenhang als derjenige Raum auf der Zielspur definiert, in den der Einscherer sein Fahrzeug manövrieren möchte. Wie bereits dargestellt, ist das Suchen nach einer geeigneten Lücke einer der Punkte beim Entscheidungsprozess zur Durchführung eines Spurwechsels. Demnach findet neben der lateralen Orientierung zu einer Lücke auch eine Anpassung der Längsdynamik an die Gegebenheiten der Zielspur statt. Die Anpassung der Geschwindigkeit an die Fahrzeuge der Zielspur beginnt zumeist bereits vor der Durchführung des Spurwechsels (vgl. [31, S.70ff.]).

Als einziges charakteristisches Merkmal für die Erkennung von Elementaraktionen, welches kein Zeitmaß ist, soll die Querablage der Fremdfahrzeuge berücksichtigt werden. Die Querablage ist definiert als der Abstand des detektierten Punktes am Objekt zur Prädiktion der Spur, auf der sich das Ego-Fahrzeug bewegt. Es ist ersichtlich, dass die Querablage somit im besonderen Maße von der Güte der Spurprädiktion abhängt. Die verwendeten Algorithmen zur Spurprädiktion werden in Kapitel 4.2.1.2 vorgestellt und in [66] detailliert ausgeführt.

Modellbildung der Hidden Markov Models

In diesem Abschnitt soll nun erläutert werden, wie die charakteristischen Merkmale in „Hidden Markov Modells“ als Beobachtungen implementiert werden können. Die Grundlagen der Theorie von Hidden Markov Models baut auf den Markov-Ketten auf und wurde in den 60er-Jahren von BAUM in mathematischen Fachzeitschriften veröffentlicht (vgl. [18] und [134]). Eine Markov-Kette ist ein Netzwerk aus Zuständen und Übergangswahrscheinlichkeiten.

Der Übergang zum Zustand im nächsten Zeitschritt wird im Allgemeinen durch die bedingte Wahrscheinlichkeit der vorangegangenen Zustände definiert. Bei Hidden Markov Models sind diese Zustände im Gegensatz zur Markov-Kette nicht beobachtbar, sondern jeder Zustand emittiert eine beobachtbare Größe, welche einer Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegt. Die Hidden Markov Models bilden sich grundsätzlich aus einer endlichen Anzahl an Zuständen, wobei diese zumeist direkt einer Elementaraktion respektive dem Teilaspekt einer Elementaraktion entsprechen. Je charakteristischem Merkmal wird ein individuelles Modell entwickelt, welches dieses Merkmal emittiert. Die Emission wird als normalverteilt angenommen und durch einen Erwartungswert und eine Varianz repräsentiert.

Wie bereits diskutiert, wird die Zeitlücke (TG) zum vorausfahrenden Fahrzeug als Merkmal für die längsdynamischen Elementaraktionen „unbeeinflusstes Fahren“ bei „freier Fahrt“ und „Sollabstand einstellen“ bei „Folgefahrt“ verwendet. Daher sollen diese beiden Elementaraktionen auch explizit als Zustände im Hidden Markov Model repräsentiert werden (vgl. Bild 19).

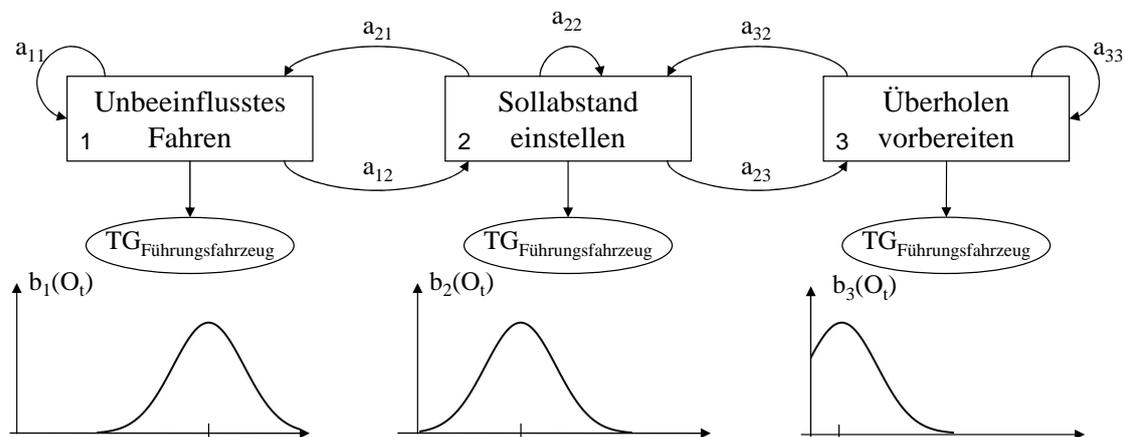


Bild 19: Hidden Markov Model für das Time Gap zum Führungsfahrzeug.

Ferner wurde bereits gezeigt, dass sich aus dem längsdynamischen Verhalten auch auf Motivationen für einen Spurwechsel schließen lässt. Dazu wird explizit der dritte Zustand „Überholen vorbereiten“ implementiert. Dieser soll für Zeitlücken gelten, welche die üblichen Zeitlücken bei einer „Folgefahrt“ unterschreiten. Daraus lässt sich eine Wahrscheinlichkeit ableiten, dass Vorbereitungen getroffen werden, um ein langsames Fahrzeug zu überholen.

Das zweite Hidden Markov Model emittiert die zeitliche Differentiation des Time Gap. Die Elementaraktion „Sollabstand halten“ wird explizit als zweiter Zustand im Hidden Markov Model repräsentiert. Dieser soll kleine, um null schwankende Werte der Veränderung der Zeitlücke ausgeben. Bei stärkeren Veränderungen der Zeitlücke kann das Hidden Markov Model entweder den Zustand „Abstand vergrößern“ oder „Abstand verkleinern“ einnehmen. Die Hidden Markov Models zu den Manövermerkmalen „Time To Line Crossing“, „Time To Collision in der Ziellücke“ sowie der „Querablage“ finden sich [66] wieder.

Hybrides Gesamtmodell

Bei der Modellierung der Manövererkennung auf Basis von Hidden Markov Models hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Komplexität der Struktur der Hidden Markov Models zu beschränken, weshalb jedem charakteristischen Merkmal der Manövererkennung ein individuelles Modell zugeordnet wird. Eine Alternative wäre gewesen, mehrere Merkmale zusammenzufassen und somit mehrere Größen durch ein Hidden Markov Model emittieren zu lassen. Infolgedessen hätte es möglich sein können, Elementaraktionen direkt durch Zustände im Hidden Markov Model zu repräsentieren. Das in dieser Arbeit dargestellte Vorgehen besitzt aber einige ausschlaggebende Vorteile, welche im Folgenden diskutiert werden sollen.

Als einen wichtigen Vorteil der vorgestellten verteilten Modellstruktur kann man konstituieren, dass diese Art von Modellen in der Literatur bereits grundlegend beschrieben ist und deshalb Algorithmen zur Evaluation, wie der Viterbi-Algorithmus [176] oder der Vorwärts-Rückwärts-Algorithmus (vgl. [135, S. 334ff.], Anwendung finden können. Da diese Algorithmen zumeist Optimierungsverfahren darstellen, wäre eine Adaption nicht ohne Weiteres möglich. Des Weiteren ist auch eine initiale Parametrierung der Modelle in der gewählten Struktur besser möglich, da die Emissionen der Modelle bekannte Größen sind, zu denen bereits zahlreiche empirische Daten erhoben wurden. Die Parametrierung ist auch vor dem Hintergrund des Trainings der Modelle entscheidend, da der Baum-Welch-Algorithmus die Parameter nur in der Art adaptiert, dass ein lokales Maximum gefunden wird. Die anfänglichen Parameter müssen demnach mindestens so gewählt werden, dass sie in der Nähe eines lokalen Maximums liegen, welches auch global eine annehmbare Lösung darstellt.

Die genannten Vorteile führen dazu, dass es sinnvoll erscheint, die charakteristischen Merkmale der Elementaraktionen jeweils auf Basis eines eigenständigen Hidden Markov Models zu untersuchen und die Modelle anschließend in einer hybriden Gesamtstruktur miteinander zu den Elementaraktionen und den Manövern zu koppeln. Die Verknüpfung entspricht den bereits dargestellten Abhängigkeiten zwischen den Elementaraktionen und den charakteristischen Manövermerkmalen.

Das Schema der hybriden Gesamtstruktur der Längsdynamik wird in Bild 20 veranschaulicht. Demnach werden die unterschiedlichen Modellierungsarten von den Hidden Markov Models und der Manöverhierarchie über die Ebene der Elementaraktionen kombiniert. Innerhalb der Elementaraktionen wird zusätzlich berücksichtigt, dass es gegenseitige Beeinflussungen zwischen Längs- und Querdynamik gibt.

Als Beispiel für die konkrete Kopplung sei die Kombination der Hidden Markov Models zur Bewertung des Längsdynamik-Manövers „Folgefahrt“ abgebildet. Dabei wird die Elementaraktion „Sollabstand einstellen“ durch die Zustände „Sollabstand einstellen“ und „Überholen vorbereiten“ des Hidden Markov Model für das Time Gap repräsentiert. Der Zustand „Überholen vorbereiten“ wird hauptsächlich für die Triggerung lateraler Manöver verwendet. Da dieser Zustand sehr kleine Zeitlücken zum Führungsfahrzeug emittiert, ist er im Hinblick auf die Längsdynamik am ehesten dem Manöver „Folgefahrt“ zuzuordnen. Somit setzt sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein Fahrzeug die Elementaraktion „Sollabstand einstellen“ durchführt, aus der Summe der Wahrscheinlichkeiten dieser beiden Zustände des Hidden Markov Model für das Time Gap zusammen.

Die Elementaraktion „Sollabstand halten“ wird direkt durch den zweiten Zustand des Hidden Markov Model für die Veränderung des Time Gap zum Führungsfahrzeug repräsentiert, womit die Wahrscheinlichkeit der Elementaraktion der des Zustandes entspricht. Die Gesamtwahrscheinlichkeit für das Manöver „Folgefahrt“ ist aufgrund der parallelen Dekomposition das Produkt der Wahrscheinlichkeiten der beiden Elementaraktionen.

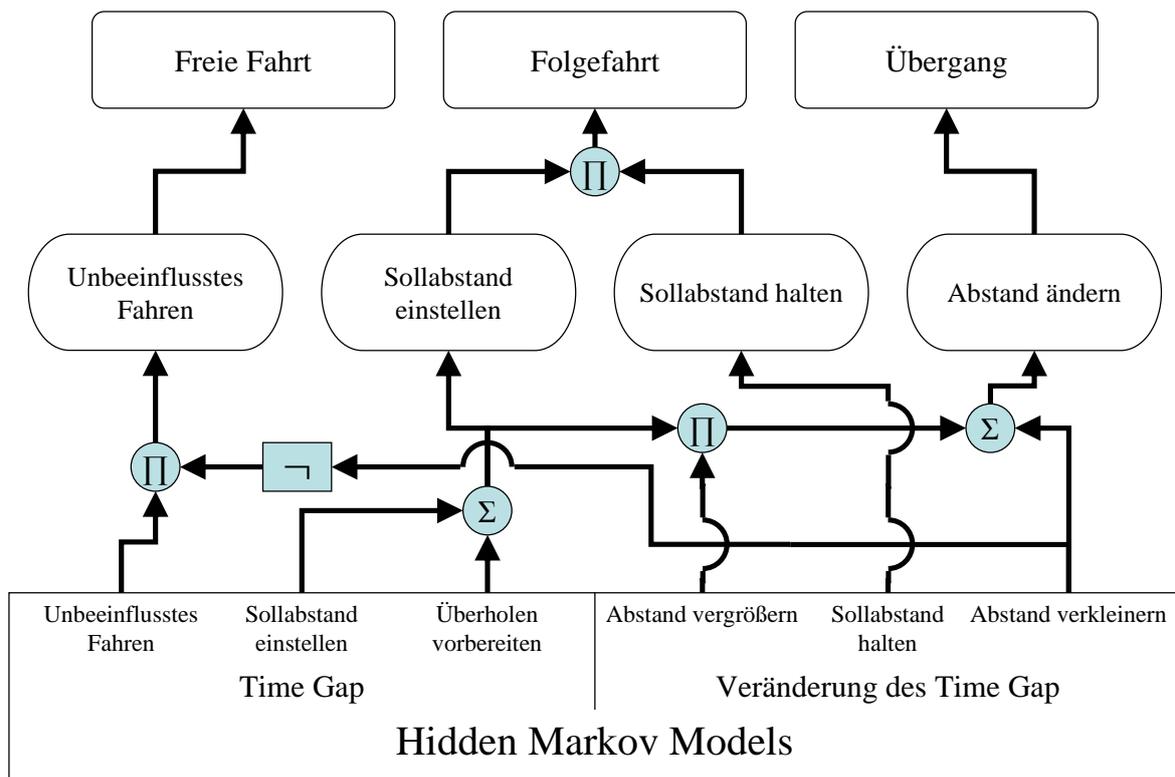


Bild 20: Hybrides Modell der Längsdynamik-Manöver: Die Zustandswahrscheinlichkeiten der Hidden Markov Models werden zunächst zu den Wahrscheinlichkeiten der Elementaraktionen durch Addition und Multiplikation kombiniert (\neg symbolisiert dabei die Komplementärwahrscheinlichkeit). Anschließend bilden sich die Manöver aus den Elementaraktionen.

Weiterhin veranschaulicht Bild 20 die Verknüpfung zu den Manövern „Freie Fahrt“ und „Übergang“. Dabei ist einerseits besonders zu beachten, dass bei „Freie Fahrt“ neben dem Time Gap ebenfalls dessen Veränderung berücksichtigt wird. Die Kombination bildet den Sonderfall ab, dass eine endliche Zeitlücke bei „Freie Fahrt“, die sich vergrößert, nicht als „Übergang“, sondern weiterhin als „Freie Fahrt“ deklariert wird. Andererseits soll angemerkt sein, dass die Verknüpfungen zum „Übergang“ respektive zur Elementaraktion „Abstand ändern“ nur der Vollständigkeit wegen dargestellt sind und sich der „Übergang“ auch als komplementäres Ereignis zu „Freie Fahrt“ und „Folgefahrt“ ausdrücken lässt.

Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird die Manövererkennung anhand einer Beispielszene – aufgezeichnet auf der Autobahn A9 nördlich von München – validiert. Den Ablauf der Fahrscene zeigt Bild 21.

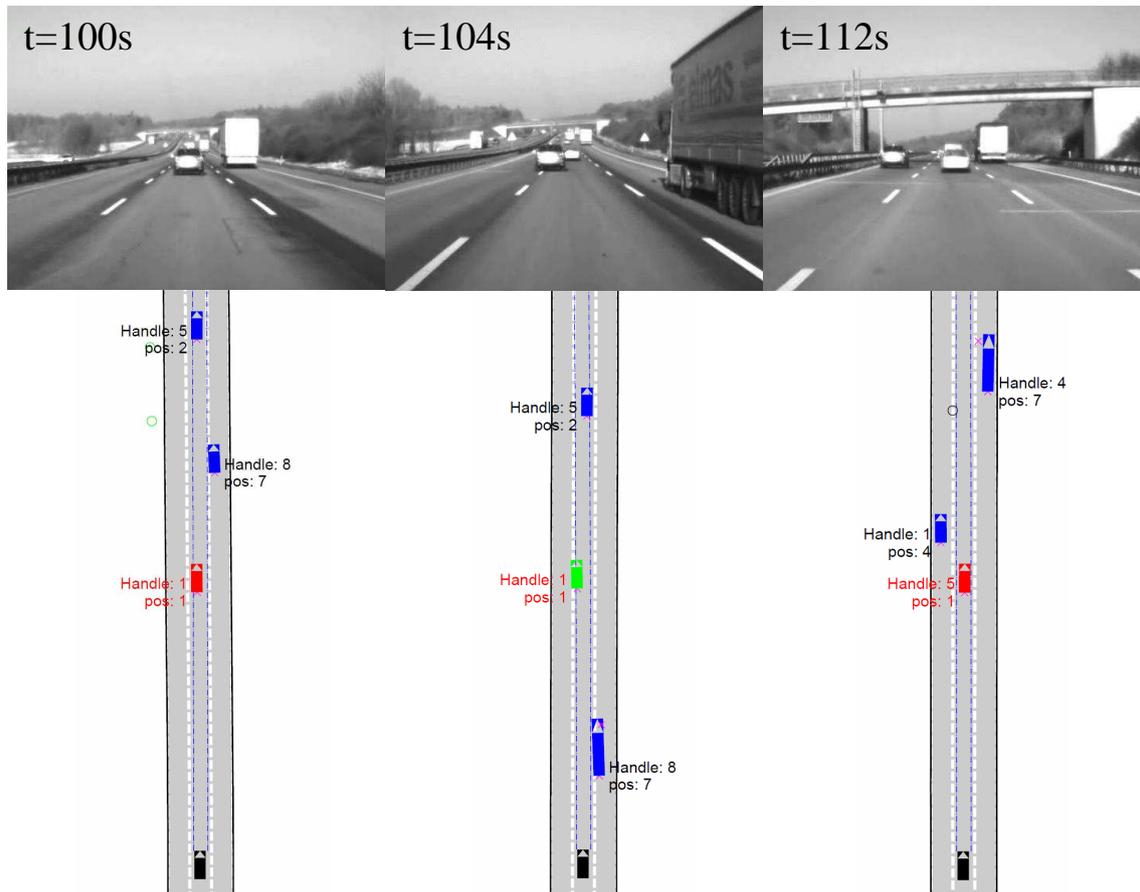


Bild 21: Aufgezeichnete Fahrscene des Spurwechsels eines Fremdfahrzeugs

In der ausgewählten Fahrscene fährt ein Fahrzeug mit dem Handle 1 vor dem als schwarze Fahrzeugsilhouette dargestellten Ego-Fahrzeug. Das Fahrzeug mit dem Handle 1 erhält zu Beginn der Fahrscene eine rote Fahrzeugsilhouette, welche das derzeitige Zielfahrzeug für die automatische Längsführung des Ego-Fahrzeugs anzeigt. Vor dem Fahrzeug mit dem Handle 1 fährt ein weiteres langsames Fahrzeug mit dem Handle 5. Im Laufe der Entwicklung der Fahrscene, wird sich Handle 1 an Handle 5 annähern, um dieses links zu überholen. Dieses Fahrmanöver von Handle 1, welches sowohl unterschiedliche Längsdynamik als auch Querdynamik-Manöver beinhaltet, soll im Folgenden durch den Algorithmus zur Manövererkennung beschrieben werden. Die Wahrscheinlichkeitsverläufe der Manöver und Teilmanöver werden in Bild 22 gezeigt.

Bezüglich der Längsdynamik befindet sich das Fahrzeug mit dem Handle 1 zunächst in der „freien Fahrt“, da kein vorausfahrendes Fahrzeug detektiert wird. Sobald ein Führungsfahrzeug vorhanden ist und im Hidden Markov Model für das Time Gap der Zustand „Folgefahrt“ wahrscheinlich wird, geschieht dieses auch im Gesamtmodell. Da das Time Gap

zum Führungsfahrzeug allerdings schnell kleiner wird, wird für die Veränderung des Time Gap der Zustand „Abstand verkleinern“ am wahrscheinlichsten, wodurch im Gesamtmodell die Wahrscheinlichkeit für den Übergangszustand ansteigt. Das Manöver „Übergang“ ist anschließend solange am wahrscheinlichsten, bis das Fahrzeug auf die leere linke Spur wechselt, so dass sich ab dem Zeitpunkt das Gesamtmodell wieder im Zustand „Freie Fahrt“ befindet.

Die Querdynamik zeichnet sich in dieser Szene zunächst dadurch aus, dass der Zustand „Spur halten“ am wahrscheinlichsten ist. Um in den Zustand „Spur wechseln“ zu kommen, muss zunächst die Lücke passen und anschließend müssen die Anzeichen für die Vorbereitung des Spurwechsels wahrscheinlich werden, bis die Wahrscheinlichkeit für „Spur wechseln“ ansteigt. In der ausgewählten Szene ist aber ein Sonderfall dargestellt, welcher durch das ausgeprägte längsdynamische Verhalten ermöglicht wird. Aufgrund dessen, dass sich das Fahrzeug mit dem Handle 1 rasch an das Führungsfahrzeug annähert und mit dem Ausscheren wartet bis die Zeitlücke ziemlich klein wird, kann angenommen werden, dass die Wahrscheinlichkeit des Spurwechsels mit der der passenden Lücke korreliert. Daher ist das Manöver „Spur wechseln“ bereits zum Zeitpunkt $t = 103.9\text{ s}$ signifikant wahrscheinlich. Ohne das ausgeprägte längsdynamische Verhalten wäre die Wahrscheinlichkeit des Spurwechsels erst mit der Time To Line Crossing angestiegen und das Querdynamik-Manöver hätte erst zum Zeitpunkt $t = 104.3\text{ s}$ erkannt werden können.

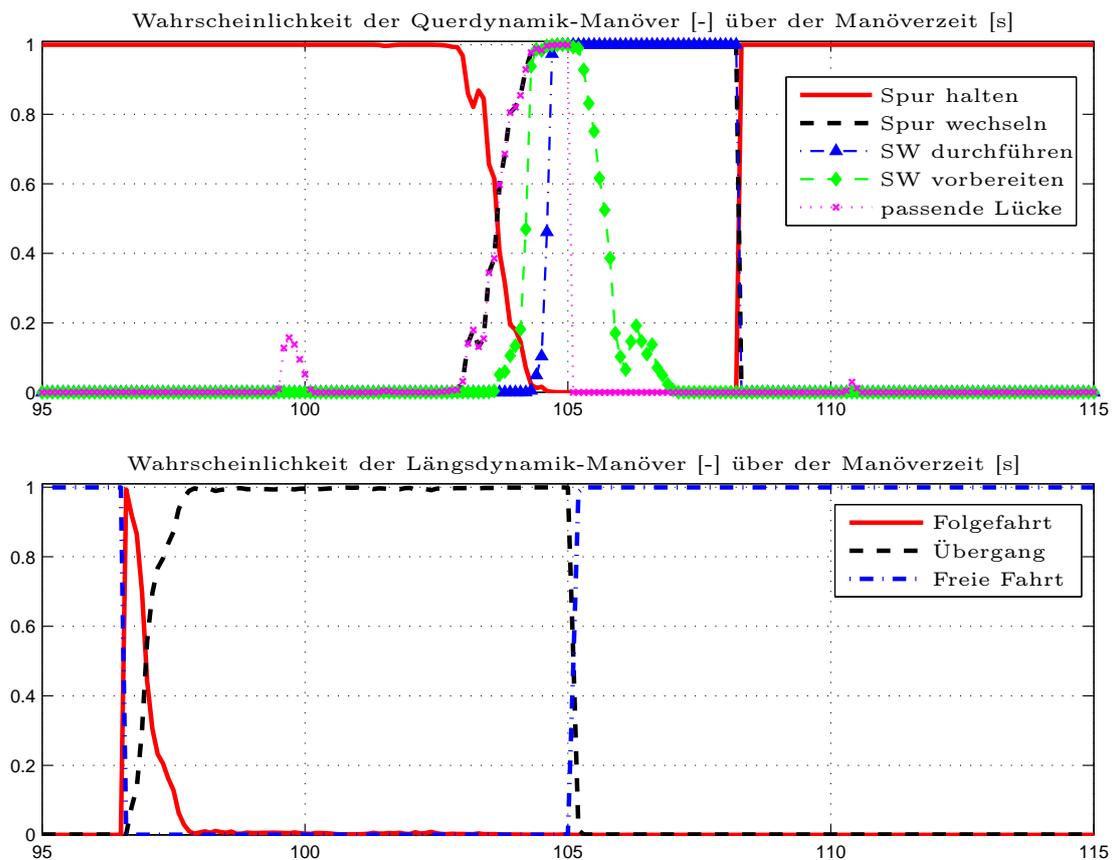


Bild 22: Manöver der Längs- und Querdynamik, evaluiert aus dem hybriden Gesamtmodell.

4.2.2.2 Erwartungsbasierte Planerkennung

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Erweiterung des vorhergehenden Konzeptes hinsichtlich des zeitlichen Horizonts. Durch die Identifikation des aktuell durchgeführten Fahrmanövers werden noch keine Aussagen über das zukünftige Verhalten des Handelnden getroffen. Betrachtet man die Manöver jedoch als Teilpläne bzw. handlungsvorbereitende Maßnahmen für einen übergeordneten Handlungsablauf, so wird basierend auf dem Konzept der Hidden Markov Models eine Planprädiktion ermöglicht. Der entwickelte Ansatz der erwartungsbasierten Planerkennung bezieht die von der Anforderungsanalyse geforderten Aspekte der Handlungsalternativen sowie den Einfluss externer Faktoren auf das eigene Verhalten mit ein (vgl. Kapitel 4.1.3.2) und wurde in [13, 67] dargestellt.

Konzept der Planerkennung

In der Literatur finden sich zwei speziell auf die Plan(konflikt)erkennung im (Land-)Straßenverkehr bezogene Konzepte von ZELLER [192] und MOCK-HECKER [116] wieder. Keines dieser Konzepte beschäftigte sich jedoch intensiv mit dem Umfeld Autobahn und mit der Nutzung realer Daten. Das hier gewählte Konzept unterscheidet sich daher in einigen Punkten von den Ansätzen aus ZELLER und MOCK-HECKER. Der wesentliche Unterschied ist der zeitliche Rahmen und die Komplexität der betrachteten Pläne. Während ZELLER und MOCK-HECKER langfristige und in sich abgeschlossene Pläne wie „Abbiegen“ und „Überholen“ nutzen, wurde im Rahmen dieser Arbeit auf solche Pläne verzichtet. Stattdessen geht die Planerkennung nicht über die Ebene der „Koordinierungsaktion“, wie sie in [192] beschrieben ist hinaus. Dies hat im Wesentlichen zwei Gründe.

Erstens ist es schwer im Bereich der Autobahn langfristige Pläne zu definieren. So ist im Allgemeinen die Dynamik auf Autobahnen deutlich höher als die auf einer Landstraße. Dies liegt zum einen an der höheren Anzahl an Objekten und zum anderen an den höheren Geschwindigkeiten. Dadurch ist es häufig der Fall, dass sich Objekte nur relativ kurze Zeit im Erfassungsbereich der Sensoren des autonomen Fahrzeugs befinden. Das Erkennen langfristiger Pläne wie Überholen ist hierbei sehr schwer realisierbar, da häufig keine in sich abgeschlossene Vorgänge (z.B. Beschleunigen – Ausscheren – Fahrzeug überholen – Einscheren) vorliegen, sondern nur Teile davon wahrgenommen werden können. Ein weiterer Unterschied zwischen Autobahn und Landstraße ist die höhere Anzahl von Spuren. Dadurch sind nicht nur einfache Spurwechsel möglich, sondern auch mehrfache.

Der zweite Grund besteht darin, dass eine derart langfristige Planung ohnehin meist nicht interessant ist, da Fahrzeuge oftmals nur wenige Sekunden im Bereich des eigenen Fahrzeugs verbleiben und somit die Ausführung späterer Aktionen für das Fahrverhalten des autonomen Fahrzeugs irrelevant sind. Viel interessanter ist hingegen die Abschätzung des aktuellen Verhaltens und der möglichen Aktionen innerhalb der nächsten Sekunden.

Das Konzept (vgl. Bild 23) beruht wie die bereits erwähnten Ansätze auf der Erkennung von Elementaraktionen und Fahrmanövern. Diese können direkt aus der Fahrmanövererkennung mit Hidden Markov Models aus Kapitel 4.2.2.1 übernommen werden. Hier werden aus den physikalischen Messdaten die Elementaraktionen generiert und aus diesen dann die Fahrmanöver zusammengesetzt.

Dadurch wird auf einer sehr einfachen und kurzfristigen Ebene der aktuelle Teilplan des jeweiligen Objekts ermittelt. Über das zukünftige Verhalten sagt dieser Teilplan allerdings noch relativ wenig aus. Die Zusammensetzung komplexerer Pläne aus dem Teilplan erfolgt nun durch die Planprädiktion. Mit Hilfe der Sensordaten wird hierbei versucht, auf verschiedenen Ebenen die Überlegungen der einzelnen Verkehrsteilnehmer nachzubilden. Dadurch lassen sich kurz- und mittelfristig (also etwa im Bereich der nächsten 0.1 bis 5 Sekunden) die künftigen Aktionen der anderen Verkehrsteilnehmer abschätzen.

Dafür werden neben einigen harten Zwangsbedingungen vor allem weiche Nebenbedingungen genutzt. Diese Randbedingungen fließen in sogenannte „Modifikatoren“ ein, die jeweils einen bestimmten abgegrenzten Bereich der Verkehrssituation widerspiegeln. Sie modifizieren die Übergangswahrscheinlichkeiten von erkannten auf nachfolgende Fahrmanöver, um den Einfluss der Interaktion mit anderen Objekten und der Umwelt in die Fahrverhaltensprädiktion zu integrieren.

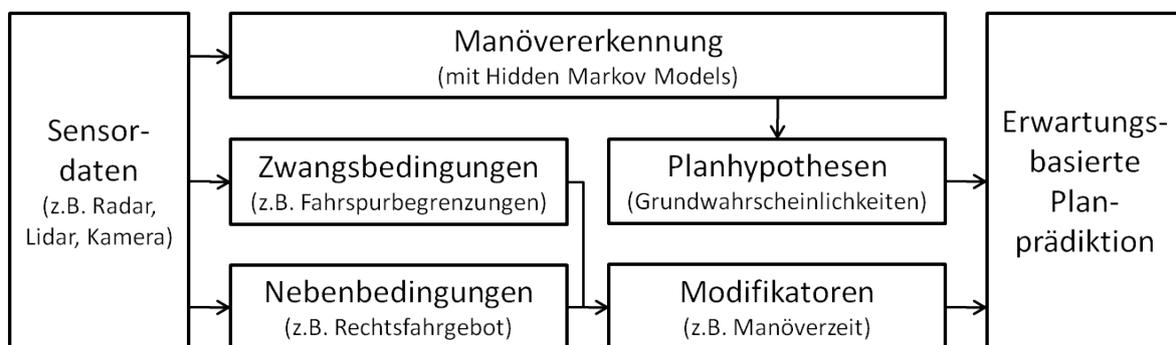


Bild 23: Konzept der Planerkennung

Die Planprädiktion ist somit eine Nachbildung der Einschätzung des Fahrverhaltens anderer Verkehrsteilnehmer durch den virtuellen Fahrer des eigenen Fahrzeugs. Diese beruht in der Realität auf den bisher im Verkehr vom Fahrer gemachten Erfahrungen und erzeugt situationsabhängig eine gewisse Erwartungshaltung bezüglich dem künftigen Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer. Damit verbunden ist immer eine gewisse Ungenauigkeit und die Möglichkeit von Fehleinschätzungen, die aber in der Realität auch vorliegt, insbesondere wenn es um die Einschätzung mehrdeutiger Situationen geht.

Planhypothesen

Durch die Aufbereitung der physikalischen Messdaten konnte das aktuelle Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer mit Hilfe der Methode der Hidden Markov Models in die leicht interpretierbare Form von Fahrmanövern eingeteilt werden. Diese Fahrmanöver müssen nun mit allgemeinen Erfahrungswerten und aktuellen Umwelt- und Objektdaten verknüpft werden, um eine Vorhersage über ein künftiges Verhalten zu ermöglichen. Die funktionale Umsetzung dieser Verknüpfung erfolgt durch die Bildung von Planhypothesen innerhalb derer die Grundwahrscheinlichkeiten für Übergänge von Fahrmanövern festgelegt werden. Die Planhypothese berücksichtigt das von einem „normalen“ Fahrer erwartete Fahrverhalten in einer

noch weitgehend von einer konkreten Verkehrslage unabhängigen Form. Lediglich das aktuell vom Fahrzeug durchgeführte Fahrmanöver wird für eine Klassifizierung verwendet.

Da die Grundwahrscheinlichkeiten sich nur auf das aktuell betrachtete Objekt, nicht aber auf dessen Interaktion mit anderen Objekten und der Umwelt beziehen, ist es notwendig diese Faktoren in einer weiteren Funktion zu berücksichtigen. Eine Anpassung der Grundwerte an die konkrete Verkehrssituation erfolgt durch die „Modifikatoren“ (vgl. Bild 23). Jeder Modifikator ist dafür auf einen speziellen Bereich der Interaktion mit dem Umfeld ausgelegt und beeinflusst die Grundwahrscheinlichkeit entsprechend. Berücksichtigt werden müssen die Umstände, dass nicht jedes Fahrmanöver beliebig in andere Fahrmanöver überführt werden kann und dass einige Fahrmanöver bevorzugt zu einem bestimmten anderen Fahrmanöver führen. Weiterhin muss auch noch die Möglichkeit betrachtet werden, dass das aktuell gefahrene Fahrmanöver im nächsten Zeitschritt beibehalten wird. Dies ist in der Regel sogar die wahrscheinlichere Alternative, insbesondere bei kontinuierlichen Manövern wie „Freie Fahrt“ oder „Folgefahrt“. Deshalb wird der Aufrechterhaltung eines Fahrmanövers grundsätzlich ein hoher Wert zugewiesen. Die Grundwahrscheinlichkeiten dieser Manöverübergänge finden sich in [13] wieder.

Modifikatoren von Übergangswahrscheinlichkeiten

Für eine Prädiktion des künftigen Fahrverhaltens der anderen Verkehrsteilnehmer reicht es nicht aus, nur deren momentane Fahrmanöver zu kennen. Diese müssen vielmehr untereinander und mit den Umfelddaten in einen Zusammenhang gebracht werden, um eine genaue Vorhersage zu ermöglichen. Diese Aufgabe übernehmen die bereits erwähnten Modifikatoren. Erst sie erlauben eine Anpassung an die konkrete Verkehrslage und stellen damit den Kern der Überlegungen dar. Der Grundgedanke hinter den Modifikatoren ist, dass erwartungsgemäß jeder Fahrer versucht, einen für ihn möglichst angenehmen und sicheren Fahrzustand einzunehmen. Dieser Fahrzustand ist zwar individuell vom Fahrertyp und der aktuellen Verkehrssituation abhängig, dennoch lassen sich drei Hauptfaktoren festlegen, um einen „optimalen“ Fahrzustand zu beschreiben. Diese sind ein möglichst geringer Zeitaufwand, ein möglichst geringer Regelungsaufwand und eine Fahrt mit möglichst geringem Risiko für den Fahrer. Hinzu kommt als weitere Motivation noch die Einhaltung von Verkehrsregeln, um nicht mit Bußgeldern oder Fahrverboten bestraft zu werden. Es gibt daher insgesamt vier Modifikatoren (sowie einen Sondermodifikator für Staufahrten), wovon jeder ein bestimmtes Teilgebiet der aktuellen Verkehrslage auswertet.

Der Modifikator „Richtgeschwindigkeit“ ist für die Anpassung der Grundwahrscheinlichkeiten entsprechend der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit zuständig. Dazu werden den einzelnen Fahrspuren charakteristische „Richtgeschwindigkeiten“ zugeordnet. Je nachdem wie hoch die aktuell gefahrene longitudinale Geschwindigkeit im Vergleich zum Richtwert ist und welches Fahrmanöver vom betreffenden Fahrzeug gerade ausgeführt wird, wird dann die Wahrscheinlichkeit für die künftigen Fahrmanöver modifiziert. Der Modifikator verändert die Wahrscheinlichkeiten dabei umso stärker, je weiter die Geschwindigkeiten vom Richtwert entfernt sind.

Der Modifikator „Distanz und Relativgeschwindigkeit“ betrachtet das Zusammenspiel der jeweils direkt hintereinander fahrenden Fahrzeuge sowie deren Abstand und Relativgeschwindigkeit zueinander. Die von WIEDEMANN [187] entwickelten Formeln für den minimal noch als

sicher empfundenen Abstand und den Maximalabstand für die Fahrfahrt dienen in Kombination mit der Betrachtung der Relativgeschwindigkeit zum Interaktionspartner als Grundlage zur Einteilung von Bereichen, welche einen Einfluss auf das Fahrverhalten des Folgefahrzeugs aufweisen können. Je nach Höhe der Bereichskritikalität wird der Fahrer des Folgefahrzeugs versuchen, einen sichereren und angenehmeren Zustand zu erreichen. Dies kann entweder durch eine Abstandsvergrößerung oder einen Spurwechsel erfolgen.

Der Modifikator „Manöverzeit“ analysiert die zeitlichen Aspekte bei über längere Zeiträume hinweg durchgeführten Fahrmanövern. Dadurch wird der Tatsache Rechnung getragen, dass manche Fahrmanöver eine bestimmte (wenn auch variable) Dauer besitzen, während andere im Prinzip beliebig lange aufrecht erhalten werden können, solange sich die Situation nicht entsprechend ändert. Zu Letzteren gehören die Fahrmanöver „Freie Fahrt“ und „Fahrfahrt“. Ist der aktuelle Fahrzustand für den Fahrer angenehm, so ist anzunehmen, dass diese Fahrmanöver möglichst lange aufrecht erhalten werden. Im Gegensatz dazu haben Spurwechsel eine begrenzte Dauer, die durch das Erreichen der Nachbarspur gekennzeichnet ist. Ein einfaches Spurwechselmodell zur Abschätzung der Manöverzeit wurde implementiert, so dass eine Modifikation der Wahrscheinlichkeiten bei bereits begonnenem Manöver mit fortschreitender Zeit ermöglicht wird.

Der Modifikator „gegenseitige Beeinflussung und sonstige Faktoren“ untersucht die Einflüsse, die durch die gegenseitige Wechselwirkung zwischen den Fahrmanövern verschiedener Fahrzeuge entstehen sowie einige spezielle Einflussfaktoren wie das Rechtsfahrgebot. Bei den bisherigen Modifikatoren wurde davon ausgegangen, dass die Fahrer der einzelnen Fahrzeuge nur die aktuellen Fahrzustände der anderen Fahrzeuge erkennen können und damit ihr Verhalten planen. In der Realität wird bei der Planung aber nicht nur das aktuelle Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer berücksichtigt, sondern zusätzlich versucht, die Pläne der anderen Fahrer abzuschätzen. Dabei werden die unterschiedlichen Planhypothesen aller erfassten Fahrzeuge auf Plausibilität untersucht und so mögliche Plankonflikte frühzeitig identifiziert. Dies betrifft vor allem die Beeinflussung durch Ein- bzw. Ausscherer. So z. B. erhöht der Spurwechsel eines Vorderfahrzeuges die Wahrscheinlichkeit der „Freifahrt“ für den Nachfolgenden.

Neben der Beeinflussung durch die Fahrmanöver anderer Fahrer sind im Modifikator noch zwei weitere Funktionalitäten integriert. Es handelt sich hierbei um die Betrachtung der Spurfreiheit und um das Rechtsfahrgebot. Die Funktion zur „Spurfreiheit“ betrachtet die Änderung der Wahrscheinlichkeit für Spurwechsel, abhängig vom Vorhandensein einer entsprechenden Lücke auf den Nachbarspuren. Normalerweise wird ein Fahrer nur dann auf die Nachbarspur wechseln, wenn dort auch eine entsprechende Lücke vorhanden ist, in die er sich einordnen kann. Die Funktion zum Rechtsfahrgebot berücksichtigt die gesetzlichen Vorschriften, die normalerweise ein Befahren einer möglichst weit rechts liegenden Spur vorschreiben, wo dies möglich ist. Befindet sich das Fahrzeug also in einer Freien Fahrt und ist die Spur rechts vom Fahrzeug frei, so wird die Wahrscheinlichkeit für einen Spurwechsel nach rechts entsprechend erhöht.

Alle Modifikatoren werden abschließend gewichtet in einem Gesamtmodifikator gebündelt. Widerspricht eine Parameterkonstellation der Durchführung eines bestimmten Fahrmanövers, so wird die Wahrscheinlichkeit für dieses Fahrmanöver gesenkt. Sprechen die Parameter für das Fahrmanöver, so wird die Wahrscheinlichkeit für die zukünftige Durchführung dieses Fahrmanövers erhöht. Ein starker Widerspruch schließt dabei die Durchführung eines Fahrmanövers allerdings genauso wenig aus, wie eine starke Übereinstimmung

zwangsläufig zu einer Durchführung des Fahrmanövers führt. Erst die Summe der Grundwahrscheinlichkeit und der Modifikatoren legt fest, welche nachfolgenden Fahrmanöver besonders wahrscheinlich bzw. unwahrscheinlich sind.

Ergebnisse

Der erarbeitete Ansatz der erwartungsbasierten Planerkennung transferiert die Erkenntnisse der Arbeiten von ZELLER und MOCK-HECKER auf den Diskursbereich Autobahn. Eine situative Anpassung der Übergangswahrscheinlichkeiten und somit der gesamten Planerkennung an die konkrete Verkehrslage konnte jedoch erst mit Hilfe der neu eingeführten Modifikatoren erreicht werden.

Die Ergebnisse der Methode zur erwartungsbasierten Planerkennung sollen wiederum an der bereits in Bild 21 vorgestellten Fahrscene aufgezeigt werden. Hier nähert sich das Fahrzeug mit dem Handle 1 schnell dem langsameren Fahrzeug mit dem Handle 5 und überholt dieses schließlich. Dabei wird ein spezielles Augenmerk auf die Erkennung des Spurwechsels des Fahrzeuges mit dem Handle 1 gelegt. Die alleinige Verwendung des probabilistischen Ansatzes aus Kapitel 4.2.2.1 erlaubt eine Erkennung des Manövers zum Zeitpunkt $t = 103.9\text{ s}$ (vgl. Bild 24).

Durch die Erweiterung des Ansatzes mit Planhypothesen und der Einbeziehung von Randbedingungen mit Modifikatoren konnte der Prädiktionshorizont vor allem bei Spurwechselmanövern stark vergrößert werden. Der Spurwechsel wird bereits zum Zeitpunkt $t = 96.7\text{ s}$ als wahrscheinlichstes nächstes Fahrmanöver prädiziert, obwohl das Fahrzeug die Spurmarkierung erst acht Sekunden später bei $t = 105.1\text{ s}$ überfährt. Dieses Beispiel zeigt das Potential des Ansatzes, der die Verkehrsszene aus einer antizipierenden und erwartungsbasierten Perspektive betrachtet.

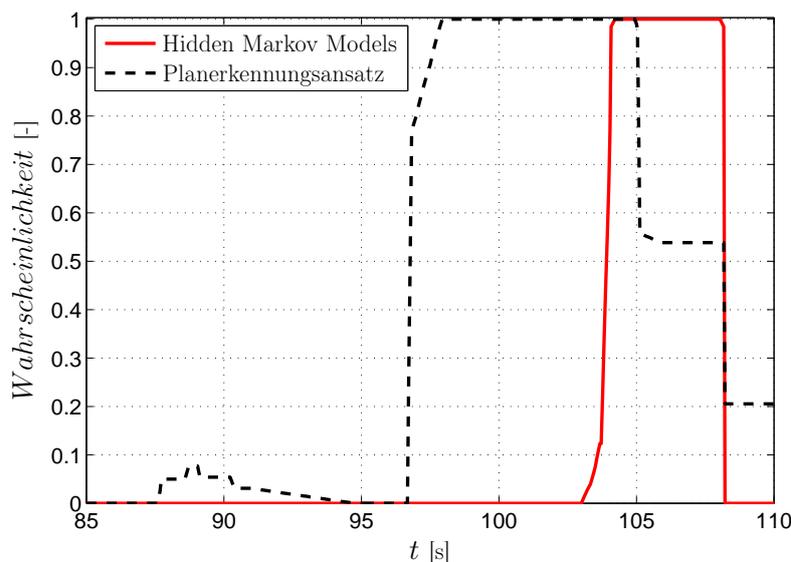


Bild 24: Vergleich der Spurwechselprädiktion mit Hidden Markov Models und mit Planerkennungsansatz

4.2.2.3 Analyse von Verkehrskonfliktwahrscheinlichkeiten

Zur Berücksichtigung der von der Anforderungsanalyse extrahierten Eigenschaften der Klasse „Handlungskonflikt“ gemäß Kapitel 4.1.3.3 wird im Folgenden ein situationsbasierter Ansatz vorgestellt, der es ermöglichen soll, die Konfliktwahrscheinlichkeit einer Verkehrssituation als negative Konsequenz von Fehlhandlungen zu werten.

Der traditionelle Ansatz zur Bewertung von Unfallwahrscheinlichkeiten in verschiedenen Verkehrssituationen sieht die Auswertung von Unfallstatistiken vor. Die Fachserie 8 der Reihe 7 „Verkehrsunfälle“ des statistischen Bundesamts [25] bietet einen umfassenden Überblick über das Unfallgeschehen auf deutschen Straßen unterteilt nach Unfalltypen gemäß dem bereits in Kapitel 2.3 vorgestellten Karlsruher Unfalltypenkatalog. Ist nun die Gesamtanzahl von Unfällen einer (Unter-)Kategorie sowie die durchschnittliche Auftretenshäufigkeit der zugehörigen Verkehrssituation bekannt, kann man auf eine Auftretenswahrscheinlichkeit eines Unfalls je nach Verkehrssituation schließen. Mit Hilfe einer vorgeschalteten Situationsklassifizierung könnte dann die Unfallwahrscheinlichkeit situationsabhängig bestimmt werden. Dieser Ansatz erscheint zunächst vielversprechend, greift aber zu kurz. Würde nämlich anhand dieser Daten die Unfallwahrscheinlichkeit einer Verkehrssituation bestimmt, wäre diese im selben Kontext immer gleich hoch und somit gleichverteilt auf die Gesamtanzahl einer Verkehrssituation. In der Realität ist die Unfallwahrscheinlichkeit aber nicht gleichverteilt, sondern ändert sich mit den genauen Umständen der Situation mitunter sehr stark. Somit wird klar, dass eine fallspezifische Beurteilung vonnöten ist, die die Aspekte der Situation mit einbezieht.

Nachfolgend wird daher ein Ansatz basierend auf dem Fehlerbaumkonzept nach REICHART [138] vorgestellt, dem die Entstehung verschiedener Unfalltypen und damit die einzelnen notwendigen Fehlhandlungen zum Eintritt eines Unfalls zu Grunde liegen.

Konzept der Fehlerbaumanalyse

Um Fehlhandlungen identifizieren zu können, wird zunächst für verschiedene Fahrsituationen ein normatives Sollverhalten aufgestellt. Das Sollverhalten orientiert sich dabei an Kriterien wie gesetzlichen Vorschriften, sozial akzeptiertem Verhalten oder inhärenten technischen und physikalischen Eigenschaften von Kraftfahrzeugen. In einem zweiten Schritt werden Fehlhandlungen mit booleschen Verknüpfungen zu Fehlerbäumen kombiniert. Diese beschreiben, welche Fehlhandlungen zusammenspielen müssen, damit ein Verkehrskonflikt eintritt. Motivation hinter der Verwendung von Fehlerbäumen ist, mit bekannten Eintrittswahrscheinlichkeiten der Einzelereignisse die Gesamtwahrscheinlichkeit für ein Eintreten des Verkehrskonflikts berechnen zu können. Es sei darauf hingewiesen, dass REICHART für den Begriff „Unfalltyp“ synonym den Begriff „Verkehrskonflikt“ (VK) verwendet. Dieser soll im Weiteren benutzt werden.

Wie aus der Betrachtung der Unfallzahlen aus der amtlichen Statistik [25] klar hervorgeht, entstehen auf Autobahnen mit Abstand am häufigsten Unfälle aus den Verkehrskonflikten „Fahrerunfall“ und „Unfall im Längsverkehr“. Somit ist es zweckmäßig, sich bei der Bewertung der Unfallwahrscheinlichkeit zunächst auf diese beiden Hauptkategorien zu konzentrieren. Dabei beschreibt der Unfalltyp des Fahrerunfalls all jene Unfälle, die durch einen Kontrollverlust über das Fahrzeug durch eine unangepasste Geschwindigkeit entstehen. Aus Sicht des Moduls der Situationsanalyse ist dieser Unfalltyp irrelevant, da die Module zur Festlegung

der Sollgeschwindigkeit des autonomen Fahrzeugs einer konservativen Auslegung folgen. Weiterhin ist davon auszugehen, dass durch die robuste Auslegung der Quer- und Längsregelung des autonomen Fahrzeugs Unfälle dieser Art, die hauptsächlich auf überhöhter Geschwindigkeit, ungeeigneten Lenkmanövern oder Unaufmerksamkeit basieren, nahezu ausgeschlossen sind. Darüber hinaus kann, beispielsweise im Falle einer verringerten Bodenhaftung, die Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Verkehrskonflikts derzeit nicht auf Basis der am Fahrzeug gemessenen Daten bewertet werden und ist somit einer fallspezifischen Risikoabschätzung nicht zugänglich.

Tabelle 3: Von REICHART [138] untersuchte Verkehrskonflikte (VK) des Unfalltyps 6

Unfalltyp 6: Unfälle im Längsverkehr	Typennummer nach [138]	Typennummer aktuell [1]
Vorausfahrender-Nachfolgender	VK 611	60
Auffahren auf Stauende	VK 621	61
Spurwechsel	VK 631	63/64
Überholer-Gegenverkehr	VK 651	66

REICHART untersuchte in der Kategorie „Unfall im Längsverkehr“ vier verschiedene Verkehrskonflikte (siehe Tabelle 3). Es sei darauf hingewiesen, dass die von REICHART verwendeten Bezeichnungen der Untertypen nicht mehr konform zur aktuellen Fassung des Karlsruher Unfalltypenkatalogs [1] sind. Um Verwechslungen vorzubeugen, sollen sie aber in dieser Arbeit weiter benutzt werden. Von vornherein nicht beachtet wird VK 651, der den Verkehrskonflikt eines überholenden Fahrzeugs mit Gegenverkehr beschreibt, da dieser Fall für die Autobahnfahrt ausgeschlossen wird. VK 621 stellt den Verkehrskonflikt des Auffahrens auf ein Stauende dar. Dieser im Kontext der Autobahn durchaus relevante Fall konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht gesondert betrachtet werden, da die perceptiven Module der Situationsanalyse mit den zur Verfügung stehenden Sensoren eine derartige Situation nicht robust detektieren können. VK 611 beschreibt den Verkehrskonflikt eines vorausfahrenden mit einem nachfolgenden Fahrzeug. Dieser Fall ist ein typischer Verkehrskonflikt der aus der Situation „Folgefahrt“ entsteht und somit in die Risikopotentialabschätzung Eingang findet. VK 631 ist der typische Verkehrskonflikt, der aus der Fahrsituation „Spurwechsel“ mit Konfliktpartnern auf der Zielspur entsteht. Auch dieser Fall wurde umgesetzt.

Nachdem die relevanten Hauptkategorien für Verkehrskonflikte bei der Autobahnfahrt untersucht wurden, zeigt sich, dass sich für den vorliegenden Fall die für die Klassifizierung relevanten Verkehrssituationen auf die Folgefahrt und den Spurwechsel mit den zugehörigen Konflikttypen VK 611 und VK 631 beschränken. Trotz der auf den ersten Blick geringen Flexibilität bei nur zwei gegebenen Situationen erscheint eine Aufteilung auf diese beiden Haupttypen in erster Näherung durchaus sinnvoll. Betrachtet man die typische Autobahnfahrt mit Fremdverkehr in der unmittelbaren Umgebung, so wird man sich die meiste Zeit in der Folgefahrt befinden, sei es aktiv als folgendes oder passiv als vorausfahrendes Fahrzeug. Wechselt Fremdverkehr auf die eigene Fahrspur oder wird selbst aktiv die Spur gewechselt, liegt dagegen die Situation „Spurwechsel“ vor. Auch einscherende Autos an Auffahrten oder Fahrzeuge, die Hindernissen ausweichen und aus diesem Grund auf die Ego-Fahrspur wechseln, können in erster Näherung als „Spurwechsel“ behandelt werden.

Wird nun bei der Situationsklassifizierung eine Folgefahrt oder ein Spurwechsel erkannt, kann der entsprechende Fehlerbaum ausgewählt und die Unfallwahrscheinlichkeit anhand von Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten bestimmt werden. Zur Interpretation von Fehlhandlungen werden die Distanzmaße Time Gap (TG), Time To Collision (TTC), Time To Brake (TTB) und Time To Accelerate (TTA) verwendet. Die TTB gibt an, wann mit einem Bremsmanöver bei maximaler Verzögerung a_{max} begonnen werden muss, um eine Kollision gerade noch zu verhindern. Äquivalent zur TTB gibt die TTA an, wann mit einem Beschleunigungsvorgang bei maximaler Beschleunigung a_{max} begonnen werden muss, um einer Kollision mit schnellerem nachfolgendem Verkehr zu entgehen. Dieses Abstandsmaß ist relevant beim Wechsel des Egos auf eine Zielspur, auf der sich von hinten ein schnelles Fremdfahrzeug nähert.

Das Wissen über die qualitative Entstehung aus den Fehlerbäumen soll anhand der im Versuchsträger verfügbaren Messdaten überprüft und so die Eintrittswahrscheinlichkeit – ständig aktualisiert – abgeschätzt werden. Aus diesem Grund muss die Fehlerbaumanalyse für die Anwendung in Echtzeit adaptiert werden.

Adaptierung der Fehlerbäume

Zunächst muss ein Ansatz gefunden werden, um eine Aussage über die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Elements des Fehlerbaums treffen zu können. REICHART gibt feste Grenzwerte an, ab wann ein Fehler oder ein Situationsmerkmal eingetreten ist. Würde allerdings der bloße Eintritt der Elemente des Fehlerbaums überprüft, würde dies für die Echtzeitberechnung bedeuten, dass nur binär zwischen Vorliegen ($p_{VK} = 1$) oder Nicht-Vorliegen ($p_{VK} = 0$) eines Konfliktfalls unterschieden werden kann. Um nun einen kontinuierlichen Verlauf der Konfliktwahrscheinlichkeit zu erhalten, wird der Ansatz in der vorliegenden Arbeit dahingehend modifiziert, dass relativ formulierte Elemente des Fehlerbaums, wie z.B. „zu geringer Abstand“ oder „starke Verzögerung“, je nach Nähe zum Grenzwert gewichtet werden.

Beispielsweise liegt nach REICHART der Fehler K9 „zu geringer Abstand“ für den Konflikt VK611 „Vorausfahrender/Nachfolgender“ genau dann vor, wenn die Time Gap (TG) 0.5 s unterschreitet. Entsprechend soll nun die Eintrittswahrscheinlichkeit mit sinkendem TG steigen, bis sie den Grenzwert überschritten hat, das Element K9 als eingetreten gilt und mit der Wahrscheinlichkeit $p_{K9} = 1$ bewertet wird. Dagegen werden harte Situationsmerkmale, wie das Vorhandensein eines überholenden Fahrzeugs bei VK631 „Spurwechsel“, in einer bloßen Fallunterscheidung nach zutreffend und unzutreffend unterschieden.

Weiterhin ergibt sich eine Problematik aus der Tatsache, dass nicht bei allen Situationsmerkmalen und Fehlerarten eine Aussage über das Eintreffen gemacht werden kann, da eine entsprechende Messtechnik oder Datenverarbeitung im Versuchsträger nicht umgesetzt ist. Zu nennen wären hier beispielsweise Aussagen über den Kraftschluss oder die Sichtweite. Diese Elemente werden in der Arbeit nicht weiter berücksichtigt und fließen somit nicht in die Berechnung der Konfliktwahrscheinlichkeit mit ein. Sie könnten aber im Falle einer Erweiterung der Messtechnik durchaus implementiert werden.

Im Folgenden soll nun die Adaptierung und Implementierung des Fehlerbaumes für den Konflikt VK 611 erläutert werden. Für die Ausführungen und Ergebnisse zum Verkehrskonflikt VK 631 Spurwechsel sei auf [165] verwiesen.

Tabelle 4: Elemente des Fehlerbaums VK611 Konflikt „Vorausfahrender/Nachfolgender“ [138]

Nummer des Elements	Situation (S) bzw. Fehlerart (F)
K1	kein Ausweichen/Überholen (S)
K2	geringe Sichtweite (S)
K3	keine Anpassung der Geschwindigkeit an Sichtverhältnisse (F)
K4	Kraftschluss gering (S)
K5	keine Anpassung der Geschwindigkeit (F)
K6	zu spätes Bremsen (F)
K7	Fehlbeurteilung der notw. Verzögerung (F)
K8	Ablenkung/Abwendung (F)
K9	zu geringer Abstand (F)
K10	Überschätzung des Bremsvermögens (F)
K11	Überschätzung des Reaktionsvermögens (F)
K12	stärkere Verzögerung des Vorausfahrenden (S)

In Tabelle 4 sind die einzelnen Elemente des vollständigen Fehlerbaums für den Verkehrskonflikt VK611 aufgeführt, wobei hier zwischen Situation (S) und Fehlerart (F) unterschieden wird. Wie vorangehend beschrieben, müssen zunächst die Elemente K1 bis K12 auf ihre Überprüfbarkeit hin untersucht werden. Die Berechnung der Eintrittswahrscheinlichkeit des Konflikts beschränkt sich auf die überprüfbaren Elemente und somit auf einen reduzierten Fehlerbaum.

