

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Stauassistenz — Längs- und Querführung im Bereich niedriger Geschwindigkeit

Dipl.-Ing. Univ. Thomas Schaller

Vollständiger Abdruck der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor – Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing

2. Hon.-Prof. Dr.-Ing. habil. Raymond F. Freymann

Die Dissertation wurde am 03.04.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 01.10.2009 angenommen.

Danksagung

Ich möchte allen Personen danken, die mich während der letzten Jahre unterstützt haben:

Allen voran gilt mein Dank meinen Gutachtern Herrn Prof. Dr. Heißing und Herrn Prof. Dr. Freymann für die Betreuung meiner Dissertation.

Die Idee für die Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Abteilung ZT-3 der BMW Forschung und Technik. Hierbei möchte ich mich im Besonderen bei meinen Vorgesetzten Dr. Spannheimer und Dr. Wisselmann bedanken, die mir diese Arbeit ermöglicht und mir den nötigen Freiraum für ihre Bearbeitung gelassen haben.

Für die inhaltliche Unterstützung möchte ich im Besonderen Dr. Kilian Funk danken, durch dessen Einflussnahme der wissenschaftliche Schwerpunkt und die Idee zu der Arbeit entstanden sind. Besonders für seine Unterstützung danken möchte ich auch Dr. Nico Kämpchen, der mir geholfen hat, die Arbeit inhaltlich abzurunden.

Vielen Dank an alle Mitarbeiter der Abteilung ZT-3, die mir in fachlichen Fragen zur Seite gestanden haben. Danke auch an die Studenten Jan-Philipp Gertges, Frank Neumann und Andreas von Eichhorn, die sich mit dem Thema beschäftigt haben.

Schließlich möchte ich mich noch bei meinen Eltern für ihre Unterstützung während meiner Studienzeit danken.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Sonja, die mich während dieser arbeitsreichen Zeit geduldig und liebevoll unterstützt und mir den Rücken freigehalten hat. Danke auch für das beständige Korrekturlesen!

Dorfen, Dezember 2009

Thomas Schaller

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	5
1 Einleitung	9
1.1 Einleitung und Motivation	9
1.2 Zielsetzung der Arbeit	10
1.3 Stand der Technik	10
1.3.1 Forschungsaktivitäten in den USA und Europa	11
1.3.2 Abgrenzung zu den bestehenden Systemen	14
2 Randbedingungen und Anforderungen an die kombinierte Längs- und Querführung	15
2.1 Definition des Begriffs Stau im Bezug auf die Verkehrsqualität	15
2.2 Situationsklassifikation im Stau	17
2.2.1 Subjektive Situationsklassifikation	18
2.2.2 Erweiterung der Situationen	21
3 Anforderungen an ein Stauassistentz-System	24
3.1 Beschreibung der Randbedingungen für den Einsatz eines Stauassistentz-Systems	25
3.1.1 Allgemeiner Einsatzbereich des Stauassistentz-Systems	25
3.1.2 Bewertung der klassifizierten Situationen	25
3.1.3 Fußgänger, Fahrradfahrer und Motorradfahrer	26
3.1.4 Witterungsbedingte Einschränkungen und allgemeiner Straßenzustand	26
3.2 Fahrdynamische Anforderungen	27
3.2.1 Grenzgesewindigkeit der Längs- und Querführung	27
3.2.2 Längsdynamik im Stau	28
3.2.3 Querdynamik im Stau	29
3.3 Komfort- und Sicherheitsanforderungen	30
3.4 Zusammenfassung der Anforderungen	30
4 Sensorik und Aktorik	33
4.1 Sensorik zur Erfassung der Eigenfahrzeugdaten	33
4.2 Die Fahrumfelderfassung	34
4.2.1 Anforderungen an die Fahrumfelderfassung	34
4.2.1.1 Abdeckungsbereich der Fahrumfelderfassung	34
4.2.1.2 Auflösungsvermögen der Fahrumfelderfassung	37
4.2.2 Betrachtung relevanter Sensortechnologien	38
4.2.2.1 Der Radar-Sensor	38
4.2.2.2 Der Lidar-Sensor	39
4.2.2.3 Videobasierte Bildverarbeitung	39
4.2.2.4 Weitere Sensortechnologien	40
4.2.3 Sensorauswahl für die Fahrumfelderfassung	41

4.3	Die Aktorik	42
4.3.1	Anforderung an die Aktorik	42
4.3.2	Das Aufbringen eines zusätzlichen Lenkmoments	43
4.3.3	Motor- und Bremsmomentenschnittstelle	43
5	Situationsinterpretation in Stausituationen	44
5.1	Modellhafte Beschreibung des Fahrzeugumfelds im Stau	45
5.1.1	Das Trajektorienmodell	45
5.1.2	Bewegungsgleichungen eines Fahrzeugs entlang der Trajektorie	46
5.1.3	Die Trajektorie zum Vorderfahrzeug	47
5.1.4	Beschreibung der Gassenbegrenzung in Stausituationen	47
5.2	Die Zustandsbeobachtung	48
5.2.1	Systemgleichung aus der modellhaften Beschreibung	48
5.2.2	Messgleichung aus der modellhaften Beschreibung	49
5.2.3	Rauschanteil und Varianten der Zustandsbeobachtung	50
5.2.4	Diskretisierung der Prozess- und Messgleichung	55
5.3	Aufbereitung der Eingangs- und Messgrößen	57
5.3.1	Berechnung und Aufbereitung der Gierrate und des Schwimmwinkels	57
5.3.2	Tracking der Sensor-Rohdaten zu Fahrzeug-Objekten	61
5.3.3	Die Objektauswahl	62
5.3.4	Daten-Assoziation für die Gassenbegrenzungen	64
5.4	Entwicklung des Gassenbeobachters in der Simulation	68
5.4.1	Closed-Loop-Simulationsumgebung	68
5.4.2	Parametrierung des Beobachters	69
5.4.3	Verhalten beim Folgen eines Vorderfahrzeugs	71
5.4.3.1	Die Berechnung der Vorderfahrzeug-Historie	73
5.4.3.2	Die Vorderfahrzeug-Historie als Messdatum des Gassenbeobachters	75
5.4.4	Die Berücksichtigung der Gassenbegrenzungsdaten im Gassenbeobachter	77
5.4.4.1	Einfluss der Gassenbegrenzungsdaten auf das Folgeverhalten	77
5.4.4.2	Systemreaktion auf zu nahe seitliche Objekte	79
5.5	Der Spurwechsel des Vorderfahrzeug-Objekts	83
5.5.1	Zur Verfügung stehende Klassifikationsalgorithmen	83
5.5.2	Grundlagen zu Bayes'sche Netze	84
5.5.3	Bayes'sche Netze zur Erkennung von Spurwechseln	86
5.5.3.1	Die Extraktion der Merkmale	87
5.5.3.2	Topologie der Bayes'schen Netze	91
5.5.3.3	Parametrierung der Klassifikatoren mittels SiL-Simulation	92
5.5.3.4	Granularisierung der Eingangswerte	94
5.5.3.5	Die Gewichtung der Merkmale	95
5.5.4	Bewertung der Klassifikatoren	97
5.5.5	Reaktion des Gassenbeobachters auf einen Spurwechsel	99
5.6	Der Verifikations-Block – Vergleich der Trajektorien	99
5.7	Die Beobachtbarkeit der Gassenbeobachter-Systemzustände	103
6	Regelungstechnische Ansätze für die Quer- und Längsführung	105
6.1	Die Querregelung entlang einer vorgegebenen Bahn	105
6.1.1	Der Prädiktions-Regler	106
6.1.2	Betrachtung der Stabilität des Querregelkreises	107
6.2	Die Längsregelung	110

7	Das HMI des Stauassistentz-Systems	112
7.1	Anforderung an das HMI	113
7.2	Das Längsführungs-HMI	113
7.3	Das Querführungs-HMI	114
7.4	Warnstrategie bei Überschreitung der Systemgrenzen	115
7.4.1	Systemgrenzen der Längsführung	115
7.4.2	Systemgrenzen der Querführung	115
8	Das Stauassistentz-System in der Fahrsimulation	117
8.1	Die Akzeptanz-Untersuchung im Fahrsimulator	118
8.1.1	Die Versuchsdurchführung	118
8.1.2	Die kritischen Situationen	118
8.1.3	Bewertung des Kundennutzens durch die Probanden	122
8.1.4	Versuchsergebnisse zur Beherrschbarkeit der Systemgrenzen	124
8.2	Diskussion der Fahrsimulator-Untersuchungsergebnisse	127
9	Das Stauassistentz-System im Realfahrzeug	128
9.1	Der Versuchsträger	128
9.1.1	Die Sensorkonfiguration des Versuchsträgers	129
9.1.2	Die Rapid-Prototyping Plattform	130
9.2	Der Stauassistentz-Algorithmus im Realfahrzeug	131
9.2.1	Verhalten beim Folgen eines Vorderfahrzeugs	131
9.2.2	Systemreaktion auf ein nahes seitliches Objekt	132
9.2.3	Die Querregelung	133
10	Zusammenfassung und Ausblick	134
	Literaturverzeichnis	137
	Betreute Diplomarbeiten, Veröffentlichungen und Patente	143

Formelzeichen

Lateinische Symbole

A		Systemmatrix des linearen Zustandmodells
A_{80}		Klothoidenparameter, Entwurfsgeschwindigkeit 80 km/h (Straßenbau)
A_D		Systemmatrix des diskretisierten Zustandmodells
a		Systemvariable des linearen Zustandmodells
age_{FC}	[s]	Zeitdauer, wie lange das Vorderfahrzeug getrackt wurde
a_{D0}		Diskretisierte Systemvariable
a_q	[m/s ²]	Quereschleunigung des Eigenfahrzeugs
a_{soll}	[m/s ²]	Sollbeschleunigung der Längsführung
$a_{x,max}$	[m/s ²]	Maximal mögliche Längsbeschleunigung der Längsführung
a_x	[m/s ²]	relative Beschleunigung in x-Richtung
a_y	[m/s ²]	relative Beschleunigung in y-Richtung
\hat{a}_z	[m/s ²]	geschätzte Längsbeschleunigungs-Störung
B		Eingangsmatrix des linearen Zustandmodells
B_D		Eingangsmatrix des diskretisierten Zustandmodells
b		Eingangsvariable des linearen Zustandmodells
b_{avoid}	[m]	Beginn des Ausweichens bei einer nahen Gassenbegrenzung
b_{D0}		diskretisierte Eingangsvariable
b_{EV}	[m]	Eigenfahrzeug-Spurbreite
b_L	[m]	Betrag des Abstands der linken Gassenbegrenzung zur Solltrajektorie
b_{min}	[m]	Mindestbreite eines v. d. Umfeldsensors zu erkennenden Fahrzeugs
b_R	[m]	Betrag d. Abstands d. rechten Gassenbegrenzung zur Solltrajektorie
b_{sec_min}	[s]	minimaler Sekundenabstand des Seitenbereichs
C		Ausgangsmatrix der Messgleichung
C_B		confusion matrix des Klassifikators
C_D		Ausgangsmatrix der diskretisierten Messgleichung
\underline{c}		Ausgangsvektor der Messgleichung
\underline{c}_{D0}		diskretisierter Ausgangsvektor
c_h	[N/rad]	Schräglaufsteifigkeit des Fahrzeugs hinten
c_v	[N/rad]	Schräglaufsteifigkeit des Fahrzeugs vorne
D		Durchschaltmatrix der Messgleichung
d_0	[m]	Stillstandsabstand in der Längsführung
d_{opt}	[-]	geringster Abstand zu einem optimalen Klassifikator
d_s	[m]	Anhalteweg der Längsführung
d_{soll}	[m]	Sollabstand in der Längsführung
d_x	[m]	Relativer Abstand in x-Richtung
d_y	[m]	Relativer Abstand in y-Richtung

\underline{e}		Schätzfehlervektor
\underline{e}_k		Fehler des optimalen Zustands-Schätzwertes
\underline{e}_k^*		Fehler des vorausgesagten Zustands-Schätzwertes
FC_limit_in	$[m]$	Suchbereich für ein neu detektiertes Vorderfahrzeug
FC_limit_out	$[m]$	Suchbereich für ein bereits detektiertes Vorderfahrzeug
FP		false positive rate
$G1$		linke Grenze der Zugehörigkeitsfunktion
$G2$		rechte Grenze der Zugehörigkeitsfunktion
I		Einheitsmatrix
I_{EV}	$[-]$	Lenkübersetzung
k	$[Fz/km]$	Verkehrsdichte
k_d	$[1/s]$	Gewichtungsfaktor der Abstands-Regeldifferenz
k_v	$[1/s]$	Gewichtungsfaktor der Geschwindigkeits-Regeldifferenz
L		Rückführmatrix der Zustandsbeobachtung
L_k		Kalman-Verstärkungsmatrix
$L_{\hat{u}}$	$[m]$	Mindestlänge eines Klothoidenstücks aus dem Straßenbau
l	$[m]$	Objektlänge
l_h	$[m]$	Abstand Hinterachse zum Fahrzeugschwerpunkt
l_v	$[m]$	Abstand Vorderachse zum Fahrzeugschwerpunkt
M		mittlere Stützstelle der Zugehörigkeitsfunktion
m_{EV}	$[kg]$	Fahrzeugmasse
P_{prev}	$[1/m^2]$	Gewichtung der Regelabweichung im Prädiktions-Regler
P_k		a-posteriori-Schätzfehler-Kovarianz
P_k^*		a-priori-Schätzfehler-Kovarianz
Q_D		Kovarianzmatrix des Prozessrauschens
Q_v		Kovarianzmatrix des Prozessrauschens ohne Rauschverstärkung
q	$[Fz/h]$	Verkehrsstärke
R_D		Kovarianzmatrix des Messrauschens
R_{min}	$[m]$	minimaler Straßenradius der Querführung
$R_{min,Lf}$	$[m]$	min. Kurvenradius d. Manöberraum-Trajektorien i. d. Längsführung
\underline{r}		Regelvektor
S_k		Innovations-Kovarianzmatrix
T	$[s]$	Zeitintervall des diskreten Zustandmodells
T_{tot}	$[s]$	Totzeit des Lenkungsmodells
TP		true positive rate
t_a	$[s]$	Sekundenabstand der Längsführung zum Vorderfahrzeug
t_{cid}	$[s]$	cut-in delay, angenommene Zeitdauer eines Einschervorgangs
t_d	$[s]$	Systemreaktionszeit der Längsführung
t_k	$[s]$	Zeitwert zum Zeitschritt k
t_{prev}	$[s]$	Vorausschau-Zeit des Prädiktions-Reglers

t_{stand}	[s]	maximale Stillstandszeit ohne Go-Request
u		Eingangsgröße des linearen Zustandmodells
\underline{u}		Eingangsgrößenvektor des linearen Zustandmodells
\underline{u}_k		zeitdiskreter Eingangsgrößenvektor zum Zeitschritt k
\underline{V}_P		Vektor zwischen zwei Gassenbegrenzungspunkten
\underline{V}_\perp		Vektor senkrecht zur Gassenbegrenzung
\underline{v}		Prozessrauschvektor
\underline{v}_D		zeitdiskreter Prozessrauschvektor
v_{EV}	[m/s]	Geschwindigkeit des Eigenfahrzeugs
$v_{Grenz,Qf}$	[km/h]	obere Geschwindigkeitsgrenze der Querführung
v_m	[km/h]	mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsstroms
v_{vl}	[m/s]	Geschwindigkeit am linken Vorderrad
v_{vr}	[m/s]	Geschwindigkeit am rechten Vorderrad
v_x	[m/s]	relative Geschwindigkeit in x-Richtung
v_y	[m/s]	relative Geschwindigkeit in y-Richtung
Δv_F	[m/s]	Geschwindigkeitsdifferenz der Vorderräder
Δv_{yFL}	[m/s]	y-Geschwindigkeit d. Fahrzeugs vorne links zur Trajektorie
Δv_{yFR}	[m/s]	y-Geschwindigkeit d. Fahrzeugs vorne rechts zur Trajektorie
\underline{w}		Messrauschvektor
w	[m]	Objektbreite
\underline{w}_D		zeitdiskreter Messrauschvektor
w_{EV}	[m]	Breite des Eigenfahrzeugs
w_{FC}	[m]	Breite des Vorderfahrzeugs
x		Zustandsgröße
\underline{x}		Zustandsvektor des linearen Zustandmodells
$\hat{\underline{x}}$		Schätzung des Zustandsvektors
x_{FC}	[m]	x-Koordinate des Vorderfahrzeugs
x'_{FC}	[m]	Verschiebung der Vorderfahrzeug-Position in x-Richtung
\underline{x}_k		zeitdiskreter Zustandsvektor zum Zeitschritt k
$\hat{\underline{x}}_k^*$		vorausgesagter Schätzwert des Zustandsvektors
$\hat{\underline{x}}_k$		optimaler Zustandsvektor zum Zeitschritt k
x_L	[m]	x-Koordinate eines Punktes auf der linken Gassenbegrenzung
x_R	[m]	x-Koordinate eines Punktes auf der rechten Gassenbegrenzung
x_S	[m]	x-Koordinate des Lidar-Rohdatums
x_T	[m]	x-Koordinate eines Punktes auf der Solltrajektorie
Δx_{EV}	[m]	x-Verschiebung des Eigenfahrzeugs innerhalb eines Zeitschritts
\underline{y}		Messgrößenvektor
$\hat{\underline{y}}$		geschätzter Messgrößenvektor
y_0	[m]	Abstand zwischen Fahrzeug und Solltrajektorie
y_{FC}	[m]	y-Koordinate des Vorderfahrzeugs

y'_{FC}	[m]	Verschiebung der Vorderfahrzeug-Position in y-Richtung
\underline{y}_k		zeitdiskreter Messgrößenvektor zum Zeitschritt k
y_L	[m]	y-Koordinate eines Punktes auf der linken Gassenbegrenzung
y_{Offset}	[m]	Offset in der Solltrajektorie bei einem seitlich zu nahen Objektiv
y_R	[m]	y-Koordinate eines Punktes auf der rechten Gassenbegrenzung
y_S	[m]	y-Koordinate des Lidar-Rohdatums
y_T	[m]	y-Koordinate eines Punktes auf der Solltrajektorie
Δy_{EV}	[m]	y-Verschiebung des Eigenfahrzeugs innerhalb eines Zeitschritts
Δy_{FL}	[m]	y-Abstand des Fahrzeugs vorne links zur Trajektorie
Δy_{FR}	[m]	y-Abstand des Fahrzeugs vorne rechts zur Trajektorie

Griechische Symbole

β_{EV}	[rad]	Schwimmwinkel des Eigenfahrzeugs
Γ		Rauschverstärkungs-Matrix des Prozessrauschens
δ	[rad]	Lenkwinkel am Vorderrad
δ_{STWA}	[rad]	Lenkradwinkel
θ_Δ	[rad]	Orientierung des Fahrzeugs zur Solltrajektorie
θ_{diff}	[rad]	Winkel zwischen den Vektoren \vec{V}_P und \vec{V}_\perp
$\theta_L(x_L)$	[rad]	Tangente zur linken Gassenbegrenzung am Punkt x_L
θ_{grenz}	[rad]	Winkel d. Ungültigkeitsbereichs eines Gassenbegrenzungspunktes
θ_{ijk}		Tabelleneinträge der Übergangsfunktion der Bayes'schen Netze
Θ	[kg m ²]	Gierträgheitsmoment des Fahrzeugs
κ_{max}	[1/m]	maximale Straßenkrümmung der Querführung
κ'_{max}	[1/m ²]	maximale Krümmungsänderung der Querführung
κ_{soll}	[1/m]	Sollkrümmung des Eigenfahrzeugs
κ_T	[1/m]	Krümmung der Solltrajektorie
κ'_T	[1/m ²]	Krümmungsänderung der Solltrajektorie
μ		Singularitätsfaktor
σ_x	[m]	Standardabweichung des Abstands in x-Richtung
σ_y	[m]	Standardabweichung des Abstands in y-Richtung
σ_{bL}	[m]	Standardabweichung d. Abstandes d. linken Gassenbegrenzung
σ_{bR}	[m]	Standardabweichung d. Abstandes d. rechten Gassenbegrenzung
$\sigma_{\kappa'_T}$	[1/m ²]	Standardabweichung d. Krümmungsänderungs-Prozessrauschens
$\dot{\Psi}_{EV}$	[rad/s]	Gierrate des Eigenfahrzeugs
$\dot{\Psi}_{mess}$	[rad/s]	gemessene Gierrate

1 Einleitung

1.1 Einleitung und Motivation

Die Stausituation – jeder Autofahrer empfindet sie als belastend und störend. Der meist unvorhergesehene zusätzliche Zeitaufwand durch einen Stau bei einer Fahrt zur Arbeit, zum Einkaufen, zu Freunden oder in den Urlaub birgt ein hohes Maß an Unzufriedenheit, Stress und Aggression. Abgesehen vom volkswirtschaftlichen Schaden, der sich laut ADAC in Deutschland täglich auf 250 Millionen Euro beläuft [1], entsteht zusätzlich ein erhöhtes Unfallrisiko.

Das Gefahrenpotential von Stausituationen zeigt sich überwiegend in Ballungsgebieten: So besagt die Verkehrsunfallstatistik der Autobahnpolizei Köln, dass etwa ein Viertel der Unfälle auf Autobahnen sich dort am Stauende oder im Stau ereigneten [2]. Ein Großteil hiervon sind Auffahrunfälle, wie Bild 1.1 zeigt.

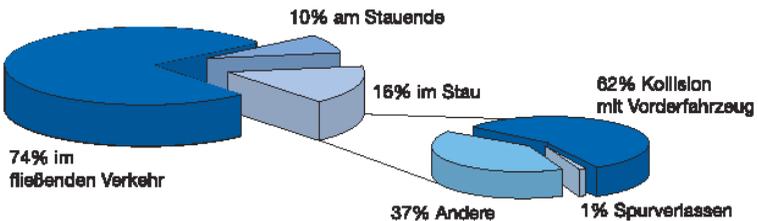


Bild 1.1: Aufteilung der Verkehrsunfälle im Autobahngebiet um Köln [2]

Staus werden wohl auch in Zukunft zu unserem Straßenbild gehören: Das statistische Bundesamt rechnet in seinem Datenreport 2004 [3] mit einer Zunahme des Pkw-Individualverkehrs bis 2015 um 16%, des Lkw-Nahverkehrs um 26% und des Lkw-Fernverkehrs um 58%, bezogen auf das Basisjahr 1997. In Ballungszentren ist diese Zunahme jetzt schon deutlich zu spüren.