Zunächst werden die Situationsmerkmale K1, K2, K4 und K12 untersucht. Nachvollziehbarerweise ist K1 „kein Ausweichen/Überholen“ Grundvoraussetzung für das Eintreten einer Kollision mit einem vorausfahrenden Fahrzeug, weshalb es mit allen übrigen Elementen über ein logisches UND verknüpft ist. Solange sich das Ego-Fahrzeug in der Situation „Folgefahrt“ befindet, kann davon ausgegangen werden, dass kein Ausweichen oder Überholen stattfindet. Andernfalls würde ein Spurwechsel vorliegen und von der Situationsklassifizierung als solcher erkannt werden.

Dagegen können K2 „geringe Sichtweite“ und K4 „Kraftschluss gering“ aufgrund der gegenwärtig implementierten Sensorik und Datenverarbeitung nicht überprüft werden. Die im Versuchsträger eingesetzten Algorithmen der Bildverarbeitung (vgl. Kapitel 3.3.1.3) sind nicht in der Lage, Aussagen zur Sichtweite aus dem Bild zu extrahieren. Diese Informationen könnten jedoch mit Hilfe von Car2Infrastructure-Technologien aus den Daten der stationären Messanlagen für Nebeldichte am Fahrbahnrand übertragen werden. Weiterhin wären zur durchgängigen Ermittlung des Kraftschlusses aufwendige technische Verfahren (z.B. in Form spezieller Messräder) notwendig, welche im Versuchsträger jedoch nicht zur Anwendung kamen. K12 „stärkere Verzögerung des Vorausfahrenden“ kann dagegen überprüft werden, da die Beschleunigung des Fremdverkehrs erfasst wird. Für die Berechnung der Gesamteintrittswahrscheinlichkeit werden folglich die Situationsmerkmale K1 und K12 herangezogen.

Bei der Überprüfung der Fehlerarten werden zunächst diejenigen ignoriert, die mit einem nicht überprüfbaren Situationsmerkmal über ein logisches UND verknüpft sind, da ein nicht überprüfbares Element mit der Eintrittswahrscheinlichkeit $p_{Kx} = 0$ versehen wird. Folglich werden die Elemente K3 und K5 hinfällig. Die Kriterien für K6 „zu spätes Bremsen“ und K9 „zu geringer Abstand“ können bewertet werden. Da über die restlichen Fehlerarten K7, K8, K10 und K11 keine Aussage gemacht werden kann, werden sie ignoriert. Es bleiben also K6 und K9, die als Fehlerarten in die Berechnung für den Verkehrskonflikt VK611 mit einfließen.

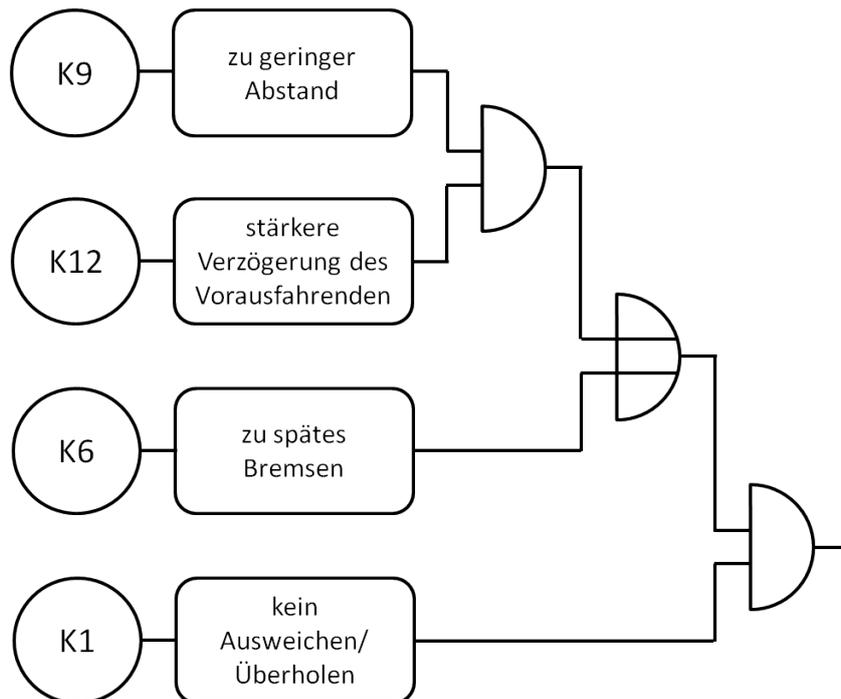


Bild 25: Reduzierter Fehlerbaum Vorausfahrender/Nachfolgender (VK611) [138]

Bild 25 zeigt den aus der Überprüfung der Elemente entstandenen reduzierten Fehlerbaum. Im Folgenden soll auf die Berechnung der einzelnen Wahrscheinlichkeiten eingegangen werden:

K9 „zu geringer Abstand“: Wie bereits erwähnt, wird Element K9 über das Zeitmaß Time Gap (TG) bewertet. Nach REICHART ist der Abstand für $TG < 0.5\text{ s}$ zu gering und damit die Fehlerwahrscheinlichkeit $p_{K9}(TG \leq 0.5\text{ s}) = 1$. Als zweite Intervallgrenze wurde eine TG von 2.5 s mit $p_{K9}(TG \geq 2.5\text{ s}) = 0$ gewählt. Die Wahrscheinlichkeit zwischen den beiden Intervallgrenzen fällt linear ab.

K12 „stärkere Verzögerung des Vorausfahrenden“: Nach REICHART gilt eine Verzögerung $a_{obj} \leq -2\text{ m/s}^2$ als eine stärkere Verzögerung und damit $p_{K12}(a_{obj} \leq -2\text{ m/s}^2) = 1$. Als zweite Grenze wurde der Nullpunkt gewählt, da bei geringem Abstand jegliche Verzögerung des Vorausfahrenden bereits eine Gefahr darstellt. Damit lautet die Situationswahrscheinlichkeit für diese Stützstelle $p_{K12}(a_{obj} \geq 0\text{ m/s}^2) = 0$. Sie weist einen linearen Verlauf zwischen den beiden Stützstellen auf. Da aus der Situationsanalyse die relative Verzögerung zum Ego-Fahrzeug bekannt ist, wird diese als Grundlage für die Berechnung genutzt.

K6 „zu spätes Bremsen“: Um das Element K6 bewerten zu können, wird das Zeitmaß Time To Break (TTB) herangezogen. Ein zu spätes Bremsen liegt dann vor, wenn die Verzögerung nicht mehr ausreichend ist, um beim Beibehalten des Kurses eine Kollision zu verhindern. Dies ist bei $TTB < 0\text{ s}$ der Fall und führt zu einer Fehlerwahrscheinlichkeit von $p_{K6}(TTB \leq 0\text{ s}) = 1$. Da dieses Kriterium alleine bereits ausschlaggebend für das Eintreffen des Verkehrskonflikts ist (situationsunabhängig), wird als zweite Grenze eine relativ komfortable TTB von 8 s gewählt, um ein allmähliches Ansteigen der Eintrittswahrscheinlichkeit zu erreichen. Die Wahrscheinlichkeit an dieser Stelle liegt bei $p_{K6}(TTB \geq 8\text{ s}) = 0$. Zwischen diesen Grenzen wird linear interpoliert.

K1 „kein Ausweichen/Überholen“: Wie erwähnt, wird K1 über das Vorliegen der Situation „Folgefahrt“ bewertet, da im Falle eines Ausweichmanövers ein Spurwechsel vorliegt und folglich die Situation ab diesem Zeitpunkt als Spurwechsel nach VK631 bewertet wird.

Aus der Struktur des Fehlerbaumes ergibt sich für die Konfliktwahrscheinlichkeit p_{VK611} folgende Berechnungsvorschrift:

$$p_{VK611} = p_{K1} \cdot \left\{ 1 - \left\{ (1 - p_{K12} \cdot p_{K9}) \cdot (1 - p_{K6}) \right\} \right\} \quad (2)$$

Ergebnisse

Nachfolgend ist für die Situation „Folgefahrt“ eine exemplarische Fahrsituation mit dem zugehörigen Konfliktverlauf aufgezeigt.

Der aus Bild 26 ersichtliche Verlauf der Konfliktwahrscheinlichkeit p_{VK611} ergibt sich aus der beschriebenen Berechnungsvorschrift für die Folgefahrt. Das vorausfahrende Fahrzeug verzögert hier und nähert sich innerhalb von ca. 2.5 s immer weiter an das Ego-Fahrzeug an. Die Unfallwahrscheinlichkeit steigt dabei. Zum Zeitpunkt mit der höchsten Konfliktwahrscheinlichkeit liegt zwar eine relativ komfortable Folgezeitlücke von $TG = 2.2\text{ s}$ vor, die Verzögerung des vorausfahrenden Fahrzeugs ist mit 1.4 m/s^2 jedoch recht stark (Grenzwert bei 2 m/s^2). Somit ergibt sich eine maximale Konfliktwahrscheinlichkeit von $p_{VK611} = 0.1263$ in dieser Sequenz. Der unstete Verlauf des Wahrscheinlichkeitsanstiegs ergibt sich dabei aus einem Rauschanteil im Beschleunigungssignal des Fremdfahrzeugs.

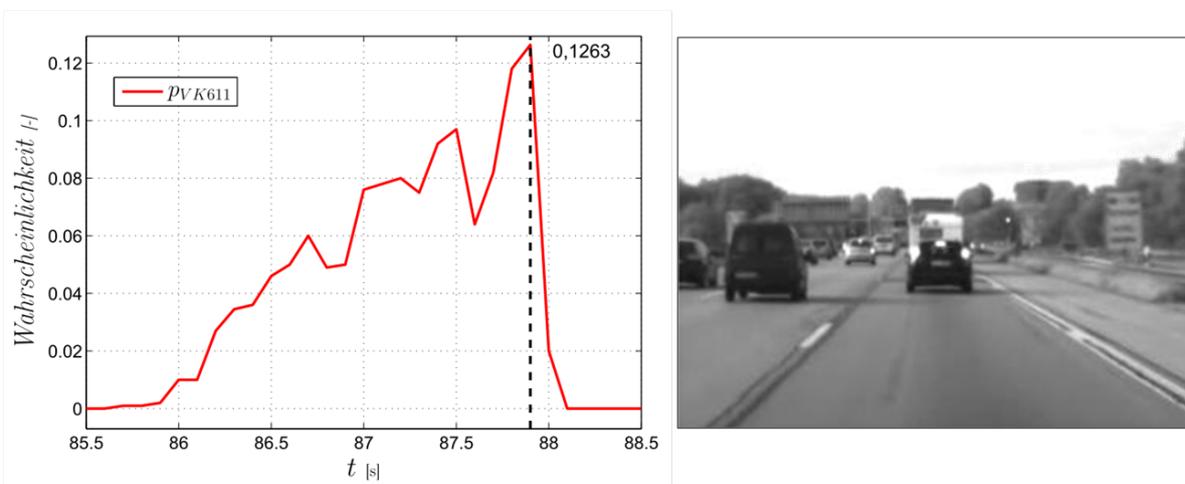


Bild 26: Konfliktwahrscheinlichkeit bei der Folgefahrt

4.3 Situationsinterpretation

Dieses Kapitel widmet sich der algorithmischen Umsetzung der normativen Anforderungen an eine Situationsbeschreibung (vgl. Kapitel 4.1.4 und Bild 13).

Aus der Motivation dieser Arbeit leitet sich die Zielsetzung einer autonomen Fahrzeugführung ab, die sich am Fahrverhalten und an der Situationsbetrachtung eines Menschen orientiert (vgl. Kapitel 1.2). Um dieses Ziel zu verwirklichen, wird ein emotionsbasierter Ansatz zur Interpretation der Umwelt realisiert. Die Abbildung der Verkehrsszene auf virtuelle Emotionen kommt dabei einer Reduktion der großen Anzahl an Umgebungsvariablen auf einige wenige, abstrahierte, innere Zustände gleich. Diese Zustände lassen sich in einem nachgeschalteten Fahrzeugführungssystem mit charakteristischen Verhaltensausrprägungen verknüpfen.

Es gibt eine große Anzahl unterschiedlichster Modellansätze die sich mit der Einbettung interner Zustände in technische Systeme beschäftigen, so dass diese menschliche Emotionen abbilden. Derartige Modelle fanden bereits Anwendung in Software-Agenten [175], Humanoiden [16], dem maschinellen Sehen [158], sowie simulativen Fahrermodellen [137]. Nachfolgendes Kapitel analysiert bestehende Theorien und darauf aufbauende Emotionsmodelle. Der für das vorliegende Problem geeignetste Ansatz wird daraufhin ausgewählt und an die Domäne des Straßenverkehrs adaptiert (Kapitel 4.3.2). Abschließend wird die Entstehung ausgewählter Emotionen erläutert und es werden die Ergebnisse anhand realer Verkehrssituationen evaluiert.

4.3.1 Analyse und Auswahl von Emotionsmodellen

Aufgrund der hohen Komplexität der Entstehung von Emotionen gibt es eine Vielzahl von Theorien zur Datenverarbeitung und Emotionsbildung. Sämtliche Vertreter der verschiedenen Theorien beschreiben die Bildung von Emotionen und deren Auswirkung und/oder Präsenz. Jedoch ermöglichen diese Theorien bis heute nur eine hinreichende Darstellung der Emotionsbildung und werden je nach persönlicher Neigung favorisiert oder kritisiert. Eine Einigung bezüglich der Emotionsbildung scheint bis heute nicht möglich. Grundsätzlich lassen sich die Theorien zur Emotionsentstehung in folgende Kategorien gliedern (wichtige Vertreter der Theorien jeweils in Klammern):

- Evolutionstheorien (DARWIN [34], OATLEY & JOHNSON-LAIRD [124], EKMAN [48])
- Diskrete Theorien (TOMKINS [169], IZARD [86])
- Building Block - Theorien (PLUTCHIK [131])
- Kontinuierliche Theorien (RUSSELL [148])
- Psychologische Theorien (JAMES & LANGE [88], CANNON [29])
- Kognitive Theorien (SCHACHTER & SINGER [152], VALINS [173])
- Schematische Theorien (LEVENTHAL [106])
- Einschätzungstheorien (ARNOLD [12], LAZARUS [104], ROSEMAN [145], SCHERER [153], FRIJDA [62], ORTONY, CLORE & COLLINS [128])

Die Mehrzahl der Computermodelle, die sich mit der Entstehung von virtuellen Emotionen befassen, basieren jedoch auf den Einschätzungstheorien. Anders als bei den kognitiven Theorien wird die physiologische Aktion und die Emotion auf eine Stufe gestellt und nicht in Folge. Grundsätzlich wird eine Wahrnehmung beurteilt, die Beurteilung ruft dann eine physiologische Aktion sowie die Emotion hervor. Die Einschätzung der Situation und Ereignisse ist bei diesen Theorien also das wesentliche Element für eine eindeutige und differenzierbare Emotionsbildung. Der maßgebliche Vorteil dieser Ansätze liegt in der guten Operationalisierbarkeit und der dadurch einfachen Implementierbarkeit in Programmcode.

Im Folgenden sollen daher die wichtigsten Vertreter der Einschätzungstheorien und die Grundzüge ihrer Ansätze sowie darauf aufbauende Emotionsmodelle vorgestellt werden.

ROSEMAN [145] veröffentlichte 1979 seine Theorie, deren Grundsatz der Einschätzungstheorie von Emotionen auch über mehrere Modifikationsstufen hinweg erhalten blieb. Er stellte seine Theorie auf Basis von Erfahrungsberichten und leitete daraus ein Emotionsmodell ab, in dem fünf kognitive Dimensionen bestimmen, ob und welche Emotionen entstehen. Diese erfassen die Motivation hin zu einem erwünschten Zustand, den Abgleich zwischen diesem und einer vorliegenden Situation, sowie das Dasein, die Verdientheit und die Quelle der auslösenden Ereignisse. Aus der Kombination dieser fünf Elemente ergeben sich kognitive Einschätzungen, welche laut ROSEMAN mit bestimmten Emotionen korrespondieren. Dieser mehrdimensionale Aufbau wurde von ROSEMAN mehrfach erweitert und angepasst, jedoch musste ROSEMAN trotz einiger Veränderungen gewisse Lücken und Inkonsistenzen einräumen [146]. Unklarheiten treten jedoch erst in relativ komplexen Situationen auf. Deshalb wird dieses Modell vor allem auch aufgrund seiner einfachen und klaren Struktur und damit guten Implementierbarkeit gerne für Anwendungen mit künstlicher Intelligenz eingesetzt.

VELÁSQUEZ [174] griff diese Modellstruktur auf und entwickelte auf dieser Grundlage das Emotionsmodell „Cathexis“. Auch hier gibt es definierte Dimensionen zur gezielten Verarbeitung von Reizen. Das Modell besteht aus sogenannten „proto-specialists“, die jeweils eine Basisemotion vertreten. Die benötigten Informationen erhalten diese aus den Reizdimensionen oder auch aus anderen proto-specialists. Da Emotionen auch aus der Kombination verschiedener proto-specialists erzeugt werden können, ist eine umfangreiche Abbildung des (menschlichen) Emotionsverhaltens möglich. Neben der Steuerung von Emotionen ist das Modell auch direkt an physische Reaktionen gebunden, die bei Auftreten bestimmter Eingangsinformationen sofort ausgeführt werden. Diese Steuerung beinhaltet das Verwalten von Reflexen und von spontanen Aktionen. „Cathexis“ ist beliebig erweiterbar und zeichnet sich durch eine hohe Variabilität aus. Ebenso hat das System eine sehr feine Auflösung, die angepasste Verhaltensweisen zusätzlich unterstützt. Eine Differenzierungsmöglichkeit bezüglich der Stärke von Emotionen ermöglicht eine vielschichtige Zielabstimmung. Aus diesen Gründen stellt das Modell eine gute Grundlage dar, ein umsetzbares und vor allem komplettes künstliches Emotionssystem zur Interpretation des Verkehrsgeschehens zu entwickeln.

ORTONY, CLORE & COLLINS [128] haben ihren theoretischen Ansatz ausdrücklich im Hinblick auf eine leichte Umsetzbarkeit in Form von Computermodellen entwickelt. Das entworfene Modell, welches auch als „OCC-Modell“ bekannt ist, ist ein Emotionsmodell, das auf dem Kausalprinzip beruht. Es betrachtet Emotionen als Folge einer Einschätzung der Situation oder Umwelt, geht also von kognitiven Emotionsauslösern aus. Das Modell bietet die Möglichkeit, Situationen, denen das erlebende Subjekt ausgeliefert ist, zu bewerten und die resultierenden Emotionen und deren Intensität zu ermitteln [6, 16, 17].

Das OCC-Modell unterscheidet im Ganzen 22 verschiedene Emotionen. Eine Übersicht des Modells ist in Bild 27 zu sehen. Grundsätzlich wird die Emotionsentstehung beim wahrnehmenden Subjekt in drei Hauptkategorien („Emotional Categories“) unterteilt:

- Konsequenzen aus Ereignissen („Consequences of Events“)
- Eigene und Handlungen anderer („Actions of Agents“)
- Aspekte von Objekten („Aspects of Objects“)

Diese Kategorien sind die Grundlage für die folgenden Hauptschritte bei der Emotionsentstehung: Klassifikation und Quantifizierung.

In der Klassifizierungsphase wird bestimmt, welche der Hauptkategorien angesprochen werden. Dazu ist es nötig, dass die Haltung des Agenten gegenüber Ereignissen, Aktionen und Objekten bekannt ist. Die normative Haltung lässt sich dabei unterteilen in Ziele („Goals“) für die Bewertung von Ereignissen, Normen („Standards“) für die Beurteilung von Aktionen und Einstellungen („Attitudes“), um Aspekte von Objekten zu beurteilen. Dies setzt ein Wissen („Knowledge“) voraus, das bereits a priori hinterlegt sein muss oder im Rahmen des maschinellen Lernens während des Betriebs erlangt wird. Als Ergebnis dieser Einstellung erhält man schließlich die Arten der Emotionen, die beim Agenten ausgelöst werden. Neben der Art der ausgelösten Emotionen ist natürlich auch deren Intensität von Interesse. Diese wird im nächsten Schritt, der Quantifizierung, bestimmt.

Zur Bewertung der Intensität einer Emotion stehen verschiedene Variablen, sogenannte „Intensity Variables“, zur Verfügung. Diese teilen sich wieder auf die drei Emotionskategorien auf: Dabei wird die Erwünschtheit („desirability“) von Ereignissen, die Löblichkeit („praise-worthiness“) von Aktionen und die Attraktivität („appealingness“) von Objekten bewertet. Auch bei diesem Schritt muss auf hinterlegtes Wissen zurückgegriffen werden, um eine Bewertung vorzunehmen. Beispielsweise ist für die Bewertung der Erwünschtheit eines Ereignisses von Bedeutung, inwieweit es zum Erreichen eines Ziels beiträgt. Dazu muss ein umfangreicher Zielkatalog mit Ober- und Unterzielen als hinterlegtes Wissen vorliegen.

Das OCC-Modell hat zwar einen hohen Grad an Komplexität und bedient einen Großteil an möglichen Emotionen, in der Literatur werden aber auch Schwachstellen respektive die Grenzen des Modells aufgezeigt, die hier nicht unerwähnt bleiben sollen. Da das Modell über keine Erinnerungsfunktion verfügt, werden die Emotionen, die von Ereignissen, Aktionen oder Aspekten ausgelöst werden, in jedem Zeitschritt neu bewertet. Vorhergehende Zustände werden dabei nicht mit einbezogen. Es ist jedoch offensichtlich, dass die momentane Emotion mit der kurz zuvor erfahrenen Emotion in einem gewissen Zusammenhang stehen muss.

Ein weiteres Problem ergibt sich aus der Tatsache, dass das Modell zwar bis zu 22 eigenständige Emotionen berechnet, aber keine Auskunft darüber gibt, ob und inwiefern sich die Emotionen gegenseitig beeinflussen. Somit bringt eine Interpretation des gesamten emotionalen Zustands Probleme mit sich. Hierbei muss aus dem emotionalen Zustand meist entsprechendes Verhalten oder ein entsprechender Ausdruck generiert werden. Dazu ist es notwendig, dass mittels „Mapping-Methoden“ eine geeignete Ableitung der Emotionen in Verhalten identifiziert wird.

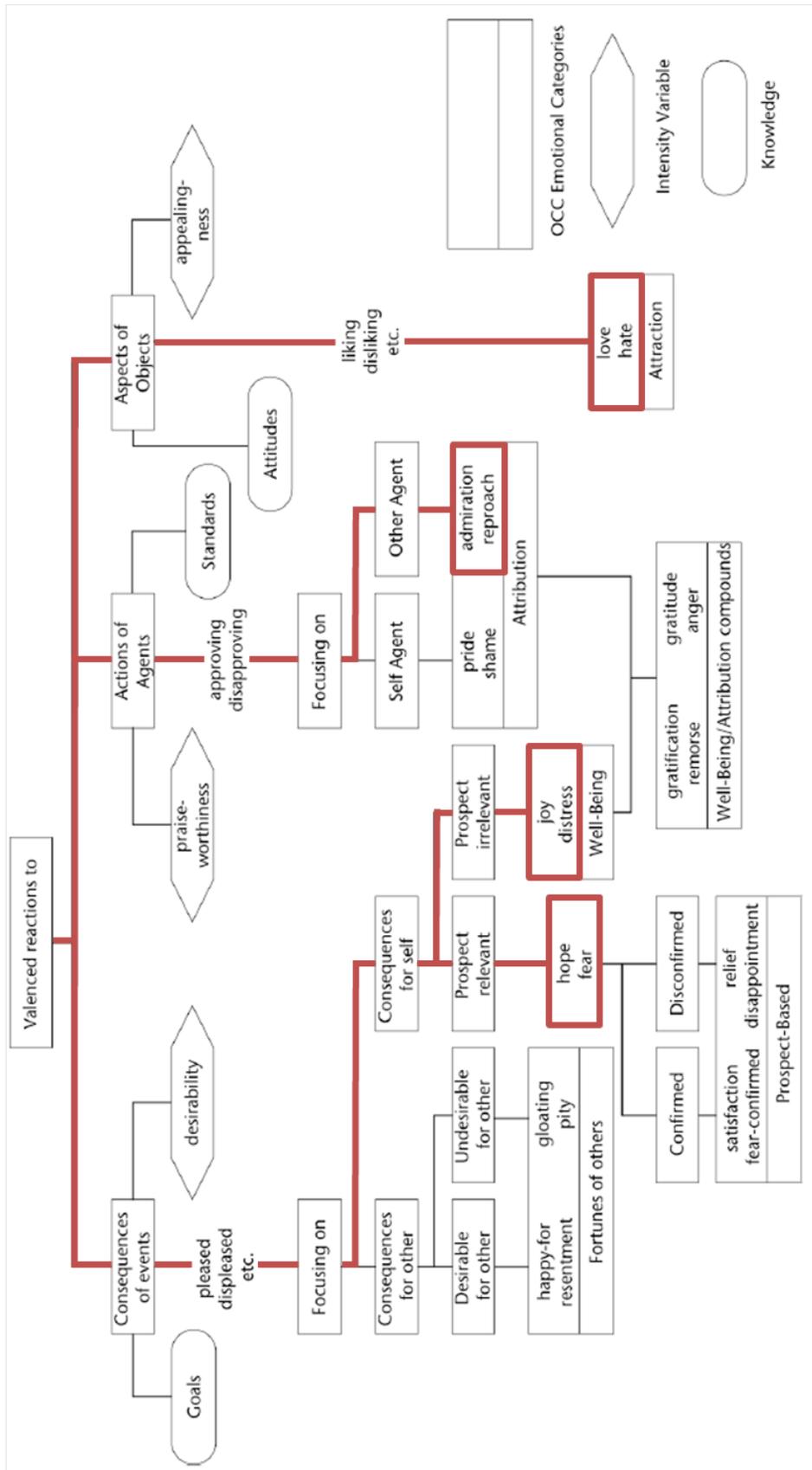


Bild 27: Emotionsmodell nach ORTONY, CLORE & COLLINS [16]

Dennoch wurden basierend auf dem Modell von ORTONY, CLORE & COLLINS diverse weitere Modelle entworfen. BATES & REILLY [140] versehen in einem Projekt der Carnegie-Mellon University synthetische Wesen mit dem Emotionsmodul „Em“ auf der Grundlage des OCC-Modells, um deren Verhalten für Zuschauer möglichst echt und natürlich wirken zu lassen. Der „Affective Reasoner“ von ELLIOTT [49] ist ein Modell, das sich hauptsächlich auf Emotionen aus sozialen Interaktionen bezieht. ELLIOTTs Modell ermöglicht zum einen, emotionspsychologische Theorien in einer virtuellen Welt anhand der Verhaltensmuster einzelner Agenten zu überprüfen. Zum anderen sieht er die Möglichkeit einer Verbesserung der Mensch-Maschine-Interaktion durch emotionales Verständnis und einer emotionalen Ausdrucksmöglichkeit auf Seite der Maschine. Das „Cognitive Emotion Layer System“ (CEL) [84] ist ein von der NASA für autonome Flugzeuge sowie Fahrzeuge entwickeltes emotionales System und wurde für die Anwendung in Umgebungen ohne direkte menschliche Intervention entwickelt. Das System wird durch das Vorhandensein vieler unabhängiger Instanzen geprägt, die alle für sich in der Lage sind, hochgradig adaptiv Entscheidungen zu treffen, sowie auch eine Überwachung von Position und Lage zu ermöglichen. Die Instanzen des „CEL“ sind in der Lage auf Emotionen beruhende Argumentationen und Entscheidungen durchzuführen und intelligentes Manövrieren zu ermöglichen.

Die Theorie von ORTONY, CLORE & COLLINS stellt die Basis für viele Emotionsmodelle dar, da sie über eine klare Struktur verfügt und aus bewertbaren Elementen besteht. Das OCC-Modell hat sich als besonders leistungsstark und leicht implementierbar erwiesen. Daher ist es zu einem der Standardmodelle für die Emotionsentstehung geworden. Vor allem die Möglichkeit der Adaptivität des Modells an den Diskursbereich Straßenverkehr prädestiniert das OCC-Modell für den vorliegenden Anwendungsfall. Weiterhin existieren in der Literatur diesbezüglich bereits Erfahrungen mit der Implementierung des OCC-Modells als Fahrermodell, wodurch die Entscheidungsfindung menschlicher Fahrer in Simulationen abgebildet werden soll (vgl. [137]). Eine tiefer gehende Analyse mehrerer Emotionsmodelle [76, 77] führte zusammen mit oben genannten Gründen zu einer Entscheidung für das OCC-Modell als zentrale Instanz zur Situationsinterpretation.

4.3.2 Modelltransfer in die Domäne Straßenverkehr

In diesem Kapitel wird dargestellt, wie das emotionstheoretische OCC-Modell an die Domäne des Straßenverkehrs adaptiert wird (vgl. [102, 103]). Dabei werden die drei Grundmechanismen getrennt voneinander betrachtet und zu jedem Pfad die jeweiligen Emotionen dargestellt. ORTONY, CLORE & COLLINS selber geben keine Formalisierungen der Entstehung der von ihnen definierten Emotionen an, postulieren jedoch, dass dies für jede Emotion in entsprechender Weise möglich ist. Die Emotionen des OCC-Modells werden daher mittels normativer Regeln berechnet. Diese Regeln werden auf Basis der kausalen Bedeutung des jeweiligen Teilbereichs gebildet und in den folgenden Kapiteln erläutert. Sämtliche nach diesen Regeln implementierte Emotionen können Werte auf einer Skala von „-1“ bis „+1“ annehmen. Der positive Wertebereich gibt dabei immer die entsprechende positive Emotion an, der negative Wertebereich gibt die negative Emotion des jeweiligen Emotionspaares an. Der Wert „0“ kann dann auftreten, wenn sich die positiven und die negativen Ereignisse genau ausgleichen oder alternativ wenn die Situation keine Emotionsbildung hervorruft (z.B. wenn sich kein anderer Verkehrsteilnehmer im Sichtbereich aufhält). Zunächst wird auf überflüssige oder nicht realisierbare Pfade des Emotionsmodells eingegangen. Anschließend werden

die Konsequenzen aus Ereignissen auf die Emotionsbildung erörtert, danach werden die Aktionen von Agenten und schließlich die Aspekte von Objekten beschrieben. Die Emotionsverläufe in den einzelnen Kategorien werden jeweils am Beispiel von realen Verkehrssituationen evaluiert.

4.3.2.1 Reduktion des Emotionsmodells

Eine genauere Betrachtung des allgemein formulierten Emotionsmodells nach ORTONY, CLORE & COLLINS lässt einen Transfer von allen 22 Emotionen in die Domäne des Straßenverkehrs nicht zu oder aber lässt diesen als nicht sinnvoll erscheinen.

Bei der Entstehung von Emotionen, die durch die Konsequenzen von Ereignissen (linker Zweig des Emotionsmodells im Bild 27) verursacht werden, lässt sich die erste Reduktionsmaßnahme treffen. Hier wird unterschieden, ob eine Bewertung hinsichtlich der Konsequenzen getroffen wird, die einen selbst oder die den Anderen betreffen. Fokussiert man sich bei dieser Betrachtung jedoch auf den jeweils Anderen, so muss man diesem unterstellen, dass dessen unbekannte Bewertungsgrundlage („Goals“) der eigenen entspricht. Da man von diesem Fall aber nicht ausgehen kann bzw. darf, werden die Emotionen, die aus dem angesprochenen Zweig entstehen könnten, nicht in die Situationsinterpretation mit einbezogen. Demnach fokussiert sich die Emotionsentstehung in diesem Hauptzweig des Modells auf die Konsequenzen von Ereignissen die sich auf das Ego-Fahrzeug auswirken.

Schreitet man in diesem Hauptzweig eine Hierarchieebene weiter nach unten, so wird eine Unterscheidung zwischen Konsequenzen getroffen, mit denen eine gewisse Erwartungshaltung verknüpft ist oder diese irrelevant erscheint. Die jeweilige Erwartungshaltung kann dabei durch nachfolgende Ereignisse bestätigt oder widerrufen werden. Eine nachträgliche Betrachtung macht jedoch nur dann Sinn, wenn eine derartige Situation auch eintreten kann. Da eine Quantifizierung jedoch auf Basis der Unfallwahrscheinlichkeit vorgenommen wird, kommt es zur Bestätigung der „fear“-Emotion nur im Falle eines Unfalls. Eine Situationsinterpretation wird dann jedoch überflüssig. Somit wird auf die a-posteriori-Betrachtung der „Prospect-Based“-Emotionen verzichtet. Der Zweig endet bei der Bewertung des Emotionspaares „hope-fear“ (vgl. Bild 27 dicke Linie links).

Bei der Analyse der Emotionsbildung, die durch die Aktionen von Agenten hervorgerufen wird, lässt sich eine weitere Reduktion des Modells vornehmen. Eine normative Bewertung der eigenen Aktionen auf Basis der StVO erscheint widersinnig, da in den verhaltensentscheidenden Modulen des (semi-)autonomen Fahrzeugführungssystems nur StVO-konforme Vorgaben hinterlegt sind. Daher würde die Emotion „pride“ ständig aktiv sein, was eine Betrachtung der Aktionen des Ego-Fahrzeugs überflüssig macht. Die Emotionsbetrachtung fokussiert sich daher in diesem Bewertungsweig auf die Aktionen der Fremdfahrzeuge (vgl. Bild 27 dicke Linie mittig).

Eine letzte Reduktionsmaßnahme lässt sich in der kombinierten Betrachtung gleichzeitig auftretender Emotionen festmachen, die sich zu neuen Emotionen kombinieren können. Da derartige Wechselwirkungen jedoch nicht genau bekannt sind, wurde auf die Emotionen der Kategorie „Well-Being/Attribution compounds“ verzichtet.

Die getroffenen Maßnahmen führen zu einem reduzierten Modell, deren Pfade zu den jeweiligen Emotionen durch dicke Linien im Bild 27 angedeutet sind. Dadurch sind Emotionen aus jedem Hauptbewertungsweig repräsentiert. Letztendlich werden die vier Emotionspaare

„love-hate“, „admiration-reproach“ sowie „joy-distress“ und „hope-fear“ gebildet. Die jeweils erstgenannte Emotion wird dabei als positive Komponente des Emotionspaares bezeichnet, die jeweils letztgenannte als negative Komponente.

4.3.2.2 Konsequenzen von Ereignissen

Wie zuvor angedeutet, werden in diesem Hauptzweig die Konsequenzen von Ereignissen, die sich auf andere fokussieren, bei der Emotionsbildung ausgeklammert. Im Folgenden wird daher auf die Bildung der Emotionspaare „joy-distress“ und „hope-fear“ näher eingegangen. Damit das gesamte OCC-Modell an den Diskursbereich Straßenverkehr adaptiert werden kann, müssen entsprechende Annahmen und Definitionen getroffen werden, um die vom Modell vorgegebenen Begrifflichkeiten unter automobilen Gesichtspunkten zu verstehen.

Hierbei werden Ereignisse als relevante Umstände definiert, die sich in ihrer Konsequenz auf die Ziele auswirken. Dies umfasst im Grunde die gesamte Verkehrssituation und deren extreme Ausmaße wie Hindernisse oder Ende von Fahrspuren. Die identifizierten Ziele nehmen hierbei eine besondere Rolle ein, denn letztendlich ist jedes Ereignis von Relevanz, wenn es die Ziele der Fahraufgabe tangiert. Die Intensitätsvariable „Erwünschtheit“ gewichtet dann den Einfluss der Ereignisse auf das Zielerreichen und fördert oder hemmt entsprechend die Auswirkungen auf die emotionstheoretischen Kennzahlen.

Um die Ziele des Autofahrens zu definieren, wird die Theorie von KLEBELSBERG [97] herangezogen. KLEBELSBERG beschreibt hierin zwei Hauptziele über die sogenannte Leistungstendenz einerseits und die Sicherheitstendenz andererseits. Die Leistungstendenz ist die Absicht, das Fahrtziel mit minimaler Kostenaufwendung zu erreichen. Diese Absicht wird im Folgenden mit „Zeiteffizientes Zielerreichen“ umschrieben. Die Sicherheitstendenz ist die Absicht, das Fahrtziel mit minimaler Gefahr und maximaler Kontrolle über das Geschehen zu erreichen, im Folgenden „Unfallfreies Zielerreichen“ genannt.

Zeiteffizientes Zielerreichen

Wie in Bild 28 zu erkennen ist, lässt sich die Begrifflichkeit des zeiteffizienten Zielerreichens durch zwei Subkriterien beurteilen, dem „Unabhängigen Fahren“ sowie dem „Flüssigen Fahren“. Beide Kriterien sind abhängig von dem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer, beziehungsweise von dem vorliegenden Verkehrsaufkommen. Wird ein Fahrzeug sowohl ungehindert von äußeren Umständen (unabhängig) als auch konstant, also ohne zahlreiche Brems- und Beschleunigungsvorgänge (flüssig) gefahren, erreicht es sein Fahrtziel in der optimalen Zeit.

Es ist notwendig, dass beide Ziele ausformuliert werden, da beispielsweise bei schlechten Witterungsbedingungen oder durch Geschwindigkeitsbegrenzungen das flüssige Fahren möglich sein kann, jedoch nicht das unabhängige Zielerreichen mit Wunschgeschwindigkeit. Umgekehrt kann durch die Straßenführung ein flüssiges Fahren verhindert werden, obwohl kein Fremdfahrzeug einem unabhängigen Fahren im Wege steht.

Beiden Unterzielen werden nun die Bewertungsmaße W_{unabh} und $W_{fluessig}$ zugeordnet, die Werte zwischen 0 und 1 annehmen können, wobei 1 für die volle Zielerreichung steht. Zur Erreichung des Oberziels tragen beide Maße je zur Hälfte bei. Somit werden die Werte

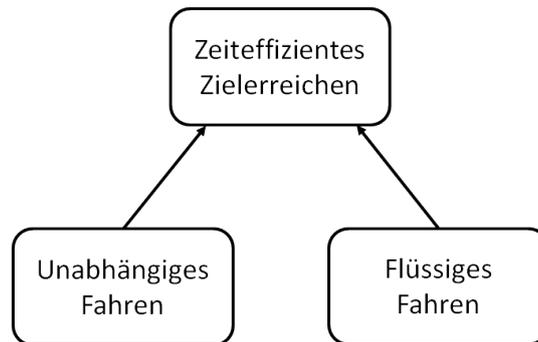


Bild 28: Struktur des Hauptziels „Zeiteffizientes Zielerreichen“

der beiden Unterziele mit 0.5 gewichtet und addiert, um das Bewertungsmaß $W_{zeiteff}$ des Oberziels zu erhalten.

$$W_{zeiteff} = 0.5 \cdot W_{unabh} + 0.5 \cdot W_{fluessig} \quad (3)$$

Im Folgenden soll die Berechnungsvorschrift (3) des Gesamtbewertungsmaßes erläutert werden.

Unabhängiges Fahren soll im vorliegenden Fall bedeuten, die erlaubte Höchstgeschwindigkeit voll auszunutzen. Im Kontext Autobahn wird dafür die Richtgeschwindigkeit für deutsche Autobahnen – 130 km/h – angenommen. Ist das Fahrzeug nun durch äußere Umstände gezwungen, langsamer zu fahren, wird das Ziel „Unabhängiges Fahren“ nicht mehr vollständig erfüllt. Dies führt zu einem niedrigeren Bewertungsmaß sowohl des Unter- als auch des Oberziels, was dem Entwickeln negativer Emotionen entspricht.

Als flüssig wird eine Fahrt mit möglichst konstanter Fahrgeschwindigkeit bezeichnet. Somit wirken sich Bremsvorgänge während der Fahrt negativ auf die Erfüllung dieses Ziels aus. Beschleunigungsvorgänge nach Bremsungen stehen zwar ebenso im Widerspruch zu einer konstanten Fahrgeschwindigkeit, wirken sich allerdings nicht negativ auf die Zeiteffizienz aus, weshalb sie nicht in die Bewertung mit einfließen. Bremsungen werden linear in einem Bereich von $a = 0 \text{ m/s}^2$ bis zu einer vom ACC-System des Fahrzeugs zugelassenen Maximalverzögerung von etwa $a = -4 \text{ m/s}^2$ gewichtet. Eine Beschleunigung von $a \geq 0 \text{ m/s}^2$ entspricht damit der vollständigen Zielerfüllung, ab einer Verzögerung von $a = -4 \text{ m/s}^2$ wird das Ziel vollständig verfehlt.

Für das Bewertungsmaß $W_{zeiteff}$ des Oberziels „Zeiteffizientes Zielerreichen“ ergibt sich somit folgende Berechnungsvorschrift (4):

$$W_{zeiteff} = 0.5 \cdot \left\{ \frac{v_{ego}}{v_{gegeben}} \right\} + 0.5 \cdot \left\{ 1 - 0.25 \cdot (-a_{ego}) \cdot \left[\frac{s^2}{m} \right] \right\} \quad (4)$$

Das erste Hauptziel des vorliegenden Fahr Szenarios ist nun vollständig beschrieben: Mit Hilfe der Werte von v_{ego} und a_{ego} kann ein aktuelles Bewertungsmaß in Abhängigkeit der Fahrsituation berechnet werden. Nun bleibt zu klären, zur Auslösung welcher Emotionen das Erfüllen oder Verfehlen des Ziels führt.

Emotionspaar „joy – distress“

Vorangehend wurden Ziele für den Unterzweig „Consequences for Self“ des OCC-Modells (siehe Bild 27) beschrieben. Dort kommen die Emotionen „hope-fear“ und „joy-distress“ infrage. Die Emotion „fear“ (Angst) scheint weniger geeignet als Folge eines nicht zeiteffizienten Fahrens, da sie eher auf die Möglichkeit extremer Ereignisse im Straßenverkehr, die Gefahr für einen selbst bedeuten, folgt. Zudem bezieht sich Angst auf ein Ereignis in der Zukunft, wie einen möglichen Unfall. Im Falle des zeiteffizienten Fahrens liegt das auslösende Ereignis in der Gegenwart. Der Moment, in dem das Fahrzeug aufgrund zählfließenden Verkehrs abbremsen muss, oder die gefahrene Geschwindigkeit unter dem erlaubten Wert liegt, soll folglich direkt zur Emotion „distress“ (Leid) führen. Trägt die momentane Verkehrskonstellation zur Erfüllung der genannten Ziele des „Zeiteffizienten Zielerreichens“ bei, so führt dies zur Emotion „joy“ (Freude). Das Bewertungsmaß $W_{zeiteff}$ wird nun benutzt, um den Wert des Emotionspaares „joy-distress“ zu bestimmen.

$$I_{joy-distress} = 2 \cdot W_{zeiteff} - 1 \quad (5)$$

Somit wird der Maximalwert „1“ des Emotionspaares „joy-distress“ bei vollständiger Erfüllung des Ziels „Zeiteffizientes Zielerreichen“ erreicht, der Wert „-1“ entsprechend bei vollständiger Zielverfehlung.

Bild 29 zeigt beispielhaft den Verlauf der behandelten virtuellen Emotionen. Bei vorhergehender freier Fahrt führt das Eintauchen eines Zielobjektes in den Reaktionsbereich des Abstandshaltesystems (Fahrzeug in der Ego-Spur, relevant ab Sekunde 69) zu einer erzwungenen Reduzierung der Wunschgeschwindigkeit. Da aufgrund des zunehmenden Verkehrsaufkommens zusätzlich noch stark gebremst werden muss (erkennbar an den Bremsleuchten der Fahrzeuge) führt dies zu einem lokalen Minimum im Intensitätsverlauf des Emotionspaares „joy-distress“.

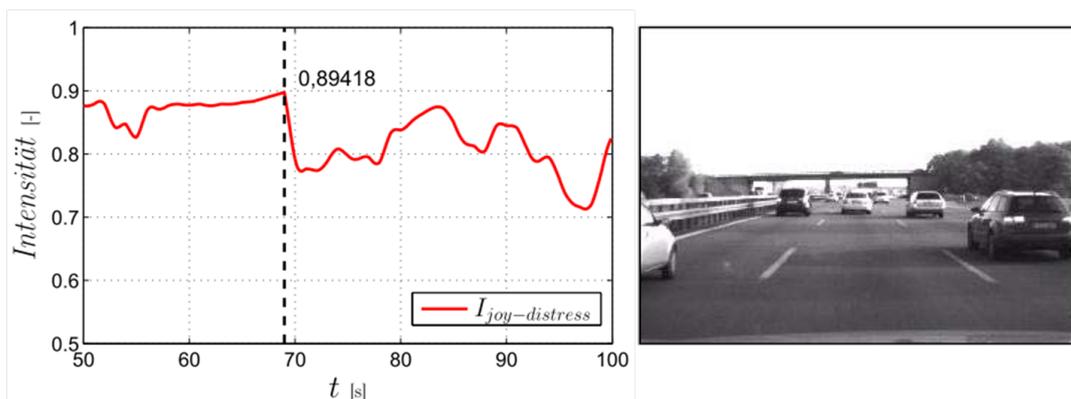


Bild 29: Intensitätsverlauf des Emotionspaares „joy-distress“ und Verkehrsszene bei $t = 69$ s

Unfallfreies Zielerreichen

Als zweites Hauptziel der Fahraufgabe wird ein sicheres, also unfallfreies, Erreichen des Fahrtziels identifiziert. Das Maß der Zielerreichung soll dabei mit Hilfe einer Unfallwahr-

scheinlichkeit bewertet werden. Ein erster Ansatz ist, die Fahrt in verschiedene Fahrsituationen zu unterteilen und danach situationsbezogen die jeweilige Unfallwahrscheinlichkeit zu berechnen. So ergeben sich wieder verschiedene Unterziele, die dem Hauptziel untergeordnet sind (siehe Bild 30).

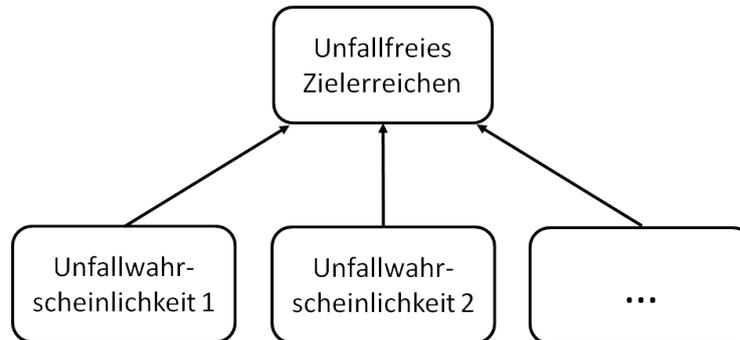


Bild 30: Unterziele des Hauptziels „Sicheres Zielerreichen“

Emotionspaar „hope – fear“

Wie dem Schema des OCC-Modells (Bild 27) zu entnehmen ist, entsteht das Emotionspaar „hope-fear“ aus der Konsequenz eines Ereignisses, wenn man dessen Auswirkungen auf sich selbst fokussiert. Dabei entsteht das Emotionspaar stets durch eine Erwartungshaltung (prospect), es wird also auf die Möglichkeit kommender Ereignisse projiziert. Im konkreten Kontext bedeutet dieses, dass die Verkehrssituation bezüglich der Auswirkungen untersucht wird, die konkret das Ziel der kollisionsfreien Fahrt des Ego-Fahrzeugs beeinflussen. Voraussetzung für ein sicheres Zielerreichen ist eine möglichst geringe Unfallwahrscheinlichkeit während der Fahrt. Daher wird dieses Maß zur Intensitätsbestimmung des Emotionspaares herangezogen. Wie schnell klar wird, handelt es sich bei der Bewertung einer Unfallwahrscheinlichkeit um eine komplexe Problemstellung, die von vielen Faktoren abhängt und nicht mit Hilfe einer einfachen Vorschrift bewertet werden kann. Die Bestimmung der Verkehrskonfliktwahrscheinlichkeiten aus Kapitel 4.2.2.3 bietet hier jedoch die ideale Form der Beurteilung einer drohenden Unfallgefahr und damit einer negativen Konsequenz auf das Ego-Fahrzeug. Die Berechnungsvorschrift zur Beurteilung der Konfliktwahrscheinlichkeit einer aktuell vorliegenden Verkehrssituation lautet somit:

$$W_{fear,aktuell} = \max(p_{VK611}, p_{VK631}) \quad (6)$$

Zur Beurteilung des Emotionspaares „hope-fear“ wird jedoch nach [128] nicht nur die Erwartungshaltung an Konsequenzen aktueller Ereignisse in Betracht gezogen, sondern auch die Auswirkungen einer möglichen Zukunft mit berücksichtigt. Um diesen Umstand Rechnung zu tragen, werden die Ergebnisse der erwartungsbasierten Planerkennung aus Kapitel 4.2.2.2 in die Emotionsbildung integriert. Die Konfliktwahrscheinlichkeiten eines zukünftigen Ereignisses sind jedoch nicht bekannt. Um deren Einfluss dennoch berücksichtigen zu können wird folgende Definition getroffen. Die Unfallgefahr eines aktuellen Fahrmanövers sinkt, wenn die Aufgabe des Manövers als sehr wahrscheinlich prädictiert wird und bleibt aufrecht

erhalten oder steigt, wenn die Fortführung desselben Manövers oder eines Manövers, das die Situation zusätzlich verschärft, prädiziert wird. Dementsprechend ergibt sich zur Beurteilung des Einflusses von möglichen zukünftigen Verkehrssituation folgende Berechnungsvorschrift:

$$W_{fear,pred} = \max \left\{ \left[p_{VK611} \cdot \left(p_{Folgefahrt,pred} + p_{\text{Übergang},pred} \right) \right], \left[p_{VK631} \cdot p_{\text{Spurwechsel},pred} \right] \right\} \quad (7)$$

Fasst man diese beiden Betrachtungsweisen zusammen und gewichtet die sehr dominante Emotion „fear“ entsprechend, so ergibt sich zur Intensitätsbestimmung des Emotionspaares „hope-fear“ folgender Zusammenhang:

$$I_{hope-fear} = 1 - 2 \cdot (W_{fear,aktuell} + W_{fear,pred}) \quad (8)$$

Liegt keine Unfallgefahr vor, so wird der Maximalwert „1“ des Emotionspaares „hope-fear“ erreicht, ist jedoch die Unfallwahrscheinlichkeit maximal, so wird der Minimalwert auf „-1“ beschränkt und entspricht der maximalen Ausprägung der Emotion Furcht.

Bild 31 zeigt in der linken Bildhälfte einen deutlichen Abfall der virtuellen Emotion in Richtung „fear“ ab etwa $t = 65$ s. Dieser Ausschlag resultiert aus der Erwartung, dass das im Bild rechts zu sehende Fahrzeug knapp vor dem Ego-Fahrzeug einscheren wird und dadurch eine hohes Verkehrskonfliktpotential mit sich bringt. Bei der gezeigten Situation befindet sich das Fahrzeug bereits im Spurwechsel. Die Situation entschärft sich jedoch durch rasches Entfernen des Vorderfahrzeuges.

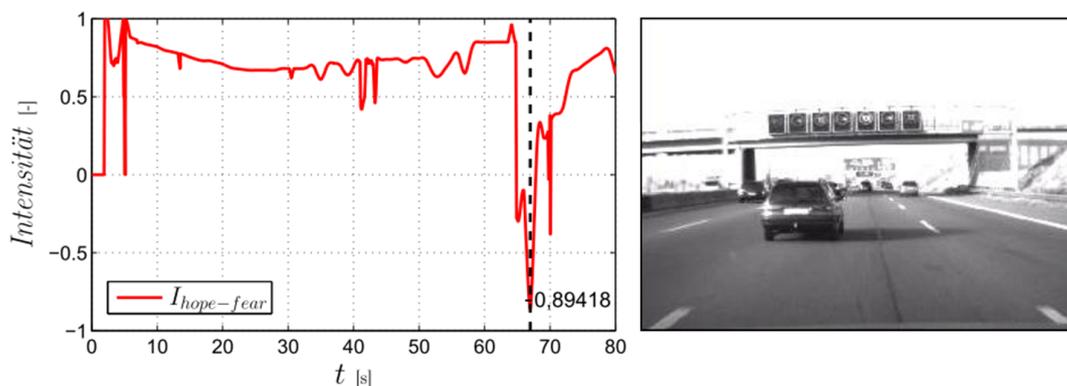


Bild 31: Intensitätsverlauf des Emotionspaares „hope-fear“ und Verkehrsszene bei $t = 67$ s

Die normativen Aufgaben zur Bewertung einer Verkehrskonstellation (vgl. Kapitel 4.1.4.1) konnten durch die Modellstruktur erfüllt werden. Eine objektive Zielverfolgung der Fahrzeuge konnte durch Einführung eines Zielwertkataloges abgebildet werden. Durch die Quantifizierung des Anreizes der Ziele konnte die Forderung nach einer Zielklassifikation eingehalten werden. Weiterhin konnte die geforderte Erwartungshaltung durch die Verknüpfung von Verkehrssituationen mit Konfliktwahrscheinlichkeiten realisiert werden.

4.3.2.3 Verhalten von Agenten

Die Beschränkung der Betrachtung auf die Aktionen anderer Agenten führt im Folgenden zur Bildung der Emotionen „admiration“ und „reproach“. Aus den Grundlagen der Emotionstheorie des hier vorliegenden Modells sind Agenten Bestandteile der Umgebung, die Aktionen ausführen können. Im Kontext der Verkehrssituation werden als Agenten daher alle Verkehrsteilnehmer definiert. Bezogen auf den eingeschränkten Diskursbereich Autobahn ist davon auszugehen, dass sich die Anzahl der möglichen Agenten auf Fahrzeuge der Klassen PKW, LKW und Motorräder einschränken lässt. Als Aktionen der Agenten werden dann alle Fahrmanöver definiert, die die Agenten durchführen können. Diese sind im Diskursbereich Autobahn unter anderem Manöver wie Vorbeifahren, Überholen oder Spurfahren (vgl. [137, S. 235f.]).

Verhaltensbezogene Standards

Die Aktionen von Agenten werden hinsichtlich ihrer Löblichkeit durch die definierten Anforderungen beschrieben. Im Kontext des Verkehrsszenarios kann als Anforderung an das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer die Einhaltung der Straßenverkehrsordnung (StVO) definiert werden. Für den eingeschränkten Verkehrsbereich Autobahn lassen sich drei Anforderungskomplexe identifizieren, deren Bewertung relevant und möglich ist. Diese sind nach der StVO Ordnungswidrigkeiten im Bereich Geschwindigkeit, Sicherheitsabstand und Überholen. Weitere Ordnungswidrigkeiten der StVO in Bereichen wie Alkohol am Steuer oder Missachtung der Vorfahrt sowie Straftaten im Straßenverkehr sind nicht bewertbar beziehungsweise von geringer Bedeutung auf Autobahnen. Die ausgewählten Anforderungskomplexe haben einen Anteil von mehr als zwei Dritteln an den geahndeten Ordnungswidrigkeiten im Jahr 2007 in Deutschland (vgl. [100, S. 9]).

Im Folgenden soll nun beispielhaft die Evaluation der Emotion „reproach“ unter den identifizierten Anforderungen des Straßenverkehrs vorgestellt werden.

Emotionspaar „admiration – reproach“

Das Schema des OCC-Modells (Bild 27) illustriert, dass die Emotion „reproach“ (Tadel) als Folge der Aktion von Agenten entsteht, wenn diese den Standards nicht entsprechen und dabei die anderen Agenten im Fokus stehen. Die Ausprägung von „reproach“ differenziert je nach Intensität der Löblichkeit der Aktion. Auf den Diskursbereich Straßenverkehr übertragen bedeutet dieses, dass die Aktionen von Agenten nach Verstößen gegen die Straßenverkehrsordnung geahndet werden, die Löblichkeit verhält sich dabei reziprok zur vorgesehenen Bußgeldhöhe nach der deutschen Bußgeldkatalog-Verordnung (vgl. [26]). Jeder Agent wird unabhängig vom Verhalten anderer für seine Vergehen sanktioniert.

Aus dem identifizierten Anforderungskomplex lassen sich fünf maßgebliche Vergehen ableiten, die mit den gegebenen Sensorinformationen bewertet werden können. Aus Vergehen gegen die geltenden Geschwindigkeitsvorschriften lassen sich einerseits Agenten bewerten, die zu schnell sind (u. a. StVO §3 Abs. 3), und andererseits Fahrzeuge, die das Rechtsfahrgebot missachten und zu langsam auf ihrer jeweiligen Spur fahren (u. a. StVO §2 Abs. 2). Im Bereich Sicherheitsabstände wird einerseits ein Drängeln des Hinterfahrzeugs sanktioniert

sowie das zu dichte Einscheren nach dem Überholvorgang, durch welches der Überholte respektive das Ego-Fahrzeug behindert wird (u. a. StVO §4 Abs. 1 Satz 1). Als letzter Punkt wird das Rechtsüberholen geahndet (u. a. StVO §5 Abs. 1).

Bei der Implementierung in Matlab/SIMULINK wird wiederum jeder Verkehrsteilnehmer einzeln bewertet. Es wird weiterhin festgelegt, dass sich die Vergehen beliebig addieren können. Bewertet werden alle Vergehen nach der deutschen Bußgeldkatalog-Verordnung. Die Emotion „reproach“ verhält sich proportional zur Summe der Bußgelder $W_{\text{Bußgeld}}$. Dazu werden die Bußgelder schließlich auf den Wertebereich 0 bis 1 normiert. Es werden dabei nur monetäre Strafen berücksichtigt, das Punktesystem des Kraftfahrtbundesamtes bleibt unberücksichtigt. Bußgelder werden bei einem entsprechenden Verstoß erhoben und verringern sich in der nachfolgenden Zeit um eine festgelegte Rate, solange keine neuen Vergehen hinzukommen.

Bei der Bewertung der überhöhten Geschwindigkeit wird die Richtgeschwindigkeit auf deutschen Autobahnen als Grenzwert festgelegt. Bei schnellerer Fahrt werden die festgelegten Bußgelder zur Berechnung herangezogen. Die Missachtung des Rechtsfahrgebotes wird hier nur auf sogenannte „Mittelspurschleicher“ angewendet. Diese werden als ein auf derselben Spur vorausfahrendes Fahrzeug definiert, wobei eine weitere Spur rechts vorhanden ist und das Fahrzeug deutlich langsamer als die Wunschgeschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs ist.

Das Abstandsverhalten der anderen Verkehrsteilnehmer wird nur bei Einscherern und hinterherfahrenden Fahrzeugen sanktioniert. Da die Bewertung nach der Straßenverkehrsordnung geschwindigkeitsabhängig ist (anteilig vom halben Tachowert), wird hier als Kriterium das Time Gap verwendet. Einscherer sind dabei durch die Relevanz der Lateraldynamik gekennzeichnet. Das hinterherfahrende Fahrzeug wird über das Positionsraster identifiziert. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, wird außerdem das Rechtsüberholen sanktioniert. Hierbei wird eine entsprechende Positionsveränderung im Positionsraster als Erkennungsmerkmal gewählt.

Der Intensitätswert des Emotionspaares „admiration-reproach“ für einen Verkehrsteilnehmer wird daraus wie folgt berechnet:

$$I_{\text{admiration-reproach}} = \begin{cases} 1, & \text{für } W_{\text{Bußgeld}} = 0, \\ 0, & \text{für } W_{\text{Bußgeld}} = \{\}, \\ \frac{-W_{\text{Bußgeld}}}{\max_{\text{Bußgeld}}}, & \text{für } W_{\text{Bußgeld}} > 0. \end{cases} \quad (9)$$

Auch wenn aufgrund der Schwere der Vergehen $W_{\text{Bußgeld}}$ einen Wert größer als $\max_{\text{Bußgeld}}$ annimmt, so wird ab diesem Strafmaß für $I_{\text{admiration-reproach}}$ ein Wert von „-1“ zugeordnet. Der Ausgabewert wird immer dem größten Vergehen im Umkreis des Ego-Fahrzeugs zugeordnet. Verkehrsteilnehmer mit geringeren Werten für $W_{\text{Bußgeld}}$ werden demnach nicht beachtet, solange das Strafmaß geringer ist, als das eines anderen Agenten im Umfeld. Wenn sich kein Verkehrsteilnehmer in der Umgebung des Ego-Fahrzeugs befindet, so nimmt der Wert für $I_{\text{admiration-reproach}}$ „0“ an, da keine Bewunderung und kein Tadel für die Aktionen eines Agenten stattfinden können.

Dies ist in Bild 32 zwischen $t = 0\text{ s}$ und $t = 2\text{ s}$ der Fall. Bei $t = 41.5\text{ s}$ ist in dem Verlauf von $I_{\text{admiration-reproach}}$ ein deutlicher Ausschlag nach unten zu sehen. Dieses Minimum resultiert aus der Erfassung und Tadelung eines rechts überholenden Fahrzeugs auf der

Testroute. Ein Videobildausschnitt dieser Situation ist im Bild rechts zu sehen. Der am rechten Bildrand zu erkennende weiße Ford Transit hat gerade das Ego-Fahrzeug überholt und durch diese Aktion die negative Emotion ausgelöst. In diesem Fall ist noch zu bemerken, dass das Versuchsfahrzeug zur Zeit dieser Testfahrt noch nicht in der Lage war, eine durchgezogene Linie von einer gestrichelten Linie zu unterscheiden, weshalb diese Situation ein Vergehen widerspiegelt.

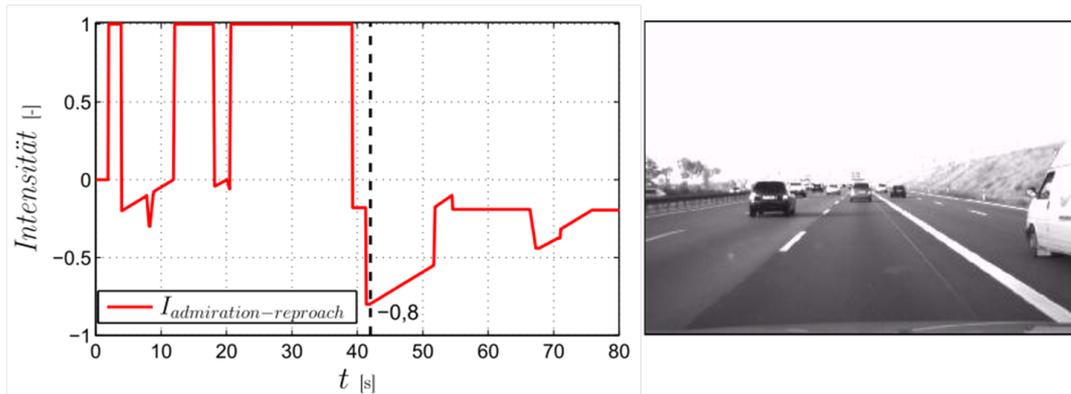


Bild 32: Intensitätsverlauf des Emotionspaares „admiration-reproach“ und Verkehrsszene bei $t = 42\text{ s}$

4.3.2.4 Eigenschaften von Objekten

Nach den Grundlagen des OCC-Modells sind Objekte beliebige Gegenstände der Umgebung, deren Eigenschaften hinsichtlich eines „Mögens“ (liking) oder „Nicht-Mögens“ (disliking) beurteilt werden können. Bezogen auf den Diskursbereich Straßenverkehr kann die Straße als zentrales Objekt definiert werden. Die Aspekte der Straße sind dementsprechend alle charakteristischen Eigenschaften wie die Anzahl an Spuren, die Spurbreite oder auch die Kurvenkrümmung. Diese Aspekte des Objekts müssen nach dem OCC-Modell hinsichtlich der Einstellungen (attitudes) zu ihnen bewertet werden. Ausschlaggebend für die Intensität der Emotion ist dann die Attraktivität (appealingness) der Aspekte.

Die Definition der Straße als Objekt ist weiterhin vor dem Hintergrund sinnvoll, dass dadurch letztendlich alle relevanten Aspekte des Verkehrsszenarios im Emotionsmodell abgebildet werden: Die Straße wird als Objekt bewertet, die Fahrmanöver von anderen Verkehrsteilnehmern als Aktionen von Agenten. Alle weiteren Konsequenzen der Fahrsituation werden hinsichtlich ihrer Zielbeeinflussung evaluiert.

Aufgabenkomplexität von Verkehrssituationen

Nach dem OCC-Modell (Bild 27) folgern sich die Emotionen „love“ und „hate“ direkt aus der Bewertung der Aspekte des Objekts bezüglich der Einstellung hinsichtlich dessen Attraktivität. Die Adaptivität an den Straßenverkehr legt nahe, die Aspekte der Straße orientierend an der Aufgabenkomplexität der Verkehrssituation zu evaluieren, um daraufhin aus der Komplexität ein „Mögen“ oder „Nicht-Mögen“ zu folgern. Je schwieriger und komplexer die Verkehrssituation, desto geforderter und belasteter der Fahrer. Damit sinkt auch die Attraktivität der jeweiligen Situation und der Emotionswert entwickelt sich in Richtung „hate“.

Zur Ableitung der Komplexität aus einer Verkehrssituation werden die Ergebnisse der Studien von FASTENMEIER verwendet (vgl. [51]). Dieser beschreibt darin die Modifikation eines Modells, das zuvor von v. BENDA zur systematischen Klassifikation von Verkehrssituationen entwickelt wurde. Dabei wurde eine Vielzahl an Einflussgrößen identifiziert, welche die Gefährlichkeit einer Verkehrssituation beschreiben. FASTENMEIER reduzierte dieses Schema auf drei Klassifikationsgruppen, um die Anwendbarkeit in der Praxis zu steigern. Es verblieben die Gruppen Straßentyp und -ausbau, Trasse und Verkehrsablauf, mit zusätzlich jeweils reduzierter Variablenanzahl. Neben der Klassifikation von Verkehrssituationen und deren Häufigkeitsverteilung, quantifizierte FASTENMEIER die Beanspruchung des Fahrers in den Fahrsituationen. Dazu wurde der handlungsorientierte Ansatz des Fragebogens zur Arbeitsanalyse (FAA) verwendet. Die Aufgabenkomplexität wird dabei als Kombination aus Informationsverarbeitung und Fahrzeugbedienung definiert.

Als Ergebnis der Evaluation entsteht eine indexbasierte Klassifizierung der Situationen, wobei die Verkehrssituation kodiert wurde. Die Indizes repräsentieren dabei die summarische Auswertung des FAA und dienen daher als relative Werte, um die Informationsverarbeitung und Fahrzeugbedienung zu bewerten. Der Index für Informationsverarbeitung (IV) repräsentiert in Abhängigkeit von den Straßenverhältnissen den Aufwand, eine bestimmte Situation ganzheitlich zu erfassen, während der Index für Fahrzeugbedienung (FB) den Regelaufwand zur Steuerung des Fahrzeugs widerspiegelt. Der für die Autobahnfahrt relevante Ausschnitt der kompletten Tabelle nach FASTENMEIER ist in Tabelle 5 dargestellt. Eine exakte Beschreibung der in der Tabelle verwendeten Abkürzungen ist im Anhang (A) einzusehen.

Tabelle 5: Taxonomie zur Aufgabenkomplexität von Verkehrssituationen nach FASTENMEIER [51]

Situationsnummer	Situations-taxonomie	unscharfe Kurzbeschreibung der Situation auf einer BAB („+1“: Seitenstreifen/Standspur)	Index Informationsverarbeitung	Index Fahrzeugbedienung
1	A1-K0	3+1 Fahrstreifen	55	13
2	A1-K0-H	3+1 Fahrstreifen in Kurve	60	13
3	A1-K3	3+1 Fahrstreifen mit Ausfahrt	76	17
4	A1-K3-H	3+1 Fahrstr. mit Ausfahrt in Kurve	76	17
5	A1-K4	Auffahrt auf 3+1 Fahrstreifen	86	21
6	A2-K0	2+1 Fahrstreifen	56	14
7	A2-K0-H	2+1 Fahrstreifen in Kurve	61	14
8	A2-K3	2+1 Fahrstreifen mit Ausfahrt	76	17
9	A2-K3-H	2+1 Fahrstr. mit Ausfahrt in Kurve	76	17
10	A2-K4	Auffahrt auf 2+1 Fahrstreifen	86	21
11	A3-K0	3 Fahrstreifen	56	14
12	A3-K3	3 Fahrstreifen mit Ausfahrt	76	17
13	A3-K3-H	3 Fahrstr. mit Ausfahrt in Kurve	76	17
14	A3-K4	Auffahrt auf 3 Fahrstreifen	88	21
15	A4-K0	2 Fahrstreifen	60	14
16	A4-K0-H	2 Fahrstreifen in Kurve	61	14
17	A4-K3	2 Fahrstreifen mit Ausfahrt	78	17
18	A4-K3-H	2 Fahrstr. mit Ausfahrt in Kurve	78	17
19	A4-K4	Auffahrt auf 2 Fahrstreifen	88	21

Bei der Emotionsbildung werden die Indizes als Grundlage zur relativen Bewertung des „Mögens“ und „Nicht-Mögens“ berücksichtigt. Ein mittlerer Wert definiert dabei den neutralen Zustand zwischen „Mögen“ und „Nicht-Mögen“. Von diesem ausgehend steigert sich das „Nicht-Mögen“ mit dem Anstieg der Informationsverarbeitung und Fahrzeugbedienung, „Mögen“ entwickelt sich entsprechend umgekehrt.

Emotionspaar „love – hate“

Damit eine Bewertung der Aufgabenkomplexität durch das Schema nach FASTENMEIER möglich wird, wurde in einem ersten Schritt die tabellarische Darstellung in ein dreidimensionales Array übertragen. Die Dimensionen beschreiben dabei den Straßentyp, den Knotentyp und die sonstigen Merkmale. Letztere sind dabei der Horizontalverlauf, der Vertikalverlauf, Engstellen oder eine Fahrtrichtungsänderung. Das Zusammenfassen dieser Kriterien zu einer Dimension ist möglich, da bei einer Beschränkung auf Autobahnen und Landstraßen jeweils nur maximal eines dieser Kriterien in der Taxonomie nach FASTENMEIER gleichzeitig signifikant ist.

Bei der Einteilung der Dimension des Straßentyps werden vier Autobahntypen und zwei Landstraßentypen unterschieden. Dies muss von einer übergeordneten Instanz detektiert und als Eingangsgröße vorgegeben werden. Weiterhin werden fünf Knotentypen unterschieden. Auch dies muss als Eingangsgröße vorliegen. Ebenso ist es notwendig, dass bei einer Fahrtrichtungsänderung eine entsprechende Eingangsgröße bereitgestellt wird. Das Vorhandensein von Engstellen, Kurven und Steigungen kann mittels Abgleich der aktuellen Spurbreite, Spurkrümmung oder Steigung evaluiert werden.

Nachdem der entsprechende Klassifikationstyp nach FASTENMEIER ausgewertet wurde, können die zugehörigen Werte aus der Informationsverarbeitung und Fahrzeugbedienung ausgelesen werden. Zur Umsetzung einer Emotionsbildung werden die beiden Werte in Relation zur möglichen Bandbreite der Indexwerte gesetzt und das Minimum ausgegeben. Der Optimalzustand einer geraden, gut ausgebauten Straße (A1-K0) wird den Indexwerten $IV=55$ und $FB=13$ zugeordnet. Diese Minimalwerte entsprechen einem $I_{love-hate}$ von „1“. Nehmen die Werte der Indizes zu, sinkt der Wert von $I_{love-hate}$. Die Maximalwerte der Indizes für die analysierbaren Straßenverhältnisse für Autobahnen und Landstraßen liegen bei $IV = 88$ und $FB = 21$. Für beide Indexwerte wird separat ein $I_{love-hate}$ -Wert berechnet, der jeweils niedrigere (schlechter bewertete) Wert wird in $I_{love-hate}$ ausgegeben. Somit ergibt sich die Berechnungsvorschrift für das Emotionspaar „love-hate“ zu:

$$I_{love-hate} = \begin{cases} \min \left(\frac{IV - IV_{med}}{IV_{min} - IV_{med}}, \frac{FB - FB_{med}}{FB_{min} - FB_{med}} \right) & \text{für } IV < IV_{med}, FB < FB_{med}, \\ \min \left(\frac{-(IV - IV_{med})}{IV_{max} - IV_{med}}, \frac{-(FB - FB_{med})}{FB_{max} - FB_{med}} \right) & \text{für } IV \geq IV_{med}, FB \geq FB_{med}. \end{cases} \quad (10)$$

In Bild 33 ist ein Beispiel für den Verlauf von $I_{love-hate}$ dargestellt. Zu Beginn der Testfahrt ($t = 1\text{ s}$ bis $t = 8\text{ s}$) liegt der Optimalfall eines gut ausgebauten, krümmungsfreien Autobahnsegmentes vor. Danach unterschreitet die Fahrspurbreite den Schwellwert für eine optimal ausgebaute Autobahn und senkt dadurch $I_{love-hate}$. Ab $t = 18\text{ s}$ sinkt der Ausgabewert von $I_{love-hate}$ auf einen noch geringeren Wert, da sich das Fahrzeug nun in einer Kurve befindet.

Die auftretenden Schwankungen des $I_{love-hate}$ -Werts zwischen $t = 21\text{ s}$ und $t = 28\text{ s}$ werden durch geringe Krümmungsschwankungen der durchfahrenen Kurve um den hinterlegten Schwellwert verursacht.

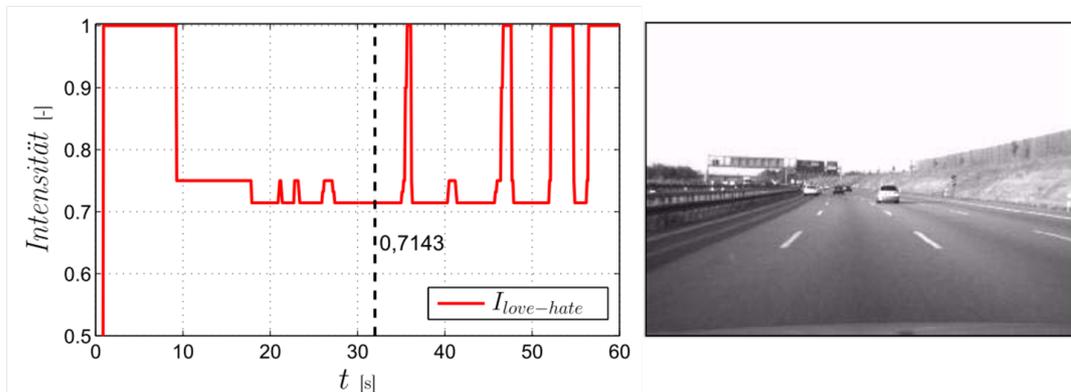


Bild 33: Intensitätsverlauf des Emotionspaares „love-hate“ und Verkehrsszene bei $t = 32\text{ s}$

4.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel beschäftigte sich mit der Analyse und Umsetzung einer umfassenden Situationsbeschreibung. Zu Beginn wurden in einer Anforderungsanalyse die relevanten Situationsmerkmale definiert. Dazu wurden zunächst in einer domänenübergreifenden Betrachtung die Aspekte identifiziert, durch die eine Situation allgemein beschrieben ist. Diese wurden anschließend auf Sinnhaftigkeit und Übertragbarkeit auf die Domäne Straßenverkehr überprüft und mit den Merkmalen aus dem Stand der Technik kombiniert. Eine abschließende Klassifikation erlaubt eine Einteilung der Anforderungen in Aufgaben der Wahrnehmung, der Prädiktion und der Bewertung. Die Anforderungen der drei Klassen galt es anschließend algorithmisch umzusetzen.

Die Situationsanalyse beschäftigt sich dabei mit den Aufgaben der Wahrnehmung und Prädiktion. Um eine stabile und robuste Erfassung statischer und dynamischer Objekte der Umwelt zu gewährleisten, wurde ein Fusionsansatz realisiert. Dafür wurden sowohl die Daten der Sensoren zur maschinellen Wahrnehmung als auch die der Sensoren zur Erfassung der Fahrzeugeigenbewegung verwendet.

Auf Basis der erfassten physikalischen Eigenschaften anderer Fahrzeuge konnten anschließend Merkmale definiert werden, welche charakteristische Elemente bestimmter Fahrmanöver darstellen. Mit Hilfe der Methode der Hidden Markov Models ist es daraufhin möglich, bestimmte Elementaraktionen der Fremdfahrzeuge zu erkennen, welche sich in einem hybriden Gesamtmodell zu Fahrmanövern vereinen lassen.

Betrachtet man das Fahrmanöver als Teilplan eines übergeordneten Handlungsablaufes, so lassen sich für jedes Fahrmanöver Planhypothesen bilden. Diese Hypothesen sind jedoch nicht starr definiert, sondern werden durch diverse äußere Einflüsse der Verkehrsumgebung modifiziert. Dadurch lassen sich wahrscheinliche zukünftige Fahrmanöver auf Basis erwartungsbasierter Annahmen vorhersagen.

Um eine Einschätzung des Konfliktpotentials einer Verkehrssituation vornehmen zu können, wurde eine Verkehrskonfliktanalyse durchgeführt. Diese verknüpft die erfassten Verkehrssituationen aus der Manövererkennung mit Fehlhandlungen, die in der jeweiligen Situation auftreten können. Eine Quantifizierung dieser Fehler erfolgt über Zeit- und Distanzmaße. Entsprechend der vorgeschlagenen Fehlerbaumstruktur lässt sich dann eine Konfliktwahrscheinlichkeit ableiten.

Die Situationsinterpretation beschäftigt sich zur Umsetzung der normativen Anforderungen mit einem in diesem Zusammenhang neuartigen Ansatz. Da die menschliche Bewertung der Umwelt zu einem Großteil von Emotionen gelenkt wird, wurde ein Modell realisiert, das die Entstehung menschlicher Emotionen nachbildet. Das allgemeingültig beschriebene Modell wurde daraufhin in die Domäne Straßenverkehr transferiert. Die Eigenschaften von Objekten, die Aktionen von anderen Fahrzeugen und die Konsequenzen aus Verkehrskonstellationen wurden in die Betrachtung mit einbezogen und hinsichtlich normativer Kriterien bewertet. Das Modul zur Emotionsentstehung integriert dabei alle zuvor gewonnenen Erkenntnisse der Situationsanalyse und bildet innere Zustände des Ego-Fahrzeuges ab, die nun nachträglich mit bestimmtem Fahrverhalten verknüpft werden können.

Das adaptierte emotionstheoretische Modell wurde bisher noch nie in den kompletten Wahrnehmungs-Verhaltens-Zyklus eines realen (semi-)autonomen Fahrzeugs zur Umsetzung situationsadaptiven Fahrverhaltens durch Regleradaptation mittels einer zentralen Beurteilungsinstanz aufgenommen.

5 Fahrverhaltensanalyse

Um fahrerspezifische Optimalitätskriterien bei der Durchführung von Fahrmanövern in gewissen Fahrsituationen zu identifizieren, wird in diesem Kapitel ein Verfahren zur Parameterschätzung präsentiert. Dazu wird ein „Bilevel Optimierungsproblem“ formuliert und numerisch gelöst. Die theoretische Anwendung der Bilevel Optimierung wird am Beispiel der optimaltheoretischen Fahrzeugführung beim Fahrspurwechsel dargestellt.

5.1 Formulierung des Optimierungsproblems

Bilevel Optimierungsprobleme stellen einen Spezialfall eines hierarchischen Optimierungsproblems dar. Ein Bilevel Problem bezeichnet eine Optimierungsproblemstellung mit einem hierarchischen Zwei-Ebenen-Ansatz, bei der Teile der Nebenbedingungen des sog. „Upper Level Problem“ (ULP) durch ein weiteres parametrisches Optimierungsproblem - das „Lower Level Problem“ (LLP) - definiert sind. Ein allgemeiner Überblick über Theorie sowie Anwendungsfälle finden sich z.B. in [4], [5], [14], [35], [99].

Die Optimierungsproblemstellung sowie die charakteristischen zwei Problemebenen werden in der Folge erläutert.

Grundlage für die erforderliche Parameteridentifikation stellt die optimaltheoretische Modellierung des Fahrers dar. In der optimaltheoretischen Modellierung des menschlichen Fahrverhaltens wird die Fahraufgabe als ein Problem der optimalen Steuerung aufgefasst. Grundannahme ist, dass der Mensch während der Ausführung bestimmter Fahraktionen optimal handelt in dem Sinn, dass er beim Ausführen der Fahraufgabe Kostenfunktionen optimiert, um die Zielerfüllung mit minimalen Kosten zu erreichen. Das die Fahrerintention repräsentierende Optimalitätskriterium setzt sich zusammen aus einer Linearkombination mehrerer charakteristischer Teilkriterien f_i , die über Parameter w_i verschieden stark gewichtet sind:

$$f = \sum_i w_i f_i \quad (11)$$

Die Gewichtungparameter w_i sind über das betrachtete Zeitintervall konstant und sollen einzeln auf das Intervall $w_i \in [0, 1]$ begrenzt sein. Ferner wird mit der geforderten Bedingung $\sum_i w_i = 1$ Eindeutigkeit und Vergleichbarkeit der Lösung sichergestellt.

Die optimaltheoretische Modellierung des Fahrers stellt ein Problem der optimalen Steuerung dar. Es erfordert die mathematische Modellierung der Fahrzeugführung als Steuerprozess. Das System Mensch-Fahrzeug-Fahrbahn wird dazu als Fahrdynamikmodell abgebildet, dessen Systemdynamik sich über ein gewöhnliches Differentialgleichungssystem 1. Ordnung

$$\dot{z}(t) = h(z(t), u(t)) \quad (12)$$

mit den entsprechenden Zustandsvariablen z und Steuergrößen u darstellen lässt. Die systemtheoretische Modellierung der Fahrdynamik ist in Kapitel 5.2 ausführlich beschrieben.

Damit ergibt sich die untere Stufe des Bilevel Problems, das sog. Lower Level Problem als Optimalsteuerungsproblem, mit dem Ziel, die Steuerung u so zu bestimmen, dass das parametrische Gütefunktional $f = \sum_i w_i f_i$ minimal wird.

Das LLP lässt sich als gewöhnliches Optimierungsproblem der Form

$$\min f(z(t), u(t) | w) = \sum_i w_i \cdot f_i(z(t), u(t)) \quad (13)$$

unter den Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= h(z(t), u(t)), \\ z(t_0) &= z_0, \\ z(t_f) &= z_f \end{aligned}$$

formulieren. Darin werden zusätzlich zur Systemdynamik weitere zu erfüllende Nebenbedingungen in Form der expliziten Randbedingungen $z(t_0) = z_0$ und $z(t_f) = z_f$ für ein gegebenes Zeitintervall $t \in [t_0, t_f]$ berücksichtigt.

Die Identifikation der menschlichen Fahrverhaltensweise in bestimmten Fahrmanövern und Fahrsituationen erfordert die Bestimmung der charakteristischen Gewichtungparameter w_i des LLP-Gütefunktional f . Es muss diejenige Kombination der zugelassenen Basisgütekriterien gefunden werden, durch die das beobachtete Fahrzeugverhalten bzw. die aufgezeichneten Fahrverläufe am besten nachgebildet werden. Die aus der optimalen Lösung $(z, u)_{LLP}$ des LLP berechneten Daten p_{comp} sollen an die realen Messdaten p_{data} angenähert werden, d.h. das Quadrat der Abweichung von berechneten Daten und den korrespondierenden Messdaten soll minimiert werden. Das resultierende Optimierungsproblem des Upper Level lautet somit

$$\min F(z(t), u(t), w) := d(p_{data}(t), p_{comp}(z(t), u(t) | w)) \quad (14)$$

$$= \text{dist}(p_{data}(t), p_{comp}(z(t), u(t) | w))^2. \quad (15)$$

Die kombinierte Betrachtung von ULP und LLP ergibt schließlich das Bilevel Problem. Die untere Ebene des LLP enthält die optimaltheoretische Modellierung des Fahrers, deren unbekannte Modellparameter durch den Abgleich berechneter Modellgrößen mit geeigneten Referenzgrößen in der höheren Stufe des ULP bestimmt werden. Bild 34 fasst die Problemstellung der Bilevel Optimierung schematisch am Beispiel eines Fahrstreifenwechsels zusammen.

5.1.1 Diskretisierung der Problemstellung

Zur numerischen Lösung des Optimierungsproblems erfolgt eine Diskretisierung des Problems über der Zeit. Dazu wird das betrachtete Zeitintervall $[t_0, t_f]$ in äquidistante Teilintervalle mit konstanter Zeitschrittweite Δ eingeteilt. Für die kontinuierliche Zeitachse ergibt sich somit die diskrete Folge an Zeitpunkten $t_k = t_0 + k \cdot \Delta$, $k = 1, \dots, N$ mit der Anzahl N an Zeitpunkten, die sich aus $t_N = t_f$ ergibt.

Die Diskretisierung der Differentialgleichung der Systemdynamik

$$\dot{z}(t) = h(z(t), u(t)) \quad (16)$$

erfolgt mittels des expliziten Euler-Verfahrens

$$z(t_{k+1}) = z(t_k) + \Delta \cdot h(z(t_k), u(t_k)). \quad (17)$$

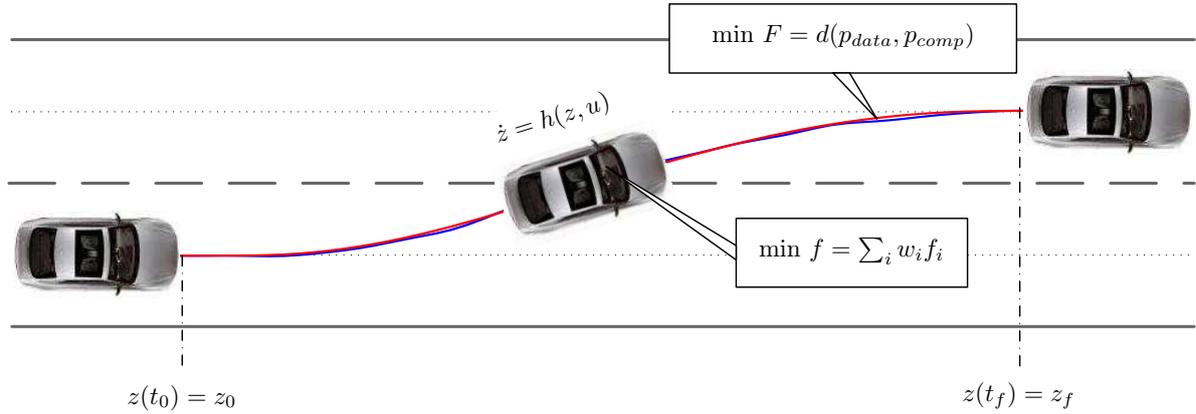


Bild 34: Schematische Darstellung der Problemstellung der Bilevel Optimierung zur Identifikation der menschlichen Ausführung eines Fahrspurwechsels

Dieses explizite Diskretisierungsverfahren verwendet zur Berechnung der Variablen des nächsten Zeitschritts ausschließlich bereits bekannte Werte der Variablen und stellt somit ein einfaches und leicht umzusetzendes Verfahren dar.

Mit Diskretisierung der Zeit lassen sich die Vektoren der zu diskreten Zeitpunkten auftretenden Zustands- und Eingangsgrößen zu Vektoren \bar{z} bzw. \bar{u} zusammenfassen:

$$\bar{z} = \begin{bmatrix} z(t_0) \\ \vdots \\ z(t_f) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n_z \cdot N} \quad \bar{u} = \begin{bmatrix} u(t_0) \\ \vdots \\ u(t_f) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n_u \cdot N} \quad (18)$$

Die Systemdynamik in diskretisierter Form lässt sich somit in Matrix-Vektornotation kompakt darstellen durch die Gleichung

$$h(\bar{z}, \bar{u}) = 0, \quad (19)$$

in die sich die Randbedingungen $z(t_0) = z_0$ und $z(t_f) = z_f$ integrieren lassen und somit die zu erfüllenden Nebenbedingungen der Systemdynamik und der Randbedingungen kompakt zusammengefasst sind durch

$$\tilde{h}(\bar{z}, \bar{u}) = 0. \quad (20)$$

Damit ergibt sich das diskretisierte Lower Level Problem zu

$$\min f(\bar{z}, \bar{u} | w) \text{ unter der Nebenbedingung } \tilde{h}(\bar{z}, \bar{u}) = 0. \quad (21)$$

Das Upper Level Problem in diskretisierter Form lautet entsprechend:

$$\begin{aligned} \min F(\bar{z}, \bar{u}, w) &:= \text{dist}(p_{data} - p_{comp}(\bar{z}, \bar{u} | w))^2 \\ &= \sum_{k=1}^N (p_{data}(t_k) - p_{comp}(\bar{z}_k, \bar{u}_k | w))^2, \end{aligned} \quad (22)$$

wobei \bar{z} und \bar{u} das LLP-Zielfunktional $f(\bar{z}, \bar{u} | w)$ minimieren müssen unter Erfüllung der Gleichheitsnebenbedingungen der Systemdynamik sowie der Randwerte $\tilde{h}(\bar{z}, \bar{u}) = 0$. Die Existenz eines globalen Minimums wird in [5] für ein analoges Bilevel Problem bewiesen [101].

5.1.2 Reformulierung des Optimierungsproblems zum Bilevel Program

Die Lösung des Bilevel Problems bzw. die Anwendung von Lösungsalgorithmen erfordert die Umformulierung in ein gewöhnliches einstufiges Optimierungsproblem. In der Literatur existieren verschiedene Strategien, mit denen sich Bilevel Probleme auf gewöhnliche Optimierungsprobleme transformieren lassen. Einen Überblick sowie theoretische Grundlagen bieten z.B. [99], [35].

Eine Möglichkeit ist dabei durch die sog. Karush-Kuhn-Tucker Bedingungen (KKT-Bedingungen) gegeben. Dabei wird das LLP über dessen Optimalitätsbedingungen 1. Ordnung der nichtlinearen Optimierungstheorie an das ULP gekoppelt, bzw. als Nebenbedingung in das ULP integriert. Die KKT-Bedingungen stellen notwendige Bedingungen für die Optimalität einer Lösung dar. Für eine Minimalstelle der LLP-Optimierungsaufgabe aus Gleichung (21) sind die KKT-Bedingungen gemäß [101] gegeben durch

$$\nabla f + \nabla \tilde{h} \lambda = 0, \quad (23)$$

mit den eingeführten Lagrange-Multiplikatoren λ . An einer optimalen Lösung müssen somit die Gradientenvektoren der LLP-Zielfunktion ∇f und der LLP-Gleichheitsnebenbedingungen $\nabla \tilde{h}$ kollinear sein [73].

Mittels dieser KKT-Bedingungen kann das zweistufige Optimierungsproblem auf ein Single Level Problem reduziert werden [101]:

$$\begin{aligned} \min F(\bar{z}, \bar{u}, w) &= \| p_{data} - p_{comp}(\bar{z}, \bar{u} \mid w) \| & (24) \\ &= \sum_{k=1}^N (p_{data}(t_k) - p_{comp}(\bar{z}_k, \bar{u}_k \mid w))^2 \end{aligned}$$

unter den Nebenbedingungen

$$\begin{aligned} 0 &= \nabla f(\bar{z}, \bar{u}, w) + \nabla \tilde{h}(\bar{z}, \bar{u}) \lambda, \\ 0 &= \tilde{h}(\bar{z}, \bar{u}), \end{aligned}$$

mit ∇ als dem Gradient bezüglich \bar{z} und \bar{u} . Zusätzlich sollen für die Anwendung der Optimierung die Forderungen bezüglich der zu identifizierenden Gewichtungparameter w_i gemäß Kapitel 5.1 berücksichtigt werden:

$$\begin{aligned} 0 &= \sum_i w_i - 1 \\ w_i &\geq 0 \end{aligned}$$

Das so erhaltene Optimierungsproblem stellt ein Standardproblem der nichtlinearen Optimierung dar, das mit vielen Lösungsalgorithmen gelöst werden kann. In dieser Arbeit findet der IPOPT-Algorithmus [178] Anwendung, dessen Eignung bereits in einer ähnlichen Anwendung und Aufgabenstellung [5] bestätigt wurde.

5.1.3 Skalierung der Gewichtungsfaktoren

Die Optimierung liefert als Ergebnis die optimalen Gewichtungsfaktoren w_i der Basiskostenfunktionen, durch die die Messdaten gemäß dem ULP-Zielfunktional am besten approximiert werden. Die gewichtete Summe der Basiskostenfunktionen ergibt die Lower Level-Kosten $f = \sum_i w_i f_i$. Zur Interpretation der Optimierungsergebnisse ist jedoch infolge der unterschiedlichen Größenordnungen der Basiskosten f_i eine Skalierung der Wichtungsfaktoren w_i erforderlich. Die Umrechnung ermöglicht somit eine Betrachtungsweise und einen Vergleich der verschiedenen in die Fahraufgabe einfließenden Minimierungskriterien im prozentualen Sinn. Mittels einer Umrechnung wird eine vergleichbare Größenordnung der verschiedenen Teilkriterien erreicht.

Die Berechnung der zur Interpretation der Optimierungsergebnisse heranzuziehenden Gewichtungsfaktoren \tilde{w}_i erfolgt gemäß [101]. Die optimale Lösung einer Basiskostenfunktion liefert die minimalen Kosten der jeweiligen Kostenfunktion. Andere Zustands- und Steuergrößenverläufe, die die Nebenbedingungen der Systemdynamik und die Randbedingungen erfüllen, resultieren in höheren Kosten. Sei (z_i, u_i) die optimale Lösung des Lower Level Problem der Basiskostenfunktion f_i , so resultiert jeder andere Verlauf von Systemgrößen (z_j, u_j) in höheren Kosten. Es gilt somit:

$$f_{ij} := f_i(z_j, u_j) \leq f_i(z_i, u_i) \quad \forall j \quad (25)$$

Um alle Basisfunktionen gleichberechtigt in das Zielfunktional einfließen lassen zu können, wird als Referenzwert der arithmetische Mittelwert

$$f_{im} := \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_i(z_j, u_j) \quad (26)$$

betrachtet, wobei (z_j, u_j) jeweils die optimale Lösung einer der betrachteten m Basiskostenfunktionen darstellt. Anhand dem arithmetischem Mittel f_{im} und den minimalen Kosten f_{ij} einer Kostenfunktion ergibt sich die skalierte Kostenfunktion \tilde{f}_i zu

$$\tilde{f}_i := \frac{1}{f_{im} - f_{ij}} f_i, \quad (27)$$

mit der sich die Wichtungsfaktoren w_i in die skalierten Wichtungsparameter \tilde{w}_i transformieren lassen:

$$\tilde{w}_i := \frac{f_{im} - f_{ij}}{\sum_{j=1}^m (f_{jm} - f_{jl}) w_j} w_i \quad (28)$$

Zudem erfolgt in Gleichung (28) die Normierung der Summe der skalierten Gewichtungsfaktoren auf 1. Die interpretierten Gewichtungsfaktoren \tilde{w}_i geben so die relative Bedeutung der einzelnen Kostenziele wieder.

5.1.4 Normierung der Abstandsminimierung

Ziel der ULP-Optimierung ist die Parameteridentifikation der unbekanntem Wichtungsfaktoren w_j über den Abgleich der berechneten Modellgrößen z_{comp} mit Referenzdaten z_{data} des beobachteten realen Systemverhaltens zu den diskreten Zeitpunkten $t_k, k = 1, \dots, N$.

Die allgemeine Zielfunktion F des ULP aus Gleichung (24) lässt sich umformuliert darstellen in der Form

$$\begin{aligned} F &= \sum_{k=1}^N (\rho_{data}(t_k) - \rho_{comp}(\bar{z}_k, \bar{u}_k | w))^2 \\ &= \sum_{k=1}^N \sum_j k_j (z_{data,j}(t_k) - z_{comp,j}(t_k | w))^2. \end{aligned} \quad (29)$$

mit dem eingeführten Skalierungsfaktor k_j der j -ten Zustandsgröße, die für den ULP-Abgleich herangezogen wird.

Über den Skalierungsfaktor k_j lassen sich Zustände verschiedener Größenordnung geeignet skalieren sowie Messungenauigkeiten berücksichtigen [28]. Ferner kann über k_j die Auswahl der zu approximierenden Zustandsgrößen erfolgen. Über die Belegung $k_j = 0$ können messtechnisch nicht erfasste, sowie nicht zu berücksichtigende Zustandsgrößen des mathematischen Modells im ULP-Zielfunktional ausgeschlossen werden.

Die verschiedenen Zustandsgrößen unterscheiden sich während der Durchführung eines Spurwechsels in ihren Wertebereichen deutlich. Während Winkelvariablen, wie z.B. der Radlenkwinkel oder der Gierwinkel, maximale Werte in der Größenordnung von 10^{-2} rad einnehmen, wächst die Querablage betragsmäßig bei der Ausführung eines Spurwechsels beginnend bei 0 m auf Werte zwischen 3 m und ca. 4 m an.

Durch den Unterschied in der Größenordnung werden bei der Abstandsminimierung Zustandsgrößen mit geringem Wertebereich bei gleicher Gewichtung weniger genau approximiert. Um die Größen gleichberechtigt im Zielfunktional zu berücksichtigen, werden sie in Abhängigkeit ihres Wertebereiches gewichtet. Die Normierung des Einflusses der Zustandsgrößen auf das Gütefunktional erfolgt über die Differenz aus Maximal- und Minimalwert der Zustandsgröße, sodass für k_j folgt

$$k_j = \frac{1}{(z_{j,max} - z_{j,min})^2}.$$

Um zudem Schwerpunkte bei der Approximation bestimmter Fahrdaten setzen zu können oder unzuverlässige mit Messungenauigkeiten behaftete Zustandsgrößen weniger stark zu gewichten bzw. auszuschließen, wird zusätzlich der multiplikative Faktor k_j eingeführt. Somit ergibt sich schließlich

$$k_j = \frac{k_j}{(z_{j,max} - z_{j,min})^2}. \quad (30)$$

5.2 Modellierung der Fahrzeugdynamik

Die Modellierung menschlichen Fahrverhaltens als Problem der optimalen Steuerung erfordert die Abbildung der Fahrdynamik im System Mensch-Fahrzeug-Fahrbahn. Die Fahrzeugführung muss als Steuerprozess der Form $\dot{z}(t) = h(z(t), u(t))$ mathematisch modelliert werden. Für die Berechnung der Fahrzeugbewegung existieren viele Fahrdynamikmodelle, die sich in der Abbildungsgüte des fahrdynamische Verhaltens unterscheiden.

Einen vereinfachten, in der Praxis insbesondere zur Regelung bewährten und oft verwendeten Ansatz stellt die Modellierung als Einspurmodell (ESM) dar. Das Einspurmodell beschreibt ein ebenes Fahrzeugmodell, bei dem der Schwerpunkt des Fahrzeugs in Fahrbahnhöhe liegt. Die Räder an Vorder- und Hinterachse werden zu je einem Rad einer Achse zusammengefasst. Durch diese Annahmen werden Vertikal-, Nick- und Wankbewegungen vernachlässigt, es erfolgt lediglich die Betrachtung der Horizontaldynamik. Das Einspurmodell stellt somit ein vereinfachtes Modell dar, das die Fahrdynamik hinreichend genau abbildet und das sich mit Methoden der Optimalsteuerung behandeln lässt. Im Folgenden werden die Grundlagen des verwendeten Fahrdynamikmodells beschrieben.

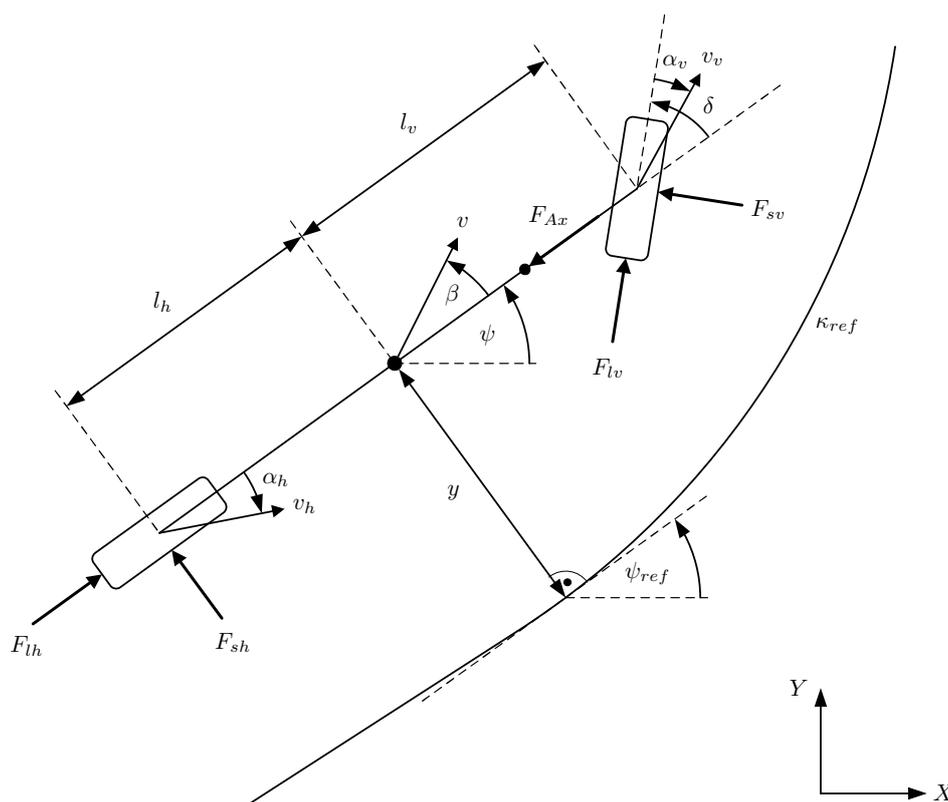


Bild 35: Lineares Einspurmodell

Bild 35 zeigt das lineare Einspurmodell mit den für die Modellierung erforderlichen geometrischen und kinematischen Größen sowie Kräften. Der Schwerpunkt des Fahrzeugs der Masse m_{Fzg} liegt auf Fahrbahnhöhe im Abstand l_v bzw. l_h zum vorderen bzw. hinteren Radmittelpunkt. Das Fahrzeug hat sich bezüglich eines inertialen, geografisch fixierten X-Y-Koordinatensystems um den Gierwinkel ψ gedreht. Das Vorderrad ist um den Radlenk-

winkel δ eingeschlagen. Der Geschwindigkeitsvektor v des Schwerpunkts schließt mit der Fahrzeuginnenachse den Schwimmwinkel β ein. Analog schließen die Bewegungsrichtungen der Räder d.h. die Geschwindigkeitsvektoren v_i an den Rädern mit den entsprechenden Radebenen den Schräglaufwinkel α_i ein. An den Rädern wirken in Radlängsrichtung die Longitudinalkräfte F_{li} sowie die bei Kurvenfahrt in Querrichtung zu den Reifen entstehenden Seitenkräfte F_{si} .

Für Querbeschleunigungen unterhalb 4 m/s^2 kann für die Reifenmodellierung vereinfacht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Schräglaufwinkel α_i und der Seitenkraft F_{si} über die Schräglaufsteifigkeit c_i angesetzt werden:

$$F_{si} = c_i \cdot \alpha_i \quad (31)$$

Zudem greifen am Fahrzeug aerodynamische Kräfte an, wobei die Kraftkomponente in Querrichtung vernachlässigt wird. Die Luftwiderstandskraft F_{Ax} wirkt entgegen der Fahrtrichtung entlang der Fahrzeuginnenachse und lässt sich über Fahrzeugstirnfläche A , Luftwiderstandsbeiwert c_w und Luftdichte ρ formelmäßig angeben zu

$$F_{Ax} = \frac{1}{2} \rho c_w A v^2 := L v^2. \quad (32)$$

Die Bewegungsgleichungen des Einspurmodells für translatorische und rotatorische Bewegung in der Ebene ergeben sich aus Kräfte- und Momentengleichgewichten des Fahrzeugs gemäß [159]:

- Das Kräftegleichgewicht in Fahrzeuginnenachse ergibt:

$$m_{Fzg} \cdot \dot{v}_x = F_{lv} \cdot \cos \delta - F_{sv} \cdot \sin \delta + F_{lh} - \frac{1}{2} \rho c_w A v_x^2 + m_{Fzg} \cdot \dot{\psi} \cdot v_y \quad (33)$$

- Das Kräftegleichgewicht in Fahrzeugquerrichtung liefert:

$$m_{Fzg} \cdot \dot{v}_y = F_{lv} \cdot \sin \delta - F_{sv} \cdot \cos \delta + F_{sh} - m_{Fzg} \cdot \dot{\psi} \cdot v_x \quad (34)$$

- Das Momentengleichgewicht um die Fahrzeuginnenachse im Schwerpunkt ergibt sich zu:

$$J_{zz} \cdot \ddot{\psi} = (F_{lv} \cdot \sin \delta + F_{sv} \cdot \cos \delta) \cdot l_v - F_{sh} \cdot l_h \quad (35)$$

Die Differentialgleichungen (33) bis (35) beschreiben die Dynamik des Fahrzeugs in der horizontalen freien Ebene. Die Fahrzeugführung in Querrichtung erfolgt in der Regel jedoch als „Tracking-Regelung“ entlang vorgegebener Trajektorien, wie etwa im Straßenverkehr entlang der Fahrbahn [159]. Um die Führungsaufgabe bezüglich vorgegebener Trajektorien zu berücksichtigen, werden obige Gleichungen gemäß [179] um die kinematischen Beziehungen zu einer Referenzbahn anhand der Größen Querablage y und Winkelfehler ψ_{rel} erweitert. Als Referenzbahn (Index: *ref*) wird in der Folge die Fahrbahnmitte betrachtet.

Der Winkelfehler bzw. relative Gierwinkel zwischen Fahrzeuginnenachse und der Referenzorientierung lässt sich darstellen in der Form

$$\psi_{rel} = \psi - \psi_{ref}. \quad (36)$$

Die Zeitableitung ergibt sich mit der Krümmung der Referenzbahn κ_{ref} zu

$$\dot{\psi}_{rel} = \dot{\psi} - \kappa_{ref} \cdot v. \quad (37)$$

Für die Änderung der Querablage gilt nach [44] die Differentialgleichung

$$\dot{y} = \psi_{rel} \cdot v + \beta \cdot v. \quad (38)$$

Die Definition der fahrbahnbezogenen Größen stimmt im Vergleich zu [159] mit den entsprechenden Messsignalen des Versuchsträgers überein.

Nach Umformung und Linearisierung der Gleichungen lässt sich das System in eine Zustandsraumdarstellung der Form $\dot{z} = Az + Bu + Es$ mit der Ausgangsgleichung $y = Cz$ überführen:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\delta} \\ \dot{\psi}_{rel} \\ \dot{y} \end{bmatrix}}_z = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{Lv^2 - (c_v + c_h)}{m_{Fzg}v} & \frac{c_h l_h - c_v l_v}{m_{Fzg}v^2} - 1 & \frac{c_v}{m_{Fzg}v} & 0 & 0 \\ \frac{c_h l_h - c_v l_v}{J_{zz}} & -\frac{c_h l_h^2 - c_v l_v^2}{J_{zz}v} & \frac{c_v l_v}{J_{zz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -v & 0 & 0 & v & 0 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} \beta \\ \psi \\ \delta \\ \psi_{rel} \\ y \end{bmatrix}}_z + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_B \cdot \underbrace{\dot{\delta}_L}_u + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ v \\ 0 \end{bmatrix}}_E \cdot \underbrace{\kappa_{ref}}_s \quad (39)$$

Zustandsgrößen z des Systems sind:

- β Schwimmwinkel
- $\dot{\psi}$ Giergeschwindigkeit
- δ Radlenkwinkel
- ψ_{rel} relativer Gierwinkel zwischen Fahrzeuglängsachse und Bahntangente (Heading)
- y Querablage des Fahrzeugschwerpunkts zur Fahrbahnmitte

Die Eingangsgrößen des Systems setzen sich zusammen aus der Stellgröße $u = \dot{\delta}_L$ – der Lenkrate am Lenkrad – sowie der externen Störgröße der Fahrbahnkrümmung $s = \kappa_{ref}$. Zwischen Radlenkwinkel δ und Lenkradwinkel δ_L besteht ein linearer Zusammenhang über die konstant angenommene Lenkübersetzung i :

$$i = \frac{\delta_L}{\delta} = \frac{\dot{\delta}_L}{\dot{\delta}} \quad (40)$$

Die Modellierung im linearen Zustandsraum bewirkt eine auf die konstante Geschwindigkeit v festgelegte Longitudinaldynamik. Die verwendeten Parameter sind Anhang B zu entnehmen.

Die Optimalsteuerungsaufgabe setzt Steuerbarkeit des modellierten dynamischen Systems voraus. Die Beeinflussung des Systems durch die Wahl des Steuervektors ist nach dem Kalmanschen Kriterium gegeben, wenn die Steuerbarkeitsmatrix

$$Q_S = [B, AB, AAB, AAAB, AAAAB] \quad (41)$$

vollen Rang besitzt [58]. Das Steuerbarkeitskriterium ist erfüllt, womit das System vollständig steuerbar ist.

5.3 Identifikation menschlicher Fahrspurwechsel

In diesem Abschnitt erfolgt eine Beschreibung aller notwendigen Schritte zur Identifikation menschlichen Fahrverhaltens am konkreten Beispiel des einfachen Fahrspurwechsels. Die quantitative Identifikation erfordert Messungen als Datenbasis. Die Referenzdaten der Fahrzeugführer werden für die Parameterschätzung zum Abgleich mit dem Modellverhalten benötigt. Daher wird zunächst auf die Aufbereitung der Messdaten für die Parameteridentifikation anhand der Optimierung eingegangen.

5.3.1 Aufbereitung der Messdaten

Gegenstand der Untersuchung menschlichen Fahrverhaltens ist die Ausführungsweise von Fahrspurwechseln auf Autobahnen. In Fahrversuchen wurden für dieses querdynamische Fahrmanöver Messdaten erfasst. Als Versuchsstrecke diente der Autobahnabschnitt der A9 zwischen der Anschlussstelle München-Fröttmaning-Süd und der Autobahnausfahrt Garching-Nord. Dieses Autobahnteilstück erweist sich für die Untersuchungen als sehr geeignet. Es beinhaltet keine Kurvenverläufe und weist einen sehr geraden Verlauf auf. Zudem sind die für die Spurerkennung der Kamera erforderlichen Fahrspurmarkierungen gut erkennbar. Ferner ermöglicht die Verkehrsdichte, dass Spurwechsel unter verschiedenen Fahrsituationen ausgeführt werden.

Bevor die aufgezeichneten Messsignale für die Parameteridentifikation als Referenzdaten verwendet werden können, ist eine Aufbereitung der Daten erforderlich. In einem ersten Schritt erfolgt die Anpassung der Messsignale an die Vorzeichenkonvention der Fahrdynamikmodelle und die Umrechnung in SI-Einheiten. Für die experimentelle Parameteridentifikation ist es erforderlich, dass die verwendeten gemessenen Referenzdaten konsistent mit den Modellgrößen der mathematischen Fahrdynamikmodelle sind. In diesem Zusammenhang muss die Kopplung der Messgrößen an die Fahrbahn berücksichtigt werden. Die lineare Systemdynamik der Fahrzeugführung lässt sich gemäß Kapitel 5.2 abbilden. Im linearen Einspurmodell wird das System Mensch-Fahrzeug-Fahrbahn als Zustandsraummodell formuliert, das die Kopplung des Fahrzeugs an die Fahrbahn ermöglicht und berücksichtigt. Das in Kapitel 5.1 formulierte Optimierungsproblem greift als hinterlegtes Fahrdynamikmodell der Fahrzeugführung nur die Systemgleichungen mit Steuereingang auf. Die Störgröße der Fahrbahnkrümmung κ stellt als externe Eingangsgröße keine Optimierungsvariable dar und kann deshalb nicht berücksichtigt werden, d.h. der Einfluss des Straßenverlaufs wird bei der implementierten Systemdynamik nicht betrachtet – es wird von einer geraden Fahrbahn ausgegangen. Die aufgezeichneten Messdaten beinhalten jedoch die Signatur aufgrund des Fahrbahnverlaufs, wodurch die Signalverläufe von Optimierungsmodell und Messfahrt im

Allgemeinen nicht konsistent zueinander sind. Die Signalanteile aufgrund des Fahrbahnverlaufs – bezeichnet als Führungsgrößen z_f – können auf Basis des von der Bildverarbeitung generierten Krümmungssignals unter Annahme einer stationären Kreisfahrt ermittelt werden. Die kurvenbereinigten Kenngrößen z_{kor} ergeben sich damit aus der Differenz von gemessenen Zustandsgrößen z_m und berechneten Führungsgrößen z_f und repräsentieren die Messgrößen auf „gerade gebogener“ Strasse:

$$z_{kor}(t) = z_m(t) - z_f(t) \quad (42)$$

Zu beachten ist, dass die Krümmungskorrektur eine hohe Qualität und Glaubwürdigkeit des Kamera-Messsignals κ voraussetzt. Die Versuchsfahrten wurden auf in sehr guter Näherung geraden Autobahnabschnitten durchgeführt, um Einflüsse der Krümmungssignalqualität auf die Messergebnisse auszuschließen. Auf die Krümmungskompensation kann somit verzichtet werden. Die Messgrößen stimmen mit den entsprechenden Modellgrößen überein. Bei gerader Fahrbahn folgt zudem $\psi = \psi_{rel}$.