Durch intelligente Verkehrsleitsysteme wird bereits heute versucht, die vorhandene Infrastruktur optimal zu nutzen. Hierbei können Verkehrsströme beeinflusst werden. Wechselverkehrszeichen auf Autobahnen geben Warnhinweise oder Geschwindigkeitsbeschränkungen, aber auch Umleitungsempfehlungen. Obwohl durch diese Maßnahmen ein Rückgang von Staus um 15% erhofft wird, kommt man in [4] zu dem Ergebnis, dass Verkehrstelematik diese Probleme nicht vollständig lösen wird.

Um dem Fahrer während des auch in Zukunft unvermeidbaren Staus mehr Fahrkomfort und -sicherheit zu gewährleisten, bietet sich an, ihm ein Stau-Assistenzsystem zur Verfügung zu stellen, das ihn bei der Fahrzeugführung unterstützt, oder Teilbereiche der Fahraufgabe abnimmt. Allgemein werden Fahrerassistenzsystemen laut ADAC ein hohes Potential an zusätzlicher Verkehrssicherheit und Komfort zugesprochen [5].

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Seit den Zeiten des wegweisenden Projekts PROMETHEUS (Programme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety) wird häufig das vollautonome Fahrzeug als ein mögliches Ziel der Entwicklung dargestellt [6] – v. a. um die steigenden Anforderungen an die Verkehrssicherheit zu erfüllen und die Überlastung des Straßennetzes zu verhindern. Unabhängig von den enormen technischen Herausforderungen kann jedoch schlecht abgeschätzt werden, ob diese Vision bei den Autofahrern Anklang findet. Verschiedene Akzeptanz- und Bedarfsstudien [7,8] lassen eher den Schluss zu, dass Autofahrer autonome Funktionen vor allem für dedizierte Anwendungsfälle bevorzugen. Sie sollen sich am Bedarf des Fahrers orientieren [9]. So wird z.B. eine autonome Notbremsung vor Kollisionen begrüßt und in EU-Projekten untersucht [10], wohingegen eine vollautonome Querführung im gesamten Geschwindigkeitsbereich wenig Akzeptanz findet.

Für ein Stauassistenten-System ergeben sich daher folgende grundsätzliche Ziele und Einschränkungen:

- Anforderung an das System ist nicht die Vollautomatisierung der Fahraufgabe, sondern ein hoher Unterstützungsgrad ohne völligen Verzicht auf Fahrereingaben.
- Systemgrenzen müssen für den Fahrer verständlich und beherrschbar sein.
- Der Fahrer soll durch gezielte Systeminformationen im Loop gehalten werden und sich des Systemzustands jederzeit bewusst sein.
- Begrenzung der Querführung auf den unteren Geschwindigkeitsbereich (Definition einer oberen Grenzgeschwindigkeit der Querführung)

Die hier vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der funktionalen Auslegung eines Stau-Assistenzsystems unter Berücksichtigung folgender Randbedingungen: Der Längsführungsanteil des Systems soll sich weitestgehend an dem ACC Stop&Go Seriensystem [11,12] orientieren. In der Querführung soll das Eigenfahrzeug in einem neuartigen Ansatz redundante Sensorinformationen nutzen. Die dafür benötigte Sensorkonfiguration ist zu definieren. Für die Systemrealisierung müssen unter Berücksichtigung der gewählten Sensorik geeignete Umgebungsmodelle für die Situationsinterpretation gefunden werden. Des Weiteren werden regelungstechnische Ansätze untersucht, um die Stellgrößen über die Schnittstellen zum Fahrzeug (Momentenschnittstelle am Lenkrad, Brems- und Motormomentenschnittstelle) einzuregulieren. Ein Anzeige- und Bedienkonzept (*HMI – Human Machine Interface*) ist zu entwickeln. Ein weiterer Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Akzeptanz eines Systems mit einem derart hohen Unterstützungsgrad und der Beherrschbarkeit der Systemgrenzen. Juristische Fragen werden nicht betrachtet.

1.3 Stand der Technik

Um der Gesellschaft die Möglichkeit des Transports auch langfristig zu erhalten, wurden in Europa und den USA verschiedene Forschungsprojekte zum Thema ADAS (Advanced Driver Assistance Systems: Fahrerassistenzsysteme) in den

80ern und 90ern ins Leben gerufen, die sich mit dem Thema Automatisierung im Straßenverkehr beschäftigen [13]. ADAS-Systeme sollen den Fahrer bei seiner Fahraufgabe unterstützen und ihm zusätzliche Sicherheit bieten. Der Systemeingriff kann informativ, aber auch teil- oder vollautomatisch geschehen.

In den USA wurden dabei Ansätze untersucht, den Fahrer bei der Fahraufgabe vollständig zu entlasten und die Fahrzeugführung zu automatisieren. Dahingegen versuchte man in Europa, autark arbeitende Komfortsysteme einzuführen, ohne dem Fahrer die Aufgabe der Fahrzeugführung völlig abzunehmen.

1.3.1 Forschungsaktivitäten in den USA und Europa

1991 wurde in den USA das Automated Highway Systems Programm (AHS) ins Leben gerufen, um den Verkehrsproblemen in Ballungsgebieten entgegenzutreten [14]. Die Kapazitätssteigerung sollte hierbei durch vollautomatische Fahrzeugführung erreicht werden. Im Rahmen des Projektes PATH wurde der Fahrspurverlauf durch in die Fahrbahn integrierte „magnetische Nägel“ detektiert [15].

Inzwischen werden auch in den USA mehr fahrerassistenzorientierte Systeme favorisiert, da vollautomatische Systeme meist einen hohen infrastrukturellen Aufwand und hohe Anforderungen an die Sicherheit verlangen. Beispielsweise mit IVI (Intelligent Vehicle Initiative) wird die Entwicklung von Sicherheits- und Informationssystemen, die den Fahrer assistierend unterstützen, gefördert.

In Europa gab es zum Thema ADAS zwei Forschungsrichtungen:

Die eine Forschungsrichtung beschäftigt sich mit der Beeinflussung des Verkehrsgeschehens, um Verkehrsstauungen zu vermeiden. Dabei handelt es sich um rein informative Systeme, die über variable Geschwindigkeitsbegrenzungen und Wechselwegweiser versuchen, die vorhandene Infrastruktur optimal zu nutzen. Hierbei ist das von der Europäischen Union geförderte Forschungsprojekt DRIVE (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe) zu nennen, bei dem infrastrukturelle Eingriffe in das Verkehrsgeschehen im Vordergrund standen [16].

In der zweiten Forschungsrichtung wurde an Fahrerassistenzsystemen gearbeitet, bei denen der Fahrer mit unterschiedlichen Unterstützungsgraden bei der Fahraufgabe assistiert wird. Dies kann durch reine Warnsysteme bis hin zur Abgabe von Längs- und Querregelaufgaben realisiert werden. Aus Gründen der Sicherheit hat der Fahrer jederzeit die Möglichkeit, die Systeme zu übersteuern.

Das Forschungsprojekt PROMETHEUS betrachtete die Integration elektronischer Komponenten und Systeme im Fahrzeug, um dem Fahrer mehr Sicherheit und Mobilität zu ermöglichen [17]. Inhalte dieses Forschungsprojekts waren unter anderem folgende Themen:

- *Sichtverbesserung* bei Nacht mit UV- oder Infrarot- Scheinwerfern
- *Straßenzustandserkennung* mit optischen und akustischen Sensoren
- *Verbesserung der Fahrstabilität*
- *Spurhalteunterstützung* basierend auf Fahrspurerkennung durch Bildverarbeitung
- *Messung der Fahrersichtweite* mit Laser-Sensoren
- *Kollisionsvermeidung*

- *Abstands- und Geschwindigkeitsregelung (ACC)* basierend auf Radar- und Lidarsensoren
- *Kooperatives und koordiniertes Fahren* unter Verwendung von Fahrzeug-Fahrzeug- und Fahrzeug-Infrastruktur-Kommunikation

Nach Abschluss von PROMETHEUS 1994 wurden aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse weitere langfristige Forschungsprojekte zu ADAS durchgeführt. Im Vordergrund standen nun die Demonstration und Implementierung von Fahrerassistenzsystemen. Folgende Projekte sind hierbei zu nennen:

UDC (Urban Drive Control):

Aufgabenstellung war die Kopplung der in PROMETHEUS entwickelten ACC-Funktion mit externen Geschwindigkeitsempfehlungen und Verkehrsregelungssystemen mit dem Ziel, den Verkehrsfluss auf großen städtischen Durchgangsstraßen zu verbessern. Die Geschwindigkeitsempfehlungen wurden über Kurzwellenkommunikation vom Fahrbahnrand aus gesendet [18].

Anti-Collision-Assist (AC-Assist):

Gegenstand der Untersuchung waren die Auswirkungen der Kollisionswarnung und der Intervention durch Notbremsmanöver unter nahezu idealen Sensorik-Bedingungen [19].

AWARE (Anti-Collision Warning and Avoidance Radar Equipment):

Aufgrund von bestehenden Sensordefiziten wurde hier versucht, mit hochauflösender und scannender Radartechnologie eine präzise Erfassung und Zuordnung insbesondere stehender Objekte zur eigenen Fahrtrajektorie zu erreichen.

ISA (Intelligent Speed Adaption):

Um Unfälle aufgrund von hoher Geschwindigkeiten zu vermeiden, wird hierbei der Fahrer über die aktuell zulässige Höchstgeschwindigkeit informiert [20]. Außerdem wurden Ansätze einer aktiven Geschwindigkeitsbegrenzung untersucht, bei denen der Fahrer zur Einhaltung der erlaubten Geschwindigkeit gezwungen wird.

MoTIV (Mobilität und Transport im intermodalen Verkehr):

Bei diesem 1996 in Deutschland gestarteten Forschungsprojekt wurden Möglichkeiten untersucht, die Mobilität zu erhalten und gleichzeitig die unerwünschten Folgen des Verkehrs auf Mensch und Umwelt zu reduzieren [21]. Hierzu zählen u. a. Systeme zur Abbiege- und Spurwechselassistentz, ACC im Ballungsraum und vorausschauendes Fahren durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation.

CHAUFFEUR:

Dieses Projekt hatte die Automation von Lastkraftwagen in der Kolonne [22] zum Schwerpunkt. Für die Längsregelung der Fahrzeuge wurde hier zusätzlich zu Radar- und Bildverarbeitungs-Sensorik die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation genutzt, um Geschwindigkeitsänderungen des Führungsfahrzeugs frühzeitig dem Regler zur Verfügung zu stellen. Für die Querverführung im Geschwindigkeitsbereich von 40-90 km/h wurden zwei Ansätze untersucht:

Einerseits wurde auf die Fahrspurmarkierungen geregelt, deren relative Position über die Bildverarbeitung zur Verfügung stand.

Die zweite Methode bestand darin, nach dem Prinzip der elektronischen Deichsel die Querführung anhand des Führungsfahrzeugs mit einem so kurzen Abstand durchzuführen, dass kein Fahrzeug dazwischen einscheren kann. Es wurde ein rechteckiges Muster an jedem Fahrzeug hinten angebracht, um über die Bildverarbeitung die genaue Querposition des Vorderfahrzeugs zu detektieren.

INVENT (intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik):

In den Jahren 2001 bis 2005 beschäftigte sich diese Forschungsinitiative mit dem Thema „Mehr Sicherheit und Effizienz trotz steigendem Verkehrsaufkommens“ [23]. Es gab drei Projektschwerpunkte:

- Fahrerassistenz / Aktive Sicherheit
- Verkehrsmanagement 2010
- Verkehrsmanagement in Transport und Logistik

Ziel war die Darstellung der Teilprojekte in Demonstrationsfahrzeugen, prototypischen Leitzentralen und Computersimulationen. Im Bereich Fahrerassistenz/Aktive Sicherheit befasste sich das Teilprojekt *Fahrumgebungserfassung und Interpretation (FUE)* mit dem Nutzen verschiedener Lidar-, Radar- und Kamerasysteme zur Umgebungserfassung. Sicherheits-Assistenzsysteme, die dazu beitragen, Unfälle zu vermeiden, wurden in *Vorausschauende Aktive Sicherheit (VAS)* betrachtet und umgesetzt.

Ein weiteres Assistenzsystem, das im Rahmen von INVENT untersucht wurde, war der *Stauassistent (STA)*. Dieses System soll dem Fahrer Unterstützung in Situationen mit geringen Geschwindigkeiten bis hin zum Stillstand bei gleichzeitig hohen Fahrzeugdichten bieten, Längs- und Querführung steht hier in eindeutigen und begrenzt komplexen Umgebungssituationen zur Verfügung. Für die Längsführung wurden unterschiedliche Regelungskonzepte untersucht, jedoch ließen sich gegenüber konventionellen Stop&Go-Regelungskonzepten [12] keine signifikanten Vorteile erkennen. Für die Querregelung nutzte man einen Regelungsansatz für die Spurhaltung [24]. Dabei wird zunächst über Bildverarbeitung die aktuelle Fahrzeugposition ermittelt. Aus dieser Position und dem Winkel relativ zur Spur sowie der Fahrbahnkrümmung und -krümmungsänderung wird ein Solllenkwinkel generiert, der dann über einen Lenkaktor umgesetzt wird (Bild 1.2).

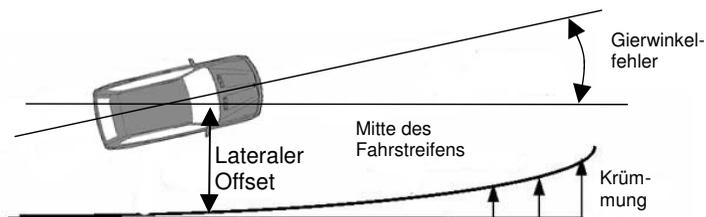


Bild 1.2: Prinzip der Querregelung im INVENT-Projekt STA

Des Weiteren wurde im Rahmen dieses Teilprojekts eine Analyse der Verkehrssituation Stau von der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen (fka) durchgeführt [25], auf die in Kapitel 2 genauer eingegangen wird.

Die Erlernbarkeit und die Nutzerakzeptanz von Assistenzsystemen wurde im Aufgabenpaket *Fahrerverhalten und Mensch-Maschine-Interaktion (FVM)* anhand verschiedener Varianten des Stauassistenten betrachtet. Es stellte sich heraus, dass der Fahrer vor allem Probleme mit unterschiedlichen Wirkungsbereichen, wie z. B. unterschiedlichen Geschwindigkeitsgrenzen hat. Auch die technische Aufgliederung in Längs- und Querführungsassistenz ist für ihn schwer nachzuvollziehen. In *Verkehrliche Wirkungen, Rechtsfragen und Akzeptanz (VRA)* wurden u. A. rechtliche Fragen der vorgestellten Assistenzsysteme betrachtet.

Bestandteile des Projektschwerpunkts *Verkehrsmanagement 2010* waren *Netzausgleich Individualverkehr (NIV)* und *Verkehrsleistungsassistenz (VLA)*. Diese beschäftigten sich einerseits mit der effizienteren Nutzung des Straßennetzes, andererseits mit der Verbesserung des Verkehrsflusses bei dichtem Verkehr durch Assistenzsysteme. Beispiel für letzteres ist eine Regelparameteranpassung des ACC-Systems im Stop&Go-Verkehr, um ein „Aufschaukeln“ der Kolonne zu vermeiden. Um dem System die nötigen Informationen zur Verfügung zu stellen, wurde u. A. Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation genutzt.

Der dritte Schwerpunkt, *Verkehrsmanagement in Transport und Logistik (VMTL)*, untersucht Ansätze zur Lösung logistischer Probleme, bei denen z. B. Baustellen und die Rush-Hour bei einer Tourenplanung berücksichtigt werden sollen.

1.3.2 Abgrenzung zu den bestehenden Systemen

Bei dem hier vorgestellten Ansatz zur Längs- und Querführung im Niedergeschwindigkeitsbereich soll im Gegensatz zu dem bereits angesprochenen INVENT STA-Projekt, bei dem nur die Fahrspurmarkierungen für die Querführung berücksichtigt wurden, eine höhere Verfügbarkeit und Sicherheit in der Querführung erreicht werden. Zusätzlich zu der Information über die Fahrspurmarkierungen werden hier in einem neuartigen Ansatz die Fahrzeuge im Front- und Seitenbereich für die Berechnung der Querführungstrajektorie berücksichtigt. Dies geschieht über eine Fusion verschiedener Sensorinformationen. Es wird eine freie Gasse zum vorausfahrenden Fahrzeug beobachtet, wodurch redundante Informationen für die Solltrajektorie zur Verfügung stehen: Zum einen die Mitte der Fahrspur aus den Spurmarkierungen, zum anderen die freie Gasse nach vorne unter Berücksichtigung der Bewegung des Vorderfahrzeugs. Eine weitere Eingangsgröße ist die Information der Seiten-Sensorik über Seitenfahrzeuge oder Randbebauung, um eine seitliche Absicherung der Solltrajektorie zu gewährleisten. Ziel ist es, dem Fahrer auch dann Querführungsassistenz zu gewähren, wenn keine plausiblen Fahrspurdaten zur Verfügung stehen. Somit ist ein Einsatz nicht nur auf Autobahnen mit breiten Fahrspuren denkbar, sondern auch auf Aus- und Einfallstraßen und auf Ringstraßen (Bild 1.3), solange eine freie Gasse nach vorne gefunden wird. Für die Einhaltung der Vorfahrtsregeln ist der Fahrer jedoch selbst verantwortlich.



Bild 1.3: Stop&Go-Situation mit freier Gasse nach vorne und nur einer detektierbaren Fahrspurmarkierung

2 Randbedingungen und Anforderungen an die kombinierte Längs- und Querführung

Zu Beginn dieses Kapitels wird der Begriff Stau definiert und eingegrenzt. Daraufhin folgt eine Klassifikation von Stausituationen, im Besonderen aus Sicht des Fahrers. Diese Situationsklassifikation wird in Kapitel 3 zur Definition von Anwendungsszenarien sowie Einschränkungen und somit der Systemanforderung an das Stauassistenz-System verwendet.

2.1 Definition des Begriffs Stau im Bezug auf die Verkehrsqualität

Obwohl der Begriff Stau eine Vielzahl von Verkehrssituationen umfasst, bedeutet er immer eine Einschränkung der Mobilität und der allgemeinen *Verkehrsqualität*. Unter dem Begriff Verkehrsqualität ist die *zusammenfassende Gütebeurteilung des Verkehrsflusses* [26] zu verstehen. Die für die Verkehrsqualität zu berücksichtigenden Kriterien werden in [27] wie folgt definiert:

- *Geschwindigkeit*
- *Reisezeit*
- *Überholmöglichkeiten*
- *Wartezeiten*
- *Staulänge*
- *Anzahl von Haltevorgängen*
- *Anzahl und Intensität von Bremsvorgängen*
- *Emissionen und Immissionen*

Eine aus diesen Kriterien ermittelte Verkehrsqualität hängt von der *Verkehrsstärke* q (auch *Verkehrsfluss* genannt, Fahrzeuge pro Zeiteinheit), *Verkehrsdichte* k (Verhältnis der Anzahl von Fahrzeugen zu Streckenlänge) und von der *mittleren*

Geschwindigkeit des Verkehrstroms v_m ab. Die Beziehung dieser makroskopisch ermittelten Kriterien untereinander wird als *Zustandsgleichung des Verkehrs* [28] bezeichnet:

$$q = v_m \cdot k. \quad (F 2.1)$$

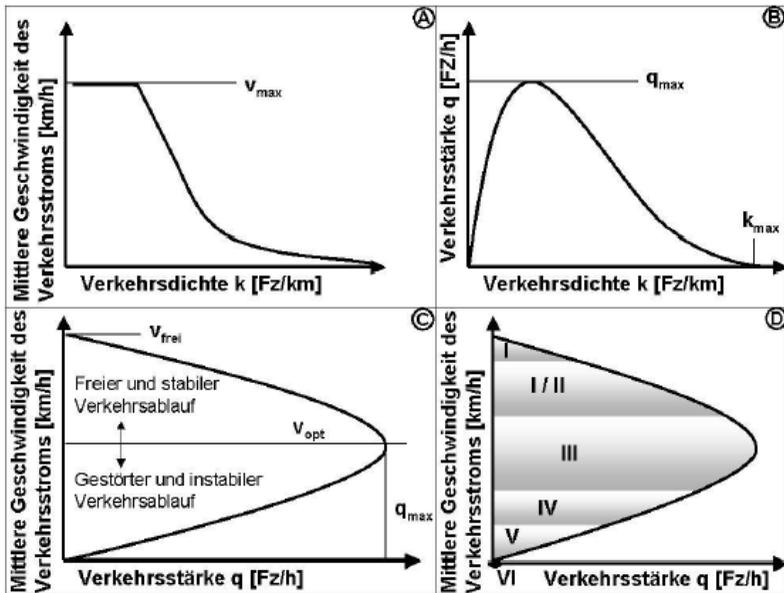


Bild 2.1: Graphische Zusammenhänge von q , v_m und k

Bild 2.1 zeigt die Zusammenhänge zwischen diesen Größen. Der Verlauf der Durchschnittsgeschwindigkeit des Verkehrstroms in Abhängigkeit von der Verkehrsdichte zeigt, dass bei einer niedrigen Verkehrsdichte die Wunschgeschwindigkeit oder maximal erlaubte Geschwindigkeit gefahren werden kann. Höhere Verkehrsdichten zwingen den Fahrer jedoch zur Verringerung seiner Geschwindigkeit. Ein weiterer Anstieg der Verkehrsdichte kann dazu führen, dass das Fahren gar nicht mehr möglich ist (Bild 2.1 A).

Der Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Verkehrsstärke ist in Bild 2.1 B dargestellt. Zunächst steigt mit wachsender Verkehrsdichte auch die Verkehrsstärke an. Da ab einer bestimmten Verkehrsdichte jedoch die Durchschnittsgeschwindigkeit des Verkehrstroms sehr langsam wird, sinkt die Verkehrsstärke wieder ab. Diese idealisierte Kurve wird auch als *Fundamentaldiagramm des Verkehrs* bezeichnet.