Ähnlich der Fahrspurkrümmung werden weitere Einflüsse der Fahrspur bei der Optimierung nicht berücksichtigt. So stellen Fahrspurrillen oder die Querneigung der Fahrbahn Störgrößen dar, welche auf das hinterlegte Fahrdynamikmodell der Fahrzeugführung wirken, aber nicht in den Systemgleichungen hinterlegt sind. Diese könnten zwar durch entsprechende Schätz- und Identifikationsverfahren ermittelt werden, sie stellen aber keine Optimierungsvariablen dar und bleiben daher bei der Optimierung unberücksichtigt. Analog der Vorgehensweise zur Möglichkeit der Kompensation der Fahrspurkrümmung könnten die Einflüsse der genannten Störgrößen zwar in einer Bereinigung der Messgrößen z_{kor} einfließen, dies setzt aber eine sehr exakte Schätzung der Störgrößen voraus. Entsprechendes gilt auch für weitere Umwelteinflüsse wie z.B. Seitenwind.

Zur Unterdrückung von Messrauschen in den Messgrößen werden die Signale tiefpassgefiltert, wodurch sich hochfrequente Rauschanteile herausfiltern lassen. Dazu werden die verrauschten Rohdaten durch einen Butterworth-Filter 4-ter Ordnung mit einer Eckfrequenz von 2Hz gefiltert. Die gewählte Grenzfrequenz resultiert aus Untersuchungen, wonach 2Hz die Obergrenze menschlicher Aktionen beim Führen von Fahrzeugen darstellen [78]. Die Eingabe des Fahrers bei der Ausführung der querdynamischen Fahraufgabe erfolgt durch Stellen des Lenkwinkels, dessen Verlauf sich direkt auf die übrigen fahrdynamischen Bewegungsgrößen auswirkt. Höhere Frequenzanteile lassen sich somit auf Messrauschen zurückführen. Ein weiteres Merkmal der Filterung stellt die symmetrische Filterung dar. Durch die kombinierte Filterung vorwärts und rückwärts kann ein Verzug in der Phase verhindert werden. Insgesamt lässt sich durch die Filterung somit ein ausreichend glatter Verlauf der relevanten Messsignale erzielen.

Die experimentelle Parameteridentifikation erfordert Messsignale als Referenzdaten, die den Zustand des Fahrzeugs während der Fahrt korrekt wiedergeben. Während die Signalqualität von Gierrate und Lenkwinkel als ausreichend genau anzusehen sind, ist das Messsignal des Schwimmwinkels als fehlerhaft einzustufen. Ferner sind die kamerabasierten Signale von Querablage und relativem Gierwinkel mit einer Totzeit von $T_d = 0.12\text{ s}$ behaftet. Zur Kompensation der Totzeit sowie Schätzung von Zustandsgrößen, deren Signalqualität als unzureichend anzusehen ist, wird deshalb ein Kalman-Filter genutzt (vgl. auch Kapitel 6.1.3.1). Somit können über das Filter aus den gemessenen totzeitbehafteten Kamerasignalen die unverzögerten internen Zustandsgrößen des relativen Gierwinkels und insbesondere der Querablage bestimmt werden.

Bild 36 zeigt das Resultat der Kalman-Filterung. Mittels des Kalman-Filters kann die kamerabedingte Verzögerungszeit des Querablagensignals kompensiert werden. Zudem ist der Vollständigkeit halber das Ergebnis der Schwimmwinkelschätzung dargestellt. Während anhand des gemessenen Schwimmwinkelsignals nicht auf einen Spurwechselvorgang geschlossen werden kann, weist der anhand der zuverlässigen Messgrößen von Gierrate und Lenkwinkel geschätzte Verlauf die charakteristische Signatur eines Spurwechsels auf. Als Referenzdaten zur Analyse der Ausführungsweise von Spurwechseln kommen jedoch ohnehin nur ausreichend zuverlässige Signale in Frage, wie beispielsweise die Messgrößen Querablage, Gierrate oder Lenkwinkel.

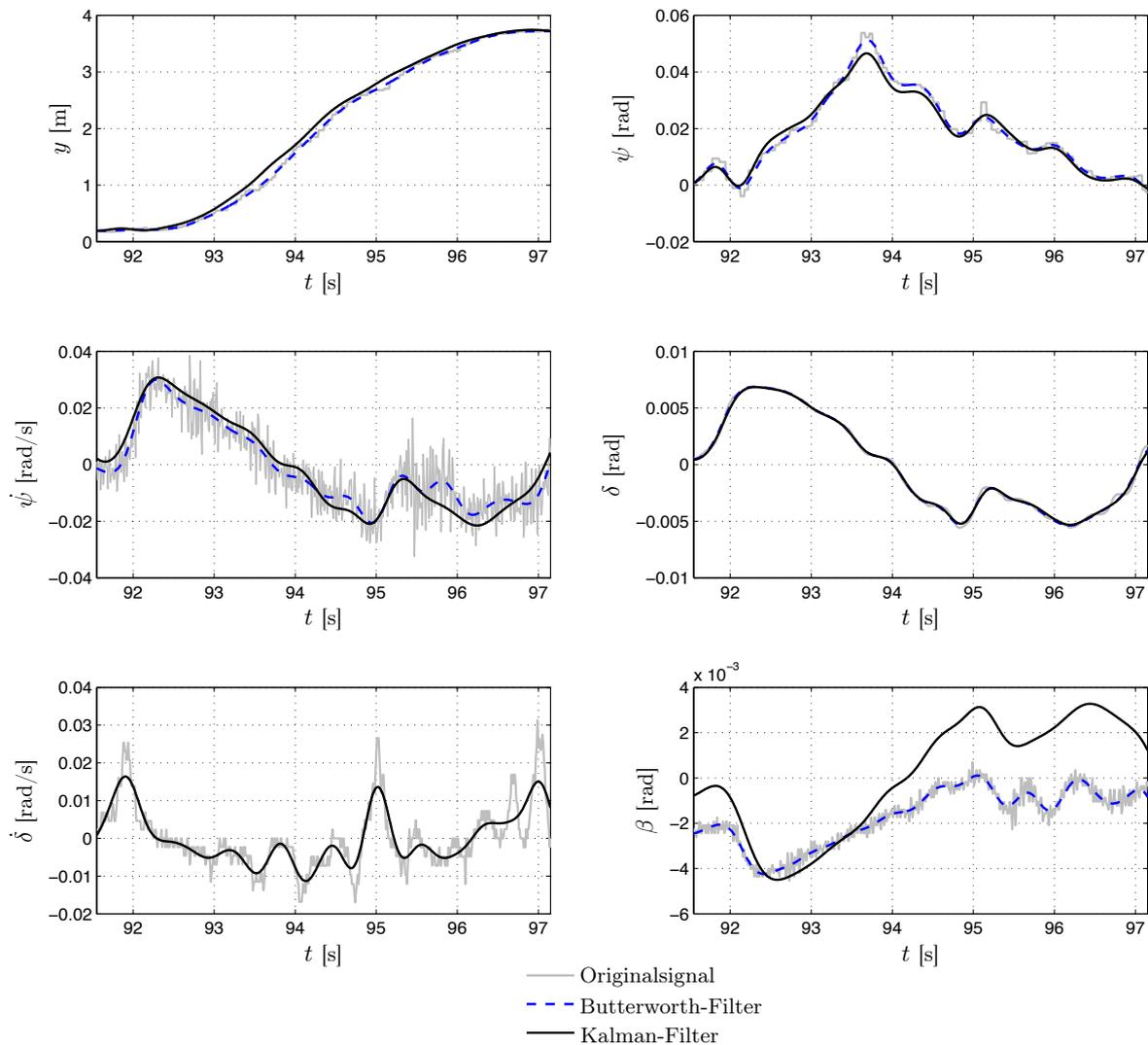


Bild 36: Aufbereitung der Messsignale

5.3.2 Analyse und Auswahl von Kostenfunktionalen

Der Optimierungsansatz impliziert, dass Menschen beim Ausführen von Fahrspurwechseln Gütekriterien optimieren, um mit minimalem Aufwand das Ziel zu erreichen. Das Zielfunktional des LLP, das der Fahrer während der Ausführung zu minimieren versucht, bildet dabei die Motivation des Fahrers bei der Bahnplanung ab. In diesem Abschnitt werden denkbare Motivationsgrößen für die Formulierung von Gütekriterien vorgestellt und ausgewählt.

Bestimmend für die Formulierung von Zielkriterien sind die Zustandsvariablen des hinterlegten dynamischen Systemmodells, d.h. mögliche Kostenkriterien müssen durch funktionale Zusammenhänge der Systemvariablen darstellbar sein. Kostenfunktionale hängen somit von Zustands- oder Steuergrößen sowie deren Ableitungen oder explizit vorgegebenen Referenzfunktionen ab. Es wird ein quadratisches Güteintegral verwendet, bei dem sich die Basiskosten f_i eines Kostenkriteriums $o(z(t), u(t), \dot{z}_t, z_{ref}, u_{ref})$ zu

$$f_i = \int_0^T o(z(t), u(t), \dot{z}(t), z_{ref}, u_{ref})^2 dt \quad (43)$$

ergeben. Kostenkriterien finden in quadratischer Form oft Anwendung, beispielsweise beim Entwurf von LQR-Zustandsreglern. Auf relevante und implementierte Gütekriterien wird im Folgenden näher eingegangen.

5.3.2.1 Kostenkriterien für die Bahnoptimierung

Die Fahrdynamik in horizontaler Ebene gliedert sich in die Längs- und Querdynamik. Dementsprechend lassen sich für beide Dynamikbereiche geeignete Gütekriterien aufstellen.

Da das längsdynamische Fahrerverhalten nicht Gegenstand der Untersuchung ist, sondern das Ziel in der Identifikation von dominanten situationsabhängigen Kriterien bei der querdynamischen Ausführung von Fahrspurwechseln besteht, wird auf die Definition von charakterisierenden Longitudinaldynamik-Kostenfunktionen verzichtet. Bei der Ausführung von Fahrstreifenwechseln konzentriert sich der Fahrer auf die Ausführung der Querführungsaufgabe. Ferner erübrigt sich aufgrund der meist geringen Geschwindigkeitsänderungen bei Fahrstreifenwechseln eine Kostenparameteranalyse der Längsdynamik. Durch eine Festlegung der Längsdynamik auf konstante Geschwindigkeiten lassen sich mit dem linearen Einspurmodell (Kapitel 5.2) zudem keine längsdynamischen Gütefunktionen implementieren.

In der Folge werden für die Analyse der Ausführung von Spurwechselvorgängen daher in Frage kommende Optimalitätskriterien betrachtet, die auf rein querdynamischen Zustands- oder Steuervariablen basieren. Zudem wird eine Einteilung in verschiedene übergeordnete Kategorien vorgenommen, wobei die Zuordnung zu einer Kategorie Raum für Interpretation bietet.

Voraussetzung für die Fahrzeugführung im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umgebung ist die Wahrnehmung und Verarbeitung von Informationen, die der Fahrer anschließend in Lenk- bzw. Pedalbetätigungen umsetzt. Eine Übersicht über die in die Fahrzeugführung einfließenden Informationsquellen und -größen findet sich z.B. in [139], [93]. Dabei stellen visuelle Informationsgrößen wie Querabweichung und Fahrzeugausrichtung (Heading bzw. relativer Gierwinkel) die entscheidenden Größen dar, auf die sich stets aus vorhandenen Fahrbahnmarkierungen bzw. Referenzmarken schließen lässt. Gemäß [81] betreibt jeder Autofahrer

bei Geradeausfahrt bzw. Spurwechseln ein automatisches „Quickening“, d.h. der Fahrzeugführer verarbeitet sowohl die absolute Positionsveränderung als auch deren Veränderungsrate. Ferner wird herausgearbeitet, dass die nach [181] für die erfolgreiche Querführung des Fahrzeugs bzw. Ausführung eines Spurwechsels notwendige Verarbeitung der Heading-Informationen im Vergleich zur lateralen Position dominiert.

Der Gierwinkel stellt somit eine relevante Informationsquelle für den Fahrer dar, mit dem sich ein Basiskostenkriterium formuliert zu

$$f_{\psi} = \int_0^T \psi(t)^2 dt \quad (44)$$

Die Minimierung des mittleren Gierwinkels lässt sich als Kriterium für sicherheitsorientierte Fahrweise interpretieren. Eine „gierwinkeloptimale“ Spurwechseltrajektorie verläuft mit in etwa konstant flachem Gierwinkel, d.h. es erfolgt eine gleichmäßig moderates Wechseln auf den Zielfahrstreifen.

Die Minimierung der mittleren lateralen Position bzw. Querablage zur Fahrspurmitte erscheint unrealistisch und stellt keine Intention des Fahrers bei der Ausführung eines Spurwechsels dar. Dieses Kriterium würde implizieren, dass der Fahrer das Fahrzeug zunächst lange auf der ursprünglichen Fahrspur hält und kurz vor Beendigung des Spurwechsels abrupt auf die Zielspur wechselt. Kostenkriterien, die die Querablage des Fahrzeugs implizieren, lassen sich unter Verwendung von Referenztrajektorien erzeugen. Dabei wird die laterale Abweichung zwischen Fahrzeugposition y und entsprechender Referenztrajektorie y_{ref} zur Erzeugung einer Basiskostenfunktion verwendet:

$$f_{y,ref} = \int_0^T (y - y_{ref})^2 dt \quad (45)$$

Der Fahrer gibt sich zwar in Realität bei Spurwechseln mögliche Trajektorien als Führungsgröße nicht visuell vor, denen er bewusst zu folgen versucht. Dennoch erweisen sich Gütefunktionale mit Referenztrajektorien als erforderlich für gute Approximationsergebnisse der Fahrdaten der Spurwechseltrajektorie. Durch die Referenztrajektorien wird der Darstellungsbereich möglicher kostenoptimaler Spurwechseltrajektorien vergrößert. Ansonsten würde das Optimierungsergebnis der Parameteridentifikation diejenige Kombination der auf fahrdynamischen Größen basierenden Kostenkriterien liefern, die der Fahrkurve unter den Gegebenheiten am nächsten kommt. Da diese Kostenfunktionen jedoch nur einen schmalen Darstellungsbereich definieren, wie später in Bild 37 zu sehen ist, würde rein mit den auf fahrdynamischen Größen beruhenden Gütekriterien keine befriedigend exakte Approximation der Spurwechseltrajektorie sichergestellt sein.

Die implementierten Referenztrajektorien beruhen dabei auf einem spline-basierten Trajektorien-Konstruktionsverfahren, das ferner zur Bahnplanung des automatisierten Fahrspurwechsels im Versuchsträger entwickelt wurde. Eine detaillierte Erläuterung dieses Ansatzes findet sich daher in Kapitel 6.1.3.1 wieder. Dabei werden die Bahntrajektorien stückweise mit parametrisierten Polynomen n -ter Ordnung folgender Form konstruiert:

$$\hat{y}_{ref,t}(t) = \sum_{i=0}^n a_i t^i = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (46)$$

Um eine von SPORRER [161] festgestellte asymmetrische Ausführungsweise von Spurwechseln zu berücksichtigen, wird die Spurwechselgeometrie über zwei Polynome jeweils vierten Grades konstruiert. Der Verknüpfungspunkt P_i der beiden Teiltrajektorien markiert im Konstruktionsverfahren den Vorzeichenwechsel im Lenkradwinkel d.h. den Lenkwinkelnulldurchgang. Nach SPORRER besteht bei der Spurwechselgeometrie ein zeitliches Verhältnis zwischen der Dauer des Auslenkens und des Ausrichtens auf den Zielfahrbahnstreifen von 1:2. Daraus resultiert die Kostenfunktion

$$f_{y_{0.33T}} = \int_0^T (y - y_{ref_{0.33T}})^2 dt \quad (47)$$

mit der charakteristische Referenztrajektorie $y_{ref_{0.33T}}$ mit Verknüpfungspunkt $P_{0.33T}$ bei einem Drittel der Manöverzeit T . Die zugehörige Spurwechseltrajektorie verläuft im Vergleich zu fahrdynamischen Minimierungskriterien zeitlich nach vorne versetzt.

Um einen größeren Bereich abzudecken, innerhalb dessen Spurwechselverläufe durch Linearkombination von Gütefunktionen darstellbar sind, wird zusätzlich eine Referenztrajektorie mit Kontrollpunkt $P_{0.70T}$ bei 70% der Manöverzeit generiert. Diese repräsentiert ein moderates Einlenken und ein spätes Ausrichten auf den Zielfahrbahnstreifen. Das zugehörige Güteintegral ergibt sich zu

$$f_{y_{0.70T}} = \int_0^T (y - y_{ref_{0.70T}})^2 dt. \quad (48)$$

Der Polynomansatz stellt einen mathematisch einfach handhabbaren Ansatz zur Modellierung von Spurwechseltrajektorien dar und ist insbesondere gut für die analytische Berechnung der für die Optimierung erforderlichen mathematischen Größen geeignet.

Ferner lassen sich Kostenfunktionen bestimmen, deren Kenngrößen die Fahrereingabe berücksichtigen. Das Gütekriterium für die Minimierung der Lenkarbeit

$$f_{\dot{\delta}} = \int_0^T \dot{\delta}(t)^2 dt, \quad (49)$$

sowie die Minimierung des mittleren Lenkeinschlags,

$$f_{\delta} = \int_0^T \delta(t)^2 dt \quad (50)$$

stellen Maße für den Stellaufwand dar. Sie lassen sich als Kennwerte dem Fahrkomfort bzw. der Fahrökonomie zuordnen.

Zusätzlich zum Kriterium für minimalen mittleren Gierwinkel (44) lassen sich weitere Größen zur Charakterisierung der Fahrzeugstabilität heranziehen. Neben dem quadratischen Mittel der Giergeschwindigkeit

$$f_{\dot{\psi}} = \int_0^T \dot{\psi}(t)^2 dt \quad (51)$$

sind Kostenfunktionen mit sicherheitsrelevanten Größen wie beispielsweise Schwimmwinkelgeschwindigkeit oder Schwimmwinkel der Fahrsicherheit zuzuordnen.

5.3.2.2 Wahl der LLP-Optimierungskriterien der Bahnplanung

Alle querdynamischen Zustands- und Steuergrößen und deren Ableitungen sowie Kriterien mit Referenztrajektorien stellen prinzipiell in Frage kommende Basiskostenfunktionen für die Querführungsaufgabe des einfachen kostenoptimalen Spurwechsels dar.

Für die Parameteridentifikation ist eine Auswahl der Basiskostenfunktionen zu treffen, die in einem Gesamtkostenfunktional f kombiniert werden. Die Auswahl soll zum einen denkbare Fahrerintentionen berücksichtigen und widerspiegeln. Zudem soll die Auswahl Basiskostenfunktionale mit charakteristischen, markanten und differierenden Zustandsverläufen umfassen, die eine Abgrenzung voneinander zulassen. Ferner muss sichergestellt sein, dass innerhalb der Auswahl die einzelnen Basiskostenkriterien eindeutig identifizierbar sind und sich nicht mittels Linearkombination anderer Gütefunktionen approximieren lassen.

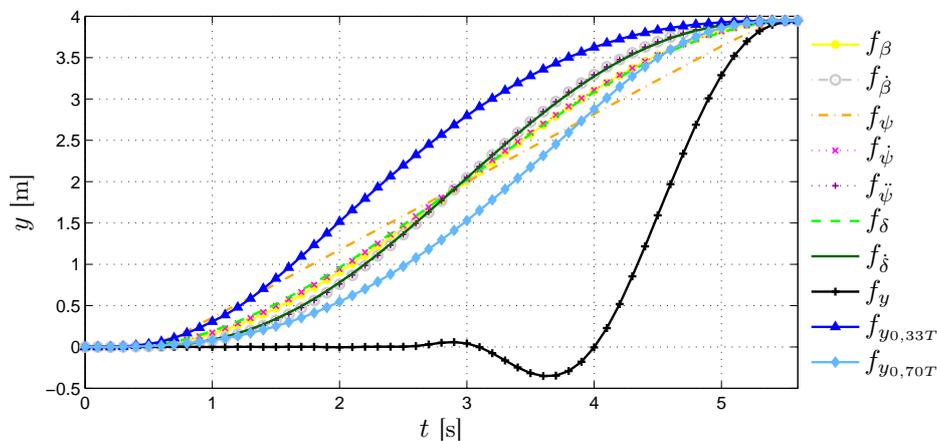


Bild 37: Kostenoptimale Spurwechselverläufe von Basiskostenkriterien

Bild 37 zeigt die mittels des hinterlegten linearen Dynamikmodells errechneten kostenoptimalen Querablagenverläufe für einen Spurwechsel nach links. Es ist ersichtlich, dass bestimmte Spurwechseltrajektorien Ähnlichkeiten in ihren Verläufen aufweisen. Die Bahnkurve für minimalen mittleren Gierwinkel hingegen unterscheidet sich z.B. signifikant gegenüber den übrigen Verläufen. Aufgrund der auftretenden geringen Schwankungsbreiten scheiden Kriterien aus, deren optimale Trajektorien mit denen anderer Kriterien nahezu übereinstimmen, da sie keine eindeutige Identifizierung des zu Grunde liegenden Gesamtgütefunktionals erlauben.

Zur Analyse und Parameteridentifikation von Spurwechselvorgängen werden aufgrund obiger Forderungen in der Konsequenz die folgenden Bahnplanungskriterien verwendet.

Fahrkomfortorientiertes bzw. fahrökonomisches Fahrverhalten soll durch die Kostenfunktionen f_{δ} (50) sowie $f_{\dot{\delta}}$ (49) repräsentiert werden, die ein Maß zur Beurteilung des Stellaufwands für den Fahrer darstellen. Aspekte der Fahrsicherheit werden durch sicherheitsorientierte Größen wie Gierwinkel und Gierrate bzw. deren quadratischen Mittel f_{ψ} (44) und $f_{\dot{\psi}}$ (51) berücksichtigt. Zudem finden neben den auf rein fahrdynamischen Größen beruhenden Gütekriterien die Kriterien der Referenztrajektorien $f_{y_{0,33T}}$ (47) und $f_{y_{0,7T}}$ (48) zur Vergrößerung des Bereichs abbildbarer Spurwechselgeometrien Eingang in das Gesamtkostenfunktional. Die Referenztrajektorie $y_{0,33T}$ lässt sich wegen ihrer Eigenschaft des frühen Weglenkens von der Ausgangsspur eher den sicherheitsorientierten Kostenfunktionen zuordnen.

Durch die geringe Lenkaktivität zu Beginn des Spurwechsels kann die Referenztrajektorie $y_{0.70T}$ den Komfort charakterisierenden Kostenfunktionen zugerechnet werden. Damit ergibt sich das parametrische LLP-Zielfunktional

$$f = w_{\psi} \cdot f_{\psi} + w_{j} \cdot f_{j} + w_{\delta} \cdot f_{\delta} + w_{\dot{\delta}} \cdot f_{\dot{\delta}} + w_{y_{0.33T}} \cdot f_{y_{0.33T}} + w_{y_{0.70T}} \cdot f_{y_{0.70T}}, \quad (52)$$

das die Intention des Fahrers repräsentieren soll und anhand dessen die Einflussfaktoren im Fahrverhalten, d.h. dominante Kriterien bei der Ausführung von Spurwechseln, untersucht werden. An dieser Stelle sei bereits vorweggenommen, dass die festgelegten Kostenkriterien eindeutig reidentifizierbar sind und somit als Unterscheidungsmerkmale für die Parameteridentifikation in Frage kommen, wie in Kapitel 5.3.5 gezeigt wird.

5.3.2.3 Wahl des ULP-Optimierungskriteriums zur Parameteridentifikation

Die Parameterschätzung erfolgt über den Angleich modellbasiert berechneter kostenoptimaler Größen an gemessene Datenverläufe im Sinne einer quadratischen Abstandsminimierung. Für die Untersuchung der Ausführungsweise von Spurwechseln und Bestimmung der Gewichtungparameter der LLP-Teilkriterien ist das gemäß Gleichung (14) definierte ULP-Abgleichskriterium geeignet zu wählen.

Generell ist die Wahl mehrerer Abgleichsgrößen bis hin zu allen gemessenen Zustandsgrößen denkbar, die untereinander verteilt gewichtet werden können. Auf diese Weise kann die geforderte Approximationsgüte gewisser Signalgrößen im internen Vergleich festgelegt werden. Die Optimierungsrechnung liefert als Ergebnis diejenige optimale Lösung, die der Minimierung des definierten Gütefunktional am besten genügt und den besten Kompromiss in der Annäherung der einzelnen Signalgrößen darstellt. Die Genauigkeit der Nachbildung einzelner Signalgrößen ist dabei jedoch stark abhängig von der Wahl der Gewichtungparameter.

Für die Analyse von Spurwechseln ist jedoch ein klares Abgleichskriterium sinnvoll und erforderlich, um ein repräsentatives Ergebnis sicherzustellen. Das charakteristische Merkmal eines Fahrstreifenwechsels stellt neben der Spurwechseldauer die Spurwechselgeometrie dar. Die gefahrene Bahnkurve des Fahrzeugs ist somit ein charakteristisches und eindeutiges Maß zur Analyse und Unterscheidung der Ausführung von Spurwechseln. Ferner wird durch die Abstandsminimierung von kostenoptimaler und gefahrener Spurwechselbahnkurve ein Gütefunktional identifiziert, das für die modellbasierte Regelung autonomer Fahrstreifenwechsel herangezogen werden kann und dabei eine menschliche Fahrlinienwahl garantiert. Zudem bietet das Messsignal für die Optimierung einen glatten Signalverlauf mit wenigen Signalschwankungen, der sich mittels optimaler LLP-Kriterien sehr exakt nachbilden lässt. Dies motiviert insgesamt die Verwendung der Bahnkurve des Fahrzeugschwerpunkts im ULP-Ausgleichsfunktional analog zu [101]. Die Parameterschätzung erfolgt demnach über die Abgleichsgröße der Querabweichungen Δy .

5.3.3 Randbedingungen

Ziel der Bilevel-Optimierung ist die Bestimmung derjenigen Kombination von LLP-Basiskostenkriterien, die gemessene Fahrdaten am besten nachbildet und somit das Fahrverhalten der betrachteten Fahrsequenz repräsentiert und charakterisiert. Eine erste Kopplung an die

Messdaten lässt sich dabei über die Randbedingungen herstellen. Allgemein bezeichnen Randbedingungen zu erfüllende Forderungen einer Lösung, die an den Rändern des Intervalls, in dem das Systemmodell gilt, vorgegeben werden können.

Randbedingungen stellen somit maßgebliche Einflussfaktoren für die Optimierung dar. Mit zunehmender Anzahl definierter Randwerte lässt sich eine genauere und realistischere Abbildung des Fahrverhaltens im Rahmen der systemdynamischen Modellierung gewährleisten. Durch die wachsenden Anforderungen an die Lösung werden der Optimierung jedoch Freiheitsgrade zur Approximation der Fahrdaten entzogen. Dies kann zu einem Zielkonflikt zwischen der Lösbarkeit der gesamten Optimierungsaufgabe und der Abbildungsgüte der Realität führen. Neben der Anzahl der zu erfüllenden Randbedingungen hat auch die wertemäßige Festlegung einen entscheidenden Einfluss auf das Optimierungsergebnis und kann zur Divergenz bzw. Inkonsistenz von Fahrdaten und Systemverhalten führen. Es existiert eventuell keine Lösung dafür, ein Fahrzeug entlang der gemessenen Fahrverläufe aus der Startkonfiguration heraus gemäß der modellierten Fahrdynamik in die Endkonfiguration überzuführen. In der Folge wird dargestellt, wie die Randbedingungen für die Analyse realer Spurwechseltrajektorien gewählt werden.

Es besteht die Möglichkeit, Randbedingungen mit vorliegenden Messwerten oder plausiblen synthetischen Soll-Werten zu belegen. Da die Qualität einzelner Messsignale als unzuverlässig und nicht immer ausreichend exakt einzustufen ist und somit der Fahrzeugzustand zu Beginn und Ende eventuell fehlerbehaftet und inkonsistent abgebildet wird, werden für die Analyse realer Fahrspurwechsel idealisierte Randbedingungen gemäß der Vorstellung eines idealen Spurwechsels angenommen. Zu Beginn des Spurwechsels fährt das Fahrzeug geradeaus auf der Ausgangsfahrs pur. Die fahrdynamischen Größen Schwimmwinkel, Gierrate, Lenkwinkel sowie die fahrbahnbezogenen Größen der Querablage und des relativen Gierwinkels nehmen Werte von Null an. Mit Abschluss eines Fahrstreifenwechsels wechselt das Fahrzeug auf dem Zielfahrstreifen erneut in die Geradeausfahrt über und die Zustandsgrößen nehmen die dafür charakteristischen Werte an. Die Querdynamik-Größen β , ψ , $\dot{\psi}$, δ , $\dot{\delta}$ werden somit als Nullrandbedingungen vorgegeben. Die Kopplung an die Messdaten erfolgt über die konkrete Positionsangabe der offsetbereinigten Querablage zu Beginn $y(0) = 0$ m und Ende $y(T) = y_{data}(T)$.

Bild 38 zeigt das Ergebnis einer Parameteridentifikation für einen realen Spurwechsel in Abhängigkeit der Konfiguration der Randbedingungen. Die zulässigen Zielkriterien des Fahrers sind gemäß der Auswahl aus Kapitel 5.3.2.2 festgelegt. Als Referenzgröße für den Angleich des Optimalsteuerungsmodells an das reale Fahrverhalten wird nach Kapitel 5.3.2.3 die befahrene Spurwechseltrajektorie im ULP-Abgleichskriterium herangezogen. Die Konfiguration der Randbedingungen entspricht dabei Tabelle 6.

Tabelle 6: Randbedingungskonfiguration

	β_0	$\dot{\psi}_0$	δ_0	ψ_0	y_0	$\dot{\delta}_0$	β_T	$\dot{\psi}_T$	δ_T	ψ_T	y_T	$\dot{\delta}_T$
RB2	-	-	-	-	0	-	-	-	-	-	$y(T)$	-
RB4	-	-	-	0	0	-	-	-	-	0	$y(T)$	-
RB6	0	-	-	0	0	-	0	-	-	0	$y(T)$	-
RB8	0	0	-	0	0	-	0	0	-	0	$y(T)$	-
RB10	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	$y(T)$	-
RB12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$y(T)$	0

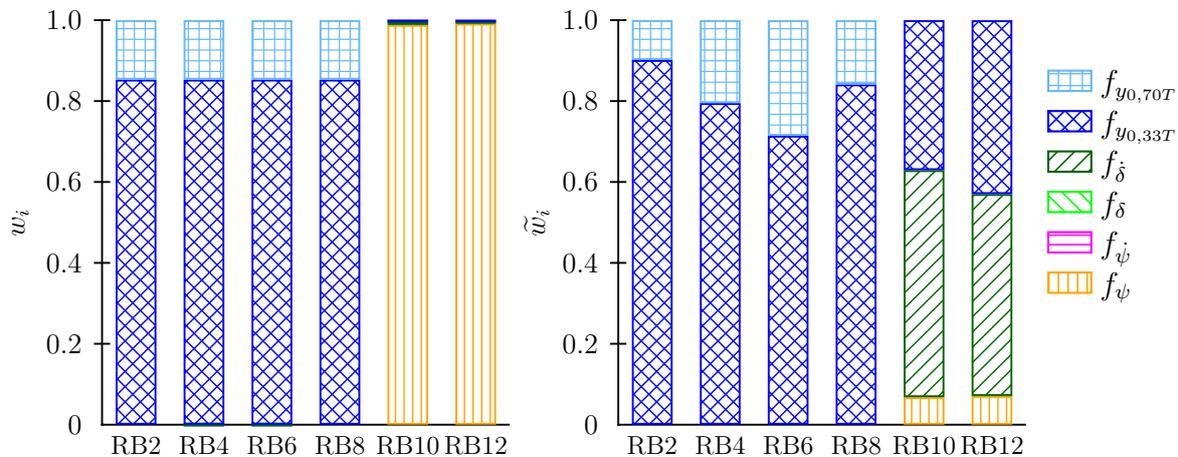


Bild 38: Parameteridentifikation eines realen Spurwechsels - Gewichtungsfaktoren in Abhängigkeit der Randbedingungen (RB)

In den Konfigurationen RB2 bis RB8 mit bis zu 8 Randbedingungen lässt sich die Fahrkurve dieses Spurwechsels am besten mittels der gewichteten Kombination der randbedingungsunabhängigen Referenzspurwechseltrajektorien $y_{0,33T}$ und $y_{0,70T}$ nachbilden. Werden jedoch alle Zustandsgrößen zu Beginn und Ende über Randbedingungen fixiert (RB10), liefert die Parameteridentifikation ein komplett unterschiedliches Ergebnis für die Gewichtungsparemeter. Bei der Approximation der Spurwechseltrajektorie sind fahrdynamische Kostenkriterien dominant. Die Trajektorie wird zudem exakter approximiert. Zusätzliche Nullrandbedingungen für die Lenkrate (RB12) bewirken sehr geringe Veränderungen im Ergebnis. Die veränderte Verteilung der Kostenkriterien in Abhängigkeit der Randbedingungen spiegelt sich auch in den für die Interpretation normierten Gewichtungsfaktoren wider.

Die Ursache der unterschiedlichen Lösungen ist darin zu sehen, dass die Optimierung den Wertebereich der nicht eingeschränkten Freiheitsgrade zur Berechnung kostenoptimaler Verläufe vollständig ausnutzt, falls Systemgrößen an den Rändern nicht explizit vorgegeben werden. In der Konsequenz ergeben sich numerische Lösungen mit unrealistischen Verläufen, die der realen Ausführungsweise von Einzelspurwechseln widersprechen. Bei geringer Anzahl gesetzter Randbedingungen ist es so beispielsweise in Konfiguration RB4 möglich, dass die lenkratenoptimale Ausführung eines Spurwechsels aus der Anfangs- in die Endkonfiguration mit konstantem Lenkwinkel und somit ohne Lenkbewegungen erfolgt. Dieser Fahrspurwechsel könnte prinzipiell bei einem Durchschervorgang auf einer 3-spurigen Autobahn mit einer Ausfahrt auftreten. Beginnt der Vorgang auf dem linken Fahrstreifen, würde das Fahrzeug die mittlere Spur mit eingeschlagenem, aber konstantem Lenkwinkel erreichen und diesen unverändert halten, bis auf dem Verzögerungstreifen wieder eine Lenkbewegung erforderlich wäre. Der Fahrstreifenwechsel von der mittleren auf die rechte Spur wäre dann auf die oben beschriebene Weise (Konfiguration RB4) erfolgt. Bei der Betrachtung eines Einzelspurwechsels ist ein derartiger Verlauf jedoch nicht realistisch.

Unter Beachtung aller Aspekte dieses Abschnitts bezüglich der Thematik der Randbedingungen werden schließlich zur Analyse realer Fahrstreifenwechsel alle Zustandsgrößen des linearen Fahrdynamikmodells zu Beginn und Ende fixiert. Diese Konfiguration der Randbe-

dingungen stellt für die konkrete Optimierungsproblemstellung eine hohe Abbildungsgüte der Realität bei gleichzeitig guter Lösbarkeit sicher.

5.3.4 Zustands- und Steuerbeschränkungen

Für die realistische Abbildung von Fahrmanövern ist die Vorgabe von Zustands- und Steuerbeschränkungen erforderlich. Durch sie werden technische Beschränkungen sowie physische Grenzen des Fahrers in der Realität berücksichtigt. In der Folge wird auf die Begrenzung von Variablen im Wertebereich für den einfachen Fahrstreifenwechsels eingegangen, um realistische Ergebnisse sicherzustellen.

Eine notwendige Beschränkung zur Eingrenzung des mathematischen Lösungsraums stellt die Begrenzung der möglichen Werte für den Radlenkwinkel auf das technisch realisierbare Intervall] -45° , 45° [dar, d.h.

$$-\frac{\pi}{4} \text{ rad} < \delta < \frac{\pi}{4} \text{ rad.} \quad (53)$$

Mit dieser Forderung lassen sich numerisch zulässige, jedoch technisch unzulässige Lösungen für die Fahrzeuglenkung ausschließen.

Ferner sollte für die Fahrermodellierung zur Abbildung menschlicher Fahrweise bei der Querführung die Eingabegröße der Lenkrate δ gewisse Forderungen erfüllen. Menschliches Fahrverhalten ist durch ein begrenztes Aktionspotential charakterisiert. So stellen beispielsweise 2Hz die Grenzfrequenz menschlichen Handelns in Fahraktionen dar [78]. Eine Beschränkung des Fahrerpotentials lässt sich durch Vorgaben bezüglich der Lenkrate berücksichtigen. Untersuchungen hinsichtlich der Ausführungsweise von Lenkbewegungen durch einen Fahrer bei der Fahrzeugquerführung ergeben nach [85] beispielsweise deutliche Unterschiede bei den auftretenden Lenkraten zwischen Spurfahrten und Spurwechseln. Bei Spurfahrfahrten treten demnach maximale Lenkraten von 8 %s auf. Langsame Spurwechsel werden mit Lenkraten von etwa 25 %s ausgeführt, schnelle Spurwechsel mit bis zu 100 %s. Somit soll für das Optimalsteuerungsmodell des Fahrers für die Radlenkrate δ mit der Lenkübersetzung i gelten:

$$-\frac{100\pi \text{ rad}}{180i \text{ s}} \leq \delta \leq \frac{100\pi \text{ rad}}{180i \text{ s}} \quad (54)$$

Somit werden für die realistische Reproduktion von Fahrverläufen bei der Analyse von Spurwechselvorgängen die physiologischen Grenzen des Fahrers durch Einschränkung der maximalen Lenkbewegungen berücksichtigt.

Variablenbeschränkungen lassen sich für die Verwendung in den IPOPT-Optionen angeben, die der Algorithmus intern bei der Lösungsfindung berücksichtigt. Bei reiner Berechnung kostenoptimaler Bahnen mittels Lösung des Lower Level Problem berücksichtigt der Lösungsalgorithmus intern die Lenkratenbeschränkung sowie Optimalitätsbedingungen und gewährleistet somit keine Werte außerhalb des für menschliche Fahrweise charakteristischen Bereichs. Ein Anschlagen an den Steuerbegrenzungen ist zulässig. Auf diese Weise wird verhindert, dass der Optimierer bei der Berechnung optimaler Lösungstrajektorien für gegebene LLP-Zielfunktionen die komplette numerisch zulässige Bandbreite für die Lenkaufgabe ausnutzt.

Komplexer gestaltet sich die Problematik der Beschränkung von Systemvariablen in der Stufe des Upper Level Problem. Das Optimierungsproblem umfasst in seiner Formulierung als Nebenbedingungen nur Gleichungsbeschränkungen, jedoch keine zu berücksichtigenden

Ungleichheitsbedingungen und stellt somit prinzipiell ein Problem ohne Variablenbeschränkung dar. Zur Lösung des Bilevel Problem in Kapitel 5.1.2 wird die optimale Bahnplanungsebene des LLP über deren KKT-Optimalitätsbedingungen ohne Berücksichtigung von Ungleichungsnebenbedingungen an das ULP gekoppelt, da die Berücksichtigung von Ungleichheitsbedingungen als aufwendig gilt und die Problemformulierung sowie Lösung erschwert. Die Aktivierung von Zustands- bzw. Steuerbeschränkungen stellt im ULP somit ein Problem dar, das bei der Parameteridentifikation realer Spurwechsel auftreten kann. Wird bei der Lösung keine gesetzte Beschränkung aktiv, befindet sich der Lösungsraum ohnehin innerhalb der geforderten Schranken und erste Voraussetzungen für eine technisch plausible Lösung sind somit erfüllt. Bei Aktivierung einer Beschränkung ist das Ergebnis zu verwerfen, da in der Formulierung der Optimierungsaufgabe für die Optimalität der Lösung die Variablenbeschränkung nicht berücksichtigt wurde. Somit sind im ULP keine aktiven Grenzen zulässig.

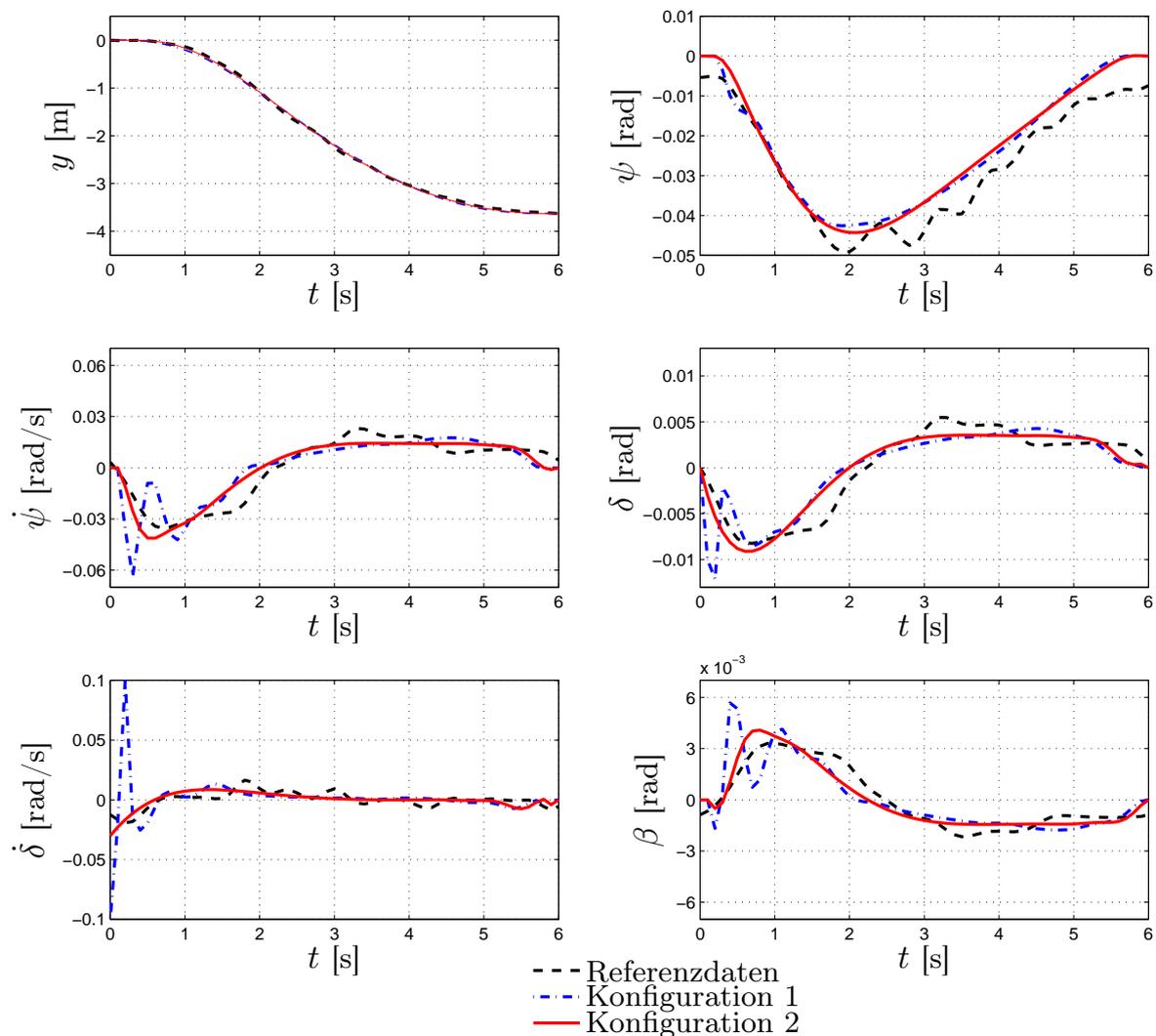


Bild 39: Einfluss der Konfiguration des LLP-Gütekriteriums auf die ULP-Optimierung im Hinblick auf eine Variablenbeschränkung gemäß menschlichem Vorbild

In der experimentellen Parameteridentifikation kann sich die Beschränkung des Wertebereichs der Lenkrate als problematisch erweisen, wie das Optimierungsergebnis der Konfiguration 1 in Bild 39 anhand eines exemplarischen Spurwechsel-Datensatzes zeigt. Das Identifikationsergebnis ist geprägt durch einen sehr unharmonischen und unnatürlichen Verlauf, der die volle Bandbreite des zulässigen Bereichs ausnutzt. Zum Zeitpunkt des Anschlages an die Lenkratenbegrenzung ($t \approx 0.2\text{ s}$) wird jedoch eine unendlich hohe Lenkbeschleunigung erforderlich, die dem Optimierer zwar gestattet ist, die aber keine realistische Lösung des Problems darstellt. Das Ergebnis ist daher zu verwerfen.

Um die Einhaltung der Lenkratenbeschränkung zu gewährleisten, wird der Stellaufwand durch die Lenkrate δ im LLP-Zielkriterium der optimalen Bahnplanung berücksichtigt. Dabei kann in Anlehnung an die LQR-Zustandsregelung durch Hinzunahme der Lenkrate in das Gütefunktional eine „Bestrafung der Stellenergie“ erwirkt werden, wodurch bereits bei niedriger Gewichtung Lenkratenwerte innerhalb des menschlichen Aktionspotentials erzielbar wären. Das Gütekriterium der Minimierung der Lenkarbeit f_{δ} ließe sich beispielsweise mit konstanter Gewichtung im LLP-Gütekriterium festlegen. Da das Ziel der Analyse das Auffinden der Gewichtungsverteilung von Gütekriterien ist, wird die Basiskostenfunktion der mittleren quadratischen Lenkrate mit freier Gewichtung parametrisiert. Mittels Aufnahme der regulierten Größe in das LLP-Kostenkriterium lässt sich somit in den analysierten Fahrsequenzen eine Aktivierung der Ungleichheitsbeschränkungen vermeiden, wie Bild 39 exemplarisch zeigt. In Konfiguration 1 des LLP-Kostenfunktionals mit

$$f_1 = w_{\psi} \cdot f_{\psi} + w_{\dot{\psi}} \cdot f_{\dot{\psi}} + w_{\delta} \cdot f_{\delta} + w_{y_{0.33T}} \cdot f_{y_{0.33T}} + w_{y_{0.70T}} \cdot f_{y_{0.70T}}$$

wird im ULP die Lenkratenbeschränkung aktiv. Mit dem LLP-Gütekriterium

$$f_2 = f_1 + w_{\delta} \cdot f_{\delta}$$

gemäß der Festlegung aus Kapitel 5.3.2.2 hingegen wird bei der Parameteridentifizierung die Fahrkurve ohne Anschlagen an der Lenkratenbegrenzung und somit mit deutlich geringeren sowie realistischeren Werten für die Lenkrate approximiert. Es ergeben sich keine numerisch wirkenden Variablenverläufe der übrigen Signalgrößen, wodurch sich qualitativ und quantitativ eine bessere Übereinstimmung mit den Messdaten erzielen lässt.

5.3.5 Reidentifikation

Um verschiedene Fahrerintentionen bei der Durchführung spezifischer Fahrmanöver abbilden und analysieren zu können, wurde die nichtlineare Optimierungsaufgabe als Bilevel Problem formuliert. Die Anwendung der Bilevel Optimierung auf die Analyse realer Fahrsequenzen erfordert die Validierung der Funktionsweise des konfigurierten Optimierungsverfahrens, die in diesem Abschnitt erbracht wird. Dazu wird die Parameterschätzung der Gewichtungsfaktoren anhand synthetischer Daten durchgeführt.

Grundgedanke ist dabei, auf Basis bekannter Wichtungsfaktoren Zustandsgrößenverläufe synthetisch zu generieren und das zu Grunde liegende Gesamtgütefunktional zu reidentifizieren. Das Vorgehen gliedert sich dabei in folgende zwei Schritte. Im ersten Schritt erfolgt die Erzeugung einer Referenzlösung für eine vorgegebene Kombination der Basiskostenfunktionen mittels der LLP-Optimierung. Die auf diese Weise konstruierten Spurwechsel-Zustandsgrößenverläufe stellen die Abgleichstrajektorien für die Parameteridentifikation im

ULP dar, welche in einem zweiten Schritt durchgeführt wird. Ziel ist die exakte Reidentifizierung der Wichtungsfaktoren des ursprünglichen Optimalitätskriteriums.

Bei dieser Verfahrensweise erfolgen die Simulation der Zustandsgrößenverläufe und die Identifikationsrechnung mittels desselben hinterlegten dynamischen Modells. Dadurch ist sichergestellt, dass die Referenzdaten dem Modellverhalten des Einspurmodells der Fahrdynamik exakt folgen. Ferner sind die Randwerte aller synthetischen „Messgrößen“ exakt bekannt.

Tabelle 7: Reidentifikation Basiskostenfunktionen

Referenz	w_ψ	$w_{\dot{\psi}}$	w_δ	$w_{\dot{\delta}}$	$w_{y_{0.33T}}$	$w_{y_{0.70T}}$	F_{ULP}
$f_{\dot{\psi}}$	0.9999	0	0	0.0001	0	0	$3.6 \cdot 10^{-3}$
f_{ψ}	0.0034	0.9946	0.002	0	0	0	$5.2 \cdot 10^{-9}$
$f_{\dot{\delta}}$	0.0014	0	0.9986	0	0	0	$1.5 \cdot 10^{-6}$
f_{δ}	0	0	0.0048	0.9952	0	0	$3 \cdot 10^{-13}$
$f_{y_{0.33T}}$	0	0	0	0.0001	0.9999	0	$1.2 \cdot 10^{-5}$
$f_{y_{0.70T}}$	0	0	0.0004	0.0004	0	0.9992	$3 \cdot 10^{-8}$

Tabelle 7 dokumentiert die Ergebnisse der Rekonstruktionsrechnungen für die querdynamischen Basiskostenfunktionale der Fahraufgabe des einfachen Spurwechsels. Die Identifikationsrechnung verläuft jeweils erfolgreich und die zur Berechnung der Referenzbahn verwendete Parameterkombination wird wieder gefunden. Im Rahmen der Rechengenauigkeit resultieren keine Unterschiede. Die ausgewählten LLP-Grundkostenfunktionale werden eindeutig reidentifiziert, d.h. sie lassen sich nicht durch Linearkombination anderer Gütefunktionen approximieren. Sie erfüllen somit eine Eignungsvoraussetzung für die eindeutige Parameterschätzung und kommen für die Analyse von Spurwechseln als Unterscheidungsmerkmal in Frage. Es ist zu erwähnen, dass Basisfunktionale, deren optimale Lösung die Stellgrößenbeschränkung ausnutzt, eigentlich für die Optimierungsrechnung nicht geeignet sind. Aufgrund ihrer eindeutigen Charakteristik können sie dennoch korrekt identifiziert werden.

Die Rekonstruktionstests können analog für Kombinationen von Basiskostenkriterien durchgeführt werden. Aus der berechneten optimalen LLP-Lösung kann die Positionskoordinate der Querablage y des Fahrzeugs extrahiert werden. Die auf diese Weise erhaltene konstruierte Bahnkurve stellt die Abgleichskurve für die Parameteridentifikation im ULP dar. Stellvertretend für die durchgeführten Reidentifikationsrechnungen wird eine Kombination der LLP-Teilkriterien $f_{\dot{\delta}}$ und $f_{y_{0.33T}}$ betrachtet. Das zu Grunde liegende Gesamtgütekriterium ist im Rahmen der Rechengenauigkeit korrekt reidentifiziert, wie Tabelle 8 beweist.

Tabelle 8: Reidentifikation einer synthetischen Kostenkombination

w	$f_{\dot{\psi}}$	f_{ψ}	$f_{\dot{\delta}}$	f_{δ}	$f_{y_{0.33T}}$	$f_{y_{0.70T}}$
w_{Soll}	0	0	0	0.5	0.5	0
w_{Ist}	0	0	0.0006	0.4997	0.4997	0

Insgesamt konnte das Parameteridentifizierungsverfahren erfolgreich validiert werden. Der Nachweis der korrekten Funktionsweise ist erbracht und der Ansatz der Bilevel Optimierung zur Analyse von Spurwechseln abgesichert.

5.3.6 Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird abschließend das entwickelte Gesamtverfahren zur Parameteridentifikation auf reale Spurwechselvorgänge angewendet. Es wird untersucht, inwieweit sich die gemessenen Spurwechseltrajektorien durch das Optimalsteuerungsmodell des Fahrers nachbilden lassen. Numerische Ergebnisse der Untersuchung der menschlichen Ausführungsweise von Fahrstreifenwechseln werden präsentiert, die sich unter Beachtung der in den vorangegangenen Abschnitten gelegten Grundlagen ergeben.

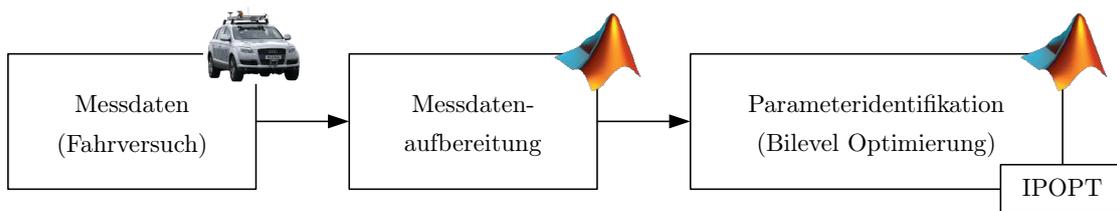


Bild 40: Gesamtverfahren der Analyse von Spurwechselvorgängen

Das gesamte Verfahren der Anwendung ist in Bild 40 zusammengestellt. Es vereint alle zuvor beschriebenen Schritte der experimentellen Parameteridentifikation. Ausgehend von den auf Autobahnen durchgeführten Messungen werden die Rohdaten für die Optimierung aufbereitet. Es werden Rauschanteile aus den Messdaten gefiltert, Spurwechselintervalle aus den Messverläufen heraus identifiziert und die Signalverläufe einer Kalman-Filterung unterzogen. Die auf diese Weise erhaltenen Referenzdaten stellen die Eingangsgrößen für die Optimierungsrechnung mittels IPOPT dar, die die Parameter des optimaltheoretischen Fahrermodells bestimmt. Alle Schritte des Gesamtverfahrens sind in MATLAB implementiert bzw. werden von MATLAB aus gesteuert und lassen sich teil- bzw. vollautomatisiert ausführen. Über iterative Optimierungsläufe unter Veränderung der Startlösungen sowie der Toleranzwerte für Konvergenz, wird das globale Optimum bestimmt, das die Fahrdaten eines Spurwechsels am besten approximiert und somit die charakteristische Gütefunktion des aufgetretenen Fahrerhaltens darstellt. Die Wahl der für die Parameterschätzung getroffenen Optimierungseinstellungen erfolgt gemäß den grundlegenden Ausführungen der vorangegangenen Abschnitte. Die optimaltheoretische Modellierung der Fahrerintention wird über die LLP-Gesamtkostenfunktion nach Gleichung (52) repräsentiert. Als Referenzgröße zur experimentellen Parameteridentifikation wird die gefahrene kalman-gefilterte Spurwechseltrajektorie $y(t)$ im ULP-Zielfunktional herangezogen. Ferner werden zehn Randbedingungen gesetzt, durch die alle Zustandsgrößen zu Beginn und Ende festgelegt sind. In der Folge werden stellvertretend Optimierungsergebnisse der experimentellen Parameterschätzung genauer vorgestellt.

In der exemplarisch ausgewählten Fahrscene 1 wird ein Spurwechsel nach rechts ausgeführt. Bild 41 stellt Momentaufnahmen des Kamerabildes dar, die die Fahrsituation und das Verkehrsumfeld kurz vor Beginn, während der Ausführung und bei Abschluss des Spurwechsels zeigen. Während dieser realen Fahrscene fährt das Ego-Fahrzeug von rechts gesehen auf dem zweiten Fahrstreifen des vierspurigen Autobahnabschnitts mit einer konstanten Geschwindigkeit. Im direkten Fahrzeugumfeld befinden sich keine Verkehrsteilnehmer. Die aktuelle sowie die rechte Fahrspur sind frei, sodass der Fahrer ungehindert auf den gewünschten Fahrstreifen wechseln kann. Während des Spurwechsels der Dauer $T = 5.9\text{ s}$ wird das

Fahrzeug um einen Querversatz von $y = 3.48$ m auf die Zielfahrspur gelenkt. Dabei legt das Fahrzeug einen Weg von 164.4 m in Längsrichtung zurück. Die Längsgeschwindigkeit ändert sich während der Manövers kaum, die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt $v = 100.3$ km/h. Nach Abschluss des „freien“ Spurwechsels fährt ein LKW in mehr als 100 m Entfernung vor dem Ego-Fahrzeug.



Bild 41: Fahrscene 1 eines Spurwechselmanövers

Bild 42 stellt den in dieser Fahrsequenz gemessenen Referenzdaten die Ergebnisverläufe des Angleichs des Modells an die Referenzdaten gegenüber.

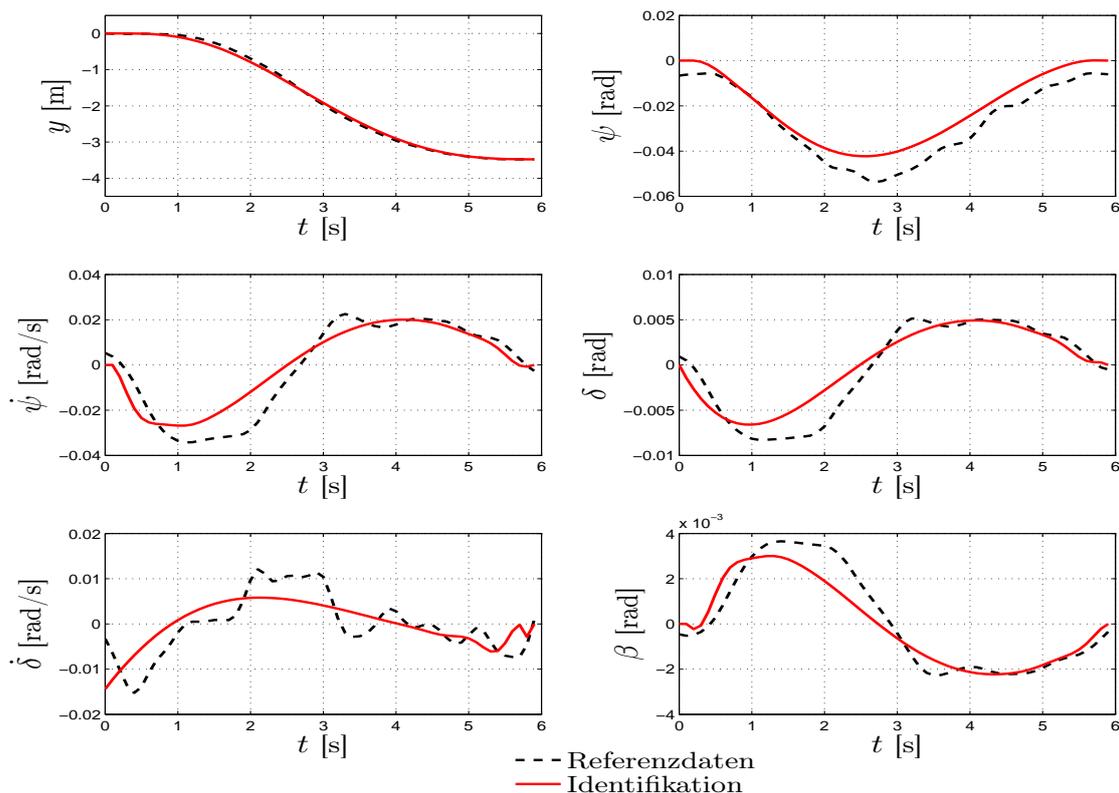


Bild 42: Vergleich gemessener und identifizierter Signalverläufe für Spurwechsel 1

Die Identifikationsrechnung liefert eine sehr gute Übereinstimmung für den im ULP-Zielfunktional zu berücksichtigenden Verlauf der Querablage $y(t)$. Es ergeben sich sehr geringe Abweichungen zwischen der gefahrenen und der rekonstruierten Spurwechseltrajektorie. Die

mittlere quadratische Abweichung beträgt 0.055 m und entspricht damit 1.6% des maximalen Querversatzes. Maximal weichen die beiden Trajektorien 0.1 m voneinander ab. Die übrigen fahrdynamischen Größen besitzen plausible, für einen Spurwechsel charakteristische Verläufe. Auch sie stimmen qualitativ sehr gut mit den gemessenen Signalverläufen überein. Die resultierenden Identifikationsparameter listet Tabelle 9 auf.

Tabelle 9: Identifizierte Gewichtungparameter für den Fahrspurwechsel 1

	f_{ψ}	$f_{\dot{\psi}}$	f_{δ}	$f_{\dot{\delta}}$	$f_{y_{0.33T}}$	$f_{y_{0.70T}}$
w_i	0	0	0	0.97	0.03	0
\tilde{w}_i	0	0	0	0.96	0.04	0

Es zeigt sich, dass sich der gemessene Fahrspurverlauf durch eine Kombination der Fahrökonomie und Fahrsicherheit repräsentierenden Kriterien f_{δ} und $f_{y_{0.33T}}$ am besten nachbilden lässt, wobei das Kriterium für minimale Lenkarbeit f_{δ} dominiert. Andere Kriterien besitzen keinen Einfluss. Das resultierende Gesamtkostenfunktional erweist sich dabei als durchaus plausibel. In der vorliegenden Fahrsituation kann der Fahrer den Fahrstreifen unbeschwert wechseln. Der Spurwechsel kann in Ruhe ohne schnelle und hektische Lenkradbewegungen ausgeführt werden.



Bild 43: Fahrszene 2 eines Spurwechselmanövers

Eine weitere Fahrszene 2 lässt sich durch Bild 43 charakterisieren. In dieser Fahrsituation passiert das auf der mittleren Fahrspur fahrende Ego-Fahrzeug zunächst ein langsames Fahrzeug. Die direkt vor ihm fahrenden Verkehrsteilnehmer sowie auf der Überholspur fahrende Fahrzeuge sind deutlich schneller unterwegs. Das Ego-Fahrzeug schert vor dem gerade überholten Fahrzeug in die Lücke hinter einem vorausfahrenden langsameren LKW (ca. 90 km/h) auf dem rechten Fahrstreifen ein. Während der Dauer der Spurwechselausführung von $T = 5.1$ s wird das Fahrzeug bei einer mittleren Geschwindigkeit von $v = 100$ km/h um 3.76 m lateral nach rechts versetzt.

Bild 44 stellt die mit dem Optimalsteuerungsmodell berechneten Signalverläufe den gemessenen Referenzdaten grafisch gegenüber. Die gefahrene Spurwechseltrajektorie wird sehr exakt approximiert. Der quadratische Mittelwert der Abweichung der steueroptimalen von der gemessenen Trajektorie liegt bei 0.03 m, die maximale bzw. minimale Abweichung betragen nur 0.04 m bzw. -0.06 m. Bezüglich der weiteren fahrdynamischen Größen, die nicht durch die Optimierung approximiert werden sollen, ergeben sich qualitativ plausible Verläufe mit im Vergleich zu den Datensätzen von Spurwechselmanöver 1 größeren Abweichungen.

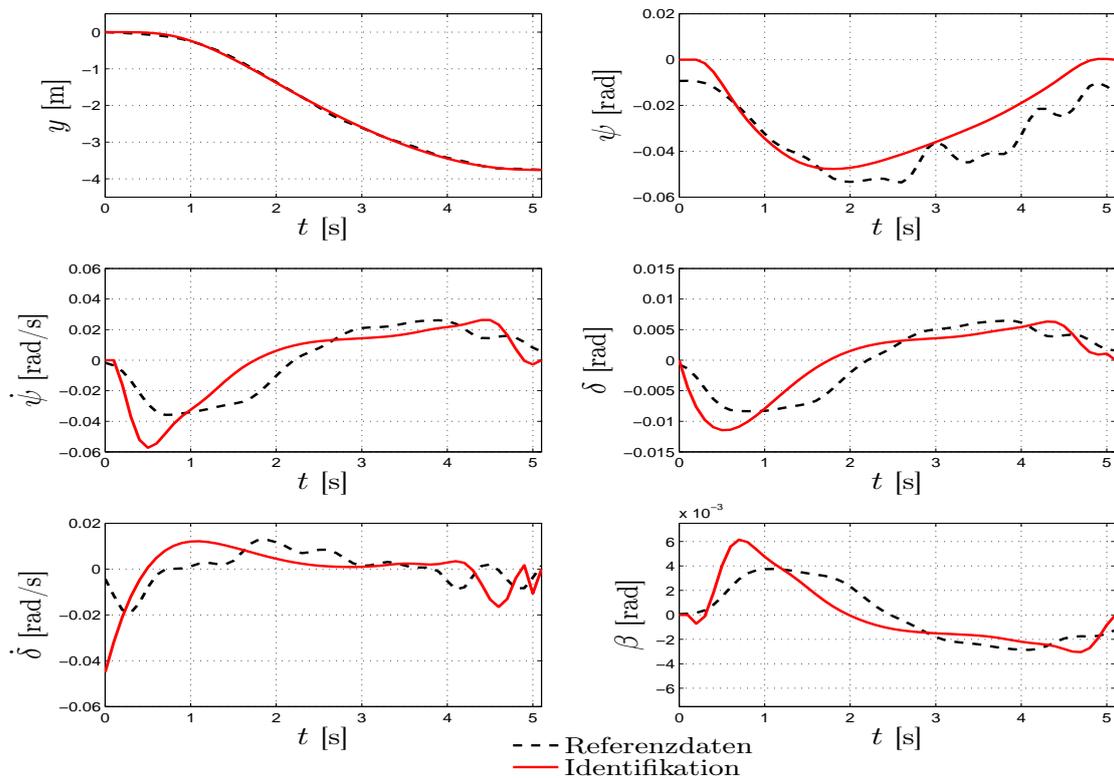


Bild 44: Vergleich gemessener und identifizierter Signalverläufe für Spurwechsel 2

Tabelle 10 führt die identifizierten Gewichtungparameter des optimaltheoretischen Fahrermodells auf. Im Vergleich zum völlig freien Spurwechsel nach rechts aus Fahrscene 1 setzt sich das Gesamtgütekriterium zusätzlich zu den Kriterien f_{δ} und $f_{y_{0,33T}}$ aus einem 13%-igen Anteil von f_{ψ} zusammen.

Tabelle 10: Identifizierte Gewichtungparameter für den Fahrspurwechsel 2

	f_{ψ}	$f_{\dot{\psi}}$	f_{δ}	$f_{\dot{\delta}}$	$f_{y_{0,33T}}$	$f_{y_{0,70T}}$
w_i	0.9951	0	0	0.0037	0.0012	0
\tilde{w}_i	0.1346	0	0	0.6184	0.247	0

Die Optimierungsergebnisse zeigen stellvertretend, dass sich die gefahrene Spurwechseltrajektorie durch das Optimalsteuerungsmodell sehr genau abbilden lässt. Der Ansatz der Bilevel-Optimierung konnte erfolgreich zur Analyse von Spurwechselvorgängen angewendet werden. Er zeichnet sich als stabiles und robustes Optimierungsverfahren aus. Um weiterführende Untersuchungen bezüglich des Zusammenhangs zwischen dem menschlichen Spurwechselverhalten und der jeweils vorliegenden Fahr situation anstellen zu können und somit eine situationsspezifische menschenähnliche Fahrzeugführung autonomer Fahrzeuge zu erreichen, wurde das Optimierungsverfahren auf eine Vielzahl weiterer Fahrdaten angewendet. Bild 45 zeigt eine Auswahl der Ergebnisse der Parameterschätzung für verschiedene Spurwechselvorgänge. Betrachtet man die Verteilung der identifizierten Gewichtungsfaktoren \tilde{w}_i , so zeigt sich, dass in den meisten Fällen eine Kombination der Kriterien f_{δ} und $f_{y_{0,33T}}$ dominiert.

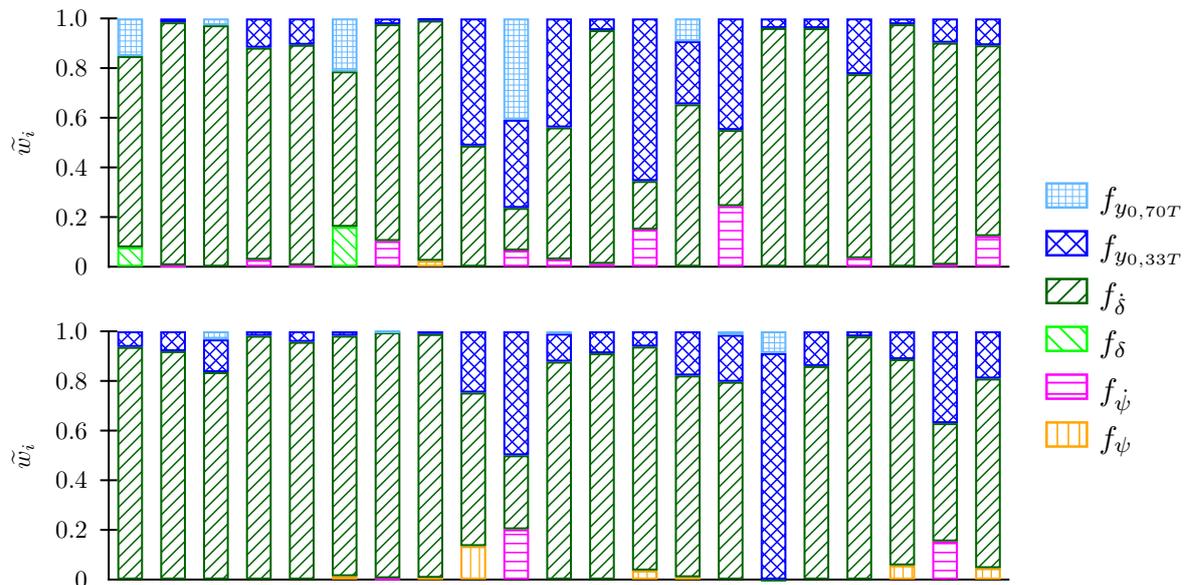


Bild 45: Interpretierte Gewichtungsfaktoren ausgewählter realer Spurwechsellvorgänge nach links (oben) und rechts (unten)

Bild 46 stellt die in den Versuchsfahrten befahrenen Bahnkurven dar, die als Referenzdaten für die experimentelle Parameteroptimierung herangezogen werden.

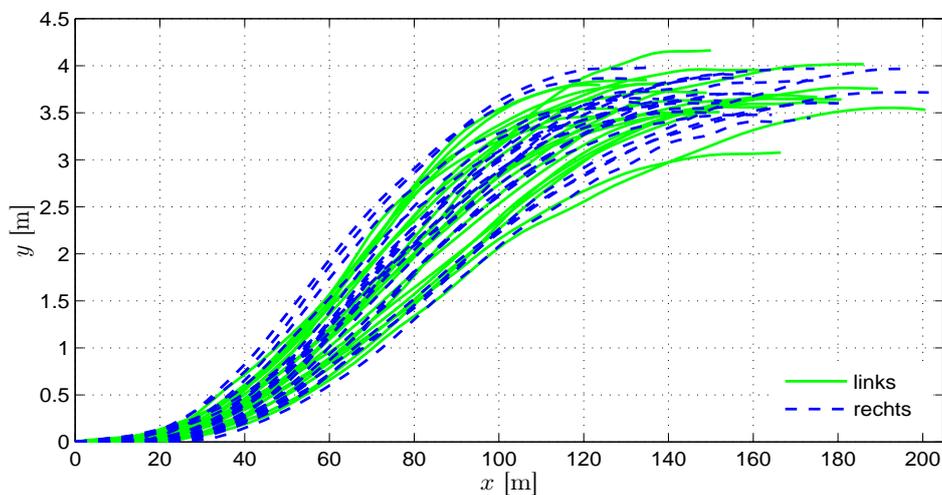


Bild 46: Gemessene Spurwechselbahnkurven

Wie aus den einzelnen Bahnkurven erkennbar, unterscheiden sich die ausgeführten Manöver mitunter sehr stark. Der Proband beendet demnach seinen Spurwechsel nicht bei einer gewissen lateralen Querablage oder einer longitudinalen Distanz. Eine zentrale Aufgabe stellt daher die Identifikation des Zeitintervalls der während der Messfahrten zeitlich betrachtet zufällig auftretenden Spurwechselsituationen dar. Um aus aufgezeichneten Messfahrten

das Auftreten eines Spurwechsels eindeutig zu identifizieren, ist eine isolierte Betrachtung einzelner Merkmale, wie z.B. der Querabweichung oder des Lenkwinkels nicht ausreichend. Zur Ermittlung von Beginn und Ende der Durchführung des Spurwechsels werden deshalb für die einzelnen Signale Toleranzbänder um Referenzwerte herum definiert. Die zeitliche Abgrenzung der querdynamischen Teilmanöver und damit die Festlegung von Beginn- und Endzeitpunkt des Spurwechsels erfolgt über die Auswertung der Zeitpunkte des Über- bzw. Unterschreitens der Toleranzschwellen. Eine Verfeinerung der zeitlichen Bestimmung der Fahrmanöverdurchführung lässt sich mittels iterativ kleiner gewählter Toleranzschwellen erreichen. Referenzwert bei Spurwechseln auf gerader Fahrbahn ist für alle Signale der Wert Null.

Die Datensätze dieser Spurwechselintervalle werden anschließend der Messdatenaufbereitung und schließlich der Bilevel Optimierung zugeführt. Die identifizierten Kostenfunktionen gelten in Zusammenhang mit den charakteristischen Daten des jeweiligen realen Spurwechsels. Zur besseren Vorstellung und Vergleichbarkeit der identifizierten Parameterkombinationen, können die identifizierten kostenoptimalen Spurwechseltrajektorien für einheitliche Bedingungen mittels der LLP-Optimierung erneut berechnet werden.

Bild 47 zeigt die mit dem Optimalsteuerungsmodell berechneten Spurwechselverläufe unter normierten Ausführungsbedingungen. Dabei ist die Durchschnittsgeschwindigkeit von $v = 104.9 \text{ km/h}$ der in den Messfahrten ausgeführten Fahrstreifenwechsel als konstante Fahrgeschwindigkeit angenommen.

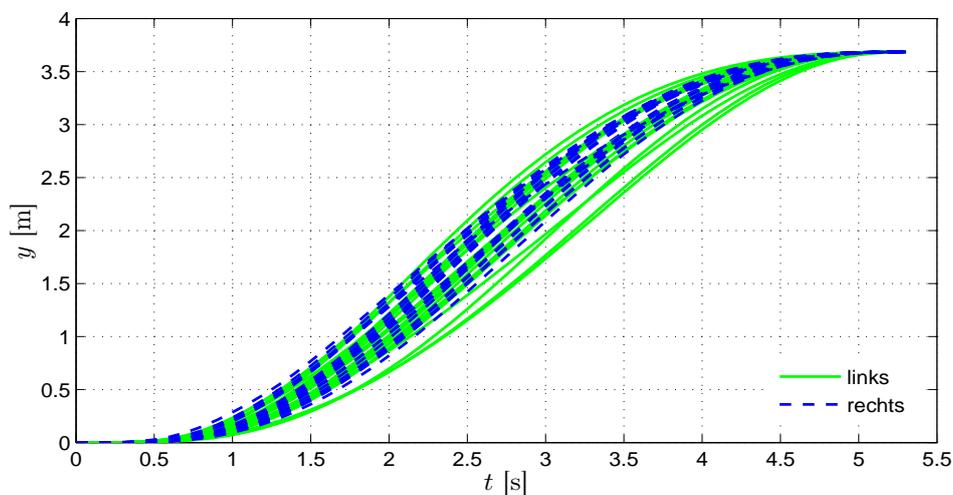


Bild 47: Normierte Darstellung von Spurwechseltrajektorien basierend auf identifizierten Kostenfunktionen realer Spurwechselvorgänge

Der Fahrzeugführer wechselt während der durchschnittlichen Spurwechseldauer von $T = 5.2 \text{ s}$ auf den Zielfahrstreifen nach links. Die Spurwechseltrajektorien liegen in einem relativ schmalen Bereich beieinander, unterscheiden sich jedoch durch den Zeitpunkt des Ausrichtens auf den Zielfahrstreifen. Inwieweit sich Unterschiede durch eine situationspezifische bzw. situationsadaptive Ausführungsweise des Menschen erklären und abbilden lassen, ist nachfolgend zu klären.

5.4 Zusammenfassung

Um menschenähnlicheres Fahrverhalten bei der Entwicklung automatischer Fahrzeugführungssysteme realisieren zu können, wird in diesem Kapitel ein optimaltheoretischer Ansatz zur Analyse menschlichen Fahrverhaltens untersucht und erfolgreich angewendet.

Die menschliche Fahrzeugführung wird über ein optimaltheoretisches Fahrermodell abgebildet, das auf der Grundidee beruht, dass der Mensch ein Aufgabenziel optimal verfolgt und sein Verhalten somit als Optimierungsaufgabe durch die Minimierung eines Kostenfunktionalis beschreibbar ist. Demnach wird die Fahraufgabe auf ein parameterabhängiges Optimierungsproblem der Bahnplanung eines reduzierten Fahrzeugmodells zurückgeführt, in dem die Gewichtungparameter der Teilkriterien des Kostenfunktionalis die Fahrereigenschaften nachbilden und charakterisieren. Zur Modellierung wird die Dynamik des Systems Mensch-Fahrzeug-Fahrbahn als Einspurmodell in linearer Form mathematisch abgebildet. Um menschliches Fahrverhalten bei der Durchführung spezifischer Fahrmanöver abbilden und analysieren bzw. identifizieren zu können, wird die Problemstellung auf ein zweistufiges Optimierungsproblem, das Bilevel Problem, erweitert. Das Bilevel Problem setzt sich aus einem Lower Level Problem und einem Upper Level Problem zusammen, wobei die untere Ebene des LLP die optimaltheoretische Modellierung des Fahrers enthält, deren unbekannte Modellparameter durch den Abgleich errechneter Modellgrößen mit entsprechenden Referenzgrößen in der höheren Stufe des ULP identifiziert werden. Zur Lösung wird das Bilevel Problem diskretisiert und über die KKT-Bedingungen in ein einstufiges Optimierungsproblem überführt, sodass es mit dem Optimierungsalgorithmus IPOPT gelöst werden kann.

Zur Analyse menschlicher Fahrverhaltensweisen in Spurwechselmanövern wird der Fahrstreifenwechsel durch Versuchsfahrten auf Autobahnen messtechnisch erfasst. Die Messdaten werden anschließend umfassend aufbereitet und als Referenzdaten, auf deren Basis die Verhaltensanalyse erfolgt, für die Parameterschätzung durch die Bilevel Optimierung bereitgestellt. Bevor die Bilevel Optimierung zur Analyse realer Fahrspurwechsel angewendet werden kann, bedarf es der Konkretisierung der zunächst allgemein formulierten Bilevel Optimierungsproblemstellung. Hierzu werden Kriterien der optimalen Bahnplanung des Fahrers, die komfortbetontes und sicherheitsorientiertes Fahrverhalten berücksichtigen, betrachtet und festgelegt. Als Abgleichskriterium der experimentellen Parameteridentifikation wird die befahrene Spurwechselbahnkurve definiert. Ferner werden mit den Nebenbedingungen der Optimierungsaufgabe, wie Randwerte und Steuerbeschränkungen, weitere Einflussfaktoren auf die Abbildungsgüte detailliert untersucht und unter dem Aspekt der realistischen Abbildung und Analyse von Fahrstreifenwechseln adaptiert. Anschließend wird die Absicherung und Validierung der korrekten Funktionsweise des konkretisierten Optimierungsproblems anhand synthetischer Daten erfolgreich durchgeführt.

Schließlich wird das entwickelte Gesamtverfahren erfolgreich zur Identifikation von Fahrerparametern in realen Spurwechselvorgängen angewendet. Die Identifikationsrechnungen liefern dabei sehr gute Approximationsergebnisse der realen Fahrverläufe, was die Leistungsfähigkeit des Verfahrens zeigt. Ein Vergleich der Approximationsgüte der Spurwechselbahnkurve zwischen dem hier dargelegten linearen und dem in [101] vorgestellten nichtlinearen Dynamikmodell liefert nur sehr geringe Unterschiede. Die realen Fahrspurwechsel lassen sich auf Basis der linearen Fahrdynamikmodellierung hinreichend genau nachbilden.

6 Situationsadaptive Fahrzeugführung

Dieses Kapitel beschreibt die zur Umsetzung einer situationsadaptiven Fahrzeugführung notwendigen Komponenten. In Kapitel 6.1 werden zunächst der Aufbau und die Grundbausteine der Fahrzeugführungsarchitektur sowie deren regelungstechnische Umsetzung erläutert. Exemplarische Auszüge automatisierter Manöververläufe des Versuchsträgers zeigen jeweils die Performance der entwickelten Bausteine. Kapitel 6.2 geht anschließend auf verschiedene Möglichkeiten zur Adaption der Fahrzeugführung sowohl auf Stabilisierungs- als auch auf Bahnführungsebene ein. Kapitel 6.3 widmet sich der Verknüpfung zwischen Situationsklassen und Fahrverhalten. Einem sicherheitsorientierten Mapping folgt eine fahrspezifische Auslegung, welche die Ergebnisse der Fahrverhaltensanalyse aus Kapitel 5 gemäß einer Korrelationsanalyse mit den Situationsaspekten aus Kapitel 4 verknüpft.

6.1 Regelungstechnische Umsetzung der Grundfunktionalität

Ein autonomes System führt bei der Erledigung seiner Aufgaben prinzipiell die gleichen Tätigkeiten aus, wie der Mensch in der jeweiligen Situation. Zur Entwicklung einer leistungsfähigen autonomen Fahrzeugführung, die den Menschen im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis ersetzt und die Bewältigung der Fahraufgabe vollständig automatisiert, ist es sinnvoll, das dazu notwendige Führungssystem und seine Architektur am menschlichen Verhalten zu orientieren. Das Modell nach RASMUSSEN [136], das drei kognitive Verhaltensebenen unterscheidet, die mit Fähigkeiten auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen korrespondieren, legt eine fähigkeits-/fertigkeitsbasierte Architektur für eine autonome Fahrzeugführung nahe. Ein auf Grundlage dieses Konzepts aufgebautes Fahrzeugführungssystem ist in [157] beschrieben. Dieser Ansatz bündelt viele für die Aufgabe der Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems relevante Vorteile und wurde daher als Basisstruktur für die Umsetzung der Entscheidungen der Verhaltensinstanzen herangezogen.

6.1.1 Konzept des Fähigkeittennetzes

Die Grundidee hinter dem Konzept bildet eine Zerlegung der komplexen Fahraufgabe (Fahrmanöver) in einfachere Grundbausteine des Fahrens (Fahrprimitive), die je nach Anforderung geeignet kombiniert und parametrisiert werden können. Der Vorteil dieser Architektur liegt darin, dass die modularen Grundbausteine unabhängig voneinander entwickelt werden können, für mehrere übergeordnete Fahrmanöver gemeinsam nutzbar sind und eine Erweiterung jederzeit durch Hinzufügen neuer Fahrprimitive problemlos möglich ist.

Aus diesen Gründen wurde in Anlehnung an [157] eine Hierarchie von Fortbewegungsfähigkeiten in einem Fähigkeittennetzwerk dargestellt [70, 167, 182], das mit Hilfe eines verallgemeinerten Ablaufmodells eine autonome Fahrzeugführung ermöglicht.

Fahrmanöver (wie z.B. „Stop&Go“ oder „Passieren“) stellen dabei übergeordnete Fahrhandlungen im Sinne von Handlungsfähigkeiten (vgl. Bild 48) dar, die der Ebene des regelbasierten Verhaltens nach RASMUSSEN zuzuweisen sind. Diese greifen wiederum auf eine Kombination unterlagerter Fahrprimitive (wie z.B. „Spur halten“, „Spur wechseln“, . . .), auch Fahrzeugfertigkeiten bezeichnet, zurück, die der Ebene der auf sensumotorischen Fähigkeiten basierendem Verhalten entsprechen. Fahrhandlungsfähigkeiten sind demnach von unter-

lagerten Fortbewegungsfertigkeiten abhängig, die sich inhaltlich in Fertigkeiten der Längs- und der Querdynamik gliedern lassen. Die Umsetzung der abrufbaren Fahrzeugfertigkeiten als Basiselemente des Fahrzeugführungssystems erfolgt automatisiert in Form von Steuerungen oder Regelungen. Deren Kombination sowie zeitliche Koordination wird wiederum durch den überlagerten Knoten der Handlungsfähigkeit festgelegt und wurde mit Hilfe von Zustandsautomaten umgesetzt. Werden wiederum unterschiedliche Handlungen von der übergeordneten Verhaltensentscheidungsinstanz zielführend kombiniert, so ergeben sich komplexere Verhaltensweisen. Durch diese Fähigkeitenhierarchie sind die drei Verhaltens-ebenen nach RASMUSSEN abgebildet.

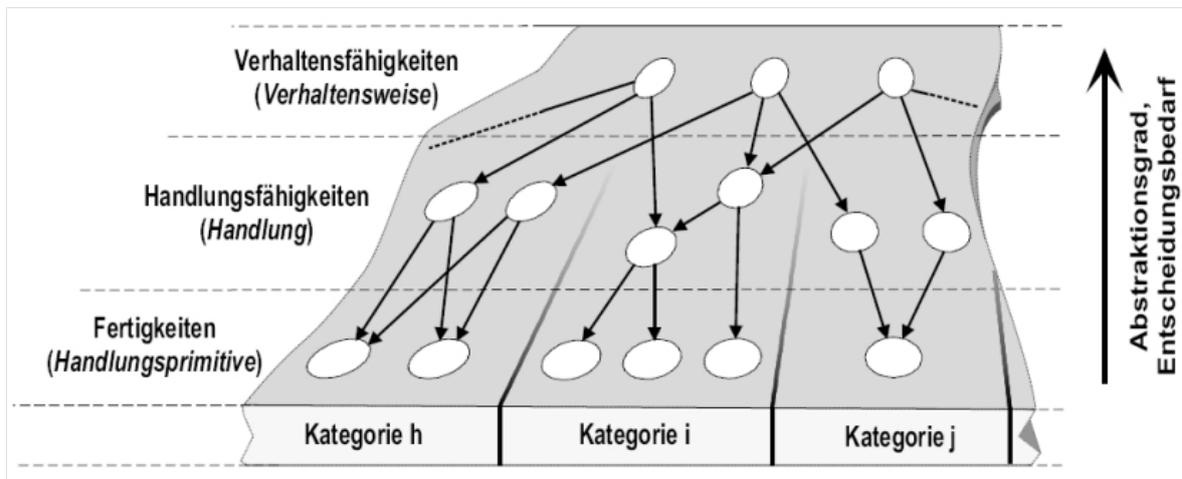


Bild 48: Fähigkeitenhierarchie nach [157]

6.1.1.1 Aspekte der Systemsicherheit im Fähigkeitsnetzwerk

Die Ausführbarkeit übergeordneter Manöver hängt wesentlich von der Verfügbarkeit einzelner untergeordneter Fertigkeitenbausteine ab. Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass durch die Analyse der Handlungsprimitive eine Aussage über die Ausführbarkeit der Manöver möglich ist. Auf unterster Ebene werden daher alle Sensoren, Aktoren und Steuergeräte überwacht, um eine Aussage bezüglich deren Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit den übergeordneten Instanzen zukommen zu lassen. Darüber hinaus kann automatisiert zwischen den diversitär ausgelegten Aktorsystemen (vgl. Kapitel 3.3.3) und deren jeweiliger Steuerung/Regelung im Sinne einer fail-operational-Auslegung durch einfachen Wechsel der korrespondierenden Fertigkeitenbausteine umgeschaltet werden.

Da die Primärsysteme der Längsdynamik charakterisiert sind durch den Zugriff auf Schnittstellen zur Längskoordination des bordeigenen Abstandregelautomaten (ACC), unterliegen dessen Systemgrenzen (bzgl. Dynamik und Stellgrößenbeschränkung) denen, die durch den Fahrzeughersteller bzw. Systemlieferanten vorgegeben sind, weisen jedoch eine hohe Systemzuverlässigkeit auf. Über die zusätzlich eingebauten Sekundärsysteme können jedoch keinerlei Aussagen zur Ausfallsicherheit getroffen werden, da Untersuchungen bzgl. Lebensdauer und Zuverlässigkeit mit dem Lehrstuhl zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich sind. Kenngrößen wie Exaktheit, Dynamik und Stellbereiche lassen sich für die eingesetzte

Aktorik hingegen einfach ermitteln. Diese sind hinsichtlich ihrer Systemgrenzen den Primärsystemen überlegen, daher würde beim Ausfall letzterer keinerlei Leistungsverminderung stattfinden, also ein fail-operational–Verhalten sogar übertroffen werden.

Beispielhaft hierfür ist die herstellerbedingte Limitierung der maximalen Längsverzögerung des Primärsystems auf einen noch komfortablen Wert von $3,9 \text{ m/s}^2$ zu nennen. Wird eine höhere Verzögerung von den übergeordneten Instanzen angefordert oder ein Ausfall des Primärsystems von den überwachenden Einheiten im Fähigkeitsnetzwerk detektiert, so erfolgt eine sofortige Umschaltung auf das Sekundärsystem der Längsführung. Dieses ist in der Lage, die maximale Verzögerung bis hin zu einer Notbremsung einzusteuern.

Das Fertigkeitenkonzept gekoppelt mit diversitärer und teils redundanter Auslegung von Sensorik und Aktorik sowie sinnvollen Rückfallebenen in einen sicheren Systemzustand trägt daher zur Realisierung der Forderung nach Systemsicherheit entscheidend bei.

6.1.1.2 Knotenkoordination im Fähigkeitsnetzwerk

Fahrmanöver sind die koordinierte Abfolge einzelner unterlagerter Fähigkeiten. Aufgrund der Tatsache, dass sich Fahrmanöver elementare Fähigkeiten zu nutze machen, müssen sie in der Fähigkeitenhierarchie höher angesiedelt sein als die Fertigkeiten. Dieser Sachverhalt wird in Bild 49 augenfällig, da man dort deutlich die Abhängigkeit zum Beispiel des Fahrmanövers „Spurwechsel“ von den Längsdynamikfertigkeiten „Beschleunigen/Geschwindigkeitsverlauf/Verzögern“ und der Querdynamikfertigkeit „Spur wechseln“ erkennen kann.

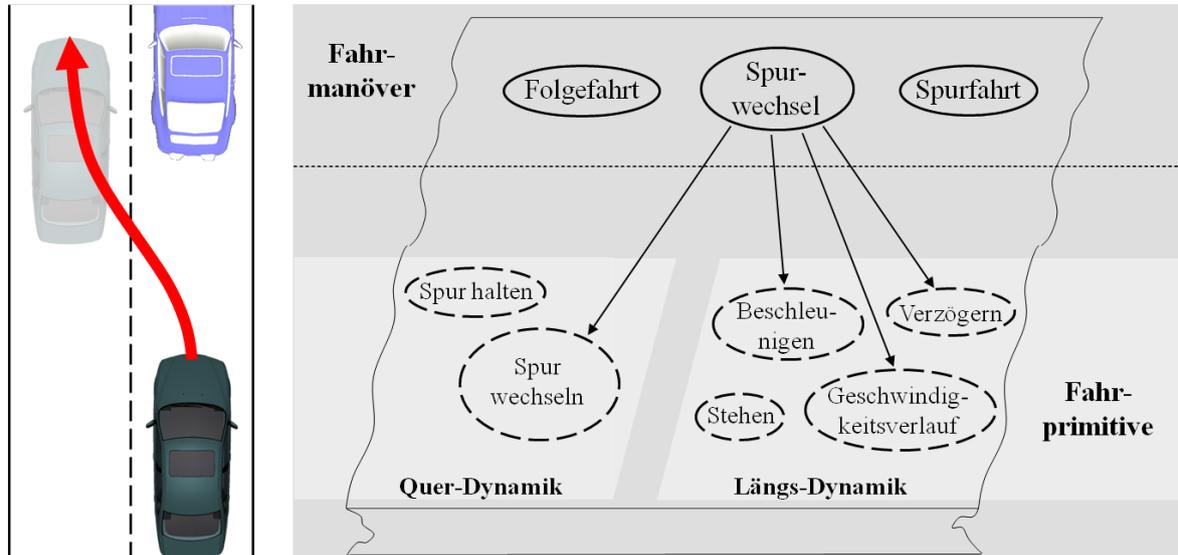


Bild 49: Exemplarischer Auszug aus dem Fähigkeitsnetz

Die Einteilung der Fertigkeiten in unterschiedliche Klassen, nämlich in die Längs- und Querdynamik, empfiehlt sich deshalb, weil verschiedene, voneinander unabhängige Aktoren (Gas / Bremse / ACC-System für die Längsdynamik, Lenkmotor für die Querdynamik) von den elementaren Fähigkeiten angesprochen werden. Aufgrund der Tatsache, dass eine Vielzahl an Fahrmanövern hinterlegt werden muss, um ein autonomes Fahren in allen denkbaren

Situation zu gewährleisten, muss stets Sorge dafür getragen werden, dass nur eine Fahrhandlung und davon auch jeweils nur genau eine unterlagerte Fertigkeit für die Längs- und Querdynamik exklusiven Zugriff auf die dazugehörige Aktorik hat. Grund dafür ist, dass den Fertigkeiten Regler hinterlegt sind, welche zu ihrer Laufzeit mit aktuellen Größen versorgt werden und je nach Fahraufgabe den entsprechenden Aktor ansteuern. Greifen mehrere Regler gleichzeitig auf den selben Aktor zu, so würde dies zu Konflikten bei der Regelung und somit zur Nichterfüllung der Fahraufgabe führen.

Innerhalb der Fahrzeuglängsdynamik wurden folgende Grundfertigkeiten der Bewegung umgesetzt: Stehen, Vollbremsen, Beschleunigen, Verzögern, Geschwindigkeitsverlauf nachfahren, Abstandsverlauf einregeln. Diese wiederum werden als Bausteine für die Erzeugung folgender übergeordneter Fahrmanöver benötigt:

- Stillstand: Fahrzeug im Stillstand halten
- Notstop: schnellst mögliches Anhalten
- Stop: in definierter Distanz anhalten
- Objektstop: im definierten Abstand vor einem Objekt halten
- Spurfahrt: einer Fahrspur entlang fahren
- Spurwechsel: einen Fahrspurwechsel vornehmen
- Stop&Go: Fahren im Stau
- Folgefahrt: einem vorausfahrenden Fahrzeug folgen

Innerhalb der Fahrzeugquerdynamik wurden die Grundfertigkeiten zum Spur halten und Spur wechseln sowie zum Fixieren des Lenkrades realisiert. Letztere tritt nur im Fahrmanöver „Stillstand“ auf. Das Fahrprimitiv „Spur wechseln“ findet ebenso nur in der Handlungsfähigkeit „Spurwechsel“ Anwendung. Bei allen anderen Fahrmanövern kommt die Grundfertigkeit „Spurhalten“ zum Einsatz.

6.1.2 Fertigkeiten der Längsführung

Die Fahrfertigkeiten erfordern als automatisiert abzuarbeitende Handlungsprimitive jeweils eine geeignete regelungstechnische Realisierung. Im Hinblick auf die Verwirklichung eines Konzepts zur Umsetzung der dargestellten Längsbewegungsfertigkeiten sind also Konzepte zur Regelung der Fahrzeugbewegungsgrößen Beschleunigung, Geschwindigkeit und Abstand erforderlich sowie die Möglichkeit zur Bremsdrucksteuerung.

6.1.2.1 Entwurf der längsdynamischen Fahrprimitive

Die Grundfertigkeit „Stehen“ wird definiert als statischer Zustand des Kraftfahrzeugs ohne Relativbewegung gegenüber dem Untergrund. Dieses Fahrprimitiv erfordert eine separate Betrachtung, da dessen Umsetzung durch das ACC-System nur über einen beschränkten Zeitraum aufrecht erhalten werden kann. Daher wird diese Fertigkeit durch eine definierte Bremsdruckvorgabe an das pneumatische Sekundärsysteme der Bremse (vgl. Kapitel

3.3.3.2) realisiert. Die Einschränkungen des ACC-Systems erfordern ebenso eine definierte Bremsdruckvorgabe innerhalb der Grundfertigkeit „Vollbremsen“ zur maximalen Verzögerung des Fahrzeugs ohne Berücksichtigung von Komfortaspekten (vgl. Kapitel 6.1.1.1). Alle anderen Fahrprimitive der Längsdynamik erfordern im Gegensatz zu den soeben aufgeführten Steuerungen eine Regelung der Fahrzeugbewegungsgrößen.

Zum Entwurf einer für Regelungszwecke verwendbaren Systembeschreibung besteht die Möglichkeit, ein mathematisches Modell der Regelstrecke durch Aufstellen von physikalisch gegebenen Zusammenhängen zu entwickeln (theoretische Regelstreckenmodellierung). Darüber hinaus kann man das vorliegende System als Black Box betrachten und im Versuch eine Systembeschreibung auf Basis vorgegebener Eingangsgrößen und messtechnisch erfasster Ausgangsgrößen entwickeln (experimentelle Systemidentifikation). Beide Modellierungstechniken wurden in dieser Arbeit verfolgt und für den anschließenden Regelungsentwurf herangezogen.

Für die systematische Festlegung der Parameter einer linearen Regelung von Eingrößensystemen muss das Ein-/ Ausgangsverhalten der Regelstrecke in Form einer linearen Differentialgleichung im Zeitbereich bzw. einer Übertragungsfunktion im Frequenzbereich bekannt sein. Hierzu wurden mit dem Versuchsfahrzeug Identifikationsfahrten in verschiedenen Systemarbeitsbereichen durchgeführt und davon ausgehend eine (bereichsweise) lineare Systembeschreibung abgeleitet. Zusätzlich musste dem Umstand Rechnung getragen werden, dass das Sicherheitskonzept auf Hardwareebene eine Diversität der Aktorik zur Umsetzung der längsdynamischen Grundfertigkeiten forderte. Dementsprechend wurde die Systemidentifikation mit allen im Versuchsträger verbauten Aktoren durchgeführt. Auch wurden alle nachfolgend aufgeführten Regelungskonzepte für jede Sensor-Aktor-Kombination realisiert, so dass ein reibungsloses Umschalten zwischen den Systemen im Fehlerfall ermöglicht wurde.

Das System „auf gerader und ebener Fahrbahn bewegtes Fahrzeug“ wurde im Hinblick auf das Übertragungsverhalten von den Eingangsgrößen Fahrpedalwert und Momentenanforderung (jeweils zur Motoransteuerung) sowie Sollbremsdruck (als Vorgabe für den Pneumatikbremsaktor) und Verzögerungsanforderung (zur Ansteuerung des aktiven Bremskraftverstärkers) zur Ausgangsgröße Fahrzeugbeschleunigung und -geschwindigkeit untersucht. Darauf aufbauend wurden folgende Regelungskonzepte zur Umsetzung der aufgeführten längsdynamischen Fortbewegungsfertigkeiten entwickelt, um auf unterster Hierarchieebene eine fertigkeitenbasierte Fahrzeugführung zu ermöglichen. Zunächst ist ein Konzept zur Regelung der Bewegungsgröße der Beschleunigung zu entwickeln. Die Beschleunigung ist aufgrund ihres unmittelbaren Zusammenhangs mit der wirkenden Kraft nach dem NEWTON'schen Gesetz das grundlegende Maß zur Beschreibung (längs)dynamischer Vorgänge, welche durch Aktoreingriffe und damit durch Kraftwirkungen beeinflusst werden. Dabei wurden die Konzepte der PI-Beschleunigungsregelung mit linearisierter Fahrzeugregelstrecke sowie mit nichtlinearer modellbasierter Vorsteuerung untersucht. Bild 50 zeigt die Systemantwort letzteren Konzeptes auf einen geforderten Beschleunigungsverlauf, welcher aus einem Testzyklus im Fahrversuch resultiert.

Den zentralen Baustein der beiden entworfenen Beschleunigungsregelungskonzepte bildet ein sehr detailliertes invertiertes Modell der Fahrzeuglängsbewegung. Das Modell kann als Regelungsbaustein zu einer geforderten Sollbeschleunigung den benötigten Aktor und die entsprechende Stellgröße zur Umsetzung der Beschleunigungsanforderung liefern.

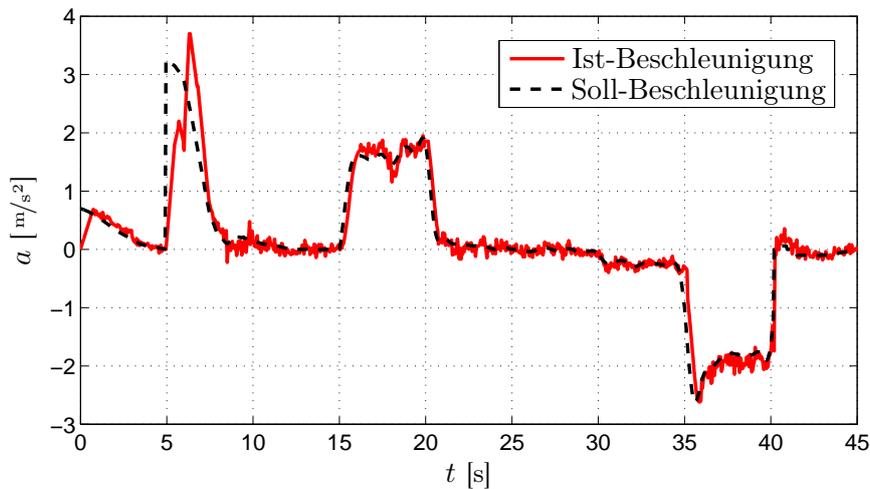


Bild 50: Systemantwort auf Beschleunigungsvorgaben im Fahrversuch

Die Verwendung des (invertierten) Fahrzeuglängsdynamikmodells bietet neben der schnellen und die Nichtlinearitäten der Regelstrecke kompensierenden Stellgrößengenerierung den weiteren Vorteil der Möglichkeit zur koordinierten Umschaltung zwischen Beschleunigungs- und Verzögerungsaktorik unter Berücksichtigung von Motorschleppwirkung und Fahrwiderständen.

Die Parametrierung des Modells konnte größtenteils durch zur Verfügung gestellte Daten des Fahrzeugherstellers erfolgen. Zur Ermittlung der unbekanntenen Größen der Fahrwiderstände, wurde das GAUSS-SEIDEL-Verfahren zur Identifikation von Rollwiderstandsbeiwert f_R (unbekannt) und dem Produkt aus Fahrzeugstirnfläche A_{St} und Luftwiderstandsbeiwert c_W (Originalwerte verändert durch zusätzliche Aufbauten, vgl. auch Bild 6) aus Messdaten herangezogen.

Da im Fall der Fahrzeugbeschleunigung durch den Motor die Streckenverstärkung (unter Vernachlässigung der nichtlinearen Fahrwiderstände) momentenübersetzungsabhängig ist, wurden die Reglerparameter entsprechend skaliert. Dadurch konnte die Systemdynamik über alle Fahrstufen und Wandler eingriffe hinweg (also bei beliebiger Momentenübersetzung i_M des Antriebsstrangs) konstant gehalten werden.

Somit konnten die Grundfertigkeiten zur Beschleunigung und Verzögerung des Versuchsträgers realisiert werden. Weiterhin ist ein Konzept zur Umsetzung des Fahrprimitivs „Geschwindigkeitsverlauf nachfahren“ zu entwickeln. Die Aufgabe der Geschwindigkeitsregelung besteht darin, das Antriebs- oder Bremsmoment über die zur Verfügung stehenden Stellgrößen so einzustellen, dass die vorgegebene Sollgeschwindigkeit v_{Soll} innerhalb der Leistungsgrenzen des Fahrzeugs möglichst gut und unabhängig von Störeinflüssen eingehalten wird. Dies soll sowohl im stationären Fall einer konstant vorgegebenen Sollgeschwindigkeit (Auslegung auf Störverhalten und stationäre Genauigkeit) als auch im instationären Fall eines vorgegebenen Sollgeschwindigkeitsverlaufs (Auslegung auf Führungsverhalten) erfüllt sein. Es ist also die Entwicklung eines geeigneten Reglerkonzepts erforderlich, welches die aufgeführten Anforderungen erfüllen kann.

Als Möglichkeit zur stationär genauen Regelung der Fahrzeuggeschwindigkeit, welche auf eine bereits entwickelte Regelungskomponente zurückgreift, wurde ein Kaskadenregler umgesetzt. Dieser nutzt die Kompensation des nichtlinearen längsdynamischen Fahrzeugverhaltens auf Beschleunigungsebene als Grundlage für die Auslegung einer übergeordneten Geschwindigkeitsregelung mit einem linearen Regelungsansatz. Bild 51 zeigt die Ergebnisse der Grundfertigkeit „Geschwindigkeitsverlauf nachfahren“, welche mit dem Konzept der Kaskadenregelung erreicht werden. Dargestellt ist wiederum die Systemantwort auf Geschwindigkeitsvorgaben des bereits in Bild 50 eingeführten Testzykluses im Fahrversuch.

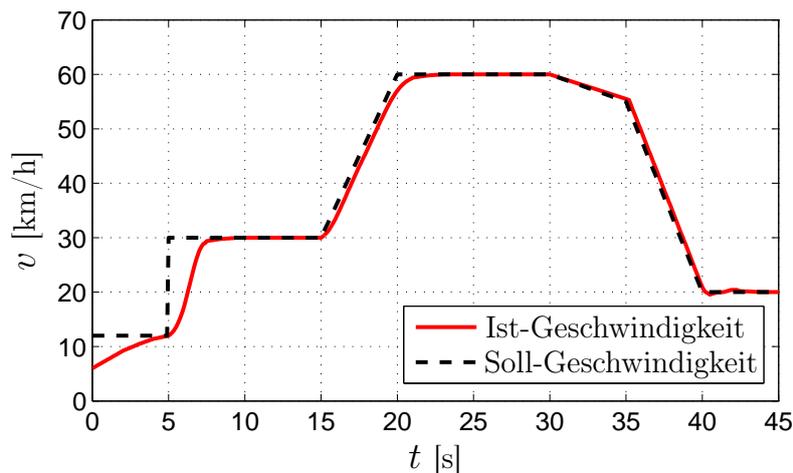


Bild 51: Systemantwort auf Geschwindigkeitsvorgaben im Fahrversuch

Ein autonomes Fahrzeug im Straßenverkehr muss in der Lage sein, auf langsamere Fahrzeuge oder Hindernisse in der eigenen Spur zu reagieren. Im Falle eines möglichen Ausweichmanövers oder Überholvorgangs reichen aus längsdynamischer Sicht die bisherigen Konzepte der Beschleunigungs- bzw. Geschwindigkeitsregelung in Kombination mit geeigneten querdynamischen Aktionen zur Bewältigung der Aufgabe aus. Beim Verbleiben in der eigenen Spur („Stop&Go“ und „Folgefahrt“) ist eine Anpassung der Geschwindigkeit an das langsamere Fahrzeug bzw. Hindernis notwendig. Dies erfordert den Entwurf weiterer Regelungsstrukturen, welche den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug oder Hindernis als zusätzliche Eingangsgröße heranziehen, um darauf basierend entsprechende Abstandsvorgaben umsetzen und Kollisionen vermeiden zu können.

Durch Rückgriff auf die unterlagerte Geschwindigkeitsregelung innerhalb einer Kaskadenregelungsstruktur konnte eine Möglichkeit zur gezielten Beeinflussung der Eigenfahrzeugbewegung zur Regelung des Abstands zu einem vorausfahrenden Fahrzeug oder einem Hindernis realisiert werden. Bild 52 zeigt die Ergebnisse des Abstandsverhaltens auf Basis der Kaskadenregelung. Ein konstant auf 30 m eingestellter Sollabstand befindet sich bei variierender Fremdfahrzeuggeschwindigkeit in einem akzeptablen Abweichungsbereich von 1 – 2 m.

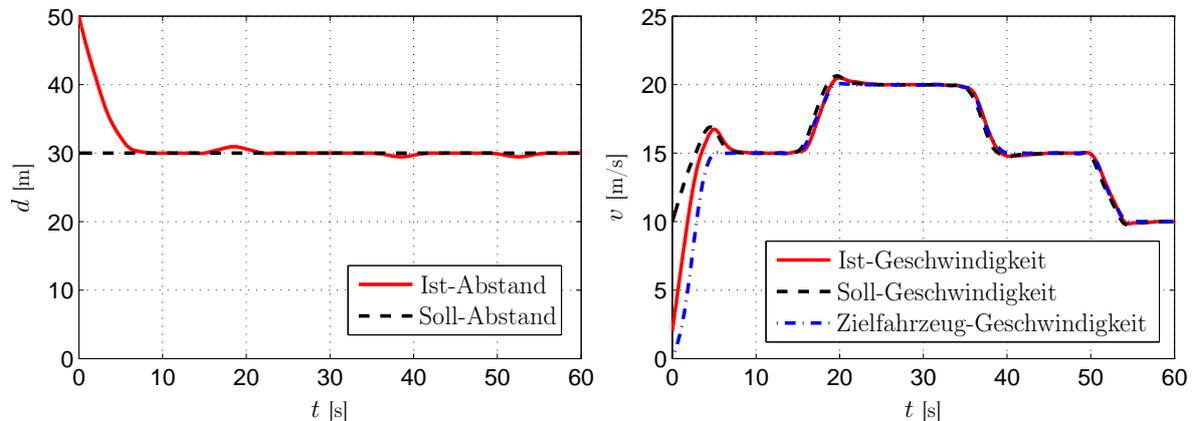


Bild 52: Testzyklus für den Abstandsregler in der Simulationsumgebung

6.1.2.2 Zusammenfassung der Längsdynamik-Regelung

Das sich aufgrund seiner Flexibilität und hohen Dynamik innerhalb der Testreihen als am günstigsten erwiesene Kaskadenregelungskonzept auf Basis einer unterlagerten Beschleunigungsregelungskaskade mit Vorsteuerung (Bild 53) wurde in das Fähigkeitenkonzept aufgenommen.

Die realisierte Regelungsstruktur ermöglicht aufgrund der enthaltenen Einzelmodule der Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Abstandsregelung eine gezielte Einflussnahme auf alle längsdynamisch relevanten Bewegungsgrößen und kompensiert durch die zentrale Beschleunigungsregelungskaskade mit modellbasierter Vorsteuerung die Nichtlinearitäten des Systems „im Straßenverkehr bewegtes Fahrzeug“ auf unterster Wirkebene. Sollvorgaben bezüglich aller Bewegungsgrößen können also auf Basis der Beschleunigungskaskade jeweils schnell und unabhängig von Störeinflüssen umgesetzt werden. Weiterhin ist durch das für die Vorsteuerung der Stellgrößen verwendete Fahrzeugmodell eine fahrsituationsabhängige Umschaltung zwischen Beschleunigungs- und Verzögerungsaktorik unter Berücksichtigung von Fahrwiderständen und Motorschleppmomenten möglich.

6.1.3 Fertigkeiten der Querführung

Innerhalb der Fahrzeugquerdynamik wurden die Grundfertigkeiten „Spur halten“ und „Spur wechseln“ realisiert. Regelungstechnisch basieren beide Grundfertigkeiten auf einem Zustandsregler zur Minimierung der Führungsgrößen der Querdynamik sowie einem Bahnplanungsmodul das eine zu folgende Trajektorie generiert; letzteres beinhaltet ein Modul zur situationsadaptiven Spurwechselplanung. Der Zustandsregler wurde zudem mit einem Parameter-Scheduling-Ansatz erweitert, um der Regelung situationsadaptives Verhalten verleihen zu können.