Bild 2.1 C stellt die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrstroms abhängig von der Verkehrsstärke dar. Bei einer optimalen Geschwindigkeit v_{opt} kann die maximale Verkehrsstärke q_{max} erreicht werden. Oberhalb von v_{opt} kann von einem freien und

stabilen Verkehrsablauf gesprochen werden. Nimmt in diesem Bereich die Verkehrsstärke zu, führt dies zu einer Abnahme der mittleren Geschwindigkeit. Nimmt die Anzahl der Fahrzeuge auf der Strecke weiter zu, wird bei v_{opt} der maximal mögliche Durchsatz erreicht. Bei einer weiteren Zunahme des Verkehrs sinkt die mittlere Geschwindigkeit ab.

In Bild 2.1 D wird das q - v_m -Diagramm in Klassen mit unterschiedlicher Verkehrsqualität unterschieden [28]. Diese Bereiche werden wie folgt definiert:

- **Klasse I: Freier Verkehr**
Hier herrschen optimale Verkehrsbedingungen, die Fahrer werden in ihrer Fahrweise nicht eingeschränkt.
- **Klasse II: Leicht gebundener Verkehr**
In diesem Bereich können zwar zeitweise leichte Behinderungen durch den übrigen Verkehr auftreten, jedoch ist eine freie Geschwindigkeitswahl fast immer möglich.
- **Klasse III: Gebundener Verkehr**
Die Leistungsfähigkeit der Strecke ist erreicht und die Geschwindigkeit aus Sicht des Fahrers nicht mehr frei wählbar, sondern wird durch den übrigen Verkehr vorgegeben. Typisches Beispiel für eine solche Situation ist das Fahren in einem Pulk.
- **Klasse IV: Zählfließender Verkehr**
Hier herrscht eine schlechte Verkehrsqualität, gekennzeichnet durch einen instabilen Verkehrsfluss, ein hohes Verkehrsaufkommen und niedrige Geschwindigkeiten.
- **Klasse V: Stockender Verkehr**
Charakteristisch für diesen Bereich sind häufige Stillstände und wellenförmiges Vorwärtsfahren, ein Verkehrsfluss ist praktisch nicht mehr vorhanden.
- **Klasse VI: Stehender Verkehr**
Hierbei handelt es sich lediglich um einen Punkt im q - v_m -Diagramm. Sämtliche Fahrzeuge der Umgebung stehen still, es fehlt die Vorwärtsbewegung der einzelnen Fahrzeuge für einen bestimmten Zeitraum. Ein Verkehrsfluss ist nicht vorhanden.

Der Begriff Stau wird in [28] alleine über die Klassen IV, V und VI definiert.

2.2 Situationsklassifikation im Stau

Es soll nun eine Klassifikation möglicher Stausituationen aus der Sicht des Fahrers, also eine subjektive Einteilung, stattfinden. Es wird davon ausgegangen, dass die aus der Situationsklassifikation abgeleiteten Systemgrenzen in Verbindung mit objektiven Daten (Fahrzeugdaten, makroskopische Verkehrsdaten) für den Fahrer nachvollziehbar sind. Des Weiteren dient die Aufstellung der Situationen dazu, in späteren Kapiteln die Reaktion des Stauassistenz-Systems auf spezielle Situationen zu definieren und die Systementwicklung darauf auszulegen.

2.2.1 Subjektive Situationsklassifikation

Im Rahmen des Forschungsprogramms INVENT beschäftigte sich Sandkühler [25] mit der Analyse von Stausituationen für die Entwicklung eines Stauassistenten. Hier wurde die Verkehrssituation Stau mit dem Ziel analysiert, innerhalb des Staus verschiedene Situationsklassen zu identifizieren. Dies geschah auf Basis von Realfahrten mit 30 Probanden. Die Probanden definierten die Situationen und für die jeweiligen Situationen charakteristische Parameter, anhand denen die Situationsklassen unterscheidbar sind. Die Fahrten wurden ohne Assistenzsystem durchgeführt.

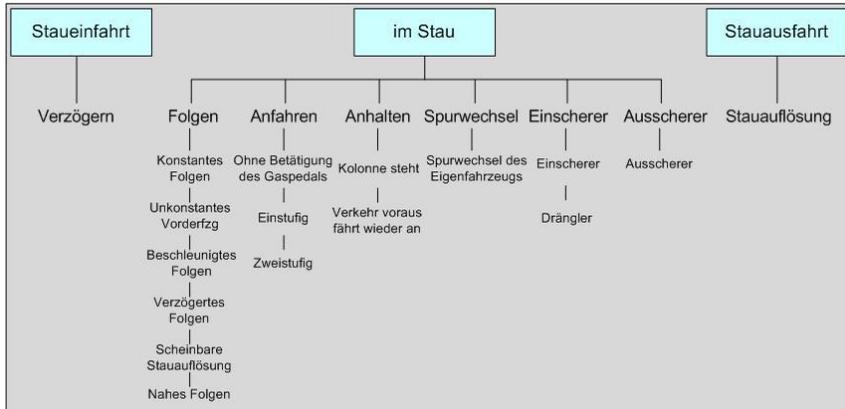


Bild 2.2: Situationsklassen im Stau nach [25]

Bild 2.2 zeigt das Ergebnis der Situationsidentifikation aus [25] als Situationsbaum. Es wird zunächst unterschieden zwischen *Stauaufahrt*, *Stauabfahrt* und *im Stau*. Im Folgenden sollen die Situationsklassen der drei Phasen genauer definiert werden.

Folgen – Konstantes Folgen und Unkonstantes Vorderfahrzeug:

Beim *Konstanten Folgen* folgt das Eigenfahrzeug dem Vorderfahrzeug mit einer Geschwindigkeit von ca. 10 km/h, wobei der Fahrer weder Gas- noch Bremspedal bei dem verwendeten Versuchsträger mit Automatikgetriebe (Schaltstellung „D“) betätigt. Die Fahrzeuge rollen mit Lehlaufdrehzahl hintereinander her, die Differenzgeschwindigkeit liegt nahe „0“. Bei höheren Geschwindigkeiten als beim *Konstanten Folgen* reicht das Motorschleppmoment nicht mehr aus, um in der Kolonne mitzufahren. Da der Fahrer das Gaspedal betätigen muss, ergibt sich ein unregelmäßiger Geschwindigkeitsverlauf für die gesamte Kolonne. Der Fahrer versucht hierbei, die Geschwindigkeitsschwankungen zu dämpfen, um eine möglichst konstante Geschwindigkeit zu fahren und das Bremspedal nicht zu betätigen. Dabei wird in Kauf genommen, dass der Abstand zum Vordermann schwankt. Im Vergleich zum *Konstanten Folgen* ergibt sich für Abstand, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Differenzgeschwindigkeit eine höhere Varianz, wobei die Mittelwerte für Differenzgeschwindigkeit und Beschleunigung bei „0“ liegen.

Folgen – Beschleunigtes Folgen:

Bei diesem Vorgang beschleunigt das Vorderfahrzeug deutlich, wobei der Proband aufgrund der Bewegung der Kolonne erkennt, dass diese Beschleunigung für die aktuelle Situation zu stark ist. Der Proband beschleunigt deshalb weniger stark und nimmt wiederum für kurze Zeit einen höheren Abstand zum Vorderfahrzeug in Kauf. Bei diesem Vorgang liegen bei Differenzgeschwindigkeit und Beschleunigung die Mittelwerte nicht mehr bei „0“, da sich das Vorderfahrzeug entfernt. Die Beschleunigung des Eigenfahrzeugs ist positiv.

Folgen – Verzögertes Folgen:

Analog zum beschleunigten Folgen treten im Stau auch Situationen mit längeren Verzögerungsphasen auf. Der Fahrer erkennt anhand der Verzögerung vorausfahrender Fahrzeuge, dass er verzögern muss. Da er auch weiterhin bestrebt ist, das Bremspedal nicht zu betätigen, wird er vorerst versuchen, die Verzögerung über das Motorschleppmoment abzufangen. Erst wenn Zeitlücke und Abstand einen bestimmten Wert unterschreiten wird die Bremse betätigt. Signifikant für diese Situation ist, dass die Differenzgeschwindigkeit negative Werte annimmt (Annäherung) und die Werte für die Beschleunigung im negativen Bereich liegen.

Folgen – Scheinbare Stauauflösung:

Bei dieser Situationsklasse handelt es sich um einen Spezialfall des beschleunigten Folgens. Das Vorderfahrzeug beschleunigt deutlich, wobei der Fahrer hier den Eindruck hat, dass das Stauende erreicht ist, da der sichtbare Bereich der Kolonne ebenfalls schneller wird. Allerdings ist die Voraussicht aufgrund der Streckenführung begrenzt, zum Beispiel durch eine enge Kurve. Die fehlende Information ersetzt der Fahrer durch seine Erfahrung. Da der Stau aber wider Erwarten nicht beendet ist, ähnelt diese Situation dem beschleunigten Folgen sehr stark. Der wesentliche Unterschied ist, dass die Beschleunigung des Eigenfahrzeugs höher ist und sich stärker am Vorausfahrenden orientiert.

Folgen – Nahes Folgen:

Charakteristisch für das nahe Folgen sind der geringe Abstand und die daraus resultierende geringe Zeitlücke zum Vorderfahrzeug. Dieser Zustand tritt dann auf, wenn sich ein aufgrund eines von der Nachbarspur einscherehenden Fahrzeugs ein geringer Folgeabstand ergibt („Hereindrängeln“). Unaufmerksamkeit des Fahrers beim Verzögern des Vorderfahrzeugs könnte ein weiterer Grund für den geringen Folgeabstand sein. In dieser Situation ist der Fahrer bemüht, den Folgeabstand nicht weiter zu verringern, will aber auch starkes Bremsen vermeiden. Er nimmt den kurzen Abstand so lange in Kauf, bis das Vorderfahrzeug wieder beschleunigt und er durch zeitlich verzögerte Gaspedalbetätigung den Abstand vergrößern kann. Die Situation ähnelt dem verzögerten Folgen, unterscheidet sich aber durch den kürzeren Sekundenabstand.

Anfahren – Anfahren ohne Betätigung des Gaspedals und Einstufiges/Zweistufiges Anfahren:

Beim Anfahren mit einem Fahrzeug mit Automatikgetriebe unterscheidet der Fahrer grundsätzlich zwischen Anfahrvorgängen mit und ohne Gaspedalbetätigung. Charakterisiert ist die Situation *Anfahren ohne Betätigung des Gaspedals* durch ein Anfahren des Vorderfahrzeugs mit niedriger Beschleunigung und einer Zielgeschwindigkeit unter 10 km/h. Der Fahrer fährt nur durch das Lösen der Bremse an, das Gaspedal muss nicht betätigt werden. Beim *Einstufigen Anfahren* ist schon während des Lösens der Bremse klar, dass eine Gaspedalbetätigung nötig

ist. Der Fahrer erkennt dies durch eine starke Beschleunigung des Vorderfahrzeugs beim Anfahren und einer hohen Geschwindigkeit der vorausfahrenden Kolonne. Eine Kombination aus Anfahren ohne Gaspedal und Einstufigem Anfahren stellt das Zweistufige Anfahren dar. Anfangs entscheidet sich der Fahrer dafür, beim Anfahren das Gaspedal nicht zu betätigen. Da aber die Kolonne vorne weiter beschleunigt, betätigt der Fahrer in der zweiten Phase das Gaspedal.

Anhalten – Kolonne steht:

Hierbei erkennt der Fahrer schon in der Vorausschau, dass die Kolonne vor ihm steht. Er passt seine Geschwindigkeit dem Vorausfahrenden an und zielt mit möglichst geringer Verzögerung auf einen komfortablen Stillstandsabstand.

Anhalten – Verkehr voraus fährt wieder an:

In diesem Fall hält der Fahrer eine relativ komfortable Zeitlücke zum anhaltenden Vorderfahrzeug, da er anhand der sich weiter vorne befindenden Fahrzeuge erkennt, dass der Stillstand nur von kurzer Dauer sein wird. Der Fahrer versucht, möglichst nicht stehen bleiben zu müssen und nimmt dafür einen kurzen Stillstandsabstand und eine eventuell höhere Verzögerung am Ende des Anhaltevorgangs in Kauf.

Nach der Betrachtung rein längsdynamischer Situationen wurden in [25] auch Situationen mit spurwechselnden Fahrzeugen identifiziert.

Einscherer:

Diese Situation ist dadurch gekennzeichnet, dass ein bisher auf einer Nachbarspur fahrendes Fahrzeug direkt vor dem eigenen Fahrzeug einschert. Wichtige Kriterien zum frühzeitigen Erkennen dieser Situation durch den Fahrer sind der gesetzte Blinker und die beginnende Querbewegung. Auch ein Straßenverlauf oder eine Beschilderung, die auf einen Spurwegfall deuten, können ein Indiz für einen möglichen Einscherer sein. Teilweise kommt es hier zu einem kooperativen Verhalten und der Einscherer wird „reingelassen“.

Einscherer – Drängler:

Der *Drängler* ist ein Sonderfall des Einscherers. In eine Lücke vor dem Fahrzeug, die der Fahrer als zu klein empfindet, schert ein Fahrzeug aus der Nachbarspur ein. Aus dieser für den Fahrer unangenehmen und gefährlichen Situation kann sich die Situation *Nahes Folgen* ergeben, da dem Fahrer die kleine Zeitlücke aufgezwungen wird.

Ausscherer:

Eine weitere Situation, bei dem sich für den Fahrer ein neues Vorderfahrzeug ergibt, ist der Ausscherer. Das Vorderfahrzeug führt einen Spurwechsel auf die linke oder rechte Nachbarspur durch. Da sich durch den Ausschervorgang ein vergrößerter Abstand ergibt, kann diese Situation als Übergang zwischen zwei Folgevorgängen betrachtet werden.

Spurwechsel des Eigenfahrzeugs:

Hier führt der Fahrer den Spurwechsel selber aus, meistens aufgrund der Vermutung, auf der Zielspur schneller voran zu kommen oder aufgrund eines Spurwegfalls. Der Fahrer wird zunächst ausreichenden Sicherheitsabstand zum Vordermann herstellen, bevor er durch Blinkersetzen den Spurwechselwunsch ankündigt und eine Lücke auf der Zielspur sucht.

Stau einfahrt und Stau ausfahrt:

In der Situation *Stau einfahrt* erkennt der Fahrer, dass er sich am Beginn eines Staus befindet. Die Kriterien aus Fahrersicht, in diese Phase einzutauchen, wurden in [25] wie folgt definiert:

- deutlicher und längere Zeit dauernder Geschwindigkeitseinbruch bis in den Stillstand
- starke Verzögerungen
- Reduzierung der Abstände zwischen den Fahrzeugen
- Entstehung einer Fahrzeugkolonne
- Aufleuchten von Bremslichtern bei den vorausfahrenden Fahrzeugen
- betätigte Warnblinkanlagen an einigen Fahrzeugen
- entsprechende Schaltung von Wechselverkehrszeichen
- am Fahrbahn stehende Polizeifahrzeuge mit eingeschaltetem Blaulicht und ein entsprechendes Hinweisschild auf dem Dach

Als Ende der Stau einfahrtsphase wird das Ende des Verzögerungsvorgangs und das Erreichen einer Geschwindigkeit nahe dem Stillstand bezeichnet.

Der Beschleunigungsvorgang am Ende eines Staus wird als *Stau ausfahrt* oder Stau auflösung bezeichnet. Der Fahrer erkennt diese Phase an deutlich schneller werdenden Fahrzeugen auf allen Spuren und damit verbundene größere Abstände zwischen den Fahrzeugen. Der Verkehrsfluss wird gleichmäßig und es setzen Überholvorgänge ein. Aus Sicht des Fahrers wird die Verkehrssituation ab einer Geschwindigkeit von ca. 60 km/h nicht mehr als Stau bezeichnet. Überschreitet die Geschwindigkeit die Grenze von 80 km/h und es kommt dann wieder zu einem vollständigen Stillstand, wird dies von den meisten Probanden als eine neue *Stau einfahrt* bezeichnet.

2.2.2 Erweiterung der Situationen

Der Situationskatalog aus [25] soll nun um Situationen erweitert werden, die sich im Gegensatz zum vorhergehenden Absatz auch auf örtliche Begebenheiten beziehen und Sondersituationen berücksichtigen, die für das zu entwickelnde System von Bedeutung sind. Im Gegensatz zu dem in [23] vorgestellten Stauassistenten werden hier Stausituationen auf Landstraßen und breite Stadtstraßen für die Systementwicklung berücksichtigt. Baustellensituationen, die häufig in Verbindung mit Staus auftreten, ergänzen den Situationskatalog. Die hinzugefügten Situationen sind in Bild 2.3 farblich dargestellt. Im Folgenden sollen auch diese relevanten Situationen genauer definiert und hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Stauassistenten-System diskutiert werden.

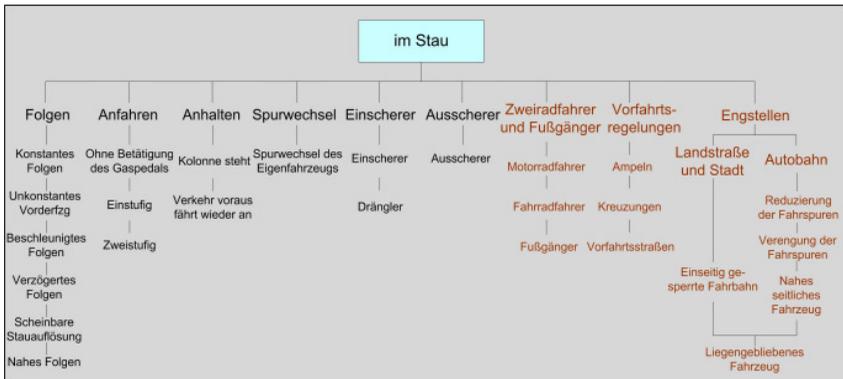


Bild 2.3: Erweiterter Situationskatalog *im Stau*

Motorrad- und Fahrradfahrer:

Diese Gruppe der Verkehrsteilnehmer ist für den Fahrer aufgrund ihrer Agilität oft schwer erkennbar oder einschätzbar. Ein weiteres Problem ist das Verhalten vieler Motorradfahrer, sich zwischen stehenden Autos im Stau oder vor Ampeln „durchzudrängeln“, obwohl dies an sich nicht erlaubt ist. Allgemein erfordern Stausituationen, bei denen Motorradfahrer involviert sind, eine erhöhte Aufmerksamkeit für den Autofahrer.

Durch die Berücksichtigung von Land- und Stadtstraßenszenarien können in Stausituationen auch Fahrradfahrer beteiligt sein. Auch diese neigen dazu, sich an stehenden Autos vorbeizudrängeln.

Fußgänger:

In längeren Standphasen, vor allem im Stadtverkehr, kann es vorkommen, dass ein Fußgänger zwischen stehenden Autos hindurch die Straße überquert. Dies erfordert vom Fahrer erhöhte Aufmerksamkeit, vor allem in Verbindung mit den Situationen *Verkehr voraus fährt wieder an* oder *Anfahren*.

Vorfahrtsregelungen:

Ampeln können oftmals Ursache für Stop&Go-Verkehr sein. Nicht nur auf Land- und Stadtstraßen, auch auf Autobahnen in Verbindung mit einseitig befahrbaren Tunneln können Stausituationen in Verbindung mit Ampeln auftreten. Durch Einfahren oder Überqueren einer vorfahrtsberechtigten Straße an Kreuzungen auch ohne Ampel können Stauungen verursacht werden, wenn die Verkehrsdichte die Kapazität der Kreuzung überschreitet.

Engstellen:

Da Baustellen oftmals Ursache für Staus sind, sollen im Folgenden für die Funktionsentwicklung relevante Typen von Engstellen betrachtet werden.

Einseitig gesperrte Fahrbahn:

Bei dieser Art von Engstelle, die auf einspurigen Fahrbahnen auf Landstraßen oder innerorts auftreten kann, wird häufig auf einer Seite der Fahrbahnbelag repariert oder es werden unter der Fahrbahn Rohre oder Kabel verlegt. Dadurch ist eine Fahrbahn gesperrt, Verkehr und Gegenverkehr müssen sich eine Fahrbahn teilen.

Des Weiteren ist die erlaubte Geschwindigkeit im Baustellenbereich begrenzt, meist wird die Vorfahrt durch Baustellenampeln geregelt. Der Verkehrsfluss ist gestört. Oft sind die Fahrbahnmarkierungen im direkten Baustellenbereich nicht vorhanden (Bild 2.4).

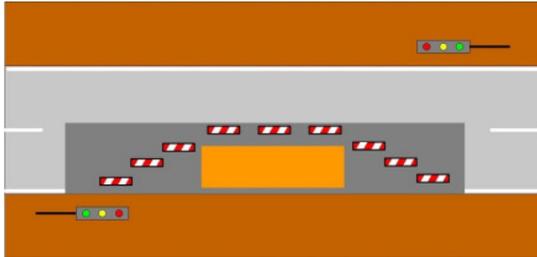


Bild 2.4: Einseitig gesperrte Landstraße ohne sichtbare Fahrbahnmarkierung im Baustellenbereich

Fahrspredduktion auf Autobahnen:

Wird bei Bauarbeiten auf Autobahnen eine Fahrspur vollständig gesperrt, erfolgt eine Fahrspredduktion (Bild 2.5). Diejenigen Fahrzeuge, die sich auf der Baustellenspur befinden, müssen einfädeln, wodurch der nachfolgende Verkehr auf den verbleibenden Fahrspuren gestört wird. Die geänderte Spurführung wird oftmals durch gelbe Fahrbahnmarkierungen gekennzeichnet. Zusätzlich gelten hier meistens Geschwindigkeitsbegrenzungen.