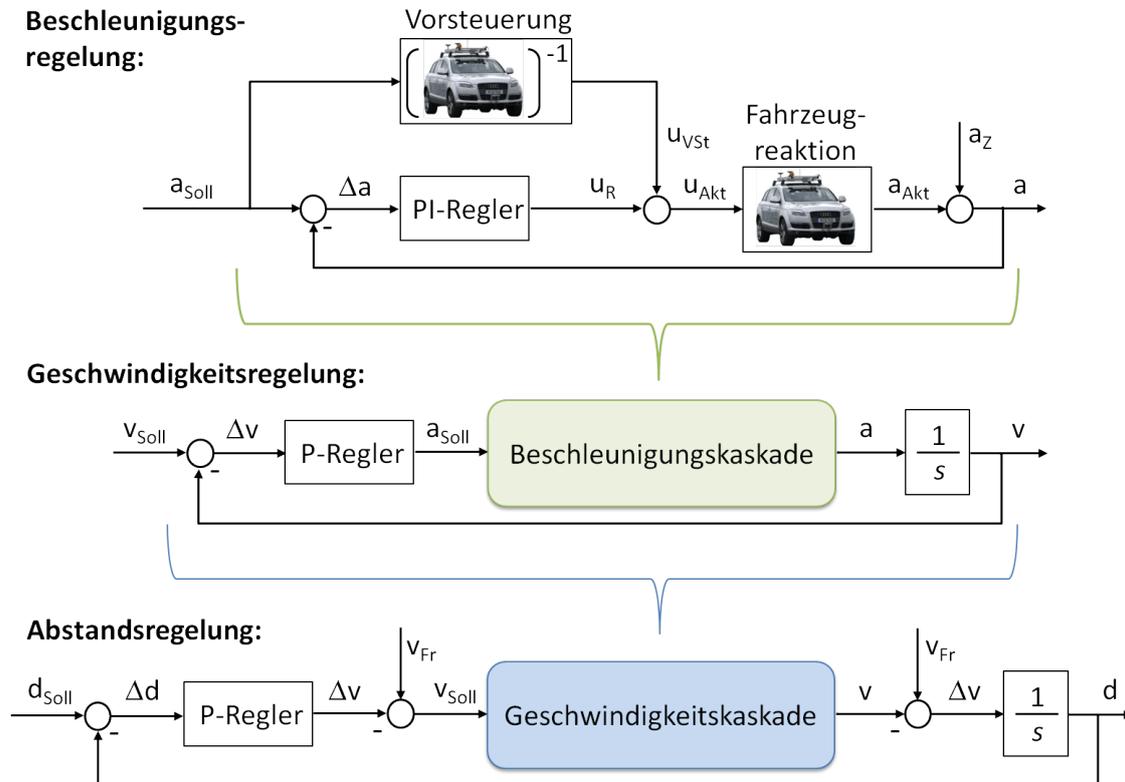


Bild 53: Verwendete Kaskadenregelungsstruktur im Überblick

6.1.3.1 Entwurf der querdynamischen Fahrprimitive

Dem 2-Ebenen-Modell von DONGES [41, 42] zufolge, kann die Fahrzeugführung durch den Menschen in zwei Hauptteile untergliedert werden: die antizipatorische Steuerung und die kompensatorische Regelung. Entsprechend diesem Modell wird die Aufgabe der Bahnführung mit der antizipatorischen Vorsteuerung und die Stabilisierung anhand der kompensatorischen Regelung umgesetzt. Analog zu dem 3-Ebenen-Modell von RASMUSSEN werden die Zustandsgrößen für den gewünschten Fahrzustand durch die Straße und die Verkehrssituation vorgegeben.

Der zu entwerfende Querdynamikregler soll für den Betrieb in normalen Fahrsituationen mit Querschleunigungen im Bereich bis maximal 4 m/s^2 ausgelegt werden. Die reifenbedingte Kennlinie des Seitenkraftaufbaus verhält sich in diesem Bereich linear gegenüber der Querdynamik. Somit besitzt eine linearisierte Betrachtung der Systemdynamik eine ausreichende Gültigkeit im Auslegungsbereich. Aus diesem Grund kann, im Gegensatz zum Betrieb im hochdynamischen Bereich mit Querschleunigungen von über 4 m/s^2 , auf die Entwicklung eines komplexeren nichtlinearen Reglers verzichtet werden. Das bewährte Konzept der linearen Zustandsregelung nach MAURER [113] bzw. BRÜDIGAM [24] bietet die Möglichkeit, alle benötigten Sensorinformationen zu berücksichtigen und dabei die Dynamik des Gesamtsystems in gewünschter Weise vorzugeben.

Die stabilen Pole des Zustandsraummodells sollen allerdings unverändert bleiben. Das Ergebnis der gewählten Polplatzierung für eine Geschwindigkeit von 80 km/h zeigt Bild 55 (links).

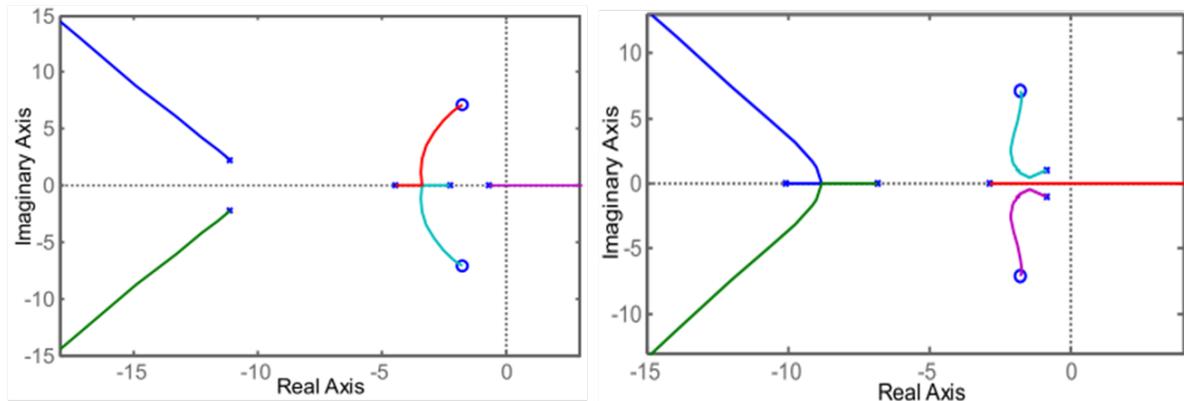


Bild 55: Wurzelortskurven des geschlossenen Regelkreises mit Polvorgabe (links) / nach Riccati (rechts)

Die zweite Möglichkeit, den Zustandsregler auszulegen, erfolgt über ein Kostenfunktional. Hierbei soll die Reglermatrix K so bestimmt werden, dass ein quadratisches Gütekriterium minimal wird. Die Lösung dieses Minimierungsproblems wird in der Regel durch das Lösen der zugehörigen algebraischen Matrix-Riccati-Gleichung berechnet [8].

Bild 55 (rechts) stellt die Wurzelortskurve des geschlossenen Regelkreises mit dem gewählten Riccati-Regler dar. Alle fünf Eigenwerte des Systems befinden sich in der linken komplexen Halbebene. Dadurch ist auch dieses geregelte System stabil. Im Vergleich mit den Wurzelortskurven des Pol-Reglers (Bild 55 links) ist jedoch zu erkennen, dass der Riccati-Regler Stabilität für größere Verstärkungen sichern kann als der Pol-Regler. Dies liegt daran, dass bei dem Riccati-Regler ein Pol erst bei größeren Verstärkungen in die rechte komplexe Halbebene wandert.

Da sich die Querdynamik in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit verändert, muss auch die Zustandsregelung geschwindigkeitsadaptiv gestaltet werden. Die Reglerauslegung erfolgt jeweils für einen bestimmten Arbeitspunkt. Dieser Arbeitspunkt entspricht einer diskreten Geschwindigkeit um die das Einspurmodell linearisiert wurde. Das Zustandsraummodell des Einspurmodells enthält die Geschwindigkeit in dessen Systemmatrizen. Des Weiteren erfolgt die Polvorgabe des geschlossenen Regelkreises – bei der Auslegung des Polplatzierungsreglers – ebenfalls in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Bei der Reglerauslegung mittels eines Gütekriteriums sind die Gewichtungen unabhängig von der Geschwindigkeit. Durch die geschwindigkeitsabhängige Veränderung des Zustandsraummodells ergeben sich jedoch auch bei diesem Reglerentwurf unterschiedliche Regelfaktoren für verschiedene Geschwindigkeiten. Für die geschwindigkeitsadaptive Auslegung wurden die Regler daher für unterschiedliche Arbeitspunkte entworfen. Die Bestimmung der Reglerparameter zwischen den diskreten Arbeitspunkten konnte durch eine lineare Interpolation hinreichend genau abgebildet werden.

Lösung der Totzeitproblematik

Die Sensorsignale einiger Zustände sind im Versuchsfahrzeug mit Totzeiten behaftet. Diese Schwachpunkte werden mittels modellbasierter Filter kompensiert. Ein weiterer Vorteil derartiger Filter ist die Möglichkeit, Zustände basierend auf einem Modell schätzen zu lassen, falls die Qualität des originalen Sensorsignals für diesen Zustand ungenügend ist. Somit können unrealistische Sensorsignale herausgefiltert werden. In diesem Zusammenhang stellt besonders der Einsatz eines Kalman-Filters eine sehr hilfreiche Methode dar. Da für die Erstellung eines Kalman-Filters ein LTI-System benötigt wird, muss der notwendige Zeitverzögerungsterm des kontinuierlichen Systems durch eine rationale Funktion angenähert werden. Dies wird durch die Pade-Approximation erreicht. Als Folge davon wird das System um die Anzahl der totzeitbehafteten Zustände erweitert. Dadurch können auch verrauschte und messtechnisch nicht erfassbare Zustände ausreichend gut rekonstruiert und den Reglerstrukturen des Fähigkeitennetzes in der erforderlichen Qualität zur Verfügung gestellt werden. Dadurch können die negativen Auswirkungen der Verzögerungszeiten auf das Fahrverhalten minimiert werden (vgl. Simulationsergebnis einer Kurvenfahrt in Bild 56).

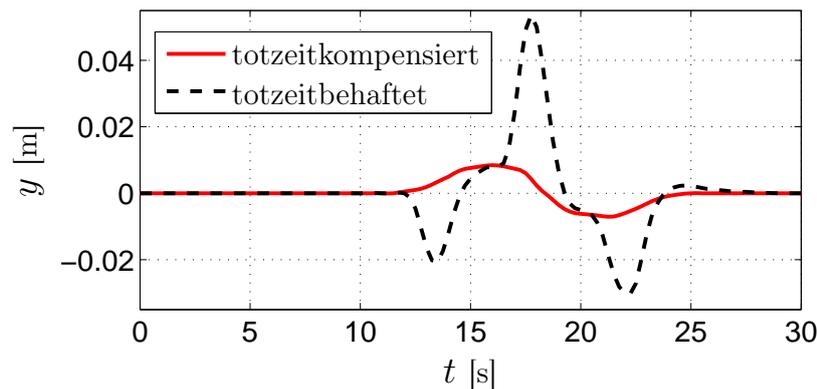


Bild 56: Querabweichungsverlauf der Regelung mit und ohne Totzeitkompensation

Bahnplanung des Fahrspurwechsels

Zur Planung und Umsetzung von menschlichen Spurwechselmanövern ist die Entwicklung eines Spurwechselautomaten erforderlich. Dazu wurde zunächst die menschliche Fahrverhaltensweise bei Spurwechselmanövern anhand durchgeführter Studien aus der Literatur analysiert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen kann daraufhin ein Konstruktionsverfahren für Spurwechseltrajektorien, unter Berücksichtigung von Fahrbahngeometrie, Fahrzeuglängs-kinematik, sowie Manöverkomfort und -sicherheit, abgeleitet werden. Darüber hinaus kann die Manövertrajektorie in Echtzeit an die Verkehrssituation adaptiert werden.

Die Trajektorien-Generierung erfolgt unter Zuhilfenahme von aus Polynomen zusammengesetzten Splines. Anzahl und Grad der verwendeten Polynome sind frei wählbar.

Ein Polynom n-ten Grades besitzt n+1 Koeffizienten:

$$\hat{y}_{ref,x}(x) = \sum_{i=0}^n a_i x^i = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (55)$$

Aus den zuvor genannten Forderungen werden Randbedingungen an die Splines und somit an die Polynome abgeleitet, welche anschließend zur Berechnung der benötigten Polynomkoeffizienten genutzt werden.

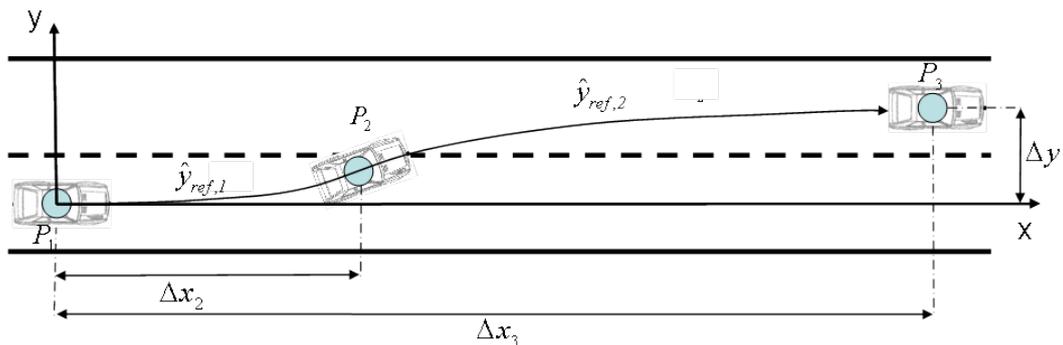


Bild 57: Trajektorie eines asymmetrischen Spurwechsels

Gesucht wird gemäß Bild 57 eine Trajektorie zwischen der Ausgangsposition P_1 auf dem ursprünglichen Fahrstreifen und der Position P_3 auf dem Zielfahrstreifen. Dabei seien der seitliche Spurversatz Δy und die gewünschte Spurwechsellänge Δx bekannt. Die Fahrzeugausrichtung im Anfangs- und Zielpunkt soll mit der Fahrbahnausrichtung übereinstimmen. Um Sprünge im Lenkwinkelverlauf auszuschließen, soll die Krümmung der Trajektorie im Anfangs- und Zielpunkt ebenfalls identisch mit der Fahrbahnkrümmung sein. Folglich ist sowohl die relative Ausrichtung (relativer Gierwinkel), als auch die relative Krümmung zwischen Straße und Trajektorie am Anfang- und Endpunkt gleich Null. Der Querversatzverlauf $\hat{y}_{ref,x}(x)$ der berechneten Trajektorie ist ebenfalls relativ zur Fahrbahn zu verstehen. Aus diesem Grund ist das Trajektorien-Konstruktionsverfahren unabhängig von der Straßenkrümmung und funktioniert auch in Kurven. Die Ausrichtung (relativer Gierwinkel) entspricht dabei der Sekantensteigung $\hat{y}'_{ref,x}(x)$. Durch zweifache Differentiation nach x erhält man die Krümmung $\hat{y}''_{ref,x}(x)$. Die Krümmung ist durch die Ackermann-Beziehung direkt proportional zum Lenkwinkel. $\hat{y}'''_{ref,x}(x)$ beschreibt die Änderung der Krümmung und ist somit direkt proportional zur Lenkrate. Daraus ergeben sich sechs Randbedingungen. Ein Polynom fünften Grades besitzt sechs Koeffizienten und könnte somit zur Konstruktion des symmetrischen Spurwechsels verwendet werden.

Aus der Arbeit von SPORRER [161] geht jedoch hervor, dass der Mensch Spurwechsel unter normalen Verkehrsbedingungen meist asymmetrisch ausführt. Um diese Asymmetrie berücksichtigen zu können, wird der Kontrollpunkt P_2 eingeführt. Außerdem wird nach SPORRER bereits nach ca. einem Drittel der Manöverausrührung mit dem Ausrichten auf den Zielfahrstreifen begonnen. Um das Fahrzeug auf den Zielfahrstreifen auszurichten, muss dem anfänglichen Einlenken entgegengesteuert werden. Somit findet beim Übergang der ersten Manöverphase „Einlenken“, zur zweiten Manöverphase „Ausrichten“ auf den Ziel-

fahrstreifen, ein Vorzeichenwechsel des Lenkradwinkels statt. Im Moment des Vorzeichenwechsels ist der Lenkradwinkel gleich Null, folglich muss auch die Trajektorienkrümmung an dieser Stelle Null sein. Daraus ergeben sich die Randbedingung an die zweiten Ableitungen der Polynome am Kontrollpunkt P_2 . Des Weiteren wird die Stetigkeit der ersten und zweiten Ableitung im Übergang gefordert. Für die beiden Polynome ergeben sich zehn Randbedingungen. Somit werden zwei Polynome 4ten Grades benötigt.

Während der Manöverausführung kann es aufgrund einer Änderung der Fahrzeuggeschwindigkeit zu einer Umformung der Manövertrajektorie kommen. Die Art der Spline-Parametrierung legt hierbei den Einfluss der Fahrzeuglängskinematik auf die Manöverausprägung (Einhaltung von Spurwechsellänge oder -zeit) fest. Darüber hinaus ist durch eine jederzeit durchführbare Neu- bzw. Umplanung der Trajektorie eine völlig flexible, echtzeitfähige Reaktion auf die umgebende Verkehrsdynamik möglich. Die Verknüpfung mit dem Fahrermodell erfolgt durch die Vorgabe der für das Manöver erforderlichen Vorsteuer-Lenkrate und der Führungsgrößen. Diese leiten sich aus der berechneten Manövertrajektorie ab.

Die Ergebnisse des Bahnplanungsmoduls zum Spurwechsel in Kombination mit der entworfenen Zustandsregelung zeigt Bild 58. In diesem Test wurde von einem Probanden ein Spurwechsel auf einem geraden Streckenabschnitt ohne Fremdverkehr ausgeführt. Anschließend wurde dieses Manöver mit dem entworfenen Spurwechselautomaten wiederholt. Dabei wurden bei gleicher Fahrgeschwindigkeit eine identische Spurwechselzeit sowie eine identische Kontrollpunktlage vorgegeben. Rein durch übereinstimmende charakteristische Randbedingungen ist bereits eine ausgeprägte Ähnlichkeit zwischen den beiden Manöverausführungen zu erkennen.

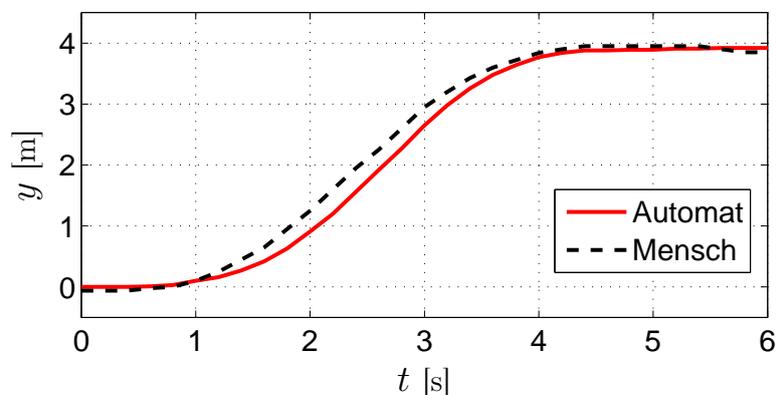


Bild 58: Spurwechsel bei 90 km/h: Vergleich Proband und Spurwechselautomat

6.1.3.2 Zusammenfassung der Querdynamik-Regelung

Analog dem 2-Ebenen-Modell nach DONGES wird die entworfene Struktur zur Querdynamik-Regelung durch eine antizipatorische Vorsteuerung sowie eine kompensatorische Nachregelung umgesetzt. Der gewählte Riccati-Regler wird zusätzlich durch eine Führungsgrößen-aufschaltung erweitert, welche die gewünschten Zustandsgrößen vorgibt. Diese können so-

wohl aus einer Anpassung an die Fahrbahn stammen als auch aus der Verknüpfung mit dem Spurwechselautomaten.

Für die Sollwertbestimmung der Fahrzeuggrößen aus dem Fahrbahnverlauf wird eine Führungsgrößenaufschaltung verwendet, die aus der gegebenen Fahrzeuggeschwindigkeit und Fahrbahnkrümmung die zugehörigen Fahrzeuggrößen für die Regelung berechnet. Die Führungsgrößen überlagern sich mit denen des Spurwechselmoduls, welche sich aus der jeweiligen Manövertrajektorie ableiten. Dadurch wird ein Spurwechsel auch in Kurven ermöglicht. Die in Bild 59 dargestellte Querregelungsstruktur wurde in das Fähigkeitsnetz integriert.

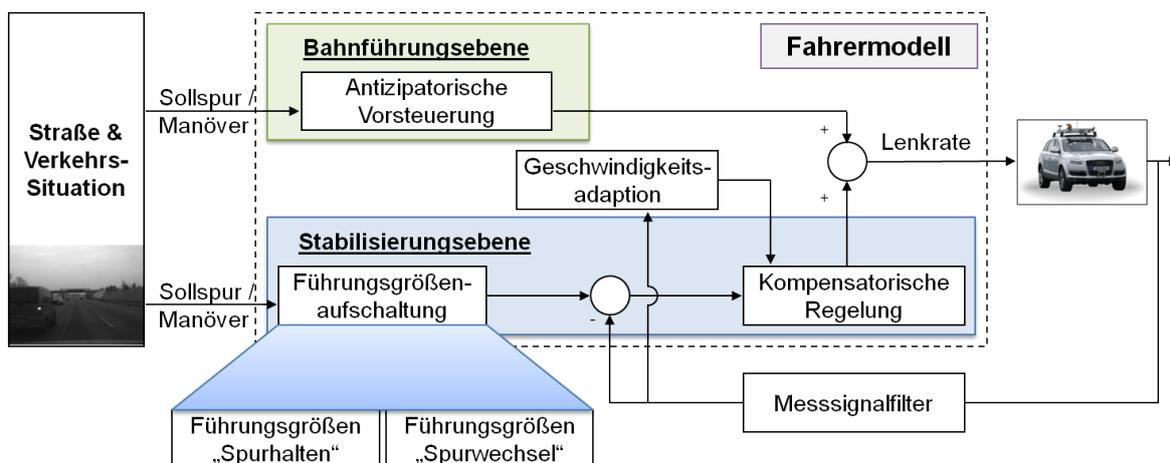


Bild 59: Verwendete Querregelungsstruktur im Überblick

6.2 Möglichkeiten der Adaption

Im Hinblick auf die Entwicklung eines zuverlässigen autonomen Fahrzeugführungssystems ist es also sinnvoll, die Fahraufgabe in elementare Teilbausteine zu zerlegen, welche als einzelne Fahrzeugfertigkeiten interpretiert und bei Bedarf von übergeordneten Instanzen abgerufen werden können. Durch diese Form der Modellierung von Fahrzeugfertigkeiten auf unterschiedlichen Hierarchieebenen eröffnet sich zudem die Möglichkeit, übergeordneten Instanzen eine Fülle von Schnittstellen anzubieten. Jeder Knoten dieses bidirektionalen Graphen des Netzwerkes stellt eine Form der Fähigkeit dar, sei es auf der Ebene des Verhaltens, der Handlung oder der Primitive, und kann von „außen“ aktiviert, parametrisiert und mit bestimmten Sollvorgaben befehligt werden. Die modulare Struktur des Fähigkeitsnetzes ermöglicht es zudem, unterschiedliche Ausprägungen der einzelnen Fertigkeitenknoten zu realisieren. Diese charakterisieren sich durch die Adaption der Regler auf Stabilisierungsebene und Bahnführungsebene an die jeweiligen Anforderungen und Verhältnisse. Durch jeweils gleiche Schnittstellen kann eine Untermenge unterschiedlicher dynamischer Ausprägungen eines Fertigkeitenknotens (z.B. „Spur wechseln“ Typ 1–4 in Bild 60) je nach Bedarf an die jeweilige Verkehrssituation adaptiert werden. Ziel der Situationsadaptivität soll eine menschenähnliche Fahrzeugführung des autonom agierenden Fahrzeugs sein.

Am Beispiel des Fahrprimitivs „Spur wechseln“ sollen im Folgenden mehrere Adaptionsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

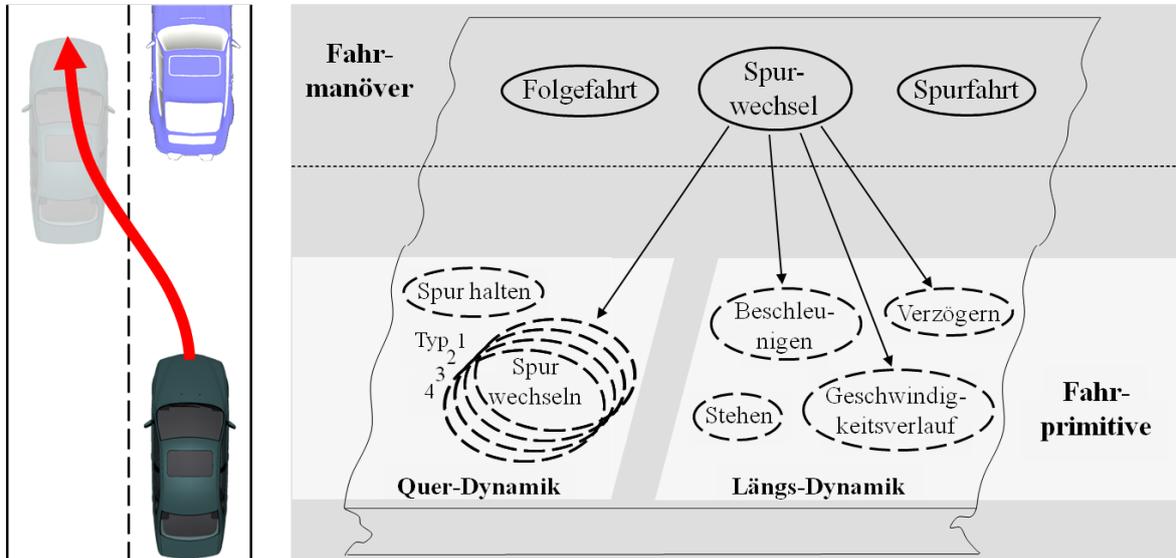


Bild 60: Ausprägungen des Fertigkeitenknotens „Spur wechseln“

6.2.1 Stabilisierungsebene

Um ein natürliches Fahrverhalten zu erreichen, das sich an die jeweilige Fahrsituation adaptiert, ist eine Anpassung der Regelung an sich ändernde Regelziele notwendig. Zu diesem Zweck wurde in das entwickelte Fahrermodell ein Subsystem zur Situationsadaption integriert (vgl. Bild 61), welches durch Anpassung der kompensatorischen Regelung der automatischen Fahrzeugführung ein möglichst menschliches Fahrverhalten verleihen soll. Es führt zu unterschiedlichem Fahrverhalten in verschiedenen Fahrsituationen.

Einen Ansatz zur Anpassung des Fahrverhaltens bieten hybride Fahrermodelle. Nach MAJJAD [111] steuert ein Fahrer sein Fahrzeug kontinuierlich in Kurven und anderen komplexeren Fahrsituationen. Auf geraden Fahrabschnitten hingegen liegt ereignisdiskretes Fahrverhalten vor. Der Fahrer versucht demnach nicht unbedingt kontinuierlich die Solltrajektorie zu halten, sondern vielmehr einen konstanten Lenkradwinkel zu gewährleisten und somit den Lenkaufwand zu minimieren. Ab einer maximalen Querabweichung zur Fahrbahnmitte erfolgt schließlich ein Gegenlenkmanöver. Daher erfolgt ein Regeleingriff nur zu bestimmten diskreten Ereignissen. Diesem Ansatz liegen somit kontinuierliche und ereignisdiskrete Regelstrukturen zu Grunde.

Um jedoch die durch den ereignisdiskreten Regler verursachten Schaltprozesse, die eine Verringerung des Fahrkomforts mit sich bringen, zu verhindern, wurde ein anderer Ansatz zur Realisierung menschlichen querdynamischen Fahrverhaltens verwendet. Es werden daher sowohl in der Geradeausfahrt als auch in der Kurvenfahrt oder sonstigen querdynamischen Manövern kontinuierliche Regelstrukturen verwendet. Diese unterscheiden sich allerdings in ihren Regelungsschwerpunkten. Werden im Subsystem zur Situationsadaption

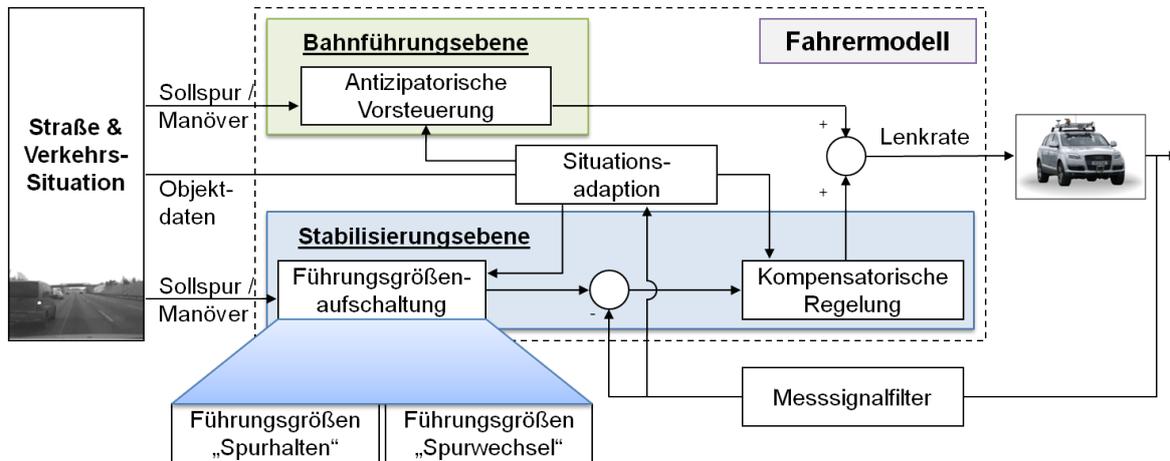


Bild 61: Erweiterte Querregelungsstruktur im Überblick

System- oder Umgebungszustände identifiziert, welche mit einer Steigerung der Fahrsicherheit verknüpft sind, so werden zuvor berechnete Optimalreglerparameter aktiviert, deren Fokus auf einem möglichst genauen Einhalten der Solltrajektorie liegt. Steht hingegen der Fahrkomfort im Vordergrund, so ist die Querabweichung von untergeordneter Bedeutung und eine Minimierung der Lenkaktivität anzustreben. Die jeweiligen Auslegungsschwerpunkte lassen sich durch das verwendete Konzept der Zustandsregelung mittels eines Reglerentwurfes nach RICCATI einstellen (siehe Kapitel 6.1.3). Dabei wird ein quadratisches Gütekriterium (56) minimiert, welches aus einem verlaufsoptimalen und einem verbrauchsoptimalen Teil besteht (vgl. [58]):

$$J(x, u) = \int_{t=0}^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (56)$$

Der verlaufsoptimale Anteil Q reduziert die Ausregelzeit. Dies entspricht einer Minimierung des Zeitintegrals der Zustandsgrößen. Der verbrauchsoptimale oder auch energieoptimale Anteil R versucht den Eingriff seitens des Reglers so klein wie möglich zu halten, also das Zeitintegral des Reglerausgangs zu minimieren. Dementsprechend kann bei der Reglerauslegung die Priorität auf eine möglichst gute Sollwertfolge oder auf ein möglichst ruhiges Regelverhalten gesetzt werden. Durch unterschiedliche Gewichtungen von Q und R lassen sich die geforderten Fahrverhaltensweisen auf der Ebene der kompensatorischen Regelung realisieren. Den beiden Auslegungsschwerpunkten entsprechen zwei Sets von Reglerparametern zwischen denen linear interpoliert werden kann. Dadurch lassen sich auch kontinuierliche Zwischenzustände von Fahrverhalten umsetzen, die innerhalb der beiden Auslegungsgrenzen liegen.

Soll, im Gegensatz zum klassischen Entwurf nach RICCATI, das Ergebnis der Regelung nicht in unendlicher Zeit, sondern bereits zu einem definierten Zeitpunkt optimal sein, so ist eine Lösung des Gütefunktional mittels des Prinzips der dynamischen Programmierung nach BELLMAN [20] möglich (vgl. [179]).

Bei der Reglerauslegung mittels eines Gütekriteriums sind die Gewichtungen unabhängig von der Geschwindigkeit. Durch die geschwindigkeitsabhängige Veränderung des Zustandsraummodells ergeben sich jedoch auch bei diesem Reglerentwurf unterschiedliche Regel-faktoren für verschiedene Geschwindigkeiten. Für die geschwindigkeitsadaptive Auslegung wurden die Regler daher zudem für unterschiedliche Arbeitspunkte entworfen. Zwischen den jeweiligen Arbeitspunkten werden die sich ergebenden Reglerparameter interpoliert.

Die situationsadaptive Reglerparametrierung hängt somit von zwei Variablen ab: der Fahr-geschwindigkeit v und einem sogenannten Hybrid-Faktor H der stellvertretend für ein be-stimmtes Regelziel steht. Bild 62 zeigt die Kennfelder zur Adaption der Regelfaktoren für die einzelnen Zustände K_i des Einspurmodells in Zustandsraumdarstellung (Gleichung 39) gemäß Kapitel 5.2.

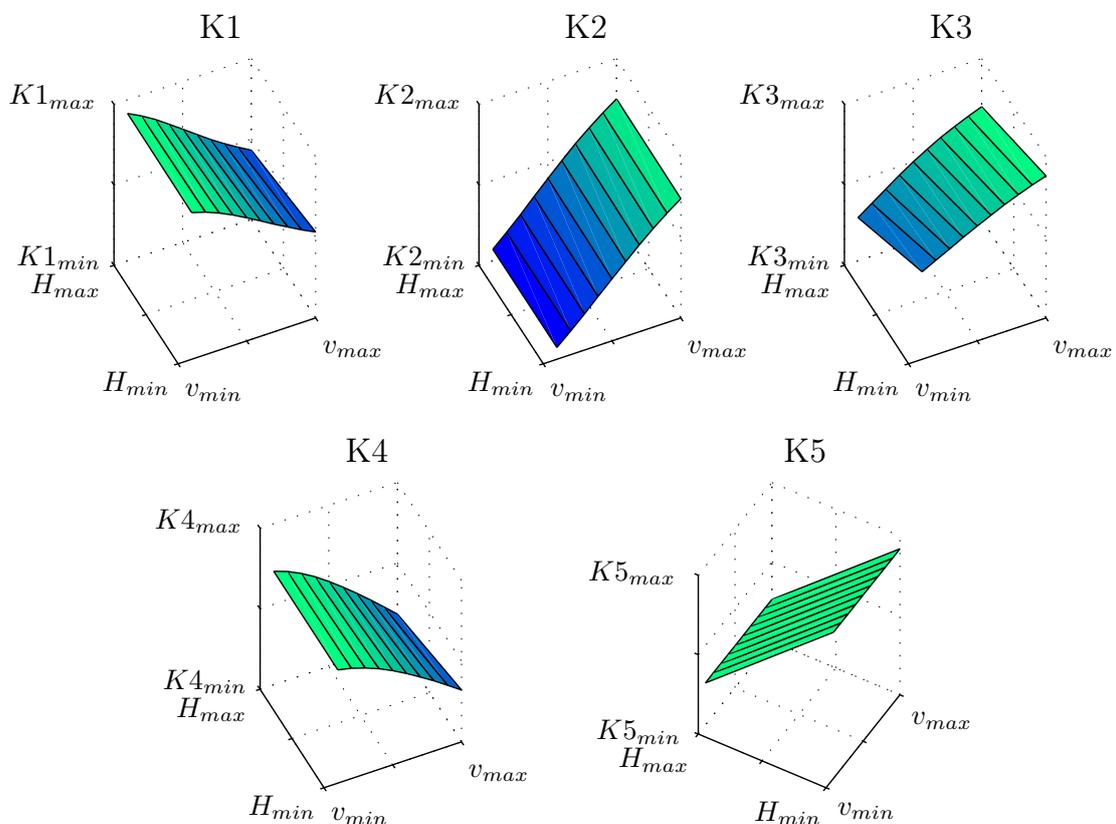


Bild 62: Geschwindigkeits- und hybridadaptive Regelfaktoren für die Einzelzustände: Schwimmgewinkel (K1), Gierrate (K2), Radwinkel (K3), relativer Gierwinkel (K4) und Querabweichung (K5)

Ein Hybrid-Faktor $H = 1$ entspricht dabei einer hohen Sollwertfolgegüte, wohingegen ein Hybrid-Faktor $H = 0$ ein ruhiges Regelverhalten zur Folge hat. Die Vorgabe dieses Hybrid-Faktors erfolgt dabei durch den in Kapitel 6.3 vorgeschlagenen Mapping-Prozess, der die Reglerparameter gemäß eines Scheduling Plans an die Situation adaptiert.

6.2.2 Bahnführungsebene

Typische, sich häufig wiederholende Abläufe des Alltags werden vom Menschen nach festen Verhaltensmustern ausgeführt. Dabei ist sich der Mensch meist gar nicht der genauen Art und Weise der Ausführung und noch weniger dem eigentlichen Grund der Ausführungsweise im Klaren. Beim routinierten Fahrer tritt die Frage nach der Form der Ausführung eines Spurwechsels komplett in den Hintergrund. Das häufig zitierte 3-Ebenen-Modell von RASMUSSEN spricht in diesem Zusammenhang von der regelbasierten Verhaltensebene. So werden mit einer wahrgenommenen Situation bekannte Verhaltensmuster assoziiert und anschließend ausgeführt, ohne weiter über die Situation und das eigene Verhalten zu reflektieren. Diese Verhaltensmuster können dabei in Form einer antizipatorischen Vorsteuerung vorgegeben werden, unterstützt durch eine entsprechende Führungsgrößenaufschaltung zur Verbesserung des Regelverhaltens (vgl. Bild 61).

6.2.2.1 Bahnführungsadaption anhand charakteristischer Randbedingungen

In der Arbeit „Realsimulation von Spurwechselvorgängen im Straßenverkehr“ [161] von SPORRER werden neben Versuchsfahrten mit Probanden, Videoanalysen von Stadt-, Landstraßen- und Autobahnverkehr durchgeführt.

Er kommt zu dem Ergebnis, dass das menschliche Fahrstreifenwechselverhalten in von der Verkehrssituation abhängige Kategorien eingeteilt werden kann. Der Manövercharakter wird durch die Spurwechselzeit, den Spurwechselversatz und durch die Spurwechselgeometrie kategorisiert. Dabei erfolgt die Einteilung in die in Tabelle 11 dargestellten Kategorien:

Tabelle 11: Untersuchte Parameter und ihre Variation

Typ	Verkehrsaufkommen auf Zielfahrstreifen	Dauer [s]	Versatz [% Spurbreite]	Asymmetrie [B1:B2]
1	kein Fahrzeug	≤ 6.5	80 ... 110	1 : 2
2	lokal gering	4.7 ... 6.5	80 ... 110	1 : 2
3	hoch	3.5 ... 4.7	80 ... 110	1 : 2

Die Erkenntnisse dieser Untersuchungen lassen sich mit Hilfe des gewählten Bahnplanungsalgorithmus (vgl. Kapitel 6.1.3.1) direkt in Spurwechseltrajektorien überführen. Dabei stellen die untersuchten Parameter die Randbedingungen für die Spline-Generierung dar. Das zeitliche Verhältnis von Einlenk- (B1) und Ausrichtphase (B2) bleibt dabei über alle drei Spurwechseltypen konstant asymmetrisch und kann über die Lage des Verknüpfungspunktes der beiden Polynome realisiert werden. Da das Einregeln auf die Spurmitte sowohl vor als auch nach dem Spurwechsel eines der Teilziele der Querführung darstellt, ist ein Querversatz von exakt einer Spurbreite als Sollwert bei allen drei Spurwechseltypen sinnvoll. Somit unterscheiden sich die drei Varianten lediglich in der Spurwechseldauer.

Darüber hinaus existiert noch eine vierte Kategorie, die das Notausweichen bei plötzlich auftretenden Krisensituationen darstellt. Da die Untersuchung derartiger Spurwechselsituationen aber weder bei der Datenerfassung zur Fahrverhaltensanalyse noch in der späteren Probandenstudie zur Akzeptanzanalyse gefahrlos durchgeführt werden kann, wird auf diese Kategorie verzichtet.

Die gewählte Struktur der Querregelung (vgl. Kapitel 6.1.3) erlaubt eine Umsetzung der Spurwechselmanöver über eine Ableitung der Vorsteuerungs- und Führungsgrößen aus der jeweils geplanten Bahn $B(t)$. Dabei leitet sich die zur Vorsteuerung notwendige Lenkrate $\dot{\delta}_{SW}(t)$ aus der Ackermann-Bedingung und dem Eigenlenkanteil ab und berechnet sich aus der momentanen Krümmung $\kappa_{SW}(t)$ der Spurwechseltrajektorie und der aktuellen Geschwindigkeit $v(t)$. Die für eine Zustandsregelung notwendige Berechnung von Führungsgrößen macht an dieser Stelle eine klare Trennung zwischen der Adaption auf Bahnführungs- und Stabilisierungsebene gemäß Bild 61 nicht möglich. Ohne die Vorgabe angepasster Führungsgrößen würde die Zustandsregelung der Vorsteuerung entgegenwirken und so einen Spurwechsel unterdrücken wollen. Da sich die erforderlichen Größen jedoch allesamt aus einer zuvor berechneten Bahn ableiten und diese wiederum an eine konkrete Situation adaptiert wurde, kann sehr wohl die gewählte Unterteilung von Adaptionmöglichkeiten hinsichtlich der Regler- und Bahncharakteristik vorgenommen werden.

6.2.2.2 Bahnführungsadaption anhand der Fahrverhaltensanalyse

Eine weitere Möglichkeit zur Adaption des Spurwechselverhaltens auf Bahnführungsebene stellt das Einspielen der Ergebnisse aus der Fahrverhaltensanalyse dar. In Kapitel 5 wurden dazu aus einer Vielzahl von aufgezeichneten Spurwechseln charakteristische Merkmale extrahiert. Diese Merkmale stellen Kombinationen aus Kostenkriterien dar, die der menschliche Fahrer bei Ausführung der jeweiligen Spurwechsel optimiert. Eine menschliche Spurwechseltrajektorie lässt sich demnach durch eine bestimmte Kombination aus Gütekriterien approximieren. Sind die Kombinationen für einen bestimmten Fahrer und für bestimmte Situationen bekannt, so lassen sich genau diese Kostenfunktionale mit einem automatisch ausgeführten Spurwechsel realisieren. Aus der jeweiligen Kombination können mit Hilfe der in Kapitel 5 eingeführten LLP-Optimierung die Spurwechsel-Zustandsgrößenverläufe rekonstruiert werden. Bild 63 zeigt das Ergebnis einer Rekonstruktion mit dem zu Grunde liegenden Gesamtgütefunktional $f = 0.5 \cdot f_{\delta} + 0.5 \cdot f_{y_{0.33T}}$.

Die aus der Fahrverhaltensanalyse identifizierten Kombinationen von Kostenkriterien werden in die zugehörigen Zustandsgrößenverläufe überführt und abgespeichert. Bei Auftreten von Situationsmerkmalen die zu den jeweiligen Kombinationen führen, können die abgespeicherten Verläufe dann der gewählten Struktur der Querregelung, mit Vorsteuerung und Führungsgrößenaufschaltung, zugeführt werden. Auch bei diesem Adaptionsverfahren ist eine klare Trennung zwischen der Bahnführungsebene und der Stabilisierungsebene nicht möglich. Analog der Bahnführungsadaption anhand charakteristischer Randbedingungen (Kapitel 6.2.2.1), wurden die generierten Größen jedoch aus einer zuvor adaptierten Bahn abgeleitet, so dass die Zuordnung dieser Adaptionmöglichkeit zur Bahnführungsebene legitim ist.

Die aus der Kombination von Kostenfunktionalen konstruierten und abgespeicherten Zustandsgrößenverläufe repräsentieren das individuelle und situationspezifische Spurwechselverhalten eines bestimmten Fahrers. Dem Zusammenhang zwischen Situationsmerkmalen und Zustandsgrößenverläufen, bzw. den zugrunde liegenden Kombinationen aus Kostenfunktionalen widmet sich das nachfolgende Kapitel.

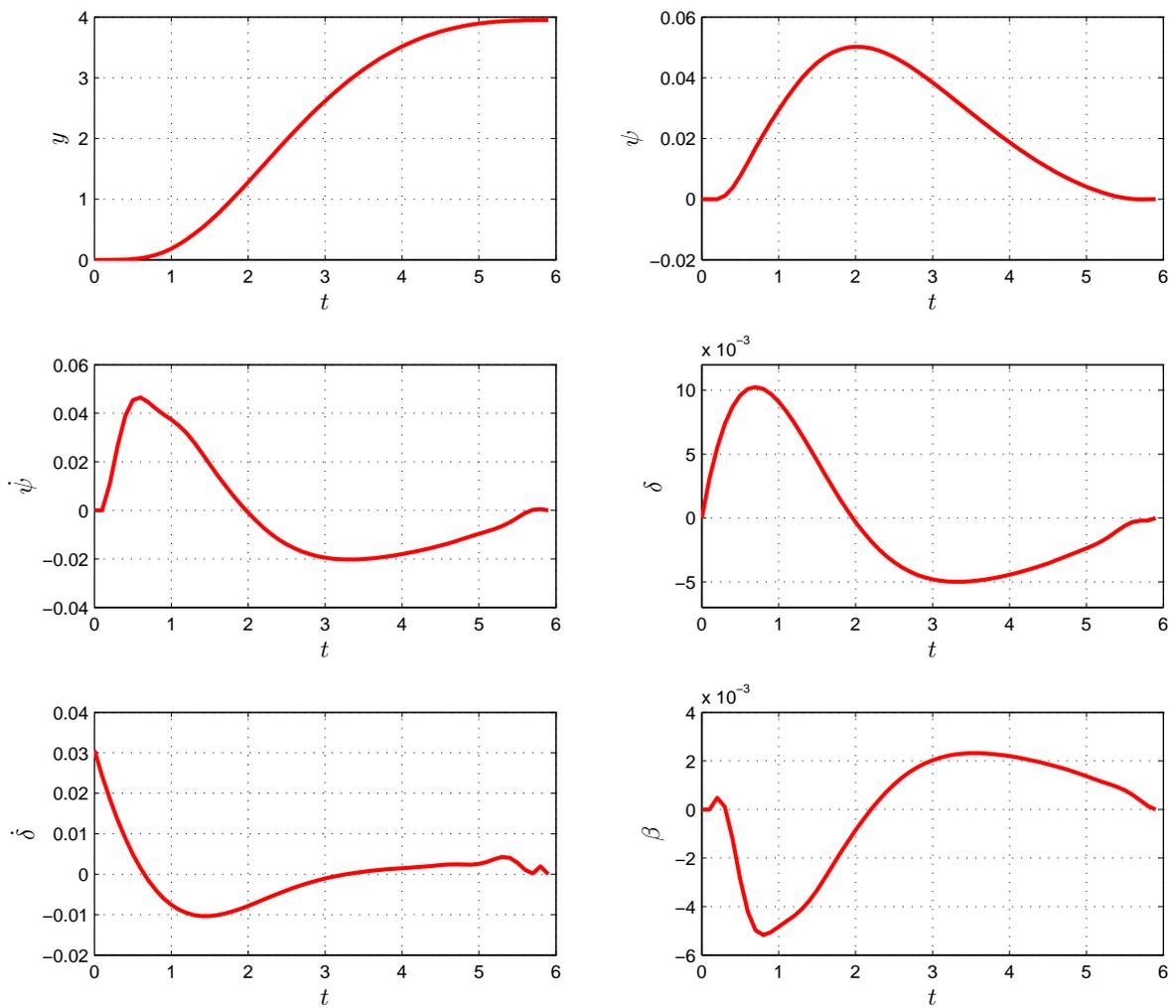


Bild 63: Spurwechsel mit dem Optimalitätskriterium $f = 0.5 \cdot f_{\dot{\delta}} + 0.5 \cdot f_{y_{0.33T}}$

6.3 Mapping-Prozess

Zur Realisierung einer situationsadaptiven Fahrzeugführung ist eine Verknüpfung von Situationsmerkmalen mit den vorgestellten Adaptionmöglichkeiten der Grundfertigkeiten erforderlich. Das in Kapitel 4.3 eingeführte Verfahren zur Abbildung von Situationsaspekten durch virtuelle Emotionen stellt dabei eine Möglichkeit dar, die vorliegende Verkehrssituation gemäß einem an die menschliche Interpretation angelehnten Prozess zu erfassen und die Vielzahl an Situationsaspekten in eine geringe Anzahl abstrahierter Emotionswerte zu überführen. Anhand dieser Kenngrößen kann somit eine Klassifizierung der Verkehrssituationen nach menschlichem Vorbild erfolgen. Die verschiedenen Möglichkeiten der Adaption des Fahrzeugführungssystems gemäß Kapitel 6.2 und ihre unterschiedlichen Ausprägungen sollen derart mit einzelnen Emotionswerten verknüpft werden, sodass ein an die Situation angepasstes Fahrverhalten erreicht wird. Dazu wird zunächst eine konservative Verknüpfung gewählt, deren Auslegung einer sicherheitsorientierten Philosophie folgt. Anschließend soll untersucht werden, inwiefern die Ergebnisse der Fahrverhaltensanalyse aus Kapitel 5 mit den Emotionswerten korrelieren und sich somit eine fahrerspezifische Ausführung des Spurwechsels realisieren lässt.

6.3.1 Sicherheitsorientierte Auslegung

Eine erste mögliche Art der Auslegung wird durch eine konservative Verknüpfung von Reglercharakteristika mit virtuellen Emotionswerten vorgenommen. Bei genauerer Betrachtung der einzelnen Emotionswerte spiegeln diese jeweils ein gewisses Gefahrenpotential wider, das von den Situationsaspekten ausgeht, die durch die jeweilige Emotion beleuchtet werden. Die im Emotionsmodell zu einem Emotionspaar zusammengefassten virtuellen Emotionen beleuchten dabei jeweils den gleichen Situationsaspekt, stellen aber dessen positive oder negative Wirkung hinsichtlich der Kritikalität dieses Situationsmerkmals dar. Beide Emotionen können daher niemals gleichzeitig aktiv sein. Vielmehr stellen sie die Wertebereiche dar, die das betrachtete Situationsmerkmal einnehmen kann. Eine Bewertung die zu einem positiven Wert des Emotionspaares führt, spiegelt demnach einen völlig unkritischen Aspekt der Situation wider. Trägt der betrachtete Situationsaspekt jedoch ein gewisses Gefahrenpotential in sich, so führt dies zu einem negativen Emotionswert.

Besonders deutlich wird dies bei genauerer Betrachtung der einzelnen Emotionspaare. Einer Beurteilung der von der Fahrbahn und deren jeweiligen Eigenschaften ausgehenden Kritikalität widmet sich das Emotionspaar *love – hate*. So wird eine Fahrbahn, die z.B. kleine Kurvenradien oder Engstellen aufweist und dem Fahrer dadurch einen hohen Fahrzeugbedienungsaufwand abverlangt, durch eine negative Ausprägung des Emotionspaares beurteilt. Auch werden Elemente der Straße, die zu einem hohen Grad an Informationsverarbeitungsaufwand führen, wie z.B. Kreuzungen oder Autobahneinfahrten, negativ bewertet. Alle Elemente des Objektes Fahrbahn, von denen ein Gefahrenpotential hinsichtlich des Unfalltyps „Fahrerunfall“ ausgeht, führen demnach zu einer negativen Emotion. Der Fahrerunfall kennzeichnet sich dabei durch einen Kontrollverlust über das Fahrzeug, aufgrund einer nicht an die Elemente der Fahrbahn angepassten Geschwindigkeit. Eine positive Emotion erfolgt unter dem Nichtvorhandensein von Gefahrenquellen, sowie von Fahrbahnelementen die einen geringen Grad an Fahrzeugbedienungs- und Informationsverarbeitungsaufwand erfordern.

Steht hingegen das Verhalten von Fremdfahrzeugen im Fokus der Betrachtung, so ist eine Auswertung des Emotionspaares *admiration – reproach* vonnöten. Dieses beleuchtet die Verhaltenskonformität der umgebenden Fahrzeugführer hinsichtlich des normativen Regelwerks der Straßenverkehrsordnung. Durch diese Beurteilungsgrundlage werden u.a. Geschwindigkeits- und Abstandsverstöße geahndet, die ihrerseits oftmals unfallverursachend wirken. Von Fahrzeugen, deren Lenker dieses Fehlverhalten zeigen, geht demnach eine potentielle Gefahr aus. Dies wird durch einen entsprechend negativen Wert des Emotionspaares *admiration – reproach* ausgedrückt. Verhalten sich alle Verkehrsteilnehmer regelkonform, spiegelt sich dies in einem positiven Emotionswert wider.

Eine Auswertung des Verkehrsflusses und dessen Auswirkung auf das eigene Fahrverhalten wird durch das Emotionspaar *joy – distress* ermöglicht. Dieses berücksichtigt, inwiefern der Wunsch des Egofahrzeuglenkers nach einer freien und unabhängigen Fahrt durch den umgebenden Verkehr limitiert wird. Ist die Beschränkung stark ausgeprägt und der Emotionswert dadurch stark negativ, so kann dies mehrere Ursachen haben. Eine eingeschränkte Geschwindigkeitswahl ist meist durch ein von der Streckenführung oder dem Streckenzustand ausgehendes Gefahrenpotential oder durch einen stockenden Verkehrsfluss bedingt. Letzterer ist wiederum geprägt durch eine hohe Anzahl potentieller Konfliktpartner. Eine negative Ausprägung des Emotionspaares *joy – distress* spiegelt demnach ebenso Verkehrskritikalität wider.

Die höchste Aussagegüte hinsichtlich eines Unfallrisikos geht jedoch von dem Emotionspaar *hope – fear* aus. Dieses beleuchtet durch eine Analyse des Verkehrskonfliktpotentials mit dem umgebenden Verkehr direkt die Wahrscheinlichkeit eines möglichen Unfalls. Negative Emotionswerte entstehen sowohl bei aktuellen als auch prädizierten Situationsmerkmalen und -verläufen, die als Konfliktauslöser fungieren können. Demnach spiegelt ein stark negativer Emotionswert eine hohe Kritikalität der Situation wider. Positive Werte des Emotionspaares entstehen unter Nichtvorhandensein potentieller Gefahrenquellen bzw. wenn deren Verhalten konfliktvermeidend oder -entschärfend ist.

Mit dieser Kenntnis lässt sich eine Verknüpfung von Emotionswerten mit Fahrverhalten vornehmen:

- Positive Emotionen entstehen entsprechend den obigen Ausführungen nur in Situationen, die ein geringes Gefahrenpotential in sich bergen. Daher lassen sich in derartigen Zeitabschnitten Auslegungen von Fahrzeugführungssystemen aktivieren, deren Fokus auf einer Komfortoptimierung liegen. Demnach lassen sich positive Emotionswerte mit ruhigen Reglern (vgl. Kapitel 6.2.1: Hybridfaktor ≤ 0.3) und/oder weichen Trajektorien (vgl. Kapitel 6.2.2.1 / Tabelle 11: Spurwechseltyp 1) verknüpfen. Darüber hinaus ist es ebenso möglich, eine komfortorientierte Trajektorie (z.B. lenkratenoptimale Ausführung) aus der Fahrverhaltensanalyse (vgl. Kapitel 5) in Form einer Führungsgrößenvorgabe einzuspielen.
- Negative Emotionen entstehen dagegen in Situationen mit höherem Gefahrenpotential. Daher müssen in diesen Zeitabschnitten Auslegungen aktiviert werden, die eine sehr hohe Folgegüte hinsichtlich der von einer übergeordneten Bahnplanungsinstanz berechneten sicheren Trajektorie aufweisen. Dies bedeutet, dass eine sicherheitsorientierte Verknüpfung gegenüber einer komfortorientierten Auslegung in den Vordergrund treten muss. Dies bedingt eine Aktivierung von Reglerparametrierungen mit hoher Folgegüte (Hybrid-Faktor ≥ 0.7) und/oder Trajektorien die das Fahrzeug schneller

und „entschlossener“ von der Gefahrenquelle weg führen (Spurwechseltyp 3). Weiterhin kann ein Führungsgrößenset der Fahrverhaltensanalyse aktiviert werden, das eine sicherheitsorientierte Ausführung des Spurwechsels widerspiegelt (z.B. gierratenoptimale Trajektorie).

- Emotionen, die in einem gewissen Band zwischen positiven und negativen Emotionsbereichen durch die jeweilige Situation entstehen, führen zu einer Verknüpfung die ein Mittelmaß zwischen den beiden oben erwähnten Auslegungen darstellt. Hier werden Reglerparametrierungen gewählt, die einen Kompromiss aus gutem Folgeverhalten und niedriger Regleraktivität darstellen ($0.3 < \text{Hybrid-Faktor} < 0.7$). Hinsichtlich der Trajektorienwahl ist ebenso ein Kompromiss durch Wahl einer neutral ausgelegten Spurwechselausführung anzustreben (Spurwechseltyp 2). Die dazu notwendigen Führungsgrößen können ebenso wiederum dem Optimierungsergebnis einer neutralen Auslegung (Trajektorie zu 50% lenkratenoptimal und zu 50% gierratenoptimal) aus der Fahrverhaltensanalyse entspringen.

Ein isoliertes Auftreten einzelner Situationsmerkmale und davon abgeleiteter Emotionswerte wird in der realen Verkehrswelt jedoch selten vorkommen. Vielmehr koexistieren diverse Situationsaspekte und führen zum Auftreten von bis zu vier Emotionsvariablen. Eine Verknüpfung jeder einzelnen Emotionsvariable mit einem bestimmten Fahrzeugführungsstil gemäß dem oben vorgeschlagenen Mapping ist jedoch nicht zielführend, da jedes Emotionspaar unterschiedliche Aspekte der vorliegenden Situation beleuchtet und diese zu konträren Verknüpfungen führen könnten. So ist es z.B. möglich, dass durch das Emotionspaar *love – hate* die positive Bewertung der Fahrbahn aufgrund einer gut ausgebauten krümmungsfreien Autobahn zu einer Verknüpfung mit einem komfortorientierten Fahrverhalten führt, jedoch aufgrund der vorliegenden Verkehrssituation ein unmittelbarer Konflikt mit dem Vorderfahrzeug prädiiziert wird. Dies würde zu einer stark negativen Bewertung durch das Emotionspaar *hope – fear* und damit zu einem sicherheitsorientierten Fahrverhalten führen. Um konträr auftretende Verknüpfungen zu vermeiden, wird daher im Sinne einer sicherheitsorientierten Grundauslegung eine konservative Verschaltung aller Emotionen über eine Minimumsfunktion vorgenommen, d.h. die jeweils kleinste Emotion bestimmt die Verknüpfung mit dem Fahrverhalten.

$$I_{\text{Gesamt}} = \min(I_{\text{Joy-distress}}, I_{\text{hope-fear}}, I_{\text{admiration-reproach}}, I_{\text{love-hate}}) \quad (57)$$

Somit ist sichergestellt, dass der Situationsaspekt mit dem aktuell größten Gefahrenpotential, repräsentiert durch die minimalste Emotion, das Fahrverhalten prägt.

6.3.2 Fahrerspezifische Auslegung

Eine weitere Möglichkeit zur Umsetzung einer situationsadaptiven Fahrzeugführung besteht in der analytischen Verknüpfung des individuellen Fahrverhaltens mit Situationsmerkmalen. Anhand der Methodik der virtuellen Emotionen kann, wie in Kapitel 4.3 gezeigt, eine Situationsklassifizierung erfolgen. Für die Ableitung von spezifischem Fahrverhalten aus Verkehrssituationen bzw. den in den jeweiligen Situationen vorherrschenden Emotionswerten muss ein Zusammenhang zwischen virtuellen Emotionen und Fahrverhalten hergestellt werden.

Dazu wurden in Kapitel 5 menschliche Spurwechsel mit Hilfe eines optimaltheoretischen Ansatzes untersucht. Aus der Analyse dieser Daten konnten Gewichtungen unterschiedlicher Gütekriterien identifiziert werden, die der Fahrer bei der Ausführung dieser Spurwechsel als Regler hinterlegt hätte. Mit Hilfe dieses Ansatzes lässt sich somit die Fahrweise fahrerspezifisch charakterisieren. Bei Betrachtung der Ergebnisse (vgl Kapitel 5.3.6) drängt sich jedoch der Verdacht auf, dass der Fahrer sein Fahrverhalten situationsabhängig verändert. Dieses Kapitel widmet sich daher einer systematischen Untersuchung möglicher Zusammenhänge zwischen Situationsmerkmalen in Form virtueller Emotionen und dem fahrerindividuellen Fahrverhalten in Form der Gewichtsverteilung der identifizierten Kostenfunktionale. Gelingt der Nachweis eines Zusammenhangs, so wird es möglich, eine situations- und fahreradaptive Fahrweise zu etablieren.

Um Zusammenhänge zwischen zwei Variablen zu finden, wird üblicherweise eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Über eine Korrelationsanalyse zwischen den in den jeweiligen Verkehrssituationen ausgelösten Emotionen und den durch die Identifikation ermittelten gewichteten Gütekriterien kann demzufolge der geforderte Zusammenhang hergestellt werden. Durch den Zusammenhang lässt sich eine Reglerparametrierung, abhängig von den vorliegenden Emotionen, nach dem Vorbild der menschlichen Fahrweise erstellen.

Für die Korrelationsanalyse gibt das verwendete Optimierungsverfahren (Kapitel 5) die Gewichtungen von sechs Kostenkriterien aus, die Aufschluss über die dominanten Kriterien des jeweiligen Spurwechsels geben. Die sechs Teilgütekriterien werden gemäß der Einführung in Kapitel 5.3.2 interpretiert. Demnach berücksichtigen die Gütekriterien Gierrate $\dot{\psi}$ und relativer Gierwinkel ψ sicherheitsorientierte Aspekte des Fahrverhaltens. Die Gütekriterien Lenkwinkel δ und Lenkrate $\dot{\delta}$ stehen für Fahrökonomie und Fahrkomfort, letzterer wird durch möglichst geringe Lenkarbeit erzielt. Die Gütekriterien $y_{0.33T}$ und $y_{0.70T}$ repräsentieren asymmetrische Referenztrajektorien. Erstere stellt dabei einen Spurwechsel dar, bei der das Ausrichten auf dem Zielstreifen bereits nach einem Drittel der Manöverausrührung beginnt; der Einlenkvorgang findet dementsprechend früh statt. Bei Letzterem ist das Verhältnis umgekehrt: einem moderaten Einlenken folgt erst nach 70% der gesamten Spurwechselzeit das Ausrichten auf der Zielspur.

Für die Korrelation der Gütekriterien mit Emotionswerten, müssen zuvor charakteristische Größen für jede Emotion bestimmt werden. Dazu werden die Emotionswerte in Schritten von 0.1 s in dem Zeitfenster von 3 s vor Startzeitpunkt bis zu Beginn des Spurwechsels aus den aufbereiteten Messdaten entnommen. Die zeitliche Indexierung beginnt dabei ausgehend vom Spurwechselbeginn rückwärts, d.h. es wird die Zeit in Sekunden vor Spurwechselbeginn angegeben. Zusätzlich werden innerhalb dieses Zeitfensters folgenden repräsentative Emotionswerte generiert (Suffix in Klammern): Maximum (max), Minimum (min), Mittelwert (mean), Mittelwert der Ableitungen (diff), quadratischer Mittelwert (rms), geometrischer Mittelwert (geomean), harmonischer Mittelwert (harmmean), Median (med), Emotionswert 3 s vor Spurwechselbeginn (beginn) und unmittelbar bei Spurwechselbeginn (end).

Um eine statistische Aussage anhand der Ergebnisse der Korrelationsanalyse treffen zu können, bedarf es sogenannter Signifikanztests. Nach FIELD [56] müssen die zu untersuchenden Daten für Signifikanztests bei der Verwendung des PEARSON-Korrelationskoeffizienten normalverteilt sein. Für die Untersuchung auf Normalverteilung bietet das Statistikprogramm SPSS KOLMOGOROV-SMIRNOV-Tests an. Die Ergebnisse dieser Tests zeigen, dass die aus der Fahrverhaltensanalyse ermittelten Gewichte (Kapitel 5.3.6) keine Normalverteilung aufweisen. Demzufolge können bei Verwendung des PEARSON-Korrelationskoeffizienten keine

Signifikanztests durchgeführt werden. Als Alternative kann SPEARMAN's Korrelationskoeffizient r_s verwendet werden. Dabei handelt es sich um eine sogenannte nicht-parametrische Statistik, welche bei der Verletzung von parametrischen Annahmen verwendet werden kann, wie z. B. bei nicht normalverteilten Daten. Bei der Korrelationsanalyse wird in Spurwechsel nach rechts und nach links unterschieden. Diese Unterscheidung wird vorgenommen, da die Verkehrssituationen bei den Spurwechseln nach rechts zumeist nur das Wiedereinscheren nach einem Überholvorgang darstellen. Somit ist in diesen Situationen meist kein Vorderfahrzeug vorhanden, was erheblichen Einfluss auf die Entstehung und den Verlauf der Emotionen hat.

Es werden jeweils Korrelationsanalysen für Spurwechsel nach rechts und Spurwechsel nach links durchgeführt. Tabelle 12 und Tabelle 13 zeigen die statistisch signifikanten Korrelationen für die Spurwechsel nach links bzw. nach rechts. Die Tabellen enthalten jedoch keinerlei Korrelationen, deren Signifikanzniveau über dem α -Level von 5% liegt (genauere Erläuterungen hierzu in Kapitel 7.2), um somit zufällige Zusammenhänge auszuschließen.

Die Stärke der aufgeführten Zusammenhänge zeigt sich dabei im PEARSON-Korrelationskoeffizienten r_s . Bei (Betrags-)Werten über 0,25 spricht man von moderaten, bei Werten über 0,5 von starken Korrelationen. Demnach weisen die gefundenen Zusammenhänge in nahezu allen Fällen eine starke Korrelation auf.

Tabelle 12: Ergebnisse der Korrelationsanalyse bei Spurwechseln nach rechts

skalierter Gewichtungsfaktor	Emotionswert	Korrelation Spearman r_s	Signifikanz p
\tilde{w}_δ	<i>joy – distress – 2.9s</i>	-0.521	0.015
\tilde{w}_δ	<i>joy – distress – max</i>	-0.497	0.022
$\tilde{w}_{y_{0,70T}}$	<i>joy – distress – 0.3s</i>	+0.513	0.009
$\tilde{w}_{y_{0,70T}}$	<i>joy – distress – min</i>	+0.513	0.017
$\tilde{w}_{y_{0,70T}}$	<i>joy – distress – mean</i>	+0.491	0.024

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Korrelationsanalyse zeigt sich, dass bei den untersuchten Spurwechseln nach rechts lediglich ein signifikanter Zusammenhang mit dem Emotionspaar *joy – distress* festzustellen ist. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass es sich bei den betrachteten Spurwechseln nach rechts meist um Wiedereinschervorgänge nach einem Überholvorgang handelt. In diesen Situationen herrscht meist eine freie oder ungebundene Fahrt vor oder zu Beginn des Spurwechsels und begünstigt somit die Entstehung dieses Emotionspaares.

Um einen Zusammenhang mit dem Emotionspaar *hope – fear* feststellen zu können, müssten relevante Vorderfahrzeuge in oder potentielle Spurwechsler zu der Egospur existieren und das Emotionspaar durch eine relative Annäherung an den Konfliktpartner anregen. Diese Situation führt allerdings in den meisten Fällen zu einem Überholwunsch, der aufgrund des rechtsseitigen Überholverbotes in einem Spurwechsel nach links mündet. Dies erklärt möglicherweise, warum keine Korrelation mit dieser Emotion feststellbar ist. Ähnlich verhält es sich mit dem Emotionspaar *admiration – reproach*, das eine Bewertung von umgebenden Verkehrsteilnehmern auf Basis der StVO vornimmt. Eine Veränderung dieses Emotionswertes, wie sie z. B. durch einen „Mittelspurschleicher“ hervorgerufen wird, würde wiederum

in einem Überholwunsch enden. Eine Korrelation mit dem Emotionspaar *love – hate* konnte ebenfalls nicht festgestellt werden, da die Datenerhebung auf einem sehr gut ausgebauten Autobahnstück ohne größere Kurvenkrümmungen stattfand und somit keine Veränderung dieser Emotion auftritt.

Die Emotionswerte von *joy – distress* 2.9s vor Beginn des Spurwechsels als auch die Maximalwerte dieses Emotionspaares im definierten Zeitfenster weisen einen hohen inversen Zusammenhang mit dem Gütekriterium δ , welches für ein komfortorientiertes Fahrverhalten steht, auf. Je niedriger der jeweilige charakteristische Wert dieses Emotionspaares liegt, desto mehr legt der Fahrer demnach den Fokus auf einen lenkratenoptimierten Spurwechsel. Dies ist z.B. in Situationen der Fall, in denen eine freie oder ungebundene Fahrt durch erhöhtes Verkehrsaufkommen eingeschränkt wird und somit die nicht erreichbare Wunschgeschwindigkeit zu einem Abfall des Emotionswertes von *joy – distress* führt.

Im Gegensatz dazu ergibt die Korrelationsanalyse einen positiven Zusammenhang zwischen den Emotionswerten *joy – distress – 0.3s*, *joy – distress – min* bzw. *joy – distress – mean* und dem Gütekriterium $y_{0.70T}$. Dieses Gütekriterium charakterisiert sich durch einen sehr moderaten Einlenkvorgang zu Beginn des Spurwechsels und stellt somit ein „Zurückgleiten“ in die rechte Ausgangsspur dar. Der Fahrer steht unter keinem zeitlichen-örtlichen Druck die Ausgangsspur möglichst schnell zu verlassen und verwendet daher den Großteil der Spurwechselzeit für den Einlenkvorgang. Das korrigierende Ausrichten auf der Zielspur wird in ca. dem letzten Drittel der Manöverzeit vollzogen. Dieses Verhalten zeigt sich laut Korrelationsanalyse immer dann, wenn Situationen mit hohem *joy – distress*-Wert vorliegen, wie dies der Fall in komplett freier und ungebundener Fahrt der Fall ist.

Tabelle 13: Ergebnisse der Korrelationsanalyse bei Spurwechseln nach links

skalierter Gewichtungsfaktor	Emotionswert	Korrelation Spearman r_s	Signifikanz p
\tilde{w}_δ	<i>hope – fear – 2.0s</i>	+0.534	0.022
\tilde{w}_δ	<i>joy – distress – 1.3s</i>	–0.501	0.034
\tilde{w}_δ	<i>joy – distress – max</i>	–0.488	0.040
\tilde{w}_δ	<i>joy – distress – med</i>	–0.498	0.035
$\tilde{w}_{y_{0.33T}}$	<i>joy – distress – 2.3s</i>	+0.659	0.003
$\tilde{w}_{y_{0.33T}}$	<i>joy – distress – min</i>	+0.663	0.003
$\tilde{w}_{y_{0.33T}}$	<i>joy – distress – med</i>	+0.574	0.013
\tilde{w}_{ψ}	<i>hope – fear – 2.0s</i>	–0.639	0.004
\tilde{w}_{ψ}	<i>hope – fear – max</i>	–0.563	0.015
\tilde{w}_{ψ}	<i>hope – fear – med</i>	–0.574	0.013
\tilde{w}_{ψ}	<i>hope – fear – end</i>	–0.503	0.033

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Korrelationsanalyse für Spurwechsel nach rechts zeigt sich bei den Spurwechseln nach links, dass neben dem Emotionspaar *joy – distress* auch das Emotionspaar *hope – fear* zu Zusammenhängen mit den untersuchten Gütekriterien führt. Dies stützt die bei der Behandlung der Spurwechsel nach rechts aufgestellte These, dass der Verlauf der *hope – fear*-Emotionen vor allem beim Aufschließen auf den zu

Überholenden und durch dessen Verhalten ausschlaggebend ist. Somit haben sie in dem untersuchten Zeitintervall von $3s$ vor dem Spurwechsel nach links, der die Vorbereitungsphase des Überholvorgangs darstellt, einen Einfluss auf den Zusammenhang mit den Gütekriterien. Ein Zusammenhang der Gütekriterien mit den Emotionspaaren *admiration – reproach* und *love – hate* kann allerdings auch bei den Spurwechseln nach links nicht hergestellt werden.

Für den Emotionswert *hope – fear – 2.0s* zeigt sich ein positiver Korrelationskoeffizient mit dem Gütekriterium der Lenkrate δ . Demzufolge besteht ein positiver Zusammenhang zwischen dem komfortorientierten Gütekriterium und besagtem Emotionswert $2s$ vor dem Spurwechselbeginn. Liegt in dieser Verkehrssituation ein positiver *hope – fear*-Wert vor, so führt der Fahrer einen lenkratenoptimalen Spurwechsel durch. Derartige Situationen kennzeichnen sich durch ein unkritisches Verkehrskonfliktpotential. Im Gegensatz zu den Spurwechsel nach rechts ist jedoch sicherlich ein Verkehrsteilnehmer vor dem Egofahrzeug, der den Grund des Spurwechsels darstellt. Dies stellt einen gewissen zeitlichen-örtlichen Druck dar, der den Fahrer zum Spurwechsel bewegt. Somit wird er nicht den moderaten Einlenkverlauf wählen, wie ihn das Gütekriterium $y_{0.70T}$ zur Folge hätte. Statt dessen wählt er einen Verlauf, der mit möglichst geringer Lenkarbeit verbunden ist. Ist die Situation jedoch durch einen niedrigen *hope – fear*-Wert gekennzeichnet, wie es z.B. in potentiellen Gefahrensituationen der Fall ist, so verzichtet der Fahrer bei seinen Spurwechselmanövern auf den Fahrkomfort; stattdessen rücken andere Aspekte bei der Ausführung in den Vordergrund.

Die negativen Korrelationskoeffizienten von vier charakteristischen Werten des Emotionspaares *hope – fear* mit dem sicherheitsorientierten Gütekriterium der Gierrate f_{ψ} scheinen diese Annahme zu bestätigen. Demnach liegt bei einem Abfall der Werte von *hope – fear – 2.0s*, *hope – fear – max*, *hope – fear – med* und *hope – fear – end* ein Anstieg der Gewichtung des Gütekriteriums f_{ψ} vor, was auf eine Zunahme des sicherheitsorientierten Fahrverhaltens schließen lässt. Diese Vermutungen erscheinen plausibel, da der Fahrer bei einem geringen Wert von *hope – fear*, der gemäß der Definition des Emotionspaares in Kapitel 4.3.2 die Gefährdung des sicheren Zielerreichens bedeutet, eine sicherheitsorientierte Fahrweise bevorzugt und auf eine komfortorientierte Fahrweise verzichtet, um die Gefährdung dieser Zielerreichung abzuwenden. Zudem führt die Wahl einer gierratenminimalen Spurwechseltrajektorie unter Vernachlässigung des Schwimmwinkels zur kleinstmöglichen maximalen Querschleunigung gemäß Gleichung 58.

$$a_y = v \cdot (\dot{\psi} + \dot{\beta}) \quad (58)$$

Dadurch müssen an den Reifen die kleinstmöglichen Querkräfte beim Spurwechsel abgestützt werden. Unter Annahme eines bestehenden Reibwertpotentials, ist mit dieser Art der Trajektorienwahl der größtmögliche Abstand zu einem Haftabriss und damit zu einem drohenden Unfall gegeben. Diese Überlegungen unterstreichen eine gierratenminimale Ausführung des Spurwechsels in sicherheitskritischen Situationen. Entspannt sich die Situation jedoch wieder und die Emotionswerte nehmen positives Vorzeichen an, so vernachlässigt der Fahrer die gierratenoptimale Spurwechselausführung und kehrt zu einem komfortbetonten Fahrstil zurück.

Bezogen auf charakteristische Werte des Emotionspaares *joy – distress* zeigt sich analog den Ergebnissen der Korrelationsanalyse für die Spurwechsel nach rechts ein inverser Zusammenhang zu dem komfortorientierten Gütekriterium der Lenkrate δ . Dementsprechend wählt der Fahrer in Situationen, in denen eine freie und ungebundene Fahrt nicht möglich

ist und der *joy – distress*-Wert demnach niedrig ist, eine lenkratenoptimale Ausführung seines Spurwechsels. Je höher jedoch die Werte des Emotionspaares werden, d.h je weniger die Verkehrslage den Fahrer bei der Wahl seiner Geschwindigkeit einschränkt, desto mehr rückt die Minimierung der Lenkarbeit in den Hintergrund. Stattdessen legen die hohen positiven Korrelationswerte der Kennwerte dieses Emotionspaares mit dem Gütekriterium $y_{0.337}$ eine Referenztrajektorie nahe, die dem zügigen Auslenken auf die Zielspur entspricht. Dadurch kann der Fahrer seinem Spurwechselwunsch in durch die Verkehrsteilnehmer uneingeschränkten Situationen zügig nachkommen.

Mit der Betrachtung der Ergebnisse der Korrelationsanalyse ist die Datenanalyse abgeschlossen. Durch die Folgerungen aus den Ergebnissen der Untersuchungen für die Spurwechsel nach links und rechts konnten mehrere Zusammenhänge zwischen den gewichteten Gütekriterien für die menschliche Fahrweise und den Fahrsituationen, repräsentiert durch die Emotionswerte, hergestellt werden.

6.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel beschäftigte sich mit der Umsetzung einer situationsadaptiven Fahrzeugführung. Dazu wurden zunächst komplexe Fahrhandlungen in einfache Grundbausteine des Fahrens zerlegt. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, dass die modularen Grundelemente geeignet kombiniert und parametrisiert werden können und somit für mehrere übergeordnete Fahrmanöver gemeinsam nutzbar sind. Die regelungstechnischen Grundfertigkeiten der Längs- und Querregelung wurden anschließend als Knoten in einem hierarchischen Fähigkeitsnetz organisiert. Dadurch ist eine zentrale Organisation der Fahrzeugführung möglich, die zudem den Aspekten der Systemsicherheit im Fähigkeitsnetzwerk Rechnung trägt. Aufgrund der Möglichkeit, für einen Knoten mehrere Ausprägungen zu hinterlegen, ist im Sinne einer fail-operational-Auslegung der Wechsel korrespondierender Bausteine für die Ansteuerung der diversitär ausgelegten Aktoren realisiert worden. Die längsdynamischen Grundfertigkeiten bauen auf einem Kaskadenregelungskonzept auf Basis einer gemeinsamen unterlagerten Beschleunigungsregelungskaskade mit Vorsteuerung auf. Durch die modellbasierte Vorsteuerung können die Nichtlinearitäten des Fahrzeugs auf unterster Wirkungsebene kompensiert werden. Die Einzelmodule der Beschleunigungs-, Geschwindigkeits- und Abstandsregelung erlauben dabei eine gezielte Einflussnahme auf alle längsdynamisch relevanten Bewegungsgrößen. Die entworfene Struktur zur Umsetzung der querdynamischen Grundfertigkeiten basiert auf einer antizipatorischen Vorsteuerung zur Bahnführung und einer kompensatorischen Nachregelung zur Stabilisierung. Eine Erweiterung um eine Führungsgrößenaufschaltung erlaubt die Anpassung an den Fahrbahnverlauf, sowie an die Manövervorgaben die sich aus dem realisierten Spurwechselautomaten ableiten. Letzterer generiert auf Basis eines splinebasierten Trajektorien-Konstruktionsverfahrens eine in der Form anpassbare und jederzeit neu planbare Spurwechseltrajektorie. Das bewährte Konzept der linearen Zustandsregelung dient als Grundlage des Reglerentwurfs. Es bietet die Möglichkeit, das dynamische Verhalten des Gesamtsystems in gewünschter Weise vorzugeben. Die gewählte Struktur der Fahrzeugführung erlaubt somit zahlreiche Wege der Adaption des Fahrverhaltens an eine Situation. Dies wurde am Beispiel des Fahrmanövers „Spurwechsel“ konkretisiert.

Der Ablaufplan der in dieser Arbeit entworfenen Methodik zur fahrerspezifischen Adaption des automatisierten Fahrverhaltens an eine konkrete Situation wird in Bild 64 visualisiert.

Zunächst erfolgt die messtechnische Erfassung des fahrerindividuellen Fahrverhaltens eines sich in einer konkreten Verkehrssituation befindenden und agierenden Probanden sowie die in Kapitel 4.1 definierten, aktuell vorherrschenden Situationsaspekte. Beide Bereiche werden anschließend *offline* getrennt voneinander analysiert. Die Merkmale der Verkehrssituation werden dabei einem neuartigen Ansatz zur Situationsinterpretation zugeführt, der die Umgebungsvariablen auf eine geringe Anzahl virtueller Emotionszustände überführt (vgl. Kapitel 4.3). In einem parallelen Analyseweig erfolgt die Bestimmung der fahrerindividuellen Parameter des Fahrverhaltens anhand der Methodik des Bilevel Programming (vgl. Kapitel 5). Das Ergebnis dieser Untersuchung stellt eine Kombination von Gewichtungsparmetern der Teilkriterien von Kostenfunktionalen dar, welche das Fahrverhalten in der spezifischen Situation charakterisieren.

Ein Mapping-Prozess verknüpft anschließend die Adaptionformen der Fahrzeugführung mit den Ergebnissen der beiden Analyseweige. Sowohl die Möglichkeiten der Anpassung über eine Modifikation der Reglerparameter auf Stabilisierungsebene als auch über eine Beeinflussung der Trajektorienform auf Bahnführungsebene wurden erläutert. Darüber hinaus können die Erkenntnisse der Fahrverhaltensanalyse aus Kapitel 5 integriert werden.

Der Mapping-Prozess wurde zunächst in einer sicherheitsorientierten Auslegungsvariante präsentiert, die das individuelle Fahrverhalten unberücksichtigt lässt. Die innovative zweite Auslegungsvariante integriert jedoch das fahrerspezifische Fahrverhalten, indem die Ergebnisse einer Korrelationsanalyse, die die Gewichtungsparmeter der Fahrverhaltensanalyse in Zusammenhang mit virtuellen Emotionswerten in den untersuchten Verkehrsszenarien setzt, für das Mapping herangezogen werden. Das Resultat stellt eine fahrer- und situationspezifische Auslegungsvariante für das automatisierte Fahrzeugführungssystem dar.

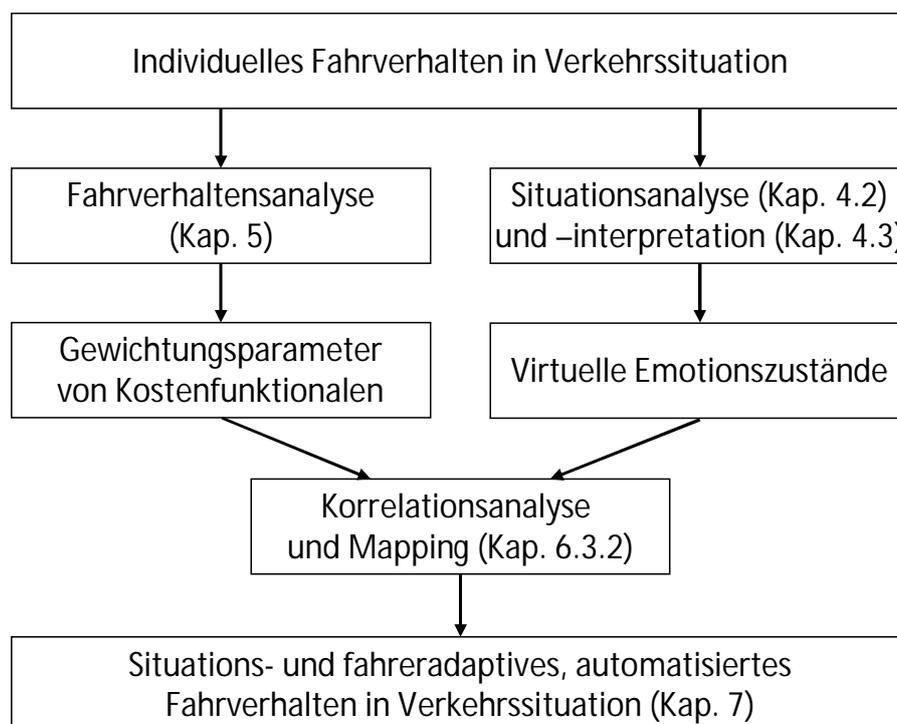


Bild 64: Ablaufplan zur situations- und fahreradaptiven Fahrzeugführung

Einen wesentlichen Neuheitsgehalt stellen die gefundenen Beziehungen zwischen dem menschlichen Fahrverhalten in Form von Kostenfunktionalen und Situationsaspekten in Form der virtuellen Emotionen dar. Dabei zeigt sich eine lenkratenoptimale Ausführung des Spurwechsels nach rechts, wenn ein störendes Vorderfahrzeug vorhanden ist, wohingegen der Fahrer bei freier Ausgangsspur ein langsames „Zurückgleiten“ in die rechte Zielspur präferiert. Bei einem Fahrspurwechsel nach links zeigt sich bei Vorhandensein eines störenden aber unkritischen Vorderfahrzeuges analoges Verhalten wie beim Spurwechsel nach rechts in Form einer Lenkratenminimierung. Ist hingegen die Fahrt auf der Ausgangsspur frei und ungebunden möglich, so wählt der Fahrer eine Trajektorie die dem zügigen Auslenken auf die linke Zielspur entspricht und somit seinen Spurwechselwunsch unterstreicht. Liegt hingegen eine Verkehrssituation mit hohem Konfliktpotential vor, so weicht der Fahrer von einer komfortorientierten Ausführung des Spurwechsels zugunsten einer sicherheitsorientierten ab. In derartigen Situation wählt der Fahrer eine gierratenoptimale Trajektorie, die unter Vernachlässigung des Schwimmwinkels zudem zur kleinstmöglichen Querbeschleunigung führt. Sowohl die einzelnen Varianten der sicherheitsorientierten Auslegung, als auch die gefundenen Korrelationen des fahrerspezifischen Mappings sollen im Folgenden anhand einer Probandenstudie hinsichtlich ihrer Akzeptanz untersucht werden.

7 Validierung des Verfahrens

7.1 Versuchsdesign

Um die These, dass Assistenzsysteme mit einem Fahrverhalten, das der menschlichen Fahrweise nachempfunden ist, zu einer erhöhten Akzeptanz beim Menschen führen, belegen zu können, werden Probandenfahrten mit dem Versuchsträger durchgeführt. Dabei werden über unterschiedliche Parametrierungen des Fahrzeugführungssystems verschiedene Adaptionsstufen realisiert, die abhängig von den durch das OCC-Modell generierten Emotionswerten ausgeführt werden. Der Fokus der Versuchsfahrten liegt auf der autonomen Durchführung von Spurwechseln. Die Probanden erhalten einen Fragebogen und werden aufgefordert, die Spurwechsel zu bewerten. Eine abschließende Auswertung soll die Hypothese bestätigen, dass eine hohe Adaptionsstufe eine ähnlich gute Bewertung erhält, wie ein vom Menschen ausgeführtes Fahrmanöver. Im Gegensatz dazu sollen Adaptionsstufen mit niedrigem Adaptionsniveau eine geringere Bewertung aufweisen.

7.1.1 Versuchsgelände

Die Versuchsfahrten werden auf dem Gelände der Universität der Bundeswehr in Neubiberg durchgeführt. Die Partnerschaft im Sonderforschungsbereich/Transregio 28 ermöglicht das Nutzen der Teststrecke. Das Versuchsgelände setzt sich aus zwei Dynamikflächen und einer ca. 1.6 km langen Geraden zusammen, dem Taxiway der ehemaligen Start- und Landebahn. Für die Durchführung der Spurwechsel bietet sich der Taxiway an, da auf der Geraden mehrere Spurwechsel nacheinander ohne nötiges Wenden durchgeführt werden können. Zusätzlich ist der Taxiway mit einer relativ neuen Spurmarkierung versehen, die dem Kamerasystem eine Spurerkennung ermöglicht. Die für die Spurerkennung wichtige Qualität der Spurmarkierungen erweist sich allerdings in einer Richtung als nicht ausreichend, sodass es zu Beeinträchtigungen des Spurerkennungsalgorithmus kommt. Um die Auswirkungen dieser Störungen auf das Beurteilungsergebnis auszuschließen, wird die Strecke nur in West-Ost Richtung autonom befahren.

7.1.2 Versuchspersonen

Zu jeder Versuchsfahrt wird ein Proband eingeladen. Das Probandenfeld setzt sich aus Mitarbeitern aus den verschiedenen Bereichen des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik zusammen, deren Tätigkeit sich nicht im Rahmen des Projektes bewegt. Somit verfügen sie über keine Vorkenntnisse. Zusätzlich nehmen Studenten der Fakultät für Maschinenwesen an den Versuchen teil.

Tabelle 14: Probandencharakteristik

Merkmal	Ausprägung (Personenanzahl)
Anzahl	20
Geschlecht	männlich (17), weiblich (3)
Alter	17-25 (8), 26-35 (9), 36-45 (2), 46-55 (1)
km/Jahr (in 1000km)	0-5 (1), 5-10 (2), 10-15 (2), 15-20 (6), 20-25 (3), 25-30 (5), 30-35 (1)
Fahrzeugklasse	kein Fahrzeug (2), Kleinwagen (8), Kompaktklasse (5), Mittelklasse (5)

Neben der Bewertung des Versuchs werden dem Probanden verschiedene Fragen zur eigenen Person gestellt. Darunter fallen das Alter, das Geschlecht, welcher Fahrzeugklasse sein Auto zuzuordnen ist und wie viele Kilometer pro Jahr er fährt. Damit ergibt sich ein detailliertes Bild der Probandencharakteristik gemäß Tabelle 14. Außerdem werden die Probanden gebeten, ihren Fahrstil einzuschätzen, wobei sie eine Einteilung von 0 bis 7 entsprechend eines vorsichtigen bis aggressiven Fahrstils vornehmen. Mit einem Mittelwert von 3.65 ergibt sich ein ausgeglichener Wert über das gesamte Probandenfeld.

7.1.3 Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn wird den Probanden kurz der Versuchsträger erklärt. Sie erhalten jeweils einen Fragebogen (Auszug im Anhang C), auf dem sie die einzelnen Spurwechsel bewerten sollen. Es wird ihnen mitgeteilt, dass bei der Versuchsdurchführung automatische Spurwechsel mit verschiedenen Einstellungen durchgeführt werden. Außerdem erhalten sie die Information, dass die Spurwechsel teilweise auch vom Fahrer des Versuchsträgers ausgeführt werden.

Der Proband nimmt auf dem Beifahrersitz Platz. Der Fahrer wird durch einen Sichtschutz vom Probanden abgetrennt. Dadurch kann der Proband nicht erkennen, ob der Spurwechsel automatisiert vom System oder vom menschlichen Fahrer ausgeführt wird. Der Proband erhält die Aufgabe den Spurwechsel auf Situationsadaptivität zu bewerten. Er hat freie Sicht auf die Fahrbahn vor sich und kann so die vorliegende Verkehrssituation gut einschätzen (vgl. Bild 65). Zur Bewertung erhält er einen Fragebogen, auf dem er die einzelnen Spurwechsel auf einer Skala von 0 bis 7 bewertet, wobei der Wert 0 einem der Situation nicht angepassten Spurwechsel und der Wert 7 einem der Situation angepassten Spurwechsel entspricht.

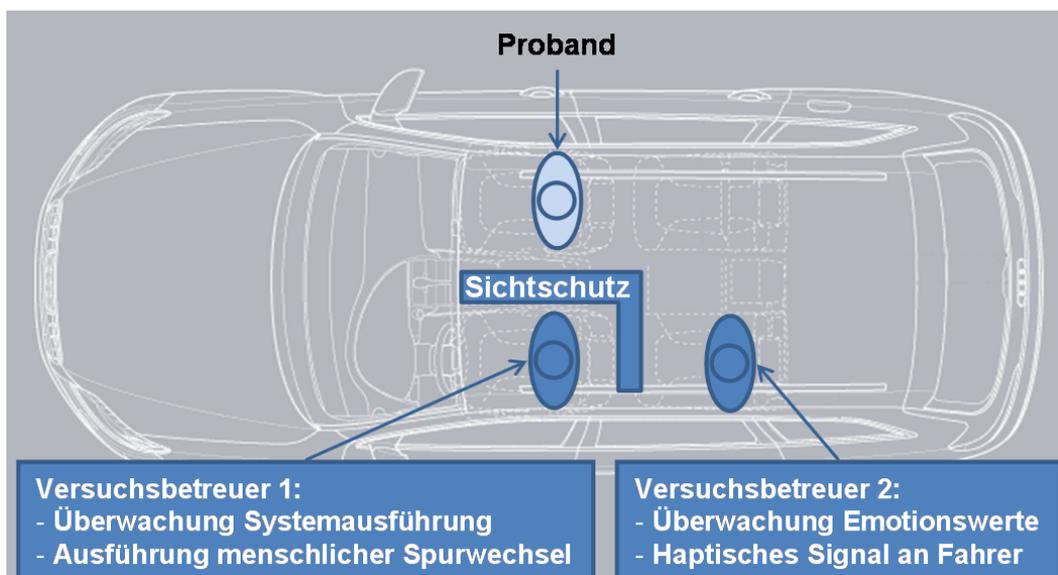


Bild 65: Positionierung Proband und Versuchsbetreuer im Versuchsträger

Während der Versuchsfahrten werden autonome Spurwechsel durchgeführt und von den Probanden bewertet. Da die Spurwechsel bei einer konstanten Geschwindigkeit durchgeführt werden sollen, übernimmt der in Kapitel 6.1.2 vorgestellte Geschwindigkeitsregler in dieser Phase die Aufgabe der Längsführung. Für die Ausführung der Spurwechsel wird der in Kapitel 6.1.3 entwickelte Spurwechselautomat verwendet.

Ein weiterer Versuchsbetreuer sitzt auf der Rückbank hinter dem Fahrer und überwacht die korrekte Ausführung der Spurwechselvarianten. Der Zeitpunkt des Spurwechselauslösens richtet sich dabei nach dem Wert des Hybrid-Faktors, der die aktuell vorherrschende Emotion widerspiegelt.

Um bei der Durchführung der Spurwechsel verschiedene Verkehrssituationen nachzubilden und somit unterschiedliche Emotionen hervorrufen zu können, ist ein weiterer Verkehrsteilnehmer notwendig. Aus diesem Grund fährt ein Mitarbeiter des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik während der Versuchsdurchführung mit einem Begleitfahrzeug vor dem Versuchsträger. Der Versuchsträger soll bei jeder der insgesamt 10 Fahrten auf dem Taxiway drei Spurwechsel ausführen und dabei links neben das Begleitfahrzeug ausscheren. Um diese drei Spurwechsel bei einer Fahrt auf dem Taxiway durchführen zu können, muss der Fahrer des Begleitfahrzeugs eine konstante Geschwindigkeit von 40 km/h auf der rechten Spur beibehalten. Der Versuchsträger beschleunigt vor jedem Spurwechsel auf 70 km/h und fährt mit aktiviertem Fahrzeugführungssystem auf das Begleitfahrzeug zu.

Der Versuchsbetreuer auf der Rückbank beobachtet beim Aufschließen zum Vorderfahrzeug den Wert des Hybrid-Faktors und gibt dem Fahrer beim Unterschreiten von festgelegten Grenzen ein für den Probanden nicht wahrnehmbares haptisches Signal. Dadurch wird im Falle autonomer Spurwechsel der Sicherheitsfahrer bereits vorkonditioniert und kann im Falle eines Systemausfalls frühzeitig korrigierend eingreifen. Werden Testläufe durchgeführt, bei denen die Spurwechsel durch den Menschen erfolgen, kann durch die haptische Information des Versuchsbetreuers gewährleistet werden, dass die manuelle Ausführung der Spurwechsel zum gleichen Zeitpunkt wie im autonomen Modus startet und die Situationen somit vergleichbar bleiben.

Nachdem der Spurwechsel erfolgt ist, übernimmt der Fahrer wieder die Kontrolle, bremst den Versuchsträger ab, lässt sich hinter das Begleitfahrzeug zurückfallen und wechselt zurück auf die rechte Spur. Der Fahrzeugführer wartet, bis das Begleitfahrzeug einen ausreichenden Abstand zum Versuchsträger aufgebaut hat, beschleunigt erneut auf 70 km/h und fährt wiederum mit aktiviertem System auf das Vorderfahrzeug zu. Auf diese Weise werden nacheinander die drei Spurwechsel durchgeführt.

7.1.4 Versuchsfaktoren

Um die verschiedenen Möglichkeiten der Adaption der Fahrzeugführungssysteme (vgl. Kapitel 6.2) an die jeweilige Situation (vgl. Kapitel 6.3) systematisch untersuchen und bewerten zu können, müssen unterschiedliche Situationen bei den drei Spurwechseln generiert werden. Die gefundenen Zusammenhänge der Gütekriterien aus Kapitel 6.3.2 für die Spurwechsel nach links entstehen mit den Emotionen *joy – distress* und *hope – fear*. Um die Reglerparametrierung auf Basis dieser Zusammenhänge situationsabhängig zu erstellen, müssen sich demnach die gebildeten Situationen der drei Spurwechsel bzgl. dieser beiden Emotionspaare unterscheiden.

Die Entstehung und der Verlauf des Emotionspaares *joy – distress* wird maßgeblich beeinflusst von der auf der Versuchsstrecke geltenden Richtgeschwindigkeit sowie von fremdfahrzeugbedingten Verzögerungen. Da sich beide Merkmale im vorgesehenen Testdesign nicht wiederfinden, eignet sich das Emotionspaar *joy – distress* nicht zur Gestaltung von unterschiedlichen Verkehrssituationen, weswegen die Korrelationen mit diesem Emotionspaar nicht verwendet werden sollen. Demnach verbleiben die Zusammenhänge mit dem Emotionspaar *hope – fear*. Die Ergebnisse der Verkehrskonfliktanalyse gemäß Kapitel 4.2.2.3 prägen dieses Emotionspaar. Entgegen der Annahme, dass bei dem Testdesign der Unfalltyp 631 – Spurwechsel entscheidend ist, wird dieser nur relevant, wenn ein Fremdfahrzeug-Spurwechsel auf die Ego-Spur oder ein Egofahrzeug-Spurwechsel auf eine Fahrspur mit Fremdverkehr erfolgt. Beide Fälle treten hierbei jedoch nicht auf, so dass für die Emotionsbildung eine Auswertung des Fehlerbaums 611 – Vorfahrer/Nachfolger maßgeblich ist. Bei Betrachtung dieses Fehlerbaums zeigt sich, dass bei konstanten Geschwindigkeiten der beiden Versuchsfahrzeuge lediglich der Abstand zum Vorderfahrzeug den Intensitätsverlauf von *hope – fear* beeinflusst. Der Abstand zum Begleitfahrzeug bei der Ausführung des Spurwechsels nach links kann ohne Schwierigkeiten variiert werden und ist von den Probanden eindeutig wahrnehmbar. Er stellt somit eine gute Möglichkeit dar, reproduzierbare Verkehrssituationen zu schaffen.

Es soll bei jeder der drei Überholsituationen pro Durchlauf ein bestimmter Emotionsbereich vorliegen, der durch zugehörige Grenzwerte festgelegt ist. Die dadurch bedingten unterschiedlichen Abstände zum Vorderfahrzeug bei Spurwechselbeginn stellen somit drei variierende Spurwechselsituationen dar und repräsentieren den ersten variablen Versuchsfaktor im Versuchsdesign. Situation 1 charakterisiert sich dabei durch einen großen Abstand bei Spurwechselbeginn (hoher Emotionswert von 0.7), Situation 2 durch einen mittleren Abstand (neutraler Emotionswert von 0.5) und Situation 3 durch einen geringen Abstand (niedriger Emotionswert von -0.25). Die gewählten Emotionsgrenzen sowie die dadurch festgelegten Randbedingungen der Spurwechsel sind in Bild 66 visualisiert.



Bild 66: Schematische Visualisierung der Versuchsszenarien auf dem Taxiway der Universität der Bundeswehr in Neubiberg

Für die Untersuchung der Auswirkung von Adaption auf die Akzeptanz beim Fahrer müssen unterschiedliche Anpassungsgrade vorgesehen sein. Als zweiter variabler Versuchsfaktor werden daher fünf verschiedene Adaptionsstufen festgelegt. Der Adaptionsgrad steigt zwischen den Stufen von keiner Adaption bis auf die Durchführung des Spurwechsels durch einen menschlichen Fahrer als höchste Adaptionsstufe an. Für die Adaption an die vorherrschende Situation werden die in Kapitel 6.2 beschriebenen Variationsmöglichkeiten der Querführung verwendet, um die Fahrzeugführungssysteme an die aktuelle Fahrsituation anzupassen. Neben einer Anpassung der Reglercharakteristik durch veränderte Auslegungsschwerpunkte (vgl. Kapitel 6.2.1) können die Randbedingungen, nach denen der Spurwechselautomat die Trajektorie und damit die Vorsteuerungs- und Führungsgrößen für die einzelnen Spurwechsel generiert (vgl. Kapitel 6.2.2.1), zur Anpassung des Spurwechsellvorgangs an die vorliegende Situation genutzt werden. Darüber hinaus wird eine Adaption der Fahrzeugführung entsprechend den Ergebnissen der Korrelationsanalyse (vgl. Kapitel 6.2.2.2) vorgenommen. Die einzelnen Adaptionsstufen werden nachfolgend mit Regleradaption (Adaptionsstufe 2), Bahnführungsadaption durch Randwertvorgabe (Adaptionsstufe 3), sowie Bahnführungsadaption aus Fahrverhaltensanalyse (Adaptionsstufe 4) bezeichnet. Ferner existieren die Stufen der menschlichen Adaption (Adaptionsstufe 5) sowie keine Adaption (Adaptionsstufe 1).

Eine Anpassung innerhalb der einzelnen Stufen wird in Anlehnung an die vorgeschlagenen Mapping-Ausführungen von Kapitel 6.3 vorgenommen. Die konkreten Adaptionspläne zeigt Tabelle 15.

Tabelle 15: Parametrierung der Adaptionsstufen

Emotionswert		Situation 1	Situation 2	Situation 3
		hoch	neutral	niedrig
Adaptionsstufe 1	Reglercharakter:	neutral	neutral	neutral
	Bahncharakter:	neutral	neutral	neutral
Adaptionsstufe 2	Reglercharakter:	ruhig	neutral	agil
	Bahncharakter:	neutral	neutral	neutral
Adaptionsstufe 3	Reglercharakter:	neutral	neutral	neutral
	Bahncharakter:	ruhig	neutral	agil
Adaptionsstufe 4	Reglercharakter:	neutral	neutral	neutral
	Bahncharakter:	lenkraten-optimiert	lenk- und gierraten-optimiert	gierraten-optimiert
Adaptionsstufe 5	—	menschliche Ausführung	menschliche Ausführung	menschliche Ausführung

Die erste Adaptionsstufe repräsentiert das niedrigste Adaptionsniveau. Deswegen wird bei dieser Stufe mit konstanter Reglerparametrierung und konstanter Randbedingung für die Vorsteuerungs- und Führungsgrößen gefahren. Für die Variationswerte werden möglichst neutrale Einstellungen gewählt. Als Wert für den Hybrid-Faktor, der die Parametrierung des Querreglers vorgibt, ist deswegen ein Wert von 0.5 festgelegt. Dies stellt einen Kompromiss aus ruhigem Regelverhalten und hoher Sollwertfolgegüte dar. Die Spurwechselzeit, welche die maßgebliche Randbedingung zur Generierung der Spurwechseltrajektorie und damit der Vorsteuerungs- und Führungsgrößen darstellt, wird nach einer von [161] beschriebenen Situation für geringes Verkehrsaufkommen mit freiem Wechseln der Spur ohne zwingende

zeitliche oder örtliche Beschränkungen mit 4.7 s bestimmt (vgl. Tabelle 11) und legt somit den neutralen Bahncharakter fest.

Die zweite Adaptionstufe nutzt die Möglichkeit der Adaption über die Parametrierung des Querreglers. Die Randbedingungen zur Generierung der Vorsteuerungs- und Führungsgrößen bleiben konstant, es wird weiterhin der neutrale Wert von 4.7 s für die Spurwechselzeit bei allen drei Situationen verwendet. Die Anpassung des Reglercharakters erfolgt auf Basis des in Kapitel 6.3.1 eingeführten Sicherheitsgedankens. Dementsprechend wird in der völlig unkritischen Spurwechselsituation 1 ein ruhiger Regler (Hybrid-Faktor 0) aktiviert, wohingegen das knappe Ausscheren in Spurwechselsituation 3 mit einem sehr agilen Regler (Hybrid-Faktor 1) gefahren wird.

Für die dritte Adaptionstufe soll ausschließlich die Adaptionmöglichkeit über die Randbedingungen der Bahnplanung genutzt werden. Die Reglerparametrierung wird durch den Hybrid-Faktor von 0.5 konstant neutral eingestellt. Die Vorsteuerungs- und Führungsgrößen werden der jeweiligen Spurwechselsituation angepasst. Die erste Spurwechselsituation entspricht durch den früh erfolgenden Spurwechsel der durch [161] festgelegten Situation: das freie Wechseln der Spur ohne zwingende zeitliche oder örtliche Beschränkungen. Dafür wird ein Spurwechselzeitwert von 6.5 s gemäß Tabelle 11 eingestellt. Für die zweite Situation wird wie bei der ersten Adaptionstufe der neutrale Wert von 4.7 s ausgewählt. Die dritte Spurwechselsituation muss aufgrund des nahen Auffahrens zum Vorderfahrzeug innerhalb kurzer Zeit erfolgen. Die verwendete Spurwechselzeit von 3.5 s entspricht damit einer Spurwechselsituation mit hohem Verkehrsaufkommen auf der Zielspur.

In der vierten Adaptionstufe kommen nun die Ergebnisse der Korrelationsanalyse aus Kapitel 6.3.2 zur Anwendung. Demzufolge besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Gewichtung der Lenkrate δ und dem Wert von *hope - fear* 2.0 s vor Beginn des Spurwechsels. Durch den positiven Korrelationskoeffizienten wird ein hoher *hope - fear* -Wert mit einer hohen Gewichtung des Gütekriteriums δ und dadurch mit einem komfortorientierten Fahrverhalten in Spurwechselsituation 1 verknüpft. Weiterhin weist das Kostenfunktional der Gierrate einen negativen Korrelationskoeffizienten zum *hope - fear* -Wert auf. Dadurch wird Spurwechselsituation 3 mit einem Fahrverhalten verknüpft, bei dem eine Optimierung dieses Kostenfunktionals der Fahrsicherheit im Fokus steht. Spurwechselsituation 2 charakterisiert sich durch einen mittleren *hope - fear* -Wert und ist demzufolge mit einer lenkraten- und gierratenoptimierten Trajektorie zu verknüpfen. Die mit Hilfe der LLP-Optimierung ermittelten Vorsteuer- und Führungsgrößenverläufe für die jeweiligen Basiskostenfunktionen oder deren Kombinationen sind mit der entworfenen Regelungsstruktur der Querverführung direkt umsetzbar. Die Reglerparametrierung wird durch den Hybrid-Faktor von 0.5 konstant neutral eingestellt.

Die mit Adaptionstufe 5 bezeichneten Spurwechsel wurden komplett vom menschlichen Sicherheitsfahrer durchgeführt. Durch das bereits erwähnte haptische Signal durch den Versuchsbetreuer bei Erreichen der Emotionsgrenzen wurde sichergestellt, dass die Abstände zum Begleitfahrzeug bei Spurwechselbeginn denen der automatischen Fahrt entsprachen.

7.2 Ergebnisse

Ziel der Versuchsdurchführung ist es zu zeigen, dass ein höherer Adaptionsgrad von Assistenzsystemen und damit eine möglichst menschliche Fahrweise zu erhöhter Akzeptanz beim Menschen führen. Die Adaptionsstufen 2 und 3 mit Regleradaptation und Bahnführungsadaptation durch Randwertvorgabe werden dabei als Adaptionsstufen mit niedrigem Adaptionsgrad bezeichnet. Die Adaptionsstufe 4, welche die Ergebnisse einer vorherigen Fahrverhaltensanalyse darstellt, wird als Stufe mit hohem Adaptionsgrad festgelegt. Adaptionsstufe 5 dient mit der menschlichen Ausführung der Spurwechsel als Vergleichsstufe, da sich durch den menschlichen Fahrer die höchste Adaption darstellt. Mit Hilfe der Ergebnisse der Versuche soll bestätigt werden, dass sich die Spurwechsel mit niedrigem bis keinem Adaptionsgrad in ihrer Bewertung von den durch Menschen ausgeführten Spurwechseln unterscheiden. Im Gegensatz dazu soll die Bewertung der Spurwechsel mit hohem Adaptionsgrad ähnlich zu den durch Menschen ausgeführten Spurwechseln sein.

Für den Nachweis dieser Annahmen werden Hypothesen aufgestellt, die durch die Ergebnisse des Versuchs angenommen oder verworfen werden. Dabei wird zwischen zwei Hypothesenarten unterschieden. Die Alternativhypothese H_A entsteht aus der Theorie des Versuchsgestalters und besagt üblicherweise, dass ein Effekt vorhanden ist. Die Nullhypothese H_0 besagt das Gegenteil der Alternativhypothese, dass kein Effekt vorhanden ist. Mittels statistischem Vorgehen wird versucht, die Nullhypothese zu verwerfen, um die Alternativhypothese und damit die Theorie des Versuchsleiters zu stützen. Bei der Annahme bzw. dem Verwerfen der Hypothesen wird zwischen zwei Fehlertypen unterschieden. Der Typ-1-Fehler entsteht, wenn die Alternativhypothese angenommen wird, obwohl sie nicht gilt. Er entsteht somit beim fälschlicherweise Verwerfen der Nullhypothese. In der Statistik wird ein Signifikanzniveau festgelegt, ab dem die Nullhypothese verworfen wird. Diese Grenze, α -Level genannt, wird üblicherweise auf 0.05 festgelegt. Wenn das Ergebnis des statistischen Tests unter Gültigkeit der Nullhypothese nur mit einer Wahrscheinlichkeit von weniger als 5% zu erwarten ist, wird diese als Erklärung für das Ergebnis abgelehnt. Der zweite Fehlertyp wird als Typ-2-Fehler bezeichnet. Er entsteht, wenn die Nullhypothese fälschlicherweise angenommen und somit ein vorhandener Effekt nicht erkannt wird. Das zugehörige β -Level, welches die maximal akzeptable Wahrscheinlichkeit des Typ-2-Fehlers darstellt, liegt nach [56] bei 0.2.

Die vorgestellten Annahmen können dementsprechend in Hypothesen gefasst werden. Um den Unterschied der Bewertung der vier Adaptionsstufen ($i = 1 \dots 4$) zur Bewertung der menschlichen Ausführung ($i = 5$) der Spurwechsel zu zeigen, ergeben sich folgende Hypothesen:

$$H_0 : \mu_i = \mu_5 \quad (59)$$

$$H_A : \mu_i \neq \mu_5 \quad (60)$$

Durch den Test auf Signifikanz kann lediglich die Existenz eines Effekts nachgewiesen werden. Um die Bedeutung des Effekts einzuordnen, werden sogenannte Effektgrößen bestimmt. Dabei handelt es sich um eine objektive und standardisierte Maßeinheit der Größe des beobachteten Effekts. FIELD [56] empfiehlt die Verwendung des PEARSON-Korrelationskoeffizienten r als Effektgröße aufgrund der klaren Abgrenzung zwischen $r = 0$ (kein Effekt) und $r = 1$ (sehr großer Effekt).

Mit den drei verschiedenen Spurwechselsituationen und den fünf unterschiedlichen Adaptionstufen liegen zwei Variablen vor. Für die Untersuchung der Hypothesen müssen die Mittelwerte der Spurwechselbewertungen der einzelnen Adaptionstufen verglichen werden. Der Vergleich der Mittelwerte von mehreren Variablen kann mit Hilfe einer sogenannten Varianzanalyse durchgeführt werden, im Englischen mit *analysis of variance* (ANOVA) bezeichnet. Durch die beiden unabhängigen Variablen sowie der Bewertungen der Spurwechsel von denselben Probanden in allen Bedingungen des Experiments, ergibt sich eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholungen. Für die Untersuchung der Alternativhypothese zur Gleichheit der Bewertungen von Adaptionstufe 4 und 5 kann die ANOVA-Methode nicht verwendet werden, da hiermit lediglich Unterschiede feststellbar sind. Es bedarf hierfür eines Äquivalenztests. Aus diesem Grund werden mit dem Intervall-Inklusionstest die Mittelwerte der Bewertungen von Adaptionstufe 4 und 5 auf Äquivalenz überprüft. Zunächst soll der Vergleich der Bewertungen der maschinellen mit denen der menschlich ausgeführten Spurwechsel im Rahmen der ANOVA erfolgen. Voraussetzung für die ANOVA sind die Annahmen der Normalverteilung, Varianzhomogenität und Sphärizität.

Ein im Statistikprogramm SPSS durchgeführter KOLMOGOROV-SMIRNOV-Test zeigt, dass die aufgenommenen Bewertungsdaten nicht normalverteilt sind. Allerdings wird in [56] darauf hingewiesen, dass die F-Statistiken der ANOVA-Methoden sehr robust gegenüber nicht normalverteilten Daten sind, wenn gleiche Gruppenstärken vorliegen, was bei den durchgeführten Versuchen der Fall ist. Deswegen soll diese Annahme vernachlässigt werden. Ebenso wird in [23] festgestellt, dass heterogene Varianzen keinen erheblichen Einfluss bei gleicher Gruppenstärke haben, weswegen die Verletzung dieser Annahme ebenfalls vernachlässigt werden kann. MAUCHLY's Test zeigt, dass die Annahme der Sphärizität für den Haupteffekt Spurwechsel ($\chi^2(2) = 7.01, p < 0.05$) und den Interaktionseffekt Spurwechsel \times Adaption ($\chi^2(35) = 69.00, p < 0.05$) verletzt wird. Der Signifikanzwert wird dabei über den Wert der χ^2 -Verteilung in Abhängigkeit der zugehörigen Freiheitsgrade bestimmt, die in Klammern angegeben werden. Deswegen werden die Freiheitsgrade der F-Werte mit den konservativen GREENHOUSE-GEISER-Schätzungen der Sphärizität korrigiert ($\epsilon = 0.76$ für den Haupteffekt Spurwechsel und $\epsilon = 0.54$ für den Interaktionseffekt Spurwechsel \times Adaption). Das GREENHOUSE-GEISER- ϵ ist hierbei der Korrekturfaktor, mit dem die Freiheitsgrade der F-Werte multipliziert werden.