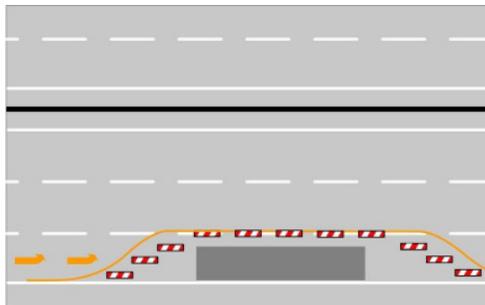


Bild 2.5: Fahrspredduktion auf Autobahn

Fahrspredderengung auf Autobahnen:

Muss für die Baustellenarbeiten keine ganze Spur gesperrt werden, kann oftmals auf eine Reduzierung der Fahrspredderengungen verzichtet werden. Gelbe Fahrbahnmarkierungen verschmälern die Fahrspredderengungen in der Art, dass die verbleibende Fahrbahnbreite auf die Fahrspredderengungen aufgeteilt wird (Bild 2.6). Dies hat zur Folge, dass vor allem für breite Fahrzeuge, z. B. Lkw, die Fahrbahnbreite kaum ausreicht, was den anderen Verkehrsteilnehmern ebenfalls eine erhöhte Aufmerksamkeit abverlangt. Zusätzlich dazu ist hier die Geschwindigkeit begrenzt. Der Verkehrsfluss wird behindert, jedoch

nicht in dem Maße wie bei einer Fahrspurreduktion. Wird für die Fahrbahn ein Teil der Gegenfahrbahn benötigt, trennt eine mobile Trennmauer geänderte Fahrbahn und Gegenfahrbahn.

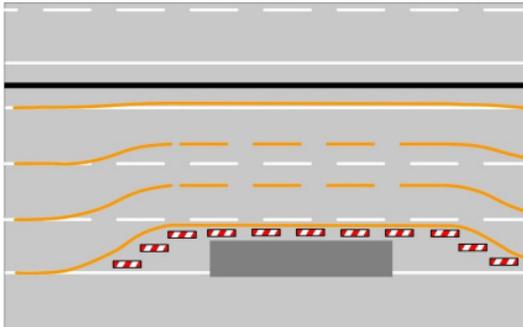


Bild 2.6: Fahrspurverengung auf Autobahnen mit gelben Fahrbahnmarkierungen

Aufgrund ihrer Komplexität stellen Baustellensituationen an das Stauassistenz-System hohe Anforderungen: Spurmarkierungen sind oftmals falsch oder gar nicht vorhanden, bei Fahrspur-Sperrung treten kurzfristig im Vergleich zu den anderen Situationen hohe querdynamische Bewegungen der Fahrzeuge auf, die Fahrspuren verengen sich und Seitenfahrzeuge kommen sehr nahe. In den folgenden Kapiteln wird bei der Systemauslegung und bei der Systemabsicherung auf die jeweilige Systemreaktion bei Baustellensituationen eingegangen.

Nahes seitliches Fahrzeug:

Eine relativ selten auftretende Situation, die vor allem bei Fahrspurverengungen, aber auch in Verbindung mit Motorradfahrern und Radfahrern auftreten kann, ist, dass ein seitliches Fahrzeug dem Eigenfahrzeug gefährlich nahe kommt.

Liegengebliebenes Fahrzeug:

Ursache eines Staus kann auch ein auf einer Fahrbahn liegengebliebenes Fahrzeug sein. Der nachfolgende Verkehr verhält sich in dieser Situation ähnlich wie bei einer Fahrspurreduktion, muss auf die noch verbliebenen Fahrspuren ausweichen und kommt ins stocken.

3 Anforderungen an ein Stauassistenz-System

Dieses Kapitel beschreibt in Form eines Lastenhefts die Anforderungen an ein Stauassistenz-System auf Basis der Situationsklassifikation im vorhergehenden Kapitel. Beruhend auf diesem Lastenheft erfolgt eine Systemdefinition des Stauassistenz-Systems in der Längs- und Querführung. Die hieraus abgeleiteten Anforderungen dienen dann in nachfolgenden Kapiteln zur Spezifikation der Fahrumfelderfassung und der Aktorik, der Situationsinterpretation und des Anzeige- und Bedienkonzepts (*HMI – Human Machine Interface*).

3.1 Beschreibung der Randbedingungen für den Einsatz eines Stauassistenz-Systems

3.1.1 Allgemeiner Einsatzbereich des Stauassistenz-Systems

Grundsätzlich ergibt sich die Anforderung, die Assistenz in Längs- und Querführung in möglichst allen Situationen *im Stau* zur Verfügung zu stellen. Dies bezieht sich auf alle Autobahn-Stausituationen. Zusätzlich soll die Assistenz in Staus auf Ring- sowie Ein- und Ausfallstraßen zur Verfügung stehen. Eine Assistenz in komplexen Stadtsituationen, die sich durch starke Fahrbahnkrümmungen, enge Fahrbahnen, hoher Längsdynamik und Situationen mit Fußgängern und Fahrradfahrern auszeichnen, ist nicht vorgesehen.

3.1.2 Bewertung der klassifizierten Situationen

Um das Umfeld und somit den Einsatzbereich des Stauassistenz-Systems beschreiben zu können, werden die Situationen aus der Situationsklassifikation hinsichtlich ihrer Relevanz für das Stauassistenz-System bewertet. Es werden diejenigen Situationen betrachtet, aus denen sich Systemanforderungen ergeben. Grundsätzlich soll es Aufgabe der Querführung sein, das Fahrzeug möglichst komfortabel und sicher in der Fahrspurmitte zu führen. Von der Längsführung wird gefordert, einen sicheren Abstand zum Vorderfahrzeug durch eine komfortable Regelung einzuhalten.

In den *Folgen*-Situationen *Konstantes Folgen* und *Unkonstantes Vorderfahrzeug* wird vom Fahrer in der Längsführung ein komfortables Folgeverhalten erwartet. Im Gegensatz dazu fordert der Fahrer beim *Beschleunigten Folgen* und in den *Anfahren*-Situationen genügend Längsdynamik, um die Lücke zum Vorderfahrzeug nicht zu groß werden zu lassen. Dies verhindert Einscherer und gewährt den Verkehrsfluss. Beim *Verzögerten Folgen* und beim *Nahen Folgen* muss wiederum ein Kompromiss in der Längsdynamik aus Komfort- und Sicherheitsgesichtspunkten gefunden werden. Auch die *Anhalten*-Situationen müssen von der Längsführung sicher und komfortabel aufgelöst werden. In den Situationen *Einscherer* und *Ausscherer* wird vom Stauassistenz-System erwartet, in der Längsführung zügig den konstanten Abstand zum neuen Vorderfahrzeug einzuregeln. Die Querführung soll unbeeinflusst vom Vorderfahrzeug-Wechsel weiterhin das Fahrzeug in der Fahrspurmitte führen. Ein automatischer *Spurwechsel des Eigenfahrzeugs* soll systemseitig nicht unterstützt werden.

Eine für das zu entwickelnde Anzeige- und Bedienkonzept (HMI) relevante Situation ergibt beim *Folgen bei scheinbarer Stauauflösung*: Der Übergang vom unterstützenden in den nicht unterstützenden Zustand muss für den Fahrer möglichst intuitiv und nachvollziehbar stattfinden. Ähnlich verhält es sich mit den Situationen *Stauaufahrt* und *Stauausfahrt*. Auch hier muss dem Fahrer jederzeit klar sein, ob er das Stauassistenz-System nutzen kann und in welchem Zustand sich das System zum jeweiligen Zeitpunkt befindet. Kritische Situationen, wie etwa der *Nahe Einscherer* oder das *Nahe seitliche Fahrzeug*, müssen eine Übernahmeaufforderung an den Fahrer hervorrufen, wenn Systemgrenzen in der Längs- und Querführung erreicht werden. Ebenfalls für das HMI zu berücksichtigen ist, dass ein selbständiges *Anfahren* des Fahrzeugs durch die Längsführung rechtlich nicht erlaubt ist.

Des Weiteren soll das systemseitige Beachten von Vorfahrtsregeln keine Anforderung sein. Aus Sicht des Stauassistenten-Systems ergibt sich damit beim Überqueren von nicht vorfahrtsberechtigten Straßen und Ampelsituationen das Problem des „Mitziehens“: Da die Längsregelung nur auf das Verhalten des Vorderfahrzeugs reagiert, wird beispielsweise einem Vorderfahrzeug, das bei gelb eine Ampel überquert, gefolgt, obwohl diese zum Zeitpunkt des Passierens schon auf rot geschaltet hat. Da auch in naher Zukunft nicht von einer vollständigen Ausstattung von Ampeln mit Kommunikations-Infrastruktur ausgegangen wird, muss der Fahrer in diesen Situationen die Längsführung selbst übernehmen.

Aufgrund ihrer Komplexität stellen *Baustellen*-Situationen an das Stauassistenten-System hohe Anforderungen: Spurmarkierungen sind oftmals irrelevant oder gar nicht vorhanden, bei Fahrspur-Sperrung treten kurzfristig im Vergleich zu den anderen Situationen hohe querdynamische Bewegungen der Fahrzeuge auf, die Fahrspuren verengen sich. In den folgenden Kapiteln wird bei der Systemauslegung und bei der Systemabsicherung auf die jeweilige Systemreaktion bei Baustellensituationen eingegangen.

3.1.3 Fußgänger, Fahrradfahrer und Motorradfahrer

Die Erkennung von Fußgängern, vor allem in komplexen Stadtszenarien, stellt sensortechnisch eine große Herausforderung dar. Keine der aktuell zur Verfügung stehende Sensortechnologien für den Automotive-Bereich, auf die in Kapitel 4 eingegangen wird, ist in der Lage, Fußgänger immer sicher zu detektieren und zu klassifizieren. Aus diesem Grund liegt es in der Verantwortung des Fahrers, bei aktiviertem Stauassistenten-System auf Fußgänger zu achten und im Notfall angemessen auf die Situation durch Übersteuerung oder Abschalten des Systems zu reagieren. Eine zusätzliche Anforderung ergibt sich hieraus, wie bereits erwähnt, für die Längsregelung. Ein automatisches Anfahren nach einer zu definierenden Stillstandsphase (Situation *Anfahren*) wird systemseitig nicht unterstützt. Der Fahrer muss das Anfahren durch einen Taster oder durch Betätigung des Gaspedals bestätigen (Go-Request).

Ähnlich verhält es sich mit Fahrradfahrern: Auch hier ist es sensortechnisch schwierig, diese sicher zu detektieren. Deshalb soll es Aufgabe des Fahrers sein, in den entsprechenden Situationen auf Fahrradfahrer zu achten.

Motorradfahrer, die sich von Fahrradfahrern hinsichtlich Geschwindigkeit, Beschleunigungen und Breite unterscheiden, müssen auf jeden Fall durch die Sensorik erkannt und als solche detektiert werden können.

3.1.4 Witterungsbedingte Einschränkungen und allgemeiner Straßenzustand

Die Einschränkungen bezüglich Witterungseinflüssen durch die Fahrumfelderfassung sind sehr stark abhängig von der verwendeten Umfeldsensorik. Deshalb soll hier nicht explizit auf die Anforderungen an die Fahrumfelderfassung eingegangen werden, diese werden in Kapitel 4 genauer betrachtet.

Da momentan keine serienrelevante Fahrzeug-Sensorik zur Ermittlung des Reibwertes zwischen Fahrzeug und Fahrbahn, der witterungs- und straßenzustandsabhängig ist, existiert, wird von einer Systemeinschränkung in Abhängigkeit des Reibwertes abgesehen.

3.2 Fahrdynamische Anforderungen

Es sollen nun aus den Anwendungsszenarien heraus Grenzwerte für die Fahrdynamik abgeleitet werden, ab denen eine Systemverfügbarkeit als nicht mehr sinnvoll und auch aus technischen Gründen als nicht mehr möglich erscheint.

3.2.1 Grenzgeschwindigkeit der Längs- und Querführung

Um die Dynamik-Grenzwerte wie Reibwerte, maximale Längs- und Querbeschleunigung und maximaler Lenkeinschlag für den Bereich der Querführung festlegen zu können, soll nun aus den Anwendungsszenarien heraus eine sinnvolle Grenzgeschwindigkeit für die Lenkunterstützung gefunden werden. Um dem Fahrer den aktuellen Systemzustand der Querführung eindeutig vermitteln zu können, wurde sich hier bewusst für eine feste Geschwindigkeitsgrenze entschieden. Im Gegensatz dazu wäre auch ein geschwindigkeitsabhängiges „aus-faden“ der Querführung als Übergang zu einer Spurverlassenswarnung bei höheren Geschwindigkeiten vorstellbar. Als Spurverlassenswarnung wird hier ein System bezeichnet, wie es im Teilprojekt SAFELANE im Rahmen des Invent-Nachfolgeprojekts PReVENT untersucht wurde [29].

Zunächst ist hier die Frage zu klären, wie viel Zeit prozentual zur Staugesamtzeit unter Berücksichtigung einer Grenzgeschwindigkeit $v_{\text{Grenz,Qf}}$ abgedeckt werden kann. Hierunter soll wieder die Analyse von Sandkühler [25] zum Invent-Teilprojekt „Stauassistent“ zugrunde gelegt werden (Bild 3.1). Bewertungskriterium war hier die Angabe der Probanden, ob sie bei den jeweiligen Geschwindigkeiten das Gefühl hatten, im Stau zu stehen.

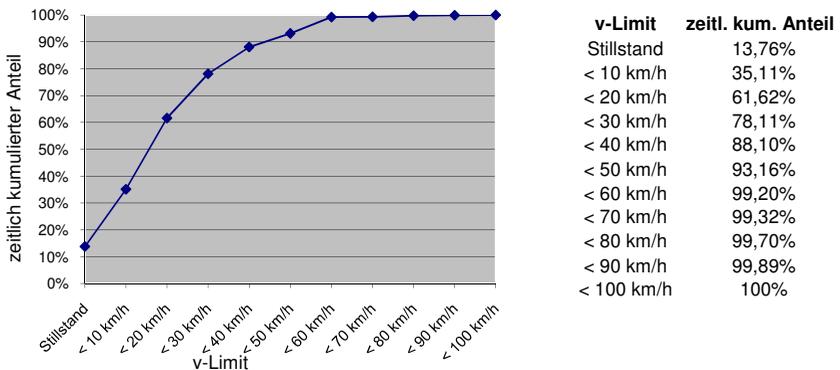


Bild 3.1: Geschwindigkeitsverteilung im Stau, zeitlicher Anteil unter v-Limit bezogen auf die Staugesamtzeit [25]

Um dem Fahrer nicht zu suggerieren, es handle sich bei dem Stauassistent-System um einen autonomen Stadtfahr-Assistenten, wird hier die Grenze der Querführung bewusst unter 50 km/h gewählt. Grundsätzlich erscheint rein technisch gesehen eine autonome Querführung bei erkannter Fahrspur auch bis 60 km/h vorstellbar, jedoch würde dadurch der Absicherungsaufwand erheblich steigen.

Die feste Geschwindigkeitsgrenze für die Querführung wird folgendermaßen festgelegt:

$$v_{\text{Grenz, Qf}} = 40 \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad (\text{F 3.1})$$

Ein Grund für die Wahl genau dieser Geschwindigkeit ist ein sicherheitstechnischer Aspekt: [30] besagt, dass stabile Kolonnen unter 40 km/h im Straßenverkehr kaum möglich sind. Da der assistierte Fahrer immer wieder durch Anfahrbestätigungen und Über- und Unterschreiten der Geschwindigkeitsgrenze systemseitig dazu gezwungen ist, Interaktionen durchzuführen, kann er sich nicht vollständig von der Fahraufgabe abwenden. (Out-of-the-Loop Performance, wird in Kapitel 8 betrachtet)

Aus der in Bild 3.1 dargestellten Datenerhebung geht hervor, dass bei der hier gewählten Grenzgeschwindigkeit von 40 km/h bezogen auf die „gefühlte“ Staugesamtzeit 88,10 % abgedeckt werden können. Dies wird hier als ausreichende Verfügbarkeit betrachtet.

Im Folgenden soll für die Betrachtung der Minimalanforderungen an die Längsführung ein Geschwindigkeitsbereich bis 60 km/h gelten. Wie Bild 3.1 zeigt, wird somit 99,2 % der „gefühlten“ Staugesamtzeit abgedeckt.

3.2.2 Längsdynamik im Stau

Betrachtet man die Auftrittswahrscheinlichkeit verschiedener Beschleunigungen im Stau [25], zeigt sich, dass sich bezogen auf die Staugesamtzeit nur 0,2 % der Zeit Beschleunigungswerte außerhalb des Intervalls $[-1,5, 1,5]$ m/s² ergeben. Die eingeschränkte Verfügbarkeit durch eine Beschränkung der Beschleunigung ist hier also nicht das Problem, es müssen sicherheits- und komforttechnische Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Allgemein ist zu sagen, dass je höher die Beschleunigungs- und Verzögerungsgrenzen für die Längsführung spezifiziert werden, desto genauer und zuverlässiger müssen die dem System zur Verfügung stehenden Sensorinformationen sein. Adiprasito [12] wählte die maximale Beschleunigung geschwindigkeitsabhängig, so wie sie in Bild 3.2 dargestellt ist. Diese Werte sollen im Folgenden auch hier als obere Grenze für die Längsbeschleunigung dienen. Da die für das System relevanten Querbeschleunigungen, wie sie in Abschnitt 3.2.3 noch genauer definiert werden, in den klassifizierten Situationen sehr gering sind, wird von einer krümmungs- oder querbeschleunigungsabhängigen Grenze der maximalen Längsbeschleunigung abgesehen.

In [12] wird eine maximale Verzögerung von 4 m/s² als noch komfortabel bezeichnet. Obwohl für einen Großteil der Situationen eine wesentlich geringere Verzögerung ausreicht, wird dieser Wert auch hier als Grenzwert übernommen, um möglichst viele kritische Brems- und Einschersituationen auflösen zu können. Sollten durch eine starke Bremsung des Vorderfahrzeugs oder durch einen *Drängler* stärkere Verzögerungen für die Längsregelung erforderlich sein, soll hier eine Übernahmearaufforderung in Längsrichtung ausgegeben werden. Dies muss bei der Entwicklung des HMI-Konzepts in Kapitel 7 berücksichtigt werden.

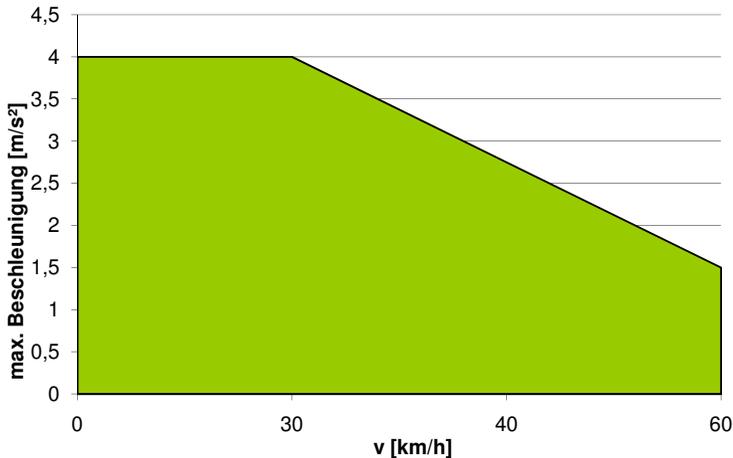


Bild 3.2: Maximale Beschleunigung der Längsregelung in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit (aus [12])

3.2.3 Querdynamik im Stau

Es wird hier als sinnvoll erachtet, nicht die Querschleunigung als Systemgrenze zu wählen, sondern die maximale Krümmung der Sollspur. Dies hat den Vorteil, dass der Fahrer die Systemgrenze besser nachvollziehen kann, da die Krümmung der Sollbahn am Fahrzeugschwerpunkt im direkten Zusammenhang mit dem Sollenwinkel und somit mit dem Lenkeinschlag steht. Somit kann der Fahrer anhand des aktuell gestellten Lenkradwinkels erahnen, ob sich das Stauassistenz-System an dieser Systemgrenze befindet.

Da der Einsatzbereich für das Stauassistenz-System auf Autobahnen, Ein- und Ausfallstraßen und Ringstraßen begrenzt ist (s. Abschnitt 3.1.1) wird der minimal unterstützte Radius auf denjenigen Wert gesetzt, der auch beim Straßenbau für diese Straßenkategorien genutzt wird [31]. Der minimale Radius beim Entwurf von Straßen ist abhängig von der Entwurfsgeschwindigkeit. Bei einer Entwurfsgeschwindigkeit einer Straße, die auf eine Geschwindigkeit von 80 km/h ausgelegt ist, ist der minimale Radius nach [31] auf

$$R_{\min} = 250m \quad (\text{F 3.2})$$

begrenzt. Als maximaler Krümmungswert ergibt sich

$$\kappa_{\max} = \frac{1}{R_{\min}} = 0,004 \frac{1}{m}. \quad (\text{F 3.3})$$

Die maximale Krümmungsänderung kann aus dem Klothoidenparameter $A_{80} = 80$ (bei einer Entwurfsgeschwindigkeit der besagten Straßenkategorie) zu

$$L_u = \frac{A_{80}^2}{R_{\min}} \quad (\text{F 3.4})$$

definiert werden [32], wobei $L_{\bar{u}}$ der Mindestlänge des Klothoidenstücks dieser Straßenkategorie entspricht. Somit ergibt sich für die maximale Krümmungsänderung κ'_{\max}

$$\kappa'_{\max} = \frac{\kappa_{\max}}{L_u} = 0,00016 \frac{1}{\text{m}^2}. \quad (\text{F 3.5})$$

Dass die Querführung auf Landstraßen oder ausgebauten Stadtstraßen mit niedrigeren Kurvenradien als R_{\min} nicht verfügbar ist, wird in Kauf genommen.

3.3 Komfort- und Sicherheitsanforderungen

Um eine höchstmögliche Akzeptanz des Stauassistenten-Systems aus der Sicht des Fahrers zu erreichen und um es funktional zusätzlich abzusichern, wird in dessen Entwicklung der *RESPONSE 3 Code of Practice* berücksichtigt [33]. Hierbei handelt es sich um eine herstellerübergreifende Richtlinie zur Entwicklung, Validierung und Markteinführung von ADAS-Systemen. Bei einem ADAS-System mit einem derart hohen Automatisierungsgrad wie dem Stauassistenten-System muss besonderer Augenmerk auf die *Controllability* gelegt werden. *Controllability* wird in [34] definiert als die *Wahrscheinlichkeit, dass der Fahrer auch Fahrsituationen an den ADAS Systemgrenzen und bei einem Systemausfall beherrscht*.

Für die Entwicklung des Stauassistenten-Systems wird die RESPONSE Checkliste berücksichtigt, auf die im weiteren Verlauf der Arbeit, im Speziellen bei der Fahrsimulator-Untersuchung in Kapitel 8, referenziert werden soll.