Bei der folgenden Aufführung der Ergebnisse werden zusätzlich zu den Signifikanzwerten p die Werte der F-Verteilung angegeben, mit den zugehörigen Freiheitsgraden für den Effekt des Modells und den Freiheitsgraden für die Residuen des Modells in Klammern. Die Signifikanzwerte werden nach den Werten der F-Verteilung bestimmt [56].

In Bild 67 sind die Mittelwerte der Bewertungen der einzelnen Adaptionstufen, sowie die jeweiligen 95%-Konfidenzintervalle dargestellt. Es gibt einen signifikanten Effekt des Typs der Adaptionstufe mit $p < 0.05$ auf die Bewertung des Spurwechsels ($F(4, 76) = 2.90$). Kontrastuntersuchungen zeigen, dass sowohl die Bewertungen von Spurwechseln mit Adaptionstufe 2 ($F(1, 19) = 7.26, r = 0.54$) als auch die Bewertungen von Spurwechseln mit Adaptionstufe 3 ($F(1, 19) = 18.97, r = 0.71$) signifikant geringer sind als Bewertungen von Spurwechseln mit Adaptionstufe 5. Die Kontraste führen also zur Annahme der Hypothese, dass ein signifikanter Unterschied zwischen den Bewertungen der Spurwechsel mit niedrigem Adaptionsgrad und den Spurwechseln mit höchstem Adaptionsgrad, repräsentiert durch die menschlich gefahrenen Spurwechsel, besteht.

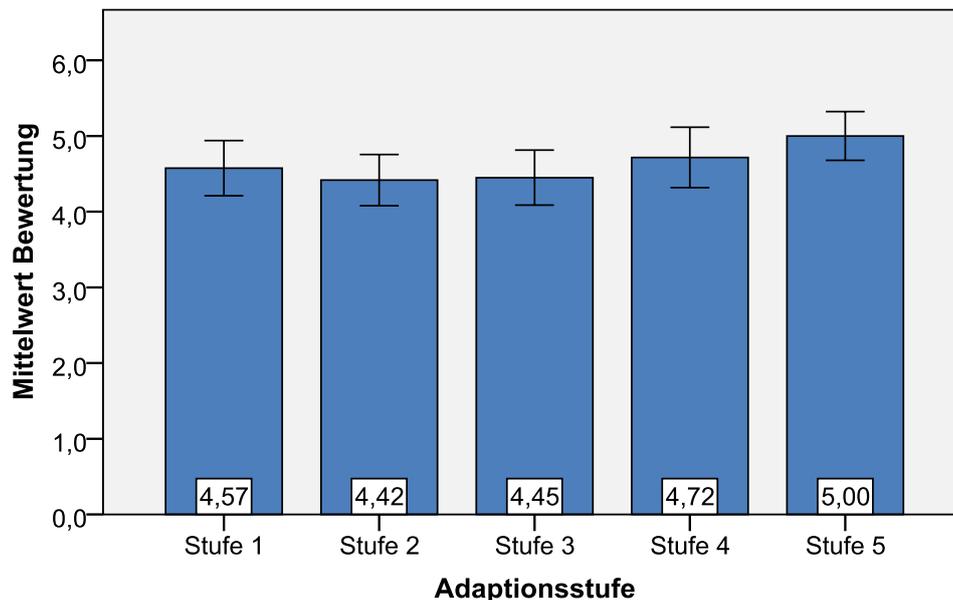


Bild 67: Bewertung der einzelnen Adaptionstufen

Der Unterschied zwischen den Bewertungen von Spurwechseln mit fester Reglerparametrierung und den Bewertungen der menschlich ausgeführten Spurwechsel kann nicht gezeigt werden, wobei bei $F(1, 19) = 3.81$, $r = 0.41$ mit $p = 0.066$ die Signifikanzgrenze nur knapp überschritten wird. Der Grund für die relativ hohe Bewertung von Adaptionstufe 1 liegt wohl darin, dass es mit der neutralen Abstimmung des Querreglers und des Spurwechselautomaten gelungen ist, ein den Probanden angenehm erscheinendes Setup zu erstellen, das allgemein zu relativ positiven Bewertungen führt. Der Vergleich von Adaptionstufe 4 mit hohem Adaptionsgrad und Adaptionstufe 5 mit menschlichem Fahrer, liefert keinen signifikanten Unterschied; bei $F(1, 19) = 1.366$, $r = 0.26$ wird mit $p = 0.257$ das Signifikanzniveau deutlich überschritten.

Um die Äquivalenz zwischen den beiden Stufen zu untersuchen, erfolgt ein Äquivalenztest in Form eines Intervall-Inklusionstests [184]. Dazu muss ein Bereich noch tolerierbarer Abweichung festgelegt werden, der sogenannte Äquivalenzbereich. Für den Versuch soll ein Äquivalenzbereich von einem halben Bewertungspunkt um die Bewertung verwendet werden, sodass sich ein Äquivalenzbereich von $[-0.5; 0.5]$ ergibt. Damit werden folgende Hypothesen aufgestellt:

$$H_0 : (\mu_4 - \mu_5) < -0.5 \text{ oder } (\mu_4 - \mu_5) > 0.5 \quad (61)$$

$$H_A : -0.5 \leq (\mu_4 - \mu_5) \leq 0.5 \quad (62)$$

Im Rahmen des Intervall-Inklusionstests werden die Mittelwerte der Bewertungen der beiden Adaptionstufen anhand eines t-Tests verglichen. Für die Durchführung eines t-Tests werden normalverteilte Daten benötigt. Wie im oberen Teil des Abschnitts erwähnt wird, sind die Daten nicht normalverteilt. Nach dem zentralen Grenzwerttheorem ist bei $n > 30$ die Verteilung der Kennwerte von Stichproben unabhängig von der Form der ursprünglichen Verteilung annähernd normal. Die Probenzahl der im Versuch aufgenommenen Daten übersteigt die Zahl von 30, sodass Normalverteilung für die Kennwerte der Stichprobe angenommen werden kann.

Um die Äquivalenz im vorgegebenen Bereich nachzuweisen, wird im Rahmen des t-Tests ein $(1 - 2\alpha)$ -Konfidenzintervall bestimmt. Für einen α -Wert von 0.05 muss somit das 90%-Konfidenzintervall bestimmt werden. Wenn das Konfidenzintervall im Toleranzbereich von $[-0.5; 0.5]$ liegt, kann mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0.05 Äquivalenz angenommen werden. Das vom t-Test gelieferte Konfidenzintervall zeigt Tabelle 16.

Tabelle 16: t-Test zwischen Adaptionstufe 4 und 5

Gepaarte Differenzen				
Mittelwert	Standard- abweichung	Standardfehler des Mittelwertes	90% Konfidenzintervall der Differenz	
			untere Grenze	obere Grenze
-0.1579	1.2070	0.1599	-0.4253	0.1095

Das 90%-Konfidenzintervall liegt somit innerhalb des Äquivalenzbereichs. Demnach kann die Äquivalenz der Bewertungen von Spurwechseln mit Adaptionstufe 4 und Adaptionstufe 5 angenommen werden. Damit kann gezeigt werden, dass bei autonom ausgeführten Spurwechseln ein Setup mit hohem Adaptionsgrad zu ähnlich hohen Bewertungen bei den Probanden führen wie menschlich ausgeführte Spurwechsel. Demzufolge kann die These bestätigt werden, dass eine hohe Adaptivität und möglichst menschliche Auslegung der autonomen Fahrweise des Versuchsträgers zu einer erhöhten Akzeptanz führen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In zukünftigen Fahrzeuggenerationen werden verstärkt Fahrerassistenzsysteme Einzug halten, deren Aktionsbereich sich nicht mehr nur auf die reine Information des Fahrers oder den kurzzeitigen Eingriff in Notfallsituationen beschränken wird, sondern der zu wesentlichen Fahranteilen die Fahrzeugführung semi- oder vollautomatisch übernehmen wird. Eine bereits im Markt befindliche Ausprägungsstufe stellen ACC Stop&Go-Systeme dar, bei denen der Fahrer von der Längsführung entlastet wird und sich hinsichtlich dieser Fahraufgabe in einer rein überwachenden Funktion wiederfindet. Weitergehende Systeme wie z.B. der Stauassistent sind in der Lage, die Fahrzeugführung in definierten Situationen vollständig zu übernehmen.

Damit derartige Systeme jedoch Erfolg im Markt haben und ihre sicherheitsorientierte Wirkung entfalten können, ist eine hohe Akzeptanz der Nutzer vonnöten. Dieses Akzeptanzproblem ist jedoch auch unmittelbar mit dem Verhalten der vorgestellten Systeme verknüpft. Je näher die Ausprägung des Fahrzeugführungssystems einer scheinbaren „Taxifahrt“ kommt, desto mehr erwartet der „Fahrgast“ ein menschliches Fahrverhalten. In diesem Zusammenhang ist das bereits erwähnte „Uncanny Valley“ und der damit verbundene Akzeptanzeinbruch bei zu artifiziellem Fahreindruck zu überwinden. Durch anthropomorpheres Fahrverhalten lässt sich ein insgesamt höheres Akzeptanzniveau erreichen.

Ziel dieser Arbeit war daher, ein Konzept zu realisieren, welches das Systemverhalten an dem sich in einer bestimmten Situation befindenden und agierenden Menschen orientiert. Dazu wurde eine fahrerspezifische Analyse des Fahrverhaltens durchgeführt, um eine situationsadaptive Parametrierung der semi-autonomen Fahrzeugführungssysteme vornehmen zu können. Demonstriert wurde das Vorgehen und die Validierung am Beispiel des Spurwechsels.

Zunächst erfolgte eine Analyse zum Stand der Technik, welche jedoch Lücken zur Umsetzung des Vorhabens mit bestehenden Ansätzen offenbarte. Diese Defizite bestehen vor allem in der noch mangelnden Kenntnis situativer Gütekriterien, die der Mensch bei seiner Tätigkeit als Fahrzeugführer umsetzt. Weiterhin konnte kein bestehender Adaptionsmechanismus eines Fahrzeugführungssystems identifiziert werden, welcher anhand eines an die menschliche Interpretation angelehnten Verfahrens das Fahrverhalten der Verkehrssituation anpasst. Darüber hinaus konnte keine einheitliche Definition einer Verkehrssituation in der Literatur festgestellt werden.

Nach der Vorstellung des realisierten Versuchsträgers und dessen Komponenten in Kapitel 3 widmete sich Kapitel 4 daher zunächst einer möglichst vollständigen und umfassenden Beschreibung einer Verkehrssituation. Über eine domänenübergreifende Analyse wurden zunächst spezifische Situationsaspekte der betrachteten Bereiche gesammelt, in die Verkehrswelt transferiert und mit denen bestehender Ansätze fusioniert. Die Klassifikation dieser Aspekte definiert die von den technischen Modulen zur Situationsanalyse und -interpretation zu leistenden Aufgaben der Perzeption, Prädiktion und Interpretation. Zur Realisierung einer robusten Erfassung statischer und dynamischer Objekte wurden daher Fusionsansätze eingesetzt, die sowohl die Daten der Umfeldsensorik, als auch die der Sensoren zur Erfassung der Fahrzeugeigenbewegung verwerten. Dadurch wird eine Erkennung von Elementaraktionen der Verkehrsteilnehmer mit Hilfe der Methode der Hidden Markov Models möglich, aus denen sich durch ein hybrides Gesamtmodell Fahrmanöver identifizieren lassen. Der Auf-

gabe der Prädiktion widmet sich ein Planerkennungsalgorithmus, der auf Basis erwartungsbasierter Annahmen Hypothesen zukünftiger Fahrmanöver von Fremdfahrzeugen generiert. Diese dienen wiederum der Einschätzung des Konfliktpotentials einer Verkehrssituation mit Hilfe einer Fehlerbaumanalyse. Zur Interpretation der vorliegenden Verkehrssituation wurde ein Ansatz gewählt, der sich an der menschlichen Interpretation einer Situation anlehnt. Dieser Ansatz stellt die Sensorinformationen und die aus der Umfeld- und Situationsanalyse abgeleiteten Messgrößen auf einer abstrahierten Ebene dar, die in ihrem Aufbau die Entstehung menschlicher Emotionen nachbildet. Dadurch wird in einem ersten Schritt die Komplexität der Sensorinformationen auf einige wenige Zustandsgrößen reduziert. Der ausgewählte Ansatz erlaubt daraufhin, diesen „inneren Zustand“ mit einer korrespondierenden Verhaltensausrprägung zu verknüpfen.

Dieses fahrerspezifische Fahrverhalten wurde in Kapitel 5 anhand eines optimaltheoretischen Ansatzes analysiert. Unter der Prämisse des Fahrers als Optimalregler, erlaubt das eingesetzte Verfahren des Bilevel Programming die Identifizierung von Kostenfunktionalen, die der Mensch bei der Ausführung seiner Fahrtätigkeit minimiert.

Durch diese Vorgehensweise wird eine situative Verknüpfung von Kostenfunktionalen mit virtuellen Emotionen ermöglicht. Kapitel 6 zeigt sowohl die zur regelungstechnischen Umsetzung einer situationsadaptiven Fahrzeugführung notwendigen Grundfunktionalitäten als auch mögliche Vorgehensweisen zur Kopplung charakteristischer Verhaltensausrprägungen an Situationsmerkmale. Eine in diesem Rahmen durchgeführte Korrelationsanalyse zwischen den Ergebnissen der Untersuchung fahrerspezifischen Fahrverhaltens und den in den jeweiligen Situationen vorherrschenden virtuellen Emotionen offenbarte signifikante Zusammenhänge für den Einzelprobanden. Dadurch wird eine möglichst menschenähnliche Form der Umsetzung von situationsbedingtem Fahrverhalten auf der untersten Ebene der Fahrzeugführung möglich.

Zur Untersuchung der Hypothese einer höheren Akzeptanz von Systemen mit möglichst anthropomorphen Verhalten gemäß der „Uncanny Valley“-Theorie, wurden in einer Probandenstudie automatische Spurwechsel in unterschiedlichen Situationen durchgeführt. Diese Manöver wurden in ihrer fahrdynamischen Ausprägung gemäß den vorgeschlagenen differierenden Auslegungsstufen an die jeweilige Situation adaptiert. Anhand der statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse konnte dabei die höhere Akzeptanz der situationsadaptiven und menschenähnlichen Fahrzeugführungsvariante nachgewiesen werden. Im Vergleich zu Spurwechseln, die von einem menschlichen Fahrer ausgeführt wurden, konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse besitzen zwar aufgrund der relativ geringen Menge untersuchter Spurwechsel, sowie der Tatsache, dass es sich um die Korrelationen einer Einzelperson handelt, keinen allgemeingültigen Charakter, jedoch konnten die Existenz und die Ausprägung derartiger Zusammenhänge in der Literatur bisher so noch nicht erbracht werden. Eine Untersuchung diverser Fahrmanöver in großer Stichprobenzahl, durchgeführt von einem breiten Probandenfeld, könnte jedoch eine allgemeingültig geartete Aussage zum menschlichen Fahrverhalten gemäß dem vorgeschlagenen Verfahren hervorbringen.

Der Ansatz bietet weiterhin eine Möglichkeit zur Unterstützung des Applikationsprozesses von Fahrzeugführungssystemen. Die Identifikation eines „Musterfahrverhaltens“ durch einen Applikationsfahrer in Form von situativen Kostenfunktionalen erlaubt eine fahrzeugunabhängige Regler vorauslegung und kann somit den Applikationsaufwand deutlich reduzieren.

Durch die objektiven Kennwerte können zudem inter- und intraindividuelle Auslegungsunterschiede der Applikationsingenieure aufgelöst werden.

Zusammenfassend kann durch die situations- und fahreradaptive Modulation zum einen die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der gezeigten Verhaltensausführung erhöht werden, zum anderen kann dadurch vor allem die Akzeptanz zukünftiger semi- oder vollautomatischer Fahrzeugführungssysteme im Straßenverkehr sowohl bei den Fahrzeuginsassen als auch den anderen menschlichen Verkehrsteilnehmern gesteigert werden. Eine hohe Marktakzeptanz würde diesen Systemen erlauben, nicht nur Ihren Komfortaspekt auszuspielen, sondern auch unfallvermeidend zu wirken.

A Taxonomie zur Aufgabenkomplexität von Verkehrssituationen

Kategorien des Klassifikationssystems nach FASTENMEIER [51]

- A1 Autobahn, modern ausgebaut; je Fahrbahn 3 (oder mehr) Fahrspuren; breiter Seitenstreifen; Standspur oder im Anschlußstellenbereich Beschleunigungs- oder Verzögerungsspur
- A2 Autobahn; je Fahrbahn 2 Fahrspuren; breiter Seitenstreifen; Standspur oder im Anschlußstellenbereich Beschleunigungs- oder Verzögerungsspur
- A3 Autobahn; je Fahrbahn 3 (oder mehr) Fahrspuren; schmaler oder kein Seitenstreifen; keine Standspur oder im Anschlußstellenbereich keine Beschleunigungs- oder Verzögerungsspur
- A4 Autobahn; je Fahrbahn 2 Fahrspuren; schmaler oder kein Seitenstreifen; im Anschlußstellenbereich ohne Beschleunigungs- oder Verzögerungsspur

- H Kurve

- K0 ohne Kreuzung
- K3 Kreuzung, Regelung durch Beschilderung; Fahrer vorfahrtberechtigt (auch Ein-/ Ausfahrten auf BAB aus der Sicht des Fahrers, der sich auf der Autobahn befindet)
- K4 wie K3, aus der Sicht des Wartepflichtigen

B Parameter der Fahrdynamikmodellierung

Parameter	Wert
Fahrzeugmasse m	2920 kg
Massenträgheitsmoment J_{zz}	5561 kgm ²
Abstand SP zu Vorderachsmittelpunkt l_v	1.533 m
Abstand SP zu Hinterachsmittelpunkt l_h	1.457 m
Lenkübersetzung i	17.5
Schräglaufsteifigkeit Vorderachse c_v	130000 N/rad
Schräglaufsteifigkeit Hinterachse c_h	255000 N/rad
Stirnfläche A	2.87 m ²
Luftwiderstandsbeiwert c_w	0.413
Rollwiderstandsbeiwert f_{R0}	0.022

C Fragebogen der Validierungsfahrten

Versuchsbeschreibung

Im nachfolgenden Versuchsablauf werden beim Abfahren der Teststrecke drei Spurwechsel durchgeführt. Die Strecke wird mehrmals durchfahren. Hintergrund ist die Anwendung von verschiedenen Setups bei der Ausführung der Spurwechsel. Dabei werden die Spurwechsel entweder vom Menschen oder von der Maschine durchgeführt. Dabei sollen Sie nur die Spurwechselvorgänge nach links bei Ihrer Bewertung berücksichtigen. Der Auslösezeitpunkt soll nicht mit in die Bewertung einfließen.

Nachdem Sie auf dieser Seite einige kurze Angaben zu Ihrer Person geben, werden Sie nach jedem erfolgten Durchlauf die drei durchgeführten Spurwechsel auf den folgenden Seiten des Fragebogens bewerten.

Personenbezogene Daten

Geschlecht?

- Männlich
 Weiblich

Besitzen Sie einen Führerschein?

- ja
 nein

Besitzen Sie ein Auto der ...

- Oberklasse
 Mittelklasse
 Kompaktklasse
 Kleinwagen
 kein Fahrzeug

Welcher Altersgruppe dürfen Sie zugeordnet werden?

17 – 25	26 – 35	36 – 45	46 – 55	56 – 65	66 – 75	76 – 85	> 85

Wie viele Kilometer fahren Sie pro Jahr (in 1.000 km)?

0 – 5	5 – 10	10 – 15	15 – 20	20 – 25	25 – 30	30 – 35	>35

Welchem Fahrertyp würden Sie sich zuordnen? (0 = vorsichtig; 7 = aggressiv)

0	1	2	3	4	5	6	7

Spurwechselbewertung

Bitte bewerten Sie für die einzelnen Spurwechsel (SPW 1 – SPW 3) nach links, ob die Art und Weise der Durchführung des Spurwechsels an die Fahrsituation angepasst erfolgte.

(0 = unangepasst; 7 = angepasst)

Spurwechselerhalten allgemein:

	0	1	2	3	4	5	6	7
SPW 1								
SPW 2								
SPW 3								

Dauer des Spurwechsels:

	0	1	2	3	4	5	6	7
SPW 1								
SPW 2								
SPW 3								

Lenkintensität des Spurwechsels:

	0	1	2	3	4	5	6	7
SPW 1								
SPW 2								
SPW 3								

Geometrie des Spurwechsels:

	0	1	2	3	4	5	6	7
SPW 1								
SPW 2								
SPW 3								

Literaturverzeichnis

- [1] *Unfalltypen-Katalog*. Institut für Straßenverkehr, Verband der Schadenversicherer - GDV. http://www.udv.de/uploads/tx_udvpublications/unfalltypenkatalog_lr.pdf. Version: 1998, Abruf: 08.12.2010. – ISSN 0724-3693
- [2] *Carnegie Mellon. Tartan Racing*. <http://www.tartanracing.org>. Version: 2007, Abruf: 01.11.2011
- [3] *Transregional Collaborative Research Center 28: Cognitive Automobiles*. <http://www.kognimobil.org>. Version: 2011, Abruf: 01.11.2011
- [4] ALBRECHT, S. ; PASSENBERG, C. ; SOBOTKA, M. ; PEER, A. ; BUSS, M. ; ULBRICH, M.: Optimization Criteria for Human Trajectory Formation in Dynamic Virtual Environments. In: *Haptics: Generating and Perceiving Tangible Sensations*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 6192, Springer, 2010, S. 257–262
- [5] ALBRECHT, S. ; SOBOTKA, M. ; ULBRICH, M.: A bilevel optimization approach to obtain optimal cost functions for human arm movements / Technische Universität München. 2010. – Vorläufiger Bericht
- [6] ANDRÉ, E. ; KLESEN, M. ; GEBHARD, P. ; ALLEN, S. ; RIST, T.: Exploiting Models of Personality and Emotions to Control the Behavior of Animated Interactive Agents. In: *Proceedings of the Agents'00 Workshop on Achieving Human-Like Behavior in Interactive Animated Agents*, 2000, S. 3–7
- [7] ANGENENDT, W. ; ERKE, H. ; HOFFMANN, G. ; MARBURGER, E. A. ; MOLT, W. ; ZIMMERMAN, G.: Situationsbezogene Sicherheitskriterien im Straßenverkehr / Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung. Bergisch Gladbach, 1987. – Forschungsbericht
- [8] ANGERMANN, A. ; BEUSCHEL, M. ; RAU, M. ; WOHLFARTH, U.: *Matlab - Simulink - Stateflow*. Bd. 4. überarbeitete Auflage. München/Wien: Oldenbourg Verlag, 2005
- [9] APEL, A.: *Modellierung des Fahrerhaltens bei Längs- und Querführung von Pkw*. Papierflieger, 1998
- [10] APKARIAN, P. ; GAHINET, P.: A convex characterization of gain-scheduled H1 controller. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* Bd. 40, 1995, S. 853–864
- [11] APPEL, H. ; KRABBEL, G. ; VETTER, D.: *Unfallforschung, Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion*. 2. Aufl. Kippenheim: Verlag INFORMATION Ambs GmbH, 2002
- [12] ARNOLD, M. B.: *Emotion and personality*. Bd. 1. New York: Columbia Press, 1960
- [13] BAMMER, M.: *Prädiktion des Fahrverhaltens mit Hilfe erwartungsbedingter Modelle*, Technische Universität München, unveröffentlichte Diplomarbeit, 2009
- [14] BARD, J. F.: *Practical bilevel optimization. Nonconvex optimization and its applications*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1998

- [15] BARON, S. ; KLEINMAN, D. L. ; LEVISON, W. H.: An Optimal Control Model of Human Response, Part I + II. In: *Automatica* 6 (1970), S. 357–383
- [16] BARTNECK, C.: Integrating the OCC Model of Emotions in Embodied Characters. In: *Proceedings of the Workshop on Virtual Conversational Characters: Applications, Methods, and Research Challenges*. Melbourne, 2002
- [17] BATH, C.: Wie virtuelle Menschen sozial werden: Technische Modelle und feministische Eingriffe. In: *Kongress Frauen in Naturwissenschaft und Technik*. Köln, 2006
- [18] BAUM, L. E. ; PETRIE, T.: Statistical Inference for Probabilistic Functions of Finite State Markov Chains. In: *The Annals of Mathematical Statistics* Vol. 37, No. 6 (1966), S. 1554–1563
- [19] BECKER, J. C.: Fusion der Daten der objekterkennenden Sensoren eines autonomen Straßenfahrzeugs. In: *Fortschrittberichte VDI, Reihe 8, Nr. 948*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2002
- [20] BELLMAN, R. E.: *Dynamic Programming*. Princeton : Princeton University Press, 1957
- [21] BENDA, H. v.: Die Skalierung der Gefährlichkeit von Straßenverkehrssituationen, 1. Teil: Ein Klassifikationssystem für Verkehrssituationen aus Fahrersicht / Technische Universität München. 1977. – FP 7320 im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen
- [22] BENDA, H. v. ; HOYOS, C. G. ; SCHAIBLE-RAPP, A.: Klassifikation von Straßenverkehrssituationen. In: *Forschungsbericht Nr. 89*. Bergisch-Gladbach : Bundesanstalt für das Straßenwesen, 1983
- [23] BORTZ, J. ; SCHUSTER, C.: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010
- [24] BRÜDIGAM, C.: *Intelligente Fahrmanöver sehender autonomer Fahrzeuge in autobahnähnlicher Umgebung*. Neubiberg, Universität der Bundeswehr München, Diss., 1994
- [25] BUNDESAMT, Statistisches: Verkehrsunfälle. In: *Verkehr, Fachserie 8, Reihe 7* (Wiesbaden, 2009), S. 59
- [26] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (Hrsg.): *Verordnung über die Erteilung einer Verwarnung, Regelsätze für Geldbußen und die Anordnung eines Fahrverbots wegen Ordnungswidrigkeiten im Straßenverkehr (Bußgeldkatalog-Verordnung - BKatV)*. 2009
- [27] BUSCH, C.: *Erstellung eines Fahrzeug-Reglers zum Nachfahren von Fahrzyklen in der Simulation*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2003
- [28] BUTZ, T. ; STRYK, O. v.: Optimal Control Based Modeling of Vehicle Driver Properties. In: *Proceedings of the SAE World Congress & Exhibition*. Detroit, MI, USA, April 2005
- [29] CANNON, W. B.: The James-Lange theory of emotions: A critical examination and an alternative. In: *American Journal of Psychology* 39 (1927), S. 106–124

-
- [30] CHEN, Z.: Menschliche und automatische Regelung der Längsbewegung von Personenkraftwagen. In: *Fortschrittberichte VDI, Reihe 12, Nr. 168*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1992
- [31] DAGLI, I.: *Erkennung von Einscherer-Situationen für Abstandsregelautomaten*, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Diss., 2005
- [32] DAGLI, I. ; BROST, M. ; BREUEL, G.: Action Recognition and Prediction for Driver Assistance Systems Using Dynamic Belief Networks. In: *Proceedings of the Conference on Agent Technologies, Infrastructures, Tools, and Applications for E-Services*, 2002, S. 179–194
- [33] DANG, T. ; HOFFMANN, C. ; STILLER, C.: Self-calibration for Active Automotive Stereo Vision. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2006, S. 364–369
- [34] DARWIN, C. R.: *The expression of the emotions in man and animals*. 1st edition. London: John Murray, 1872
- [35] DEMPE, S.: *Foundation of Bilevel Programming*. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 2002
- [36] DEUSCHLE, S.: Fahrerassistenzsysteme - Wer fährt, das System oder der Fahrer? In: *4. Aachener Verkehrssymposium*. Aachen, 2004
- [37] DICKMANN, E. D.: 4D-Szenenanalyse mit integralen raumzeitlichen Modellen. In: *9. DAGM-Symposium Mustererkennung*, Springer Verlag, 1987 (Informatik Fachberichte 149)
- [38] DICKMANN, E. D. ; BEHRINGER, R. ; DICKMANN, D. ; HILDEBRANDT, T. ; MAURER, M. ; THOMANEK, F. ; SCHIEHLEN, J.: The seeing passenger car 'VaMoRs'. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 1994, S. 68–73
- [39] DICKMANN, E.D.: *Dynamic vision for perception and control of motion*. London: Springer-Verlag, 2007
- [40] DIETER, B. (Hrsg.) ; WERMKE, M. (Hrsg.): *Duden, Das große Fremdwörterbuch: Herkunft und Bedeutung der Fremdwörter*. Mannheim: Dudenverlag, 2000
- [41] DONGES, E.: Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 24 (1978), Nr. 3, S. 98–112
- [42] DONGES, E.: A two level-model of driver steering behavior. In: *Human Factors* 20 (1978), Nr. 6, S. 691–707
- [43] DONGES, E.: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *Automobil-Industrie* 27 (1982), S. 183–190
- [44] DONGES, E. ; NAAB, K.: Regelsystem zur Fahrzeugführung und -stabilisierung in der Automobiltechnik. In: *at - Automatisierungstechnik* 44 (1996), S. 226–236
- [45] DREYER, W.: *Zum längsdynamischen Verhalten des Regelkreises Fahrer-Kraftfahrzeug*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1980
-

- [46] ECKARDT, M. ; GRIEGERICH, I. ; RINALDI, D. ; TIBURCO, L.: *Talcott Parson - Biografie und Werke*, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Seminararbeit, 2008
- [47] EHMANN, D.: *Modellierung des taktischen Fahrverhaltens bei Spurwechselvorgängen*, RWTH Aachen, Diss., 2002
- [48] EKMAN, P.: An argument for basic emotions. In: *Cognition and Emotion* 6 (1992), S. 169–200
- [49] ELLIOTT, C.: *The affective reasoner: a process model of emotions in a multi-agent system*. Evanston, IL, USA, Northwestern University, Diss., 1992
- [50] ERKE, H. ; WESSEL, W.: *Verkehrskonfliktbeobachtung in der Verkehrserziehung*. Braunschweig: Technische Universität, 1985
- [51] FASTENMEIER, W.: Die Verkehrssituation als Analyseeinheit im Verkehrssystem. In: *Autofahrer und Verkehrssituation*. Köln, Verlag TÜV Rheinland, 1995, S. 27–78
- [52] FASTENMEIER, W. ; GSTALTER, H.: Entwicklung und Anwendung einer neuen Methodik zur Fahraufgabenanalyse. In: *VDI-Berichte* 1768 (2003), S. 197–213
- [53] FASTENMEIER, W. ; GSTALTER, H. ; ZAHN, P.: Prospektive Risikopotentialabschätzung am Beispiel der Spurwechsel-Assistenz. In: *VDI-Berichte* 1613 (2001), S. 173–189
- [54] FASTENMEIER, W. ; HINDERER, J. ; LEHNIG, U. ; GSTALTER, H.: Analyse der kritischen Fahrsituationen beim Spurwechsel / im Auftrag der BMW AG, Robert Bosch GmbH, Adam Opel AG, Volkswagen AG. München, 1998. – Forschungsbericht im Rahmen von MOTIV/Abbiege- und Spurwechselassistentz
- [55] FECHER, N.: *Analyse des stationären Folgeverhaltens von PKW-Fahrzeugführern unter Berücksichtigung von Nässe und einhergehender Sichtbehinderung*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2005
- [56] FIELD, A.: *Discovering Statistics Using SPSS*. Third. London: Sage Publications Ltd, 2009
- [57] FILZEK, B.: *Abstandsverhalten auf Autobahnen - Fahrer und ACC im Vergleich*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2002
- [58] FÖLLINGER, O.: *Regelungstechnik, Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*. Heidelberg : Hüthig Verlag, 10.Auflage, 2008
- [59] FREDERIKSEN, N.: Toward a taxonomy of situations. In: *American Psychologist* 27 (1972), S. 114–123
- [60] FREYER, J.: *Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung des Spurwechselverhaltens von ACC*. Cuvillier Verlag, 1.Auflage, Band 9, 2008
- [61] FRIEDMANN, P.: *Interaktive Kompetenz und interaktives Handeln*. Kiel, Christian Albrechts-Universität, Habilitationsschrift, 1979
- [62] FRIJDA, N. H.: *The emotions*. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 1986

- [63] GÄFGEN, G.: *Theorie der wirtschaftlichen Entscheidung*. Bd. 3. Aufl. Tübingen, 1974. – 95 ff. S.
- [64] GALLIKER, M. ; WEIMER, D.: *Sprachliche Kommunikation - Ansätze und Perspektiven*. Kröning: Asangr Verlag, 2003. – 11–66 S.
- [65] GIBSON, J. J. ; CROOKS, L. E.: A theoretical field analysis of automobile driving. In: *American Journal of Psychology* 51 (1938), S. 453–471
- [66] GNATZIG, S.: *Fahrmanöverprädiktion von Fremdfahrzeugen unter Einbeziehung des Situationskontextes mit Hilfe von Hidden Markov Models*, Technische Universität München, unveröffentlichte Diplomarbeit, 2009
- [67] GNATZIG, S. ; BAMMER, M. ; KRAUS, S. ; HEISSING, B.: Manoeuvre Recognition and Prediction for Driver Assistance Systems using Hidden Markov Models and Modifiers. In: *Proceedings of AVEC 2010, 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control*. Loughborough, UK, August 2010
- [68] GOEBL, M.: *Homepage der Realzeitdatenbasis für kognitive Automobile (KogMo-RTDB)*. <http://www.kogmo-rtdb.de>. Version:2009, Abruf: 19.06.2010
- [69] GOEBL, M.: *Eine realzeitfähige Architektur zur Integration kognitiver Funktionen*, Technische Universität München, Diss., 2009
- [70] GOEBL, M. ; ALTHOFF, M. ; BUSS, M. ; FÄRBER, G. ; HECKER, F. ; HEISSING, B. ; KRAUS, S. ; NAGEL, R. ; LEÓN, F. P. ; RATTEI, F. ; RUSS, M. ; SCHWEITZER, M. ; THUY, M. ; WANG, C. ; WÜNSCHE, H.-J.: Design and Capabilities of the Munich Cognitive Automobile. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Eindhoven : IEEE Press, June 2008, S. 1101–1107
- [71] GOEBL, M. ; FÄRBER, G.: A Real-Time-capable Hard- and Software Architecture for Joint Image and Knowledge Processing in Cognitive Automobiles. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE Press, Juni 2007, S. 734–740
- [72] GOEBL, M. ; FÄRBER, G.: Eine realzeitfähige Softwarearchitektur für kognitive Automobile. In: *Informatik Aktuell*. Springer-Verlag, Oktober 2007, S. 198–204
- [73] GRAICHEN, K.: *Vorlesung Optimierung (WS 2009/2010)*. http://www.acin.tuwien.ac.at/fileadmin/cds/lehre/opt/Skript_Optimierung_WS2009-10.pdf, Abrufdatum: 11.10.2010
- [74] HACKER, W.: *Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie*. Berlin: VEB Verlag, 1978
- [75] HACKMAN, J. R.: Tasks and task performance in research on stress. In: MCGRATH (Hrsg.): *Social and psychological factors in stress*. New York: Holt, 1970
- [76] HÄMMERLE, N.: *Emotionsmodelle in Robotik und Automation*, Technische Universität München, unveröffentlichte Semesterarbeit, November 2009
- [77] HÄMMERLE, N.: *Entwurf und Optimierung emotionstheoretischer Modelle zur situativen Regleradaptation autonomer Fahrzeugführungssysteme*, Technische Universität München, unveröffentlichte Diplomarbeit, Mai 2010

- [78] HEISSING, B. ; ERSOY, M.: *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. Berlin : Vieweg+Teubner Verlag, 2008
- [79] HILLE, F.: *Ermittlung der Spurwechselmotivation eines PKW-Fahrers anhand ausgewählter Motivatoren*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2004
- [80] HÖFLER, F.: *Verkehrswesen-Praxis*. Bd. 2: Verkehrstechnik. Berlin: Bauwerk Verlag, 2006
- [81] HOFMANN, P. ; GETZMANN, S. ; RINKENAUER, G.: Die Gewichtung von Heading und lateraler Position bei der Spurhaltung. In: *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme: 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme* (2009)
- [82] HORN, A.: *Fahrer - Fahrzeug - Kurvenfahrt auf trockener Straße*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1985
- [83] IMHOF, E.: *Gelände und Karte*. Stuttgart: Rentsch, 1968
- [84] IPPOLITO, C. ; PISANICH, G. ; YOUNG, L.: Cognitive Emotion Layer Architecture for Intelligent UAV Planning, Behavior and Control. In: *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, MT, März 2005, S. 1–16
- [85] ISERMANN, R., (Hrsg.): *Fahrdynamik-Regelung*. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 1. Auflage, 2006
- [86] IZARD, C. E.: *Human Emotions*. New York: Plenum Press, 1977
- [87] JAMES, D. J. G. ; BOEHRINGER, F. ; BURNHAM, K. J. ; COPP, D. G.: Adaptive driver model using a neural network. In: *Artificial Life and Robotics 7* (2004), S. 170–176
- [88] JAMES, W.: What is an Emotion? In: *Mind* 9 (1884), April, Nr. 34, S. 188–205
- [89] JASPERS, K.: *Die geistige Situation der Zeit*. Berlin: Gruyter Walter de GmbH, 1979. – 19–24 S.
- [90] JÜRGENSOHN, T.: Fahrermodelle - ein kritischer Überblick. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 99 (1997), S. 7–8
- [91] KAJIWARA, H. ; APKARIAN, P. ; GAHINET, P.: LPV techniques for control of an inverted pendulum. In: *Proceedings of the IEEE Control Systems Magazine* Bd. 19, 1999, S. 44–54
- [92] KARAMITSOS, F.: DRIVE. In: PAPAGEORGIU, M. (Hrsg.): *Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation*. Pergamon Press, 1991, S. 107–112
- [93] KECHT, S.: *Wahrnehmungsmodellierung ausgewählter Größen der Fahrzeugquerdynamik*, Technische Universität München, unveröffentlichte Semesterarbeit, 2009
- [94] KELTCHER, C. N. ; MCGRATH, K. J. ; AHMED, A. ; CONWAY, P.: The Opteron processor for multiprocessor servers. In: *IEEE Micro* Bd. 23, IEEE Computer Society Press, März/April 2003, S. 66–76

- [95] KEMPSKI, J. v.: *Brechungen - Kritische Versuche zur Philosophie der Gegenwart*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag, 1964
- [96] KIRSCH, W.: *Entscheidungsprozesse, Bd. II: Informationsverarbeitungstheorie des Entscheidungsverhaltens*. Wiesbaden, 1971
- [97] KLEBELSBERG, D.: *Risikoverhalten als Persönlichkeitsmerkmal*. Bern: Huber, 1969
- [98] KLEBELSBERG, D.: *Verkehrspsychologie*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1982
- [99] KNAUER, M.: *Bilevel-Optimalsteuerung mittels hybrider Lösungsmethoden am Beispiel eines deckengeführten Regalbediengeräts in einem Hochregallager*, Universität Bremen, Dissertation, 2009
- [100] KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (Hrsg.): *Verkehrsauffälligkeiten, Zugang im Verkehrszentralregister Jahr 2007*. 2007
- [101] KRAUS, S. ; ALBRECHT, S. ; SOBOTKA, M. ; ULBRICH, M.: Optimisation-based Identification of Situation Determined Cost Functions for the Implementation of a Human-like Driving Style in an Autonomous Car. In: *Proceedings of AVEC 2010, 10th International Symposium on Advanced Vehicle Control*. Loughborough, UK, August 2010
- [102] KRAUS, S. ; ALTHOFF, M. ; HEISSING, B. ; BUSS, M.: Cognition and Emotion in Autonomous Cars. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Xi'an, Shaanxi, China : IEEE Press, June 2009, S. 635–640
- [103] KRAUS, S. ; WANG, C.: Eignung emotionstheoretischer Fahrermodelle für den Einsatz in autonomen Fahrzeugen. In: *1. Automobiltechnisches Kolloquium München*, 2009
- [104] LAZARUS, R. S.: *Psychological stress and the coping process*. New York: McGraw-Hill, 1966
- [105] LEUTZBACH, W. ; PAPAVALIOU, V.: Wahrnehmungsbedingungen und sicheres Verhalten im Straßenverkehr: Wahrnehmung in konkreten Verkehrssituationen / Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Unfallforschung. 1988 (177). – Forschungsbericht
- [106] LEVENTHAL, H.: Toward a comprehensive theory of emotion. In: *Advances in Experimental Social Psychology* 13 (1980), S. 139–207
- [107] LOHMANN, B.: *Vorlesungsskript: Moderne Methoden der Regelungstechnik 1*, Technische Universität München, 2008
- [108] LÜCK, H. E.: *Die Feldtheorie und Kurt Lewin. Eine Einführung*. Weinheim: Psychologie Verlags Union, 1996
- [109] LUFT, J.: *Einführung in die Gruppendynamik*. Stuttgart: Klett, 1971
- [110] MACADAM, C. C.: Application of an Optimal Preview Control for Simulation of Closed-Loop Automobile Driving. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* Bd. 11, 1981, S. 393–399
- [111] MAJJAD, R.: *Hybride Modellierung und Identifikation eines Fahrer-Fahrzeug Systems*. Frankreich, Institut National Polytechnique de Nancy, Diss., 1997

- [112] MAREK, J. ; STEN, T.: *Traffic environment and the driver. Driver behavior and training in international perspective*. Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1977
- [113] MAURER, M.: Flexible Automatisierung von Straßenfahrzeugen mit Rechnersehen. In: *Fortschrittberichte VDI, Reihe 12, Nr. 443*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2000
- [114] MAYR, R.: *Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung: Längs- und Querreglung; Spurwechsel- und überholmanöver*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2001
- [115] MCRUER, D. T. ; GRAHAM, D. ; KRENDEL, E. ; REISNER, W.: Human Pilot Dynamics in Compensatory Systems / Air Force Flight Dynamics Laboratory, Wright Patterson AFB. 1965. – Technical Report
- [116] MOCK-HECKER, R.: Wissensbasierte Erkennung kritischer Verkehrssituationen - Erkennung von Plankonflikten. In: *Fortschrittberichte VDI, Reihe 12, Nr. 209*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1994
- [117] MUCKE, E.-K. ; NITZ, S.: *Thesepapier zum Seminar: Allgemeine Soziologie*, Universität Kiel, 2005
- [118] MÜLLER, T.: Fahrerassistenz auf dem Weg zur automatisierten Fahrzeugführung. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 01 (2007), S. 58–64
- [119] NACHTIGALL, W.: *Vorbild Natur. Bionik-Design für funktionelles Gestalten*. Berlin : Springer-Verlag, 1997
- [120] NECULAU, M.: *Modellierung des Fahrerverhaltens: Informationsaufnahme, Regel- und Steuerstrategien in Experiment und Simulation*, Technische Universität Berlin, Diss., 1992
- [121] NEUGEBAUER, L.: *Unternehmertum in der Unternehmung*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht, 1997. – 77–78 S.
- [122] N.N.: *Die Rollentheorie: Soziales Handeln als Rollenhandeln*. <http://www.frida-levy-gesamtschule.de/busse/sozialerolle.pdf>, Abruf: 25.08.2010
- [123] N.N.: *Situation in der Kartographie*. <http://www.wissen.de/wde/generator/wissen/ressorts/natur/index,page=1242294.html>, Abruf: 25.08.2010
- [124] OATLEY, K. ; JOHNSON-LAIRD, P. N.: Towards a cognitive theory of emotions. In: *Cognition and Emotion* 1 (1987), S. 29–50
- [125] OLSEN, E. C. B.: Analysis of Distribution, Frequency, and Duration of Naturalistic Lane Changes. In: *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings, Surface Transportation* (2002), S. 1789–1793(5)
- [126] OPPELT, W. ; VOSSIUS, G.: *Der Mensch als Regler*. Berlin : VEB Verlag, 1970
- [127] OPTRONIK, A. Fraunhofer-Institut f. Systemtechnik und Bildauswertung: Kwiatkowski K. Systemtechnik und Bildauswertung: Kwiatkowski ; WERNER, H.: *LPV Gain Scheduling - Modellierung und Reglerentwurf am Beispiel der Füllungsregelung eines Ottomotors*. <http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/9951/Abstract-Werner.pdf>, Abruf: 25.08.2010

- [128] ORTONY, A. ; CLORE, G. L. ; COLLINS, A.: *The Cognitive Structure of Emotions*. Cambridge University Press, 1988
- [129] PHATAK, A. ; WEINERT, H. ; SEGALL, I. ; DAY, C. N.: Identification of a Modified Optimal Control Model for the Human Operator. In: *Automatica* 12 (1976), Januar, Nr. 1, S. 31–41
- [130] PIETSCH, R. ; SCHIMMEL, C. ; HEISSING, B.: Objective assessment of handling performance. In: *chassis.tech*. München, March 2009
- [131] PLUTCHIK, R.: Outlines of a new theorie of emotion. In: *Transactions of the New York Academy of Sciences* Bd. 20, 1958, S. 394–403
- [132] PROKOP, G.: Modeling Human Vehicle Driving by Model Predictive Online Optimization. In: *Vehicle System Dynamics* 35 (2001), Nr. 1, S. 19–53
- [133] RAAB, J.: *Erving Goffman*. Konstanz: UVK, 2008
- [134] RABINER, L. R.: A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. In: *Proceedings of the IEEE* 77 (1989), Nr. 2, S. 257–286
- [135] RABINER, L. R. ; JUANG, B.-H.: *Fundamentals of Speech Recognition*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall PTR, 1993
- [136] RASMUSSEN, J.: *Information processing and human-machine-interaction*. Roskilde, Risø National Laboratory, Diss., 1986
- [137] REICHARDT, D. M.: Approaching Driver Models Which Integrate Models Of Emotion And Risk. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2008, S. 234–239
- [138] REICHART, G.: Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen. In: *Fortschrittberichte VDI, Reihe 22, Nr. 7*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2001
- [139] REICHEL, W.: *Ein adaptives Fahrermodell zur Bewertung der Fahrdynamik von Pkw in kritischen Situationen*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1990
- [140] REILLY, W. S.: *Believable Social and Emotional Agents*. Pittsburgh, PA, Carnegie Mellon University, Diss., March 1996
- [141] REUTHER, E.-U.: *Einführung in den Bergbau*. Bd. 1. Auflage. Essen: Glückauf Verlag, 1982
- [142] RISSE, H. J.: Das Fahrverhalten bei normaler Fahrzeugführung. In: *Fortschrittberichte VDI, Reihe 12, Nr. 160*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1991
- [143] RITTER, N.: *Recherche und Vergleich aktueller Forschungsarbeiten zur Fahrzeugumfeldererkennung im Automobilbereich*, Universität Lüneburg, Diplomarbeit, 2008
- [144] ROPOHL, G.: *Eine Systemtheorie der Technik: zur Grundlegung der allgemeinen Technologie*. München/Wien: Hanser, 1979

- [145] ROSEMAN, I. J.: Cognitive aspects of emotion and emotional behavior. In: *Proceedings of the 87th Annual Convention, American Psychological Association*. New York, NY, 1979
- [146] ROSEMAN, I. J. ; ANTONIOU, A. A. ; JOSE, P. A.: Appraisal Determinants of Emotions: Constructing a More Accurate and Comprehensive Theory. In: *Cognition and Emotion* 10 (1996), Nr. 3, S. 241–277
- [147] RUNKEL, M.: *Die Bedeutung der Sichtbehinderung durch Lastkraftwagen für Überholvorgänge auf zweispurigen Landstraßen*, TH Stuttgart, Diss., 1969
- [148] RUSSELL, J. A.: A circumplex model of affect. In: *Journal of Personality and Social Psychology* 39 (1980), S. 1161–1178
- [149] SALVUCCI, D. D. ; LIU, A. ; BOER, E. R.: Control and monitoring during lane changes. In: *To appear in Vision in Vehicles 9* (2001)
- [150] SANDKÜHLER, D. ; BENMIMOUN, A.: Verkehrssituationserkennung: Entwicklungsmethoden, -werkzeuge und Anwendung. In: *VDI-Tagung „Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme“*. Wolfsburg, Oktober 2004
- [151] SAXTON, L. ; SCHOENE, G.: Federal IVHS program initiatives resulting from ISTEAs of 1991. In: *International Congress on Transportation Electronics*, 1992, S. 319–328
- [152] SCHACHTER, S. ; SINGER, J. E.: Cognitive, social, and physiological determinants of emotional state. In: *Psychological Review* 69 (1962), Nr. 5, S. 379–399
- [153] SCHERER, K. R. ; SCHERER, K. R. (Hrsg.) ; EKMAN, P. (Hrsg.): *On the nature and function of emotion: A component process approach*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1984. – 293–317 S.
- [154] SCHULTE, H.: *Approximative Modellierung, Systemidentifikation und Reglerentwurf mittels gewichteter Kombination lokaler Zustandsraummodelle am Beispiel fluidischer Antriebe*. Kassel, Universität Kassel, Diss., Juni 2005
- [155] SHARP, R. S. ; CASANOVA, D. ; SYMONDS, P.: A mathematical model for driver steering control, with design, tuning and performance results. In: *Vehicle System Dynamics* 33 (2000), Nr. 5, 289–326. <http://www.informaworld.com/index/CB02APKKDG613WWW.pdf>
- [156] SHLADOVER, S. E.: The California PATH program: A state approach to IVHS research. In: *International Congress on Transportation Electronics*, 1992, S. 329–338
- [157] SIEDERSBERGER, K.-H.: *Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-)autonomen Fahrzeugen*. Neubiberg, Universität der Bundeswehr München, Diss., 2003
- [158] SILVA, P. R. D. ; OSANO, M. ; MARASINGHE, A. ; MADURAPPERUMA, A. P.: A Computational Model for Recognizing Emotion with Intensity for Machine Vision Applications. In: *IEICE Transactions on Information Systems* Bd. E89-D. Oxford, UK : Oxford University Press, 2006, S. 2171–2179

- [159] SÖHNITZ, I.: *Querregelung eines autonomen Straßenfahrzeugs*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2001
- [160] SPINDLER, W.: *Wege, Querbekleunigung und die Wahl der überholwege bei der Kurvenfahrt von Kraftfahrzeugen*, Technische Universität München, Diss., 1962
- [161] SPORRER, A. ; PRELL, G. ; BUCK, J. ; SCHAIBLE, S.: Realsimulation von Spurwechselfvorgängen im Straßenverkehr. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 3 (1998), S. 69–76
- [162] STEIN, W. H.: *Untersuchungen zur Fahrzeug- und Prozeßführung unter Berücksichtigung des menschlichen Überwachungs- und Entscheidungsverhaltens*, Gesamthochschule Kassel, Diss., 1985
- [163] STEMPFLE, H.: *Systemtheorie im Brückenbau*. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 2008
- [164] STÜKER, D.: *Heterogene Sensordatenfusion zur robusten Objektverfolgung im automobilen Straßenverkehr*, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Diss., 2004
- [165] TEGEL, A.: *Emotionsbasierte Situationsklassifizierung und Analyse des menschlichen Fahrverhaltens unter Anwendung eines optimaltheoretischen Ansatzes*, Technische Universität München, unveröffentlichte Diplomarbeit, 2010
- [166] TESIS DYNAAWARE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE SIMULATION UND SOFTWARE MBH: *TESIS DYNAAware: veDYNA Traffic Modul*. <http://dynaware.thesis.de/de/index.php?page=583>, Abruf: 25.08.2010
- [167] THUY, M. ; GOEBL, M. ; RATTEI, F. ; ALTHOFF, M. ; OBERMEIER, F. ; HAWE, S. ; NAGEL, R. ; KRAUS, S. ; WANG, C. ; HECKER, F. ; RUSS, M. ; SCHWEITZER, M. ; LEÓN, F. P. ; FÄRBER, G. ; BUSS, M. ; DIEPOLD, K. ; EBERSPÄCHER, J. ; HEISSING, B. ; WÜNSCHE, H.-J.: Kognitive Automobile - Neue Konzepte und Ideen des Sonderforschungsbereiches/TR-28. In: *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*. Garching bei München, 2008
- [168] THUY, M. ; LEÓN, F. P.: Non-Linear Multimodal Object Tracking Based on 2D Lidar Data. In: *Metrology and Measurement Systems XVI* (2009), Nr. 3, S. 359–369
- [169] TOMKINS, S. S.: *Affect Imagery Consciousness: Volume I, The Positive Affects*. London: Tavistock, 1962
- [170] TUSTIN, A.: The effects of backlash and speed-dependant friction on the stability of closed-cycle control system. In: *J. Inst. Elec. Eng* 94 (1947), Nr. 2A, S. 143–151
- [171] UNGOREN, A. Y. ; PENG, H.: An Adaptive Lateral Preview Driver Model. In: *Vehicle System Dynamics* 43 (2005), April, Nr. 4, S. 245–259
- [172] VACEK, S.: *Videogestützte Umfelderkennung zur Interpretation von Verkehrssituationen für kognitive Automobile*, Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH), Diss., 2008
- [173] VALINS, S.: Cognitive Effects of False Heart-Rate Feedback. In: *Journal of Personality and Social Psychology* 4 (1966), S. 400–408

-
- [174] VELÁSQUEZ, J. D.: *Cathexis: A Computational Model for the Generation of Emotions and their Influence in the Behavior of Autonomous Agents*, Massachusetts Institute of Technology, Diplomarbeit, September 1996
- [175] VELÁSQUEZ, J. D.: Modeling Emotions and Other Motivations in Synthetic Agents. In: *Proceedings of the 14th National Conference on Artificial Intelligence*. Providence, RI, 1997, S. 10–15
- [176] VITERBI, A.: Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm. In: *IEEE Transactions on Information Theory* Bd. 13, 1967, S. 260–269
- [177] VOY, C. ; HAMM, L. ; PANIK, F. ; REISTER, D.: PROMETHEUS, ein europäisches Forschungsprojekt zur Gestaltung des Straßenverkehrs der Zukunft. In: *VDI-Berichte Nr. 612, S. 1-13*. 1986
- [178] WÄCHTER, A. ; BIEGLER, L. T.: On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. In: *Mathematical Programming* 106 (2006), Nr. 1, S. 25–57
- [179] WALDMANN, P.: *Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems zum Erlernen der Idealinie auf Rennstrecken*, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Diss., 2008
- [180] WALLENTOWITZ, H.: *Einführung in die Fahrerassistenz - sicherheitsrelevante Bordsysteme - Folien zur Vorlesung Kraftfahrzeuge III*. Aachen, RWTH-Aachen, 2004
- [181] WALLIS, G. ; CHATZIASTROS, A. ; BÜLTHOFF, H.: An Unexpected Role for Visual Feedback in Vehicle Steering Control. In: *Current Biology* 12 (2002), S. 295–299
- [182] WANG, C. ; KRAUS, S.: Safety Concept of the Cognitive Vehicle Control. In: *Proceedings of the FISITA World Automotive Congress*. Munich, Germany, 2008, S. 465–477
- [183] WEISS, E.: Untersuchung und Rekonstruktion von Ausweich- und Fahrspurwechselforgängen. In: *Fortschrittberichte VDI, Reihe 12, Nr. 96*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1988
- [184] WELLEK, S.: *Testing Statistical Hypotheses of Equivalence*. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC Press, 2002
- [185] WELLER, G. ; SCHLAG, B.: Kriterien zur Beurteilung von Fahrerassistenzsystemen. In: *BDP-Kongress für Verkehrspsychologie*. Regensburg, 2002
- [186] WESTLEY, B. ; MCLEAN, M.: A conceptual model for mass communication research. In: *Journalism Quarterly* 34 (1957), S. 36
- [187] WIEDEMANN, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses / Institut für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe. 1974 (8). – Technischer Bericht
- [188] WILTSCHKO, T.: *Sichere Information durch infrastrukturgestützte Fahrerassistenzsysteme zur Steigerung der Verkehrssicherheit an Straßenknotenpunkten*, Universität Stuttgart, Diss., 2004
- [189] WINNER, H. ; HAKULI, S. ; WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2009

- [190] WITHALM, G.: *Kommunikationswissenschaft, Medienforschung & SEMIOTIK 21: Kommunikations-Modelle*. Wien, Universität für angewandte Kunst, Proseminar WS 2008/09, 2008
- [191] WOLF, H.: *Untersuchung des Lenkgefühls von Personenkraftwagen unter besonderer Berücksichtigung ergonomischer Erkenntnisse und Methoden*, Technische Universität München, Diss., 2008
- [192] ZELLER, M.: Planerkennung im Straßenverkehr. In: *Fortschrittberichte VDI, Reihe 12, Nr. 282*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996
- [193] ZERVOS, S.: *Sartre zwischen Freud und Marx: Subjektivität und Identität in Theorie und Literatur*. Hamburg: Kovač, 2009
- [194] ZIMBARDO, P. G.: *Lehrbuch der Psychologie*. Berlin: Springer Verlag, 1995