Hinsichtlich des Komforts sollen die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen fahrdynamischen Systemgrenzen als noch komfortabel gelten und somit nicht weiter eingeschränkt werden. Starke Lastwechselreaktionen in der Längsführung sind des Weiteren nicht akzeptabel, unkomfortable Sprünge in der Beschleunigungsvorgabe sollen vermieden werden. Für die Querführung gilt die Forderung, Sprünge in der Sollvorgabe für das eingesteuerte Lenkmoment, die einen für den Fahrer sichtbaren Lenkwinkelsprung zur Folge haben, zu vermeiden. Die Komfortabstimmung erfolgt im Fahrzeug mit integriertem Gesamtsystem.

3.4 Zusammenfassung der Anforderungen

Es soll nun eine Zusammenfassung der Anforderungen und somit eine Systemdefinition für das Stauassistenten-System erfolgen.

Das System soll innerhalb der vorher definierten Systemgrenzen folgende Aufgaben der Längsführung übernehmen:

Einen gewählten Sekundenabstand zum Vorderfahrzeug bei einer konstanten Folgefahrt einhalten:

Für die minimale Einstellung des Sekundenabstands wird gefordert, dass er den gesetzlich vorgeschriebenen Mindestabstand von etwa 1 s [35] nicht unterschreitet.

Andererseits würde der Fahrer zu große Sekundenabstände nicht akzeptieren, da sonst die *Einscherer*-Situationen häufig auftreten und das Fahrzeug den Verkehrsfluss behindert. Deshalb soll der Sekundenabstand, analog zum Seriensystem ACC Stop&Go, in 4 Stufen zwischen 1 s und 2,5 s wählbar sein.

Automatisches Beschleunigen / Verzögern bis zum Stillstand hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug

innerhalb der in Abschnitt 3.2.2 festgelegten Beschleunigungsgrenzen.

Selbstständiges Anfahren innerhalb einer bestimmten Zeitspanne nach dem Anhalten:

Grundsätzlich ist, wie in Abschnitt 3.1.3 erwähnt, ein selbstständiges Losfahren rechtlich nicht erlaubt. Ist die Stillstandszeit des Eigenfahrzeugs jedoch sehr kurz, würde eine Anfahrbestätigung vom Fahrer eine sehr schnelle Interaktion erfordern, um den Verkehrsfluss nicht zu behindern. Aus diesem Grund wird hier, analog zum ACC Stop&Go Seriensystem, eine Anfahrbestätigung innerhalb von 3 s Stillstand nicht gegeben. Innerhalb dieser Zeitspanne soll die Längsführung selbständig losfahren.

Hinsichtlich der Längsführung ergeben sich folgende Anforderungen an das HMI:

Go-Request:

Bei längerem Stillstand als 3 s soll der Fahrer bei Wiederanfahrt eine Anfahrbestätigung (*Go-Request*) erhalten. Erst nach einer Fahreraktivität (z. B. Bestätigung über Taste oder Gaspedal) soll die Längsführung wieder anfahren.

Übernahmeaufforderung in kritischen Situationen,

wenn die maximale Verzögerung von 4 m/s^2 nicht ausreicht, um die Situation aufzulösen (z. B. *Drängler*).

Des Weiteren wird hier hinsichtlich der Längsführung davon ausgegangen, dass a priori stehende Ziele, im Gegensatz zum Seriensystem ACC Stop&Go, sicher detektiert werden können. Untersuchungen in [36] haben ergeben, dass gerade diese Systemgrenze vom Fahrer als kritisch und unangenehm empfunden wird. Bedingt durch den höheren Automatisierungsgrad des Stauassistenten-Systems wird davon ausgegangen, dass der Fahrer tendenziell unaufmerksamer ist als bei einem reinen Längsführungs-System. Daher wird hier gefordert, a priori stehende Ziele der Situationsinterpretation zur Verfügung zu stellen.

Hinsichtlich der Querführung soll das System folgende Aufgaben übernehmen:

Querführung des Fahrzeugs im der Mitte des eigenen Fahrstreifens

innerhalb der Systemgrenzen *maximale Geschwindigkeit der Querführung*, *maximale Krümmung der Querführungsbahn* aus Abschnitt 3.2.3. Des Weiteren soll die Querführung nur zur Verfügung gestellt werden, wenn ein Vorderfahrzeug vorhanden ist. Diese Einschränkung soll verhindern, dass die Querführung zu jeder Zeit, auch wenn es sich um keine Stausituation handelt, verfügbar ist.

Führen durch eine begrenzt enge Gasse,

was einem „Mitschwimmen“ mit dem umliegenden Verkehr entspricht. Die minimale Breite der Gasse soll aus der *Richtlinie für die Anlage von Straßen – Querschnitt*

(RAS-Q) für die Fahrbahnbreite von Bundesstraßen (RQ 10,5) abgeleitet werden und beträgt 3,5 m [37].

Ausweichen

in der eigenen Fahrspur, falls sich Objekte dem Eigenfahrzeug seitlich nähern (z. B. *Nahes seitliches Fahrzeug*). Wie bereits erwähnt, soll die Querregelung innerhalb eines Korridors von 3,5 m garantiert werden (RAS-Q, RQ 10,5, [37]). Bei einer Eigenfahrzeugbreite von ca. 2 m und beim Fahren auf der Spurmitte muss somit ein seitlicher Abstand von jeweils 0,75 m eingehalten werden.

Bezogen auf die Querführung ergeben sich folgende Anforderungen an das HMI:

Information an den Fahrer, falls Systemgrenzen bereits beim Einschalten überschritten sind

Information/Übernahmeaufforderung beim Erreichen der Systemgrenzen

Weitere Anforderung an das Gesamtsystem ist:

Möglichkeit für den Fahrer, das System jederzeit zu übersteuern

Dieser Punkt deckt sich mit der Forderung A1 Nr. 6 aus der RESPONSE Checkliste [33]: „Kann der Fahrer das sich in Betrieb befindliche System jederzeit übersteuern?“

Die Übersteuerungsmöglichkeiten der Längsführung sollen analog zum Serienstand von ACC Stop&Go umgesetzt werden [12]:

- Abschaltung der Längsführung bei Betätigung des Bremspedals
- Übersteuerung/Unterdrückung der Systemreaktion bei Betätigung des Gaspedals

Hinsichtlich des für die Querführung aufzubringenden zusätzlichen Moments ergeben sich folgende Forderungen:

- Der Fahrer muss jederzeit die Möglichkeit haben, das zusätzlich aufgebrachte Lenkmoment zu übersteuern.
- Übersteuert der Fahrer das zusätzliche Lenkmoment für die Querführung, muss die Querführungs-Funktion sofort abgeschaltet werden.

Aus diesen Anforderungen an das Gesamtsystem ergibt sich die in Bild 3.3 dargestellte Grobstruktur für das Stauassistenten-System. Auf die Anforderungen an die Teilkomponenten wird in den jeweiligen Kapiteln eingegangen.

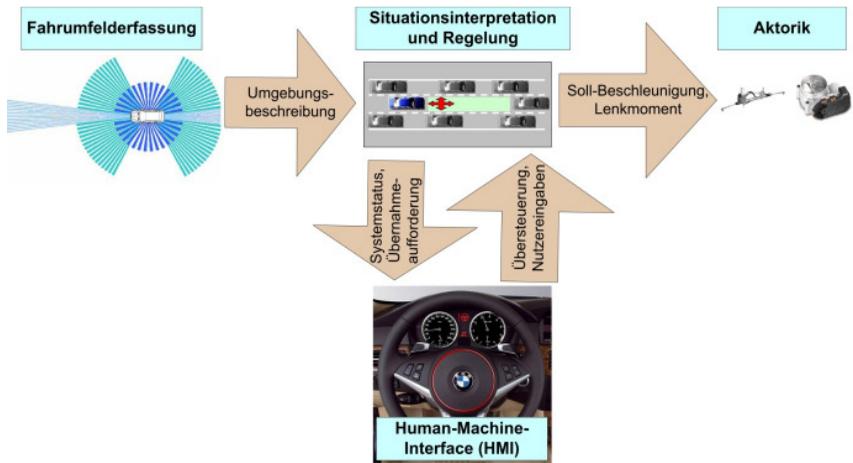


Bild 3.3: Grobstruktur und Signalfluss des Stauassistenten-Systems

4 Sensorik und Aktorik

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der für das Stauassistenten-System relevanten Sensorik. Hierbei wird zwischen Sensoren, die Daten über das eigene Fahrzeug liefern, und Sensoren zur Fahrfelderfassung unterschieden. Weiterer Bestandteil dieses Kapitels ist die Aktorik, mit der die Längs- und Querverführung im Fahrzeug umgesetzt wird.

4.1 Sensorik zur Erfassung der Eigenfahrzeugdaten

Die Geschwindigkeit der Vorderräder und die Fahrzeuggeschwindigkeit werden durch Raddrehzahl-Sensoren (Induktions-Sensoren) gemessen.

Beschleunigungs-Sensoren messen die Längs- und Querschleunigung des Fahrzeugs. Hierbei wird durch den Kräfteinfluss der Beschleunigung eine federnd gelagerte Masse bewegt, wobei die Verschiebung der Masse, die proportional zur Beschleunigung ist, kapazitiv gemessen wird.

Zur Messung der Drehbewegung des Fahrzeugs um seine Hochachse (Gierrate) wird ein mikromechanischer Gierraten-Sensor benutzt. Zur Gierratenmessung wird das in Bild 4.1 dargestellte Antriebsrad zu einer Schwingung angeregt. Tritt nun eine Gierrate am Fahrzeug auf, beginnt das Antriebsrad aufgrund der auftretenden Coriolis-Kräfte zu kippen. Diese Kippbewegung ist proportional zur Gierrate und wird wiederum kapazitiv über die Substratelektrode aufgenommen.

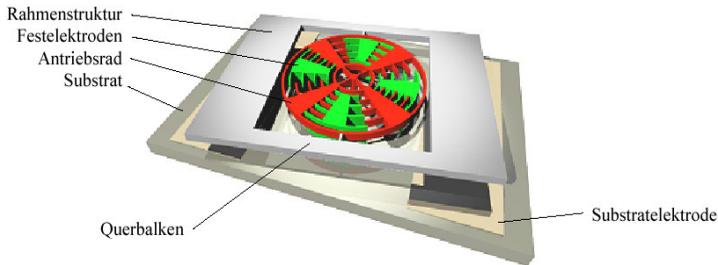


Bild 4.1: Mikromechanischer Gierraten-Sensor

Für die Messung des Lenkradwinkels wird ein *AMR* (Anisotropic MagnetoResistive) - Sensor benutzt. Hierbei wird die Änderung eines Magnetfelds durch eine Winkeländerung des Magneten sensiert, der in die Lenkstange integriert ist. Für ausführliche Informationen über die Funktion der Sensorik zur Erfassung der Eigenfahrzeugdaten wird unter anderem auf [38] und [42] verwiesen. Die aus Messungen ermittelten Auflösungen und Abtastzeiten der jeweiligen Eigenfahrzeug-Sensorik des in Kapitel 9 beschriebenen Versuchsträgers sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Sensorsignal	Auflösung	Abtastzeit
Geschwindigkeit v_{EV}	0,027 m/s	20 ms
Längsbeschleunigung a_{EV}	0,025 m/s ²	20 ms
Gierrate $\dot{\Psi}_{EV}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$ rad/s	20 ms
Lenkradwinkel δ_{STWA}	0,01 rad	1 ms

Tabelle 4.1: Auflösung und Abtastzeit der Eigenfahrzeugdaten-Sensorik

4.2 Die Fahrumfelderfassung

Um eine für das Stauassistenten-System geeignete Umfeldsensorik zu finden, wird im Folgenden definiert, welches Sichtfeld mit welcher Auflösung durch die Umfeldsensorik abgedeckt werden muss. Daraufhin wird untersucht, welche Sensortechnologien in der Lage sind, die Anforderungen zu leisten. Aus diesen Technologien wird eine Sensorkonfiguration für das Stauassistenten-System ausgewählt.

4.2.1 Anforderungen an die Fahrumfelderfassung

4.2.1.1 Abdeckungsbereich der Fahrumfelderfassung

Um die in Kapitel 3.4 geforderte Systemverfügbarkeit zu erreichen, ist es unabdingbar, zusätzlich zum Fahrzeugvorfeld auch den Seitenbereich zu sensieren,

um bei aktivierter Querverführung ein Ausweichen von zu nahen seitlichen Objekten zu ermöglichen.

Für den Abdeckungsbereich vor dem eigenen Fahrzeug soll die gleiche Spezifikation gelten wie für ACC Stop&Go, jedoch werden hier, wie bereits in Abschnitt 3.2.1 erwähnt, nur Geschwindigkeiten bis 60 km/h betrachtet. In [12] wird für den Abdeckungsbereich nach vorne gefordert, dass mindestens der Bereich vor dem eigenen Fahrzeug überdeckt werden muss, in dem sich das eigene Fahrzeug potentiell bewegen kann. Da der Bewegungsraum mit aktiver Querverführung nach Abschnitt 3.2.3 auf den minimalen Radius von 250 m begrenzt ist, erscheint es als sinnvoll, nur den ACC Stop&Go-Betrieb ohne Querverführung zu betrachten, da hierbei weit kleinere Radien erreicht werden (Beispielsweise bei Übersteuerung der Querverführung). Unter Berücksichtigung der maximal gefahrenen (geschwindigkeitsabhängigen) Querbeschleunigungen a_q aus [12], die geschwindigkeitsabhängig sind, kann der minimal mögliche Kurvenradius der Längsführung $R_{min,Lf}$ über

$$R_{min,Lf} = \frac{v_{EV}^2}{a_q} \quad (F 4.1)$$

errechnet werden, welcher wiederum abhängig von der Eigenfahrzeuggeschwindigkeit v_{EV} ist. In Verbindung mit dem Anhalteweg d_s ergibt sich der potentielle Manöverraum aus

$$d_s = -\frac{v_{EV}^2}{2 \cdot a_{x,max}} + t_d \cdot v_{EV}, \quad (F 4.2)$$

wobei v die Fahrzeuggeschwindigkeit zu Beginn der Betrachtung, $a_{x,max}$ die maximal mögliche Verzögerung und t_d die Systemreaktionszeit ist. Wird nun eine maximale Verzögerung von -4 m/s^2 und eine Systemreaktionszeit von 0,5 Sekunden angenommen, ergeben sich die in Bild 4.2 dargestellten Trajektorien für verschiedene Geschwindigkeiten. Die Umhüllende dieser Trajektorien stellt den Manöverraum dar.

Für die Abdeckung des Seitenbereichs wird die Forderung gestellt, jederzeit ein Fahrzeug zu erkennen, das sich auf der Fahrspur neben dem Eigenfahrzeug befindet. Zudem darf kein „toter Winkel“ im Abdeckungsbereich auftreten. Das heißt, ein Fahrzeug, welches das Eigenfahrzeug passiert, muss durchgehend von der Sensorik erfasst werden können, wie es in Bild 4.3 qualitativ dargestellt ist. Um in Abschnitt 4.2.3 eine geeignete Sensorkonfigurationen finden zu können, wird nun der gesamte abzudeckende Bereich in zwei Abschnitte aufgeteilt. Der Mittelbereich, um das Fahrzeugvorfeld abzudecken, und der Nahbereich für den seitlichen Bereich um das Fahrzeug. Die Aufteilung erfolgt hier aus dem Grund, da davon ausgegangen wird, dass der Seitenbereich über an den Fahrzeugseiten angebrachten Sensoren abgedeckt wird. Der Sensor für den Bereich vor dem Fahrzeug soll an der Fahrzeugfront angebracht sein. Auf Basis dieser Aufteilung können unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen für den jeweiligen Bereich spezifiziert werden.

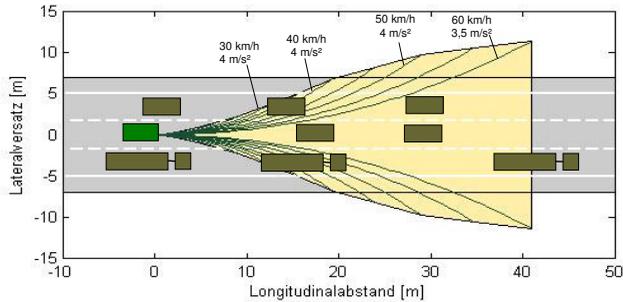


Bild 4.2: Manörraum bei einer Längsverzögerung von -4 m/s^2 bei verschiedenen Anfangsgeschwindigkeiten bis 60 km/h und den dazugehörigen maximal gefahrenen Querbeschleunigungen aus [12] ($t_d = 0,5 \text{ s}$)

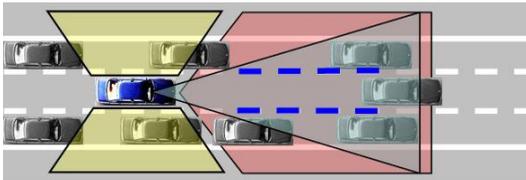


Bild 4.3: Qualitative Darstellung der Anforderungen an die Umfeldsensorik mit Mittel- und Nahbereich und Fahrspurerkennung

Diese Aufteilung wurde in Bild 4.3 bereits vorgenommen, des Weiteren ist hier noch die Erkennung von Fahrbahnmarkierungen nach vorne mit berücksichtigt. Diese kann durch einen zusätzlichen Sensor, wie hier dargestellt, abgedeckt werden oder durch die Mittelbereichs-Sensorik, falls diese Fahrbahnmarkierungen sensieren kann. Für die Erkennung der Fahrbahnmarkierungen ergibt sich die Forderung, dass der Situationsinterpretation zusätzlich zum Abstand und der Orientierung der Fahrspurmarkierung eine Krümmung nach vorne zur Verfügung steht, um eine Querführung auf Basis der Fahrbahnmarkierungen, wie sie in Abschnitt 3.4 gefordert wird, ermöglichen zu können (Bild 1.2). Die Erkennung der Farbe der Fahrbahnmarkierungen wird hier nicht als Anforderung gestellt, da die Performance seriennaher Fahrbahnmarkierungs-Erkennungssysteme für eine sichere Detektion der Farbe nicht ausreicht.

Die Sensorbereiche werden folgendermaßen festgelegt:

- Mittelbereich bis ca. 50 m vor dem Fahrzeug (Bild 4.2)
- Nahbereich bis ca. 5 m neben dem Fahrzeug

Bei Erweiterung der Sensorconfiguration um einen Fernbereichssensor (Reichweite bis 150 m) wäre es möglich, dem Fahrer zusätzlich zum Stauassistenten-System ein ACC-System für den höheren Geschwindigkeitsbereich (bis 180 km/h) zur Verfügung zu stellen. Dies soll aber hier nicht als Anforderung gelten.

4.2.1.2 Auflösungsvermögen der Fahrumfelderfassung

Für den Mittelbereich werden hohe Anforderungen an Genauigkeit und Auflösung gestellt, da sich hier die relevanten Objekte für die Längs- und Querführung im Niedergeschwindigkeitsbereich befinden. Erhöhte Genauigkeit im Vergleich zu reinen Längsführungssystemen wird vor allem im Querauflösungsvermögen benötigt. Bei reinen Längsführungssystemen wird es als ausreichend erachtet, ein Fahrzeug als Massepunkt zu repräsentieren, wohingegen hier der Fahrzeugkontur eine größere Bedeutung zukommt. Zusätzlich zu einer Spurzuordnung der Fahrzeuge spielt bei der Querregelung auch die Position der Fahrzeuge in der Spur eine Rolle. Deshalb ist es unabdingbar, mehrere Messpunkte je Fahrzeug zur Verfügung zu haben, auch um daraus eine Fahrzeugbreite messen zu können. Es soll gelten, dass Fahrzeuge ab einer Mindestbreite von

$$b_{\min} = 0,5m \quad (\text{F 4.3})$$

sicher detektiert werden müssen. Wie bereits in Abschnitt 3.1.3 erwähnt wurde, soll nicht die Anforderung bestehen, Fußgänger und Fahrradfahrer sicher erkennen und klassifizieren zu können. Bei 50 m Entfernung ergibt sich aus (F 4.3) eine minimale Winkelauflösung von $1,7^\circ$ für den Mittelbereich. Analog dazu soll die minimale Genauigkeit des Abstandes 0,5 m für den Mittelbereich betragen, um die Kritikalität naher Einschereiner einschätzen zu können.

Für die Nahbereichs-Sensorik zur Seite muss die Auflösung in longitudinaler Richtung (aus der Sicht des Sensors) höher sein, da der Abstand der dem Eigenfahrzeug zugekehrten Seite des Fremdfahrzeugs zum Eigenfahrzeug für die Evaluierung des Gefahrenpotentials des Fremdfahrzeugs benötigt wird. Auf Basis dieser Information soll eine Kritikalitätseinschätzung des Seitenfahrzeugs stattfinden. Deshalb wird für die Nahbereichs-Sensorik mindestens eine aus Sicht des Sensors (zur Seite) longitudinale Genauigkeit von 0,25 m gefordert, um sicher zwischen einem kritischen und einem unkritischen Seitenfahrzeug unterscheiden zu können. Hinsichtlich Winkelauflösung ergibt sich im Nahbereich die Forderung, dass ein 1 m langes Objekt über den gesamten Seitenbereich auf der Nebenspur detektiert werden muss. Wird nun davon ausgegangen, dass ein Seitenfahrzeug ab einem seitlichen Abstand von 2 m für das System relevant wird, ergibt sich eine minimale laterale Auflösung von 26° für diesen Sensor (Tabelle 4.2).

Vom Öffnungswinkel der Mittelbereichs-Sensorik wird einerseits gefordert, den in Bild 4.2 dargestellten Manöverraum im Mittel- und Nahbereich vor dem Fahrzeug abzudecken, andererseits darf in Verbindung mit der Seitenbereichs-Sensorik, wie bereits erwähnt, kein „toter Winkel“ auftreten. Ein Objekt ab einer Länge von 1 m muss beim Passieren also durchgehend von der Umfeldsensorik erfasst werden können. Weitere Anforderung für die Seitenbereichs-Sensorik ist die Erkennung von baulichen Trennungen zwischen den beiden entgegen gesetzten Fahrbahnen einer Autobahn und von Leitplanken.

Deshalb sollen Objekte ab einer Höhe von 30 cm im Nahbereiche erfasst werden können. Die Erkennung von Bordsteinkanten ab 10 cm und deren Berücksichtigung für die Querführungs-Algorithmik wäre wünschenswert, jedoch würde dies zu hohe Anforderungen an die Nah- und Mittelbereichs-Sensorik stellen.

	Reichweite	Longitudinale Auflösung	Laterale Auflösung
Mittelbereich	50 m	0,5 m	1,7°
Nahbereich	2 m	0,25 m	26°

Tabelle 4.2: Anforderungen an die Nahbereichs- und Mittelbereichs-Sensorik

Für die sichere Detektion der Fahrbahnmarkierungen wird ein Öffnungswinkel der Kamera von $\pm 20^\circ$ als ausreichend erachtet. Die Mindestgenauigkeit des Abstandes zu den erkannten Fahrbahnmarkierungen (Lateraler Offset in Bild 1.2) soll 0,1 m betragen, um eine komfortable und sichere Spurregelung durchführen zu können.

4.2.2 Betrachtung relevanter Sensortechnologien

Für den Einsatz im Automotive-Bereich stehen verschiedene Sensortechnologien zur Fahrumfelderfassung zur Verfügung, die sich zum Teil bereits im Serieneinsatz bewährt haben. Es soll nun eine Bewertung verschiedener Technologien hinsichtlich deren Eignung für das Stauassistenten-System vorgenommen werden. Aus den vorgestellten Technologien wird ein Sensorkonzept ausgewählt, das für die behandelte Problemstellung am sinnvollsten erscheint.

4.2.2.1 Der Radar-Sensor

RADAR-Sensoren (**R**adio **D**etection **A**nd **R**anging) werden in der Automobilindustrie bereits jetzt als Sensor für ACC-Systeme eingesetzt. Sie basieren auf dem Prinzip der Rückstrahlortung und werden in der Regel im Frequenzbereich von 24 GHz (Nahbereich) bzw. 77 GHz (Fernbereich) betrieben. Ein Radarsystem sendet dabei einen elektromagnetischen Impuls aus, der von einem Objekt in der Fahrumgebung reflektiert und vom Sensor ausgewertet wird. Die Rückstrahlleistung hängt dabei im Wesentlichen vom Rückstrahlquerschnitt des Objektes in der Ausstrahlrichtung ab. Im Unterschied zu Lidar-Sensoren kann zusätzlich zum Abstand die radiale Geschwindigkeit durch die Auswertung des Dopplereffektes direkt gemessen werden. Ein weiterer positiver Aspekt der Radar-Sensorik ist die Schlechtwettereigenschaft dieser Systeme, bedingt durch die Ausbreitungseigenschaft der Welle im besagten Frequenzbereich hinsichtlich atmosphärischer Dämpfung und der Niederschlagsdämpfung [39]. Hierdurch erweist sich der Radar-Sensor als relativ unempfindlich gegen Witterungseinflüsse.

Aufgrund der (im Vergleich zur Lidar-Sensorik) größeren Wellenlänge und der begrenzten räumlichen Abmessung des Radarsystems ist jedoch nur eine geringe laterale Auflösung möglich. Bild 4.4 zeigt ein typisches Radar-Richtdiagramm. Hierbei wird meist nur die Hauptkeule zur Abstands- und Geschwindigkeitsmessung ausgewertet.

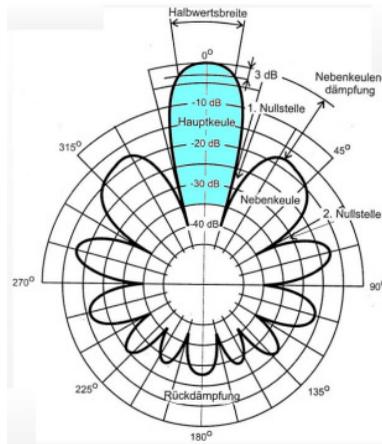


Bild 4.4: Typisches Radar-Richtdiagramm [40]

Für detaillierte Informationen hinsichtlich der Verwendung von Radar-Sensorik im Automotive-Bereich sei hier auf [39], [40], [41] und [42] verwiesen.

4.2.2.2 Der Lidar-Sensor

LIDAR-Sensoren (**L**ight **D**etection and **R**anging) basieren auf dem Prinzip der Lichtlaufzeitmessung. Dabei wird die Laufzeit eines abgestrahlten und reflektierten Lichtimpulses mit einer Wellenlänge von 900 nm (Infrarot) durch eine Auswerteelektronik im Sensor ermittelt und schließlich aufgrund der konstanten Lichtgeschwindigkeit in einen Abstand umgerechnet. Ausgesendet werden die Lichtpulse durch mehrere Diodenreihen mit fester Optik (Multi-Beams) oder durch eine Laserdiode mit beweglicher Optik (Lidar-Scanner) [43]. Eine Aussage über die Objektausdehnung ist somit bei entsprechend hoher Auflösung möglich. Die Geschwindigkeit kann dabei nicht direkt gemessen werden, sondern muss über nachgeschaltete Algorithmen durch die Differenzierung des Abstandes berechnet werden. Lidar-Sensoren haben gegenüber Radar-Sensoren Nachteile bei schlechten Sichtbedingungen. Allerdings sprechen niedrigere Kosten und eine hohe laterale Auflösung für die Lidar-Sensorik. Verschiedene Assistenzsysteme auf Basis von Lidar-Laserscannern wurden in [44] vorgestellt.

4.2.2.3 Videobasierte Bildverarbeitung

Eine passive Sensortechnologie, die sich bereits im Serieneinsatz befindet, ist die Bildverarbeitung auf Basis von Video-Sensorik. Mehrere Fahrzeughersteller bieten eine Spurverlassenswarnung an, die den Fahrer auf Basis von Video-Fahrspurerkennung warnt, wenn er ungewollt seine Fahrspur verlässt. Über Bildverarbeitung können, wie in Bild 4.5 dargestellt, zusätzlich zur Eigen- und Nebenfahrspur (anhand der Fahrspurmarkierungen) auch Fahrzeuge erkannt werden [45]. Die Auswertung der orts-, werte- und zeitdiskretisierten Bilddaten ist rechenintensiv, jedoch mit modernen Steuergeräten im Fahrzeug in Realzeit möglich. Fahrbahnmarkierungen

und Fahrzeuge im Bild werden mittels Kanten-Detektion gesucht und durch modellbasierte Kalman-Filterung beobachtet und ausgewertet [46]. Nachteil dieser Sensortechnologie ist die geringe Verfügbarkeit bei ungünstigen Sichtbedingungen (Schlechtwetter, schnell wechselnde Lichtverhältnisse bei Alleendurchfahrten oder Tunnellein- und ausfahrten). Bei der Erkennung von Fahrzeugen steht dem guten lateralen Auflösungsvermögen eine hohe Unsicherheit in der longitudinalen Richtung gegenüber, weshalb sich hier eine Fusion mit Radar-Daten anbietet.

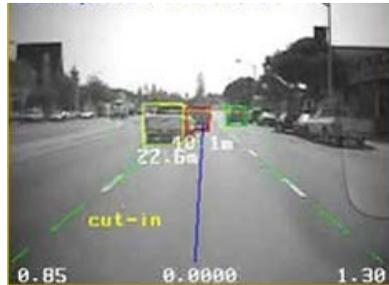


Bild 4.5: Fahrspurerkennung und Fahrzeugerkennung mittels Video-Bildverarbeitung [47]

4.2.2.4 Weitere Sensortechnologien

- **Ultraschall**

Eine bereits etablierte Technologie im Automotive-Bereich stellt die Ultraschall-Sensorik dar. Mehrere Sensoren dieser Art werden bei der Einparkhilfe (*PDC: Park Distance Control*) dazu verwendet, im Nahbereich und bei niedrigen Geschwindigkeiten stehende Hindernisse zu erkennen, um das Einparken zu erleichtern. Aus gesendeten und empfangenen Echosignalen und der Schallgeschwindigkeit kann hierbei die Entfernung zum Hindernis errechnet werden. Nachteile dieser Technologie für die Problemstellung der Stauassistenten sind im Vergleich zu den bereits vorgestellten Sensortechnologien die begrenzte Reichweite und die langsamere Reaktionszeit.

- **Infrarot-Sensor zur Detektion der Fahrbahnmarkierungen**

Für die Detektion der Fahrbahnmarkierungen können Infrarot-Sensoren als Alternative zu einer Video-Bildverarbeitung eingesetzt werden. Diese kostengünstige Technologie wird bereits heute eingesetzt, um über in der vorderen Stoßstange verbaute Infrarot-Sensoren zu erkennen, wann das eigene Fahrzeug ungewollt die Fahrspur verlässt [48]. Eine Querführung auf Basis dieser Daten ist jedoch nicht möglich, da die Spur erst beim Überfahren erkannt werden kann und keine Vorausschau bezüglich der Krümmung der Fahrspur möglich ist.

- **3D-Kamera**

Hierbei werden, ähnlich wie beim Lidar-Sensor, Laserpulse ausgesendet und empfangen. Jedoch geschieht hier die Abtastung in zwei Dimensionen (Bild 4.6). Dadurch entsteht ein dreidimensionales Entfernungsbild des abgetasteten Bereiches. Die Entwicklung dieser Sensorik für den Automotive-Bereich wird bereits im PReVENT-Teilprojekt UseRCams untersucht [49]. Für den Einsatz im Stauassistenten-System sind ähnliche Vor- und Nachteile wie bei der videobasierten Bildverarbeitung zu erwarten.

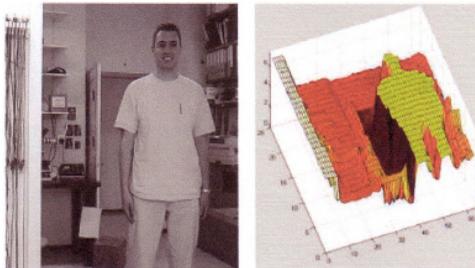


Bild 4.6: Sensorbild einer 3D-Kamera [50]

4.2.3 Sensorauswahl für die Fahrfelderfassung

Um den Anforderungen an die Fahrfelderfassung aus Abschnitt 4.2.1 gerecht zu werden, sollen nun Sensorfusionskonzepte betrachtet werden, da keine der dargestellten Sensortechnologien alleine allen Anforderungen genügen kann. Analog zu Abschnitt 4.2.1 ist die Umfeldsensorik in Fern-, Mittel- und Nahbereich aufgeteilt. Eine mögliche Sensorkonfiguration ist in Bild 4.7 dargestellt.

- **Erkennung der Fahrbahnmarkierungen**

Für die geforderte Erkennung der Fahrbahnmarkierungen erscheint die Video-Bildverarbeitung als am sinnvollsten. Zusätzlich können durch die Bildverarbeitung detektierte Fahrzeuge in Fusionskonzepten berücksichtigt werden. [47] gibt für Kameras zur Fahrbahnmarkierung- und Fahrzeugerkennung einen *FoV* (*Field of View*) von 40° an. Bei einer Auflösung von 640×480 Pixel können für die Fahrzeugerkennung Reichweiten von über 60 Metern erreicht werden.

- **Mittelbereich**

Da die Anforderungen an die Mittelbereichs-Sensorik denen der Fernbereichs-Sensorik ähneln, wird auch hier ein Lidar-System vorgeschlagen, jedoch mit geringeren Anforderungen an die Entfernung (bis 50 m) und einem größeren Öffnungswinkel ($\pm 70^\circ$), um zusammen mit der Seitenbereichs-Sensorik Fahrzeuge durchgehend erkennen zu können.

- **Nahbereich (Seitenbereich)**

Für den Seitenbereich empfiehlt sich ein Lidar-Scanner, da dieser einen großen Öffnungswinkel (bis $\pm 90^\circ$) mit kleinem Einbauraum vereint. Somit kann dieser Sensor direkt zwischen Vordertüre und vorderem Radkasten verbaut werden.

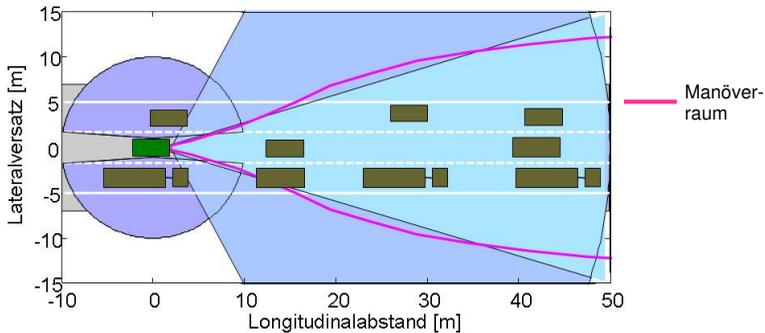


Bild 4.7: Darstellung einer möglichen Sensorkonfiguration aus Lidar-Sensorik mit dem Manöverraum aus Bild 4.2: Öffnungswinkel Mittelbereich $\pm 70^\circ$, Öffnungswinkel Nahbereich $\pm 80^\circ$

Die Verwendung von Lidar-Sensorik hat den Nachteil, dass die Geschwindigkeitsinformation im Gegensatz zu Radar-Sensoren nicht direkt gemessen sondern nur durch Ableitung des Abstandssignals in Längs- und Querrichtung gewonnen wird. Daher ist eine möglichst hohe Messrate für die Geschwindigkeitsauflösung und die Vermeidung von Fehlzugeordnungen von großer Bedeutung.

Bei der Lidar-Sensorik mit der hier dargestellten Auflösung kann angenommen werden, dass im Gegensatz zum Radar vor allem im Nahbereich viele Reflektionspunkte eines Fahrzeugs zur Verfügung stehen und dass somit eine Form detektierbar ist. Des Weiteren wird davon ausgegangen, a priori stehende Ziele sicher als Fahrzeug klassifizieren zu können, um die in [36] beschriebene Problematik der Beherrschbarkeit dieser Systemgrenze zu vermeiden.

4.3 Die Aktorik

4.3.1 Anforderung an die Aktorik

Der Querführungs-Aktorik muss in der Lage sein, ein zusätzliches Lenkmoment an der Lenkeinheit zu erzeugen. Für das maximal aufzubringende Lenkmoment besteht die Notwendigkeit, dass es jederzeit durch den Fahrer übersteuert werden kann, um den Systemanforderungen in Kapitel 3.4 zu genügen. Zusätzlich muss an der Lenkung erkannt werden, ob und wann der Fahrer die Querführung durch eigene Lenkbewegungen übersteuert, um daraufhin das zusätzliche Lenkmoment abschalten zu können. Aus Sicht der Trajektorienregelung besteht die Anforderung, durch Ansteuern des Lenkmoments innerhalb der Systemgrenzen aus Kapitel 3.4 die Trajektorie sicher einzuregeln.

Hinsichtlich der Längsdynamik-Aktorik besteht die Forderung, die Grenzwerte für die Längsbeschleunigung aus Kapitel 3.2.2 umsetzen zu können. Auch hier ist es unabdingbar, die Übersteuerung durch den Fahrer per Gas- oder Bremspedal zu erkennen und systemseitig darauf zu reagieren.

4.3.2 Das Aufbringen eines zusätzlichen Lenkmoments

Die im Versuchsträger verbaute hydraulische Lenkung wird durch eine elektrische Lenkung ersetzt. Bei dieser Lenkung ist der Elektromotor parallel zur Achse am Gehäuse der Lenkung angebracht (Bild 4.8). Die Momente des Elektromotors werden über einen Riemen mit einer Übersetzung von 1/21 auf das Lenkgestänge übertragen. Es handelt sich nicht um ein Steer by Wire System, da das Lenkgestänge weiterhin vorhanden ist. Dadurch kann der Fahrer bei einem Ausfall des Elektromotors lenken oder bei einer Fehlfunktion den Lenkmotor übersteuern.

Die elektrische Lenkung verfügt über eine Momentenschnittstelle, die für die Realisierung von Assistenzfunktionen im öffentlichen Straßenverkehr, beispielsweise für Einparkassistenten und Spurhaltesysteme, entwickelt wurde. Über diese Schnittstelle kann nicht direkt auf das Moment des Elektromotors zugegriffen werden, sie ermöglicht lediglich die Aufschaltung eines virtuellen Lenkradmomentes zu dem vom Fahrer gestellten Lenkmoment.

Das maximal aufbringbare zusätzliche Lenkradmoment der Momentenschnittstelle beträgt hier etwa 3,5 Nm, da Versuche gezeigt haben, dass dieses Moment für die Trajektorienregelung innerhalb der Systemgrenzen aus Abschnitt 3.4 ausreicht und vom Fahrer auch bei einer Fehlfunktion des Stauassistenten-Systems sehr leicht zu übersteuern ist.

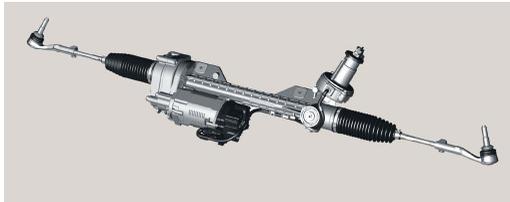


Bild 4.8: Achsparallel verbaute elektrische Lenkung der Firma ZF [51]

4.3.3 Motor- und Bremsmomentenschnittstelle

Der Versuchsträger ist serienmäßig mit einer ACC und DSC-Funktion ausgestattet. Für die Umsetzung dieser Funktionen verfügt das Fahrzeug schon ab Werk über eine entsprechende Motor- und Bremsmomentenschnittstelle. Die Momente können so groß gewählt werden, dass das Fahrzeug innerhalb der Systemgrenzen maximal beschleunigt bzw. maximal verzögert. Das Elektro-Hydraulische Bremssystem im Fahrzeug erlaubt eine sehr schnelle Umsetzung des vorgegebenen Bremsmomentes. Außerdem ermöglicht sie eine Verzögerung bis in den Stillstand, was für die Stop&Go-Längsführung vorausgesetzt wird.

5 Situationsinterpretation in Stausituationen

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die für das Stauassistenten-System relevante Fahrzeug- und Fahrfeld-Sensorik betrachtet wurde, beschäftigt sich dieses Kapitel mit der Situationsinterpretation. Deren Aufgabe ist es, die Sensordaten modellbasiert in der Form zu interpretieren, so dass die in Kapitel 6 aufgeführte Regelung auf Basis dieser Sensordaten stattfinden kann.

Eine grundsätzliche Aufgabenstellung der Querführung ist, eine Spurregelung von Fahrzeugen mit einem Fahrermodell als Regler durchzuführen. Es ist erforderlich, einerseits eine Modellvorstellung der dynamischen Abläufe bei der Querbewegung eines Fahrzeugs entlang einer vorgegebenen Spur (Solltrajektorie) zu entwickeln und andererseits das menschliche Beobachtungs- und Regelverhalten nachzuahmen. Die Aufgabe der Situationsinterpretation hierbei ist, anhand der Daten der nun definierten Sensorkonfiguration eine freie Gasse und somit eine Solltrajektorie zu berechnen. Hierzu soll ein gültiges Gassenmodell für den Stau gefunden werden, das die Möglichkeiten der Umfeld-Sensorik hinsichtlich Auflösung und Reichweite berücksichtigt. Um die Redundanz der Information umliegender Fahrzeuge und der Fahrbahnmarkierungen für die Solltrajektorie ausnutzen zu können, werden diese anfangs getrennt voneinander betrachtet.

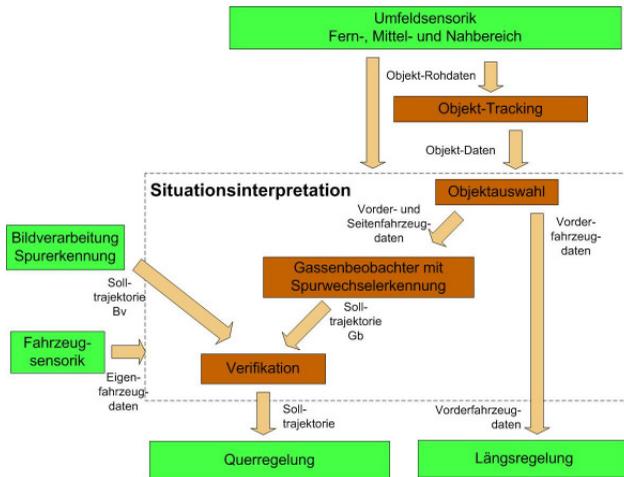


Bild 5.1 Aufbau und Schnittstellen der Situationsinterpretation

Der daraus folgende Aufbau des Situationsinterpretationsblocks ist in Bild 5.1 dargestellt. Eingangsseitig werden die Daten der Umfeld-Sensorik dazu verwendet, im dargestellten Block „Objekt-Tracking“ die Sensorrohdaten einem Objekt zuzuordnen. Bei detektierten Objekten findet hier eine Schätzung der Bewegungszustände statt, worauf in Abschnitt 5.3.2 genauer eingegangen wird. Aus

diesen Objekten wird das relevante Vorderfahrzeug anhand einer Objektauswahl gewählt, auf welches dann auch die Längsregelung reagiert. Dieses Vorderfahrzeug wird zusammen mit den detektierten seitlichen Fahrzeugen und den Sensorrohdaten im Gassenbeobachter dazu verwendet, eine freie Gasse nach vorne und somit eine Trajektorie auf Basis der Bewegung umliegender Objekte (Randbebauung und Fahrzeuge) zu errechnen. Der Verifikations-Block verifiziert oder ergänzt mit dieser Trajektorie die Solltrajektorie aus der Bildverarbeitung und gibt die Solltrajektorie an die Querregelung weiter. Die Situationsinterpretation berücksichtigt dabei auch Daten der internen Fahrzeug-Sensorik. Dies sind die Fahrzeuggeschwindigkeit aus den Raddrehzahl-Sensoren, die Gierrate aus dem fahrzeugeigenen Gierratensensor und der Lenkwinkel, der vom Lenkwinkel-Sensor ausgegeben wird.

5.1 Modellhafte Beschreibung des Fahrzeugumfelds im Stau

5.1.1 Das Trajektorienmodell

Es soll nun ein Modell für die Solltrajektorie der Querverführung aus Sicht des Eigenfahrzeugs (*EV: Ego Vehicle*) erstellt werden. Hierfür wird zu Beginn als Fahrzeugmodell das Punktmassenmodell genutzt, welches dann in Abschnitt 5.3.1 durch ein genaueres Modell, das Einspurmodell, ersetzt wird. Analog zur Trajektorienberechnung in der Spurhalteunterstützung (*HC: Heading Control*, [52]) kann eine Trajektorie näherungsweise mit

$$y_T = y_0 + x_T \cdot \theta_\Delta + \frac{1}{2} \cdot x_T^2 \cdot \kappa_T \quad (\text{F 5.1})$$

beschrieben werden (Bild 5.2, Fahrzeugschwerpunkt als Ursprung).

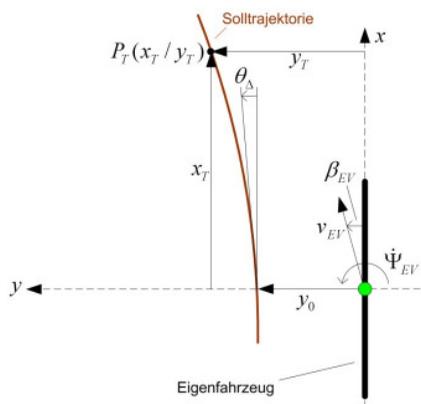


Bild 5.2: Geometrische Verhältnisse der Bewegung eines Fahrzeugs entlang einer gekrümmten Trajektorie im fahrzeugfesten Koordinatensystem

Hierbei stellt $P_T(x_T/y_T)$ einen beliebigen Punkt auf der Solltrajektorie, θ_Δ den Differenzwinkel zwischen Fahrzeug-Längsachse und Tangente an der Solltrajektorie und y_0 den Abstand zwischen Fahrzeug und Solltrajektorie dar. Die Krümmung der Solltrajektorie wird mit κ_T bezeichnet.

Näherungsweise gilt hierbei $\sin \theta_\Delta \approx \theta_\Delta$ und $\cos \theta_\Delta \approx 1$. Eine weitere Approximation, die hier als gültig angenommen wird, ist die Gleichstellung der Krümmung einer Kreisbahn mit dem Koeffizienten des zweiten Taylorpolynoms aus [53].

Der Vorteil der in (F 5.1) dargestellten Näherung einer Kreisbahn durch ein Polynom gegenüber einer Beschreibung ohne Näherung, wie sie in [54] und [55] verwendet wird, ist, dass hierbei kein Sonderfall bezüglich eines unendlichen Radius (Geradeausfahrt) berücksichtigt werden muss. Zudem erfolgt hierdurch eine erhebliche Reduktion der Komplexität der folgenden Bewegungsgleichungen.

Im Trajektorienmodell aus (F 5.1) wird nun die Taylorreihe um ein Polynom 3. Grades erweitert, um zusätzlich zur Krümmung eine Krümmungsänderung und somit eine angenäherte Klothoidenbahn, wie sie im Straßenentwurf [31] verwendet werden, zu erreichen. Auch aus Gründen der Trajektorienregelung erscheint dies als sinnvoll, da dieses zusätzliche Polynom nicht direkt für die Querregelung (Abschnitt 6.1) verwendet wird. Somit kann die Krümmungsänderung für den später folgenden Beobachter als Freiheitsgrad, über den die Messwerte in die Trajektorie mit eingehen, genutzt werden. Da es sich bei der Erweiterung um eine ortsbezogene Änderung der Krümmung handelt, wird der Koeffizient des dritten Taylorpolynoms mit κ'_T bezeichnet:

$$y_T = y_0 + x_T \cdot \theta_\Delta + \frac{1}{2} \cdot x_T^2 \cdot \kappa_T + \frac{1}{6} \cdot x_T^3 \cdot \kappa'_T. \quad (\text{F } 5.2)$$

Dies entspricht der Taylor-Reihenentwicklung der *Fresnel'schen Integrale* für eine Klothoidenbahn bis zum Polynom 3. Grades, woraus sich auch die jeweiligen Koeffizienten ergeben. Die Herleitung dieser Näherung und eine Fehlerbetrachtung sind in [53] zu finden.

5.1.2 Bewegungsgleichungen eines Fahrzeugs entlang der Trajektorie

Die Differentialgleichungen der Bewegung eines Fahrzeugs entlang der Trajektorie in Bild 5.2 und (F 5.2) sollen nun aufgestellt werden.

Die zeitliche Änderung des Abstandes des Fahrzeugs zur Trajektorie (Querversatzänderung) in Abhängigkeit des Winkelfehlers θ_Δ und des Schwimmwinkels β_{EV} lautet

$$\dot{y}_0 = \theta_\Delta \cdot v_{EV} - \beta_{EV} \cdot v_{EV}. \quad (\text{F } 5.3)$$

Es gilt für die zeitliche Änderung des Winkelfehlers $\dot{\theta}_\Delta$ abhängig von der Trajektorienkrümmung κ_T und der Fahrzeugdrehrate (Gierrate) $\dot{\Psi}_{EV}$

$$\dot{\theta}_\Delta = \kappa_T \cdot v_{EV} - \dot{\Psi}_{EV}. \quad (\text{F } 5.4)$$

Die zeitliche Krümmungsänderung lässt sich mit der örtlichen Krümmungsänderung κ'_T durch

$$\dot{\kappa}_T = \kappa'_T \cdot v_{EV} \quad (\text{F 5.5})$$

ausdrücken.

5.1.3 Die Trajektorie zum Vorderfahrzeug

Eine entscheidende Größe für die Trajektorienplanung auf Basis der umliegenden Objekte ist das Vorderfahrzeug. Als Vorderfahrzeug soll dasjenige Fahrzeug bezeichnet werden, das sich im Stau vor dem Eigenfahrzeug auf der gleichen Fahrspur befindet. Unter Ausschluss der Situationen *Ausscherer* und *Einscherer* (vgl. Abschnitt 2.2.1) kann davon ausgegangen werden, dass das Eigenfahrzeug dem Vorderfahrzeug in der Querführung folgen soll. Somit kann zur Bestimmung der Trajektorienparameter in (F 5.2) die Schwerpunktsposition des Vorderfahrzeugs $P_{FC}(x_{FC}/y_{FC})$ (*FC - Front Center*) einem Punkt auf der Trajektorie P_T gleichgesetzt werden:

$$y_{FC} = y_0 + x_{FC} \cdot \theta_\Delta + \frac{1}{2} \cdot x_{FC}^2 \cdot \kappa_T + \frac{1}{6} \cdot x_{FC}^3 \cdot \kappa'_T. \quad (\text{F 5.6})$$

5.1.4 Beschreibung der Gassenbegrenzung in Stausituationen

Das Umfeldmodell soll nun um seitliche Begrenzungen ergänzt werden. Diese Begrenzung schränkt die Querbewegung des Eigenfahrzeugs und somit die Solltrajektorie ein. Sie kann durch Fahrzeuge auf der Nebenfahrbahn, aber auch durch Randbebauung, bauliche Trennungen und Leitplanken hervorgerufen werden. Es wird davon ausgegangen, dass die rechte und linke Gassenbegrenzung parallel zur mit (F 5.2) beschriebenen Solltrajektorie verlaufen (Bild 5.3). Somit können beliebige Punkte $P_L(x_L/y_L)$ auf der linken Gassenbegrenzung durch

$$y_L = (y_0 + b_L) + x_L \cdot \theta_\Delta + \frac{1}{2} \cdot x_L^2 \cdot \kappa_T + \frac{1}{6} \cdot x_L^3 \cdot \kappa'_T \quad (\text{F 5.7})$$

beschrieben werden. Analog dazu gilt für Punkte $P_R(x_R/y_R)$ auf der rechten Gassenbegrenzung

$$y_R = (y_0 - b_R) + x_R \cdot \theta_\Delta + \frac{1}{2} \cdot x_R^2 \cdot \kappa_T + \frac{1}{6} \cdot x_R^3 \cdot \kappa'_T. \quad (\text{F 5.8})$$

b_L und b_R bezeichnen hierbei jeweils den Betrag des Abstandes der linken und rechten Gassenbegrenzung zur Solltrajektorie.

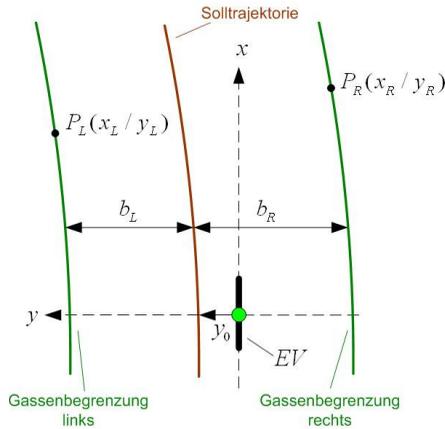


Bild 5.3: Erweiterung des Straßenmodells um die linke und rechte Gassenbegrenzung

5.2 Die Zustandsbeobachtung

Die Aufgabe der Zustandsbeobachtung ist es, die Zustandsgrößen dynamischer Systeme bei verrauschten Messungen und Störeinflüssen zu schätzen.

Hierfür werden die Systemgleichungen in die Standardbeschreibungsförm für lineare Zustandsmodelle (*LTI: linear, time-invariant*) überföhrt.

$$\dot{\underline{x}} = A\underline{x} + B\underline{u}, \quad (\text{F } 5.9)$$

wobei \underline{x} dem Zustandsvektor entspricht, \underline{u} dem Eingangsgrößenvektor, A der Systemmatrix und B der Eingangsmatrix.

Die Messgleichung lautet

$$\underline{y} = C\underline{x} + D\underline{u}, \quad (\text{F } 5.10)$$

mit dem Messgrößenvektor \underline{y} , der Ausgangsmatrix C und der Durchschaltmatrix D .

5.2.1 Systemgleichung aus der modellhaften Beschreibung

Bezogen auf die in Abschnitt 5.1 definierten Trajektorien- und Bewegungsgleichungen resultiert für das hier dargestellte dynamische System mit

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} y_0 \\ \theta_\Delta \\ \kappa_T \\ \kappa'_T \\ b_L \\ b_R \end{pmatrix} \quad (\text{F 5.11})$$

als Zustandsvektor und

$$\underline{u} = \begin{pmatrix} \beta_{EV} \\ \dot{\Psi}_{EV} \end{pmatrix} \quad (\text{F 5.12})$$

(Gierrate und Schwimmwinkel des Fahrzeugs) als Eingangsgrößenvektor die Systemgleichung

$$\begin{pmatrix} \dot{y}_0 \\ \dot{\theta}_\Delta \\ \dot{\kappa}_T \\ \dot{\kappa}'_T \\ \dot{b}_L \\ \dot{b}_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & v_{EV} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & v_{EV} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & v_{EV} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ \theta_\Delta \\ \kappa_T \\ \kappa'_T \\ b_L \\ b_R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -v_{EV} & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \beta_{EV} \\ \dot{\Psi}_{EV} \end{pmatrix}, \quad (\text{F 5.13})$$

wenn (F 5.3), (F 5.4) und (F 5.5) in (F 5.9) eingesetzt werden.

Die Fahrzeuggeschwindigkeit wird analog zu [52] und [54] für die Relativbewegung des Fahrzeugs zur Trajektorie als konstant angenommen. Somit kann sie in der Systemmatrix A als Konstante verwendet werden.

5.2.2 Messgleichung aus der modellhaften Beschreibung

Als Messgrößen dienen zum einen die Position des Vorderfahrzeugs $P_{FC}(x_{FC}/y_{FC})$, die über die Front-Sensorik und einem nachgeschalteten Tracking zur Verfügung steht, zum anderen die Sensorrohdaten der Gassenbegrenzung $P_L(x_L/y_L)$ und $P_R(x_R/y_R)$ aus Bild 5.3. Für die Beobachtung der Gassenbegrenzung werden die ungetrackten Sensorrohdaten genutzt, da im Seitenbereich modellunabhängig die dem Eigenfahrzeug am nächsten liegenden Reflektionspunkte relevant sind (vgl. Abschnitt 5.3.4). Die Position des Vorderfahrzeugs auf der Trajektorie steht zu einem betrachteten Messzeitpunkt einmal zur Verfügung, wohingegen mehrere Reflektionspunkte die seitliche Gassenbegrenzung beschreiben. Da die erwarteten Winkelabweichungen θ_Δ und Krümmungen κ_T relativ geringe Werte annehmen, kann im Modell davon ausgegangen werden, dass sich Änderungen der Zustandsvariablen kaum auf die gemessenen x-Koordinaten des Vorderfahrzeugs und der Gassenbegrenzungspunkte auswirken. Dies gilt jedoch nicht für die entsprechenden y-Koordinaten des Vorderfahrzeugs. Werden die x-Koordinaten also als konstant angenommen, kann der Messgrößenvektor für das LTI-System als

$$\underline{y} = \begin{pmatrix} y_{FC} \\ y_{L1} \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{Lm} \\ y_{R1} \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{Rn} \end{pmatrix} \quad (\text{F 5.14})$$

definiert werden, wobei m der Anzahl der gültigen Messdaten aus der linken Gassenbegrenzung und n der Anzahl der gültigen Messdaten aus der rechten Gassenbegrenzung entspricht. Somit ergibt sich aus (F 5.6), (F 5.7) und (F 5.8) analog zu (F 5.10) folgende Messgleichung:

$$\begin{pmatrix} y_{FC} \\ y_{L1} \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{Lm} \\ y_{R1} \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{Rn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{FC} & \frac{1}{2} \cdot x_{FC}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{FC}^3 & 0 & 0 \\ 1 & x_{L1} & \frac{1}{2} \cdot x_{L1}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{L1}^3 & 1 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{Lm} & \frac{1}{2} \cdot x_{Lm}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{Lm}^3 & 1 & 0 \\ 1 & x_{R1} & \frac{1}{2} \cdot x_{R1}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{R1}^3 & 0 & -1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{Rn} & \frac{1}{2} \cdot x_{Rn}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{Rn}^3 & 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ \theta_\Delta \\ \kappa_T \\ \kappa'_T \\ b_L \\ b_R \end{pmatrix}. \quad (\text{F 5.15})$$

Da kein direkter Bezug zwischen Eingangsgröße und Messgrößenvektor besteht, kann als Durchschaltmatrix D in (F 5.10) die Nullmatrix verwendet werden.

Stehen die Rohdaten der Messung in Polarkoordinaten $P_P(r/\varphi)$ zur Verfügung, können sie durch eine mit C multiplizierte Transformationsmatrix als Messdaten in dem betrachteten kartesischen Koordinatensystem berücksichtigt werden. Hierdurch kann einer unterschiedlichen Genauigkeit der Rohdaten in φ - und r - Richtung im Kalman-Filter Rechnung getragen werden.

5.2.3 Rauschanteil und Varianten der Zustandsbeobachtung

Rauschen wird im Allgemeinen als stochastischer Prozess betrachtet, bei dem über den Wert einer zeitabhängigen Größe für jeden Zeitpunkt nur Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden können. Somit existiert kein deterministischer Zusammenhang zwischen den Werten des Rauschprozesses.

Bei Messungen mit den in Kapitel 4 vorgestellten Sensorsystemen wird von einem verrauschten Sensorsignal (Messrauschen) ausgegangen. Dieses Rauschen kann verschiedene Ursachen haben: Beispielsweise besitzt jeder Sensortyp spezielle physikalische Eigenschaften. Die Genauigkeit bei der Entfernungsmessung mit Radar- und Lidar-Sensoren ist einerseits abhängig vom Messprinzip des zu verarbeitenden Signals. Andererseits können elektromagnetische Einstrahlungen in den Stromkreisen des Sensors das gemessene Signal verfälschen. Das Verhältnis der Energie von Nutz- und Rauschsignal (Signal to Noise Ratio – SNR) gibt hierbei eine Aussage über die Qualität des gemessenen Signals.

Ein weiteres Problem bei der Betrachtung linearer Zustandsmodelle ist, dass sich im Normalfall zu einem bestimmten Zeitpunkt keine Aussage über den Wert der Zustandsvariablen treffen lässt. Diese Zustandswerte müssen erst durch die Berücksichtigung früherer Systemzustände geschätzt werden, was voraussetzt, dass die Zustände vorausberechenbar sind. Auch dies ist nicht immer der Fall. Des Weiteren können die Systemgleichungen fehlerbehaftet sein, beispielsweise wenn sich als konstant angenommene Zustände in der Realität ändern (z. B. die Beschleunigung in Abschnitt 5.3.2), und sind somit mit einem Prozessrauschen versehen. Für die nun folgenden Filtermethoden wird das Mess- und Prozessrauschen als unabhängiges, normalverteiltes, mittelwertfreies weißes Rauschen angenommen.

Da also in der Realität Prozess und Messung verrauscht sind, werden in der Regelungstechnik die Gleichungen (F 5.9) und (F 5.10) um einen Rauschanteil zu

$$\dot{\underline{x}} = A\underline{x} + B\underline{u} + \Gamma\underline{v} \quad (\text{F 5.16})$$

und

$$\underline{y} = C\underline{x} + D\underline{u} + \underline{w} \quad (\text{F 5.17})$$

erweitert.

Hierbei bezeichnen $\Gamma\underline{v}$ und \underline{w} einen Prozess- und Messrauschanteil, welche wie eingangs erwähnt als unabhängige, normalverteilte, mittelwertfreie weiße Rauschanteile angenommen werden. Γ stellt hierbei die Rauschverstärkung des Prozessrauschens dar [56]. Der Anteil $D\underline{u}$ in (F 5.17) wird im Folgenden nicht mehr betrachtet, da die Durchschaltmatrix D im betrachteten Fall in (F 5.15) der Nullmatrix entspricht.

Ziel der Zustandsbeobachtung ist es, die verrauschten Zustandsgrößen in \underline{x} , die nicht direkt gemessen werden können, über die verrauschten Messungen in \underline{y} möglichst genau ermitteln zu können. Hierfür wird in der Regelungstechnik für die Zustandsbeobachtung folgender allgemeiner Ansatz gemacht:

$$\dot{\underline{\hat{x}}} = \underbrace{A\underline{\hat{x}} + B\underline{u}}_{\text{Prozessterm}} + \underbrace{L(\underline{y} - \underline{\hat{y}})}_{\text{Korrekturterm}} \quad (\text{F 5.18})$$

$$\underline{\hat{y}} = C\underline{\hat{x}} \quad (\text{F 5.19})$$

Die Beziehungen beschreiben ein zu (F 5.16) und (F 5.17) ähnliches Hilffsystem mit dem Schätzwertvektor $\underline{\hat{x}}$ von \underline{x} , das über die bekannten Größen \underline{y} und \underline{u} an den

Prozess gekoppelt ist. Zu definierender Entwurfparameter ist hier die Beobachter-Rückführmatrix L .

Für den Schätzfehler \underline{e} , der definiert ist über

$$\underline{e}(t) = \underline{x}(t) - \hat{\underline{x}}(t), \quad (\text{F 5.20})$$

soll gelten

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\underline{e}(t)\| = 0. \quad (\text{F 5.21})$$

Entwurfsziel des Zustandsbeobachters ist demnach, den Schätzvektor $\hat{\underline{x}}$ dem tatsächlichen Zustandsvektor \underline{x} anzunähern. Der Beobachter (F 5.18) sorgt dafür, dass der Fehler zwischen direkten Messwerten \underline{y} und den über den Schätzwerten $\hat{\underline{x}}$ vorausgesagten Messwerten $\hat{\underline{y}}$ im Falle eines anfänglichen Schätzfehlers asymptotisch zu Null „geregelt“ wird, damit (F 5.21) erfüllt wird.

Spielt der Rauschanteil in (F 5.16) und (F 5.17) eine untergeordnete Rolle, werden die Parameter der Rückführmatrix L konstant gewählt (*vollständiger* oder *Luenberger-Beobachter*, [57]). Bei der betrachteten Problemstellung jedoch erweist es sich als sinnvoller, die Rückführmatrix algorithmisch bei jedem Zeitschritt neu zu bestimmen, da die Rauschanteile stark variieren können. Vor allem das Prozessrauschen kann bei sich ändernden Umgebungsbedingungen (Krümmungsänderung der Straße, sich annähernde oder entfernende Randbebauung) sehr unterschiedlich stark auf den beobachteten Prozess einwirken. Deshalb wird hier ein *rauschoptimaler* Beobachter verwendet, das *Kalman-Filter*. Auf die Herleitung der Filtergleichungen soll hier kurz eingegangen werden, die genaue Herleitung ist in [57], [58] und [59] zu finden.

Im Folgenden erweist es sich als zweckdienlich, die Prozess- und Messgleichungen zu diskretisieren, um die Filterschritte sequentiell durchführen zu können. Aus (F 5.16) und (F 5.17) resultieren durch Diskretisierung

$$\underline{x}_k = A_D \underline{x}_{k-1} + B_D \underline{u}_{k-1} + \Gamma \underline{v}_{Dk-1} \quad (\text{F 5.22})$$

und

$$\underline{y}_k = C_D \underline{x}_k + \underline{w}_{Dk}, \quad (\text{F 5.23})$$

wobei A_D , B_D und C_D jeweils den bei der Diskretisierung der Prozess- und Messgleichung entstehenden Matrizen entsprechen. $\Gamma \underline{v}_D$ und \underline{w}_D sind dann zeitunabhängige normalverteilte Zufallswerte mit den Wahrscheinlichkeitsverteilungen

$$p(\Gamma \underline{v}_D) \sim N(0, Q_D) \quad (\text{F 5.24})$$

und

$$p(\underline{w}_D) \sim N(0, R_D), \quad (\text{F 5.25})$$

mit Q_D als Kovarianzmatrix des Prozessrauschens $\Gamma \underline{v}_D$ und R_D als Kovarianzmatrix des Messrauschens \underline{w}_D .

Für die Herleitung der Filtergleichungen werden nun einige Variablen definiert.

Ist \underline{x}_k^* der vorausgesagte Schätzwert von \underline{x} zum Zeitpunkt k , kann e_k^* als der Fehler des Schätzwertes bezeichnet werden:

$$\underline{e}_k^* = \underline{x}_k - \underline{x}_k^* . \quad (\text{F 5.26})$$

Wird zusätzlich der optimale Schätzwert $\hat{\underline{x}}_k$ betrachtet, ist e_k der Fehler dieses optimalen Schätzwertes:

$$\underline{e}_k = \underline{x}_k - \hat{\underline{x}}_k . \quad (\text{F 5.27})$$

Im Gegensatz zum vorausgesagten Schätzwert \underline{x}_k^* berücksichtigt der optimale Schätzwert $\hat{\underline{x}}_k$ die aktuelle Messung.

P_k^* beschreibt den mittleren quadratischen Fehler (a-priori-Schätzfehler-Kovarianz) zwischen dem Zustand \underline{x}_k und seinem vorausgesagten Schätzwert \underline{x}_k^* :

$$P_k^* = E(\underline{e}_k^* \underline{e}_k^{*T}) . \quad (\text{F 5.28})$$

P_k beschreibt den mittleren quadratischen Fehler (a-posteriori-Schätzfehler-Kovarianz) zwischen dem Zustand \underline{x}_k und seinem optimalen Schätzwert $\hat{\underline{x}}_k$ unter Berücksichtigung des Messwertes:

$$P_k = E(\underline{e}_k \underline{e}_k^T) . \quad (\text{F 5.29})$$

Bei Berücksichtigung der Kovarianz des Prozessrauschens Q_D lässt sich anhand des a-posteriori-Schätzfehlers ein a-priori-Schätzfehler für den nächsten Zeitschritt voraussagen:

$$P_k^* = A_D P_{k-1} A_D^T + Q_D . \quad (\text{F 5.30})$$

Um nun die Kalman-Filtergleichungen zu erhalten, wird eine Gleichung aufgestellt, die den optimalen Schätzwert $\hat{\underline{x}}_k$ als Linearkombination des vorausgesagten Schätzwertes \underline{x}_k^* und der gewichteten Differenz zwischen Messwert \underline{y}_k und dem vorausgesagten Messwert $C \underline{x}_k^*$ beschreibt:

$$\hat{\underline{x}}_k = \underline{x}_k^* + L_k (\underline{y}_k - C_D \underline{x}_k^*) . \quad (\text{F 5.31})$$

Der Anteil $\underline{y}_k - C_D \underline{x}_k^*$ wird als Innovation bezeichnet.

Die Rückführ- oder Kalman-Verstärkungsmatrix L_k gewichtet analog zu (F 5.18) den Fehler zwischen vorausgesagtem Messwert und tatsächlichem Messwert zum Zeitpunkt k .

Sie wird aus den nun bekannten Größen, unter anderem der Kovarianz des Messrauschens R_D , folgendermaßen errechnet [58]:

$$\begin{aligned} L_k &= P_k^* C_D^T S_k^{-1} \\ S_k &= C_D P_k^* C_D^T + R_D \end{aligned} \quad (\text{F 5.32})$$

Für die Innovations-Kovarianzmatrix S_k gilt

$$S_k = E((\underline{y}_k - C_D \underline{x}_k^*)(\underline{y}_k - C_D \underline{x}_k^*)^T). \quad (\text{F 5.33})$$

Sie besteht zum einen aus der in den Messraum überführten Schätzfehler-Kovarianzmatrix und zum anderen aus der Sensorfehler-Kovarianzmatrix und gibt somit den mittleren quadratischen Fehler der Innovation an.

Wird L_K über (F 5.32) ermittelt, minimiert sie über (F 5.31) die a-posteriori-Schätzfehler-Gleichung (F 5.29).

Betrachtet man Gleichung (F 5.32) genauer, fällt auf, dass bei geringen Werten der Messrauschen-Kovarianzmatrix $R_D \rightarrow 0$ die Verstärkungsmatrix L gegen $L_k \rightarrow (C_D^T)^{-1}$ geht. In (F 5.31) wird beim Einsetzen dieses Wertes der Messung vollständig vertraut, der Schätzwert wird nicht mehr berücksichtigt. Bei geringen Fehlern des Schätzwertes $P_k^* \rightarrow 0$ errechnet sich $L_k \rightarrow 0$. Somit wird nur der Schätzwert und nicht die Messung für die Berechnung des optimalen Schätzwertes in (F 5.31) berücksichtigt.

Der Fehler des optimalen Schätzwertes P_k kann nun unter der Berücksichtigung der Kalman-Verstärkungsmatrix folgendermaßen berechnet werden:

$$P_k = P_k^* - L_k C_D P_k^* \quad (\text{F 5.34})$$

Die jetzt bekannten Gleichungen werden für den nun folgenden Filter-Algorithmus verwendet.

Das Kalman-Filter schätzt die Zustände mittels einer Feedback-Kontrolle. Erst werden die inneren Zustände anhand des dynamischen Verhaltens unter Berücksichtigung früherer Zustände geschätzt, dann wird der optimale Schätzwert unter Berücksichtigung des Messwertes errechnet (Bild 5.4).

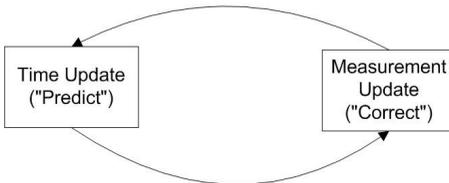


Bild 5.4: Ablauf des Kalman-Filteralgorithmus

Setzt man die vorher hergeleiteten Gleichungen ein, erhält man den in Bild 5.5 dargestellten Algorithmus, der zu jedem Zeitpunkt k einmal ausgeführt wird.

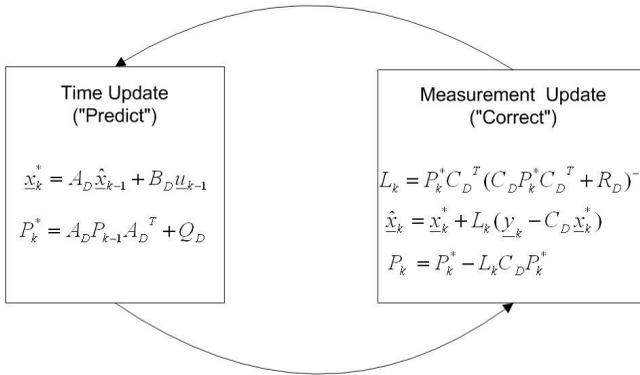


Bild 5.5: Ablauf des Kalman-Filteralgorithmus

Im *Time Update* - Rechenschritt wird der nächste Zustandsvektor \underline{x}_k^* und sein voraussichtlicher Fehler P_k^* geschätzt. Der *Measurement Update* - Schritt ermittelt mit P_k^* die Verstärkungsmatrix L_k , woraus dann unter Berücksichtigung des Messwertes \underline{y}_k der optimale Schätzwert $\hat{\underline{x}}_k$ ermittelt wird. Schließlich wird noch der aktuelle Fehler des optimalen Schätzwertes P_k berechnet.

Im Gegensatz zum Luenberger-Beobachter wird beim Kalman-Filter anhand des geschätzten aktuellen Prozessfehlers die Rückführmatrix bei jedem Zeitschritt neu berechnet. Ein weiterer Vorteil des Kalman-Filters bei der hier betrachteten Problemstellung ist, dass er eine Schätzung des aktuellen Prozessfehlers zur Verfügung stellt. Diese Information kann für die Breite des Suchschlauches zur Eingrenzung der Gassenbegrenzungspunkte verwendet werden.

5.2.4 Diskretisierung der Prozess- und Messgleichung

Um die inneren Zustände des dynamischen Systems auf Basis der Beobachtungs-Algorithmik, die im vorigen Abschnitt definiert wurde, beobachten zu können, werden die Prozess- und Messgleichung nun diskretisiert. Hierdurch kann die Komplexität des Beobachterproblems reduziert und im Realzeitsystem (Kapitel 9) implementiert werden. Als Diskretisierungsverfahren wird hier die Euler-Diskretisierung gewählt. Da die Diskretisierungsschritte im Vergleich zur Dynamik des Systems relativ klein sind, wird von Diskretisierungsverfahren höherer Ordnungen abgesehen. Somit folgt aus (F 5.16) durch Diskretisierung

$$\frac{\underline{x}_{k+1} - \underline{x}_k}{T} = A \underline{x}_k + B \underline{u}_k + \Gamma \underline{v}_k, \quad (\text{F 5.35})$$

wobei T dem Zeitintervall

$$T = t_{k+1} - t_k \quad (\text{F 5.36})$$

und somit der Schrittweite des diskreten Systems entspricht. Die Stellgröße u wird über ein Halteglied nullter Ordnung approximiert und somit während eines Zeitschrittes $[t_k \ t_{k+1}]$ als konstant angenommen. Durch Umformung erhält man aus (F 5.35)

$$\underline{x}_{k+1} = (I + TA)\underline{x}_k + TBu_k + T\Gamma v_k. \quad (\text{F 5.37})$$

Somit können unter Berücksichtigung von (F 5.22) und (F 5.23) folgende Beziehungen zwischen diskreten und kontinuierlichen Systemmatrizen gemacht werden:

$$\begin{aligned} A_D &= (I + TA) \\ B_D &= TB \\ C_D &= C \\ Q_D &= T^2 Q \\ R_D &= R. \end{aligned} \quad (\text{F 5.38})$$

mit Q als Kovarianzmatrix des Prozessrauschens und R als Kovarianzmatrix des Messrauschens. Die diskretisierte Prozessgleichung aus (F 5.13) und Messgleichung aus (F 5.15) lauten folglich

$$\begin{pmatrix} y_{0,k+1} \\ \theta_{\Delta,k+1} \\ \kappa_{T,k+1} \\ \kappa'_{T,k+1} \\ b_{L,k+1} \\ b_{R,k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & T \cdot v_{EV} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T \cdot v_{EV} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \cdot v_{EV} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_{0,k} \\ \theta_{\Delta,k} \\ \kappa_{T,k} \\ \kappa'_{T,k} \\ b_{L,k} \\ b_{R,k} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -T \cdot v_{EV} & 0 \\ 0 & -T \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \beta_{EV,k} \\ \Psi_{EV,k} \end{pmatrix} \quad (\text{F 5.39})$$

und

$$\begin{pmatrix} y_{FC,k} \\ y_{L1,k} \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{Lm,k} \\ y_{R1,k} \\ \cdot \\ \cdot \\ y_{Rn,k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{FC} & \frac{1}{2} \cdot x_{FC}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{FC}^3 & 0 & 0 \\ 1 & x_{L1} & \frac{1}{2} \cdot x_{L1}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{L1}^3 & 1 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{Lm} & \frac{1}{2} \cdot x_{Lm}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{Lm}^3 & 1 & 0 \\ 1 & x_{R1} & \frac{1}{2} \cdot x_{R1}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{R1}^3 & 0 & -1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{Rn} & \frac{1}{2} \cdot x_{Rn}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{Rn}^3 & 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_{0,k} \\ \theta_{\Delta,k} \\ \kappa_{T,k} \\ \kappa'_{T,k} \\ b_{L,k} \\ b_{R,k} \end{pmatrix}. \quad (\text{F 5.40})$$

Wie (F 5.40) zeigt, berücksichtigt das hier entwickelte Kalman-Filter zur Beobachtung der freien Gasse nach vorne neben der getrackten Position des Vorderfahrzeugs auch die Rohdaten aus dem Seitenbereich, welche aus umliegenden Fahrzeugen oder einer Randbebauung stammen können. Durch dieses Vorgehen werden die Seitenbereichsdaten nicht nur dazu genutzt, den Abstand eines seitlichen Objekts zu schätzen, sondern zusätzlich, vor allem bei Reflektionspunkten *vor* dem Eigenfahrzeug, um die vorausschauenden Zustandsgrößen der Solltrajektorie (Krümmungsänderung, Krümmung und Drehung zur Solltrajektorie) zu gewichten. Somit wurde erreicht, dass das Vorderfahrzeug *und* seitliche Objekte zur Berechnung der Solltrajektorie berücksichtigt werden. Es stehen jetzt also Filtergleichungen für die Beobachtung einer freien Gasse nach vorne (Gassenbeobachter) zur Verfügung. Die Evaluierung des Gassenbeobachters soll in Abschnitt 5.4 in einer Closed-Loop-Simulationsumgebung stattfinden.

5.3 Aufbereitung der Eingangs- und Messgrößen

Die für die Kalman-Filterung benötigten Größen werden von der Sensorik nicht direkt in der Form, wie in (F 5.39) und (F 5.40) dargestellt, zur Verfügung gestellt. Im Folgenden sollen die Methoden zur Aufbereitung der Messgrößen aufgezeigt werden.

5.3.1 Berechnung und Aufbereitung der Gierrate und des Schwimmwinkels

Da in Stausituationen, also in dem für das Stauassistenz-System relevanten Geschwindigkeits- und Dynamikbereich, geringe Gierraten auftreten, erweist sich das Signal aus dem Gierraten-Sensor als zu verrauscht und zu wenig hoch auflösend für die direkte Verwendung als Eingangsgröße des Gassenbeobachters. Aus diesem Grund wird wiederum ein Kalman-Filter verwendet, das für die Berechnung der optimalen Gierrate zusätzlich zur gemessenen Gierrate die Geschwindigkeitsdifferenz der Vorderräder und den Lenkradwinkel berücksichtigt. Als Fahrzeugmodell dient das Einspurmodell, welches aufgrund seiner einfachen Struktur häufig im Bereich der Fahrerassistenz und in der Aktiven Sicherheit eingesetzt wird. Des Weiteren werden die Dynamik-Grenzen und somit der Gültigkeitsbereich für die Querschleunigung des Einspurmodells, der unterhalb 4 m/s^2 liegt [60], innerhalb der Systemgrenzen des Stauassistenz-Systems nicht überschritten (s. Abschnitt 3.2.3). Die Singularität des Einspurmodells bei verschwindender Längsgeschwindigkeit wird analog zu [61] durch geeignete Koordinatentransformation und entsprechende Diskretisierung vermieden. Auf die Herleitung der Einspurmodellgleichungen soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, hierfür wird auf [60] und [61] verwiesen.

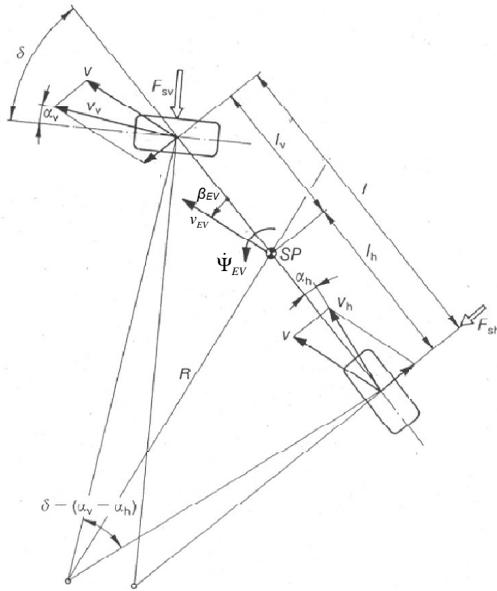


Bild 5.6: Geschwindigkeits- und Kräftevektoren im Einspurmodell

Die Bewegungsgleichungen des Einspurmodells unter Berücksichtigung der Kräftevektoren aus Bild 5.6 lauten für $v_{EV} > 0$

$$\Theta \ddot{\Psi}_{EV} = -\frac{(c_v l_v^2 + c_h l_h^2)}{v_{EV}} \dot{\Psi}_{EV} - (c_v l_v - c_h l_h) \beta_{EV} + c_v l_v \delta \quad (\text{F 5.41})$$

und

$$m_{EV} v_{EV} \dot{\beta}_{EV} = -(m_{EV} v_{EV} + \frac{c_v l_v - c_h l_h}{v_{EV}}) \dot{\Psi}_{EV} - (c_v + c_h) \beta_{EV} + c_v \delta. \quad (\text{F 5.42})$$

Hierbei entspricht Θ dem Gierträgheitsmoment, c_v und c_h den als konstant angenommenen Schräglaufsteifigkeiten, β_{EV} dem Schräglaufwinkel, $\dot{\Psi}_{EV}$ der Gierrate und δ dem Lenkwinkel am Vorderrad. Die Fahrzeugmasse wird mit m_{EV} bezeichnet.

Um die Komplexität des Systems zu reduzieren, erfolgt eine Ordnungsreduktion durch die Annahme eines konstanten Schräglaufwinkels, was $\dot{\beta}_{EV} = 0$ entspricht. Somit steht die Krümmung der Eigenfahrzeughahn κ_{EV} mit der Gierrate $\dot{\Psi}_{EV}$ über

$$\dot{\Psi}_{EV} = v_{EV} \cdot \kappa_{EV} \quad (\text{F 5.43})$$

in Zusammenhang. Es wird im Folgenden anstelle der Gierrate die Krümmung der Eigenfahrzeugbahn κ_{EV} als Zustandsgröße betrachtet, da diese im Gegensatz zur Gierrate bei $v_{EV} = 0$ nicht zu null verschwindet.

Zusätzlich wird nun die Zustandsbeschreibung aus (F 5.9) um einen Singularitätsfaktor $\mu = v_{EV}$ erweitert, um die Singularitätsfreiheit bei $v_{EV} = 0$ zu erreichen [61]. Das Einsetzen von (F 5.43) in (F 5.41) und (F 5.42) unter Berücksichtigung der genannten Ordnungsreduktion ergibt

$$\mu \dot{x} = ax + bu$$

mit

$$\begin{aligned} x &= \kappa_{EV}, \quad u = \delta, \quad \mu = v_{EV}, \\ a &= \left(-(c_v l_v^2 + c_h l_h^2) + \frac{(m_{EV} v_{EV}^2 + c_v l_v - c_h l_h)(c_v l_v - c_h l_h)}{c_v + c_h} \right) \Theta^{-1}, \\ b &= c_v \left(l_v - \frac{(c_v l_v - c_h l_h)}{c_v + c_h} \right) \Theta^{-1}. \end{aligned} \quad (F 5.44)$$

Durch die Einführung des Singularitätsfaktors μ werden also beide Seiten der reduzierten Einspurmodell-Gleichung mit v_{EV} multipliziert, wodurch diese auch bei $v_{EV} = 0$ gültig ist. Der Singularitätsfaktor verursacht zwar hier eine singuläre Störung des Differenzialgleichungssystems bei $v_{EV} \rightarrow 0$, bei $v_{EV} = 0$ jedoch degeneriert das System zum kinematischen Ackermannmodell und kann als singularitätsfrei angenommen werden:

$$\kappa_{EV}(v_{EV} = 0) = -\frac{b}{a} \delta = \frac{1}{l_v + l_h} \delta. \quad (F 5.45)$$

Somit ist (F 5.44) innerhalb der Querführungs-Systemgrenzen bis $v_{EV} = 0$ gültig, eine Fallunterscheidung ist nicht nötig.

Die Eingangsgröße des dynamischen Systems, der Lenkwinkelschlag am Vorderrad δ , kann über die Lenkübersetzung l_{EV} , die vom Lenkradwinkel und von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig sein kann, aus dem gemessenen Lenkradwinkel δ_{STWA} bestimmt werden:

$$\delta = \frac{1}{l_{EV}(v_{EV}, \delta_{STWA})} \cdot \delta_{STWA}. \quad (F 5.46)$$

Als Messgrößen stehen die Gierrate aus dem Gierraten-Sensor $\dot{\psi}_{mess}$, die Vorderradgeschwindigkeiten v_{vl} und v_{vr} und somit deren Differenz

$$\Delta v_F = v_{vr} - v_{vl} \quad (F 5.47)$$

aus der fahrzeuginternen Sensorik zur Verfügung (s. Abschnitt 4.1). Die Differenz der Vorderradgeschwindigkeiten Δv_F errechnet sich aus der Krümmung der Eigenfahrzeugbahn über

$$\Delta v_F = b_{EV} \cdot v_{EV} \cdot \kappa_{EV} \quad (\text{F 5.48})$$

wobei b_{EV} der Eigenfahrzeug-Spurbreite entspricht.

Die Messgleichung $\underline{y} = \underline{c}x$ lautet somit

$$\begin{pmatrix} \dot{\psi}_{mess} \\ \Delta v_F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{EV} \\ b_{EV} \cdot v_{EV} \end{pmatrix} \cdot \kappa_{EV} \quad (\text{F 5.49})$$

Analog zum Gassenbeobachter soll nun eine Diskretisierung der Prozess- und Messgleichungen vorgenommen werden. Jedoch kann hier wegen des in (F 5.44) eingeführten Singularitätsfaktors kein explizites Diskretisierungsverfahren, wie in Abschnitt 5.2.4, verwendet werden. Wie in [61] dargestellt, wird hier eine Diskretisierung erster Ordnung mit Halteglied nullter Ordnung vorgenommen. Da die Durchgangsmatrix der Nullmatrix entspricht, kann auf ein rückwärts formuliertes Halteglied, wie es in [61] beschrieben wird, verzichtet werden. Somit ergibt sich für die diskreten System- und Messgleichungen folgende Beschreibung:

$$x_{k+1} = a_{D0}x_k + b_{D0}u_k \quad (\text{F 5.50})$$

$$\underline{y}_k = \underline{c}_{D0}x_k$$

mit

$$a_{D0} = \mu(\mu - aT)^{-1}$$

$$b_{D0} = (\mu - aT)^{-1}bT$$

$$\underline{c}_{D0} = \underline{c}, \quad (\text{F 5.51})$$

wobei T der Schrittweite des diskreten Systems und somit der Abtastzeit entspricht. Die Krümmung der Eigenfahrzeugbahn kann wiederum über Kalman-Filterung geschätzt werden. Über (F 5.43) steht dem Gassenbeobachter somit eine geschätzte Eigenfahrzeug-Gierrate als Eingangsgröße zur Verfügung.

Der ebenfalls von der Gassenbeobachtung als Eingangsgröße benötigte Schwimmwinkel β_{EV} steht unter Verwendung der geschätzten Krümmung der Eigenfahrzeugbahn durch Umformung von (F 5.42) unter Annahme von $\dot{\beta}_{EV} = 0$ wie folgt zur Verfügung:

$$\beta_{EV} = \frac{-(m_{EV}v_{EV}^2 + c_v l_v - c_h l_h)\kappa_{EV} + c_v \delta}{(c_v + c_h)} \quad (\text{F 5.52})$$

5.3.2 Tracking der Sensor-Rohdaten zu Fahrzeug-Objekten

Für die Berücksichtigung der Vorderfahrzeugsposition als Messgröße für den Gassenbeobachter müssen die durch den Lidar-Sensor zur Verfügung gestellten Reflektionspunkte (Rohdaten) des Vorderfahrzeugs zu einem Objekt zusammengefasst werden. Zusätzlich benötigen die Funktionsteile Spurwechselwahrscheinlichkeits-Berechnung (Abschnitt 5.5) und Längsregelung (Abschnitt 6.2) weitere Fahrzeugattribute wie Längs- und Quergeschwindigkeit, die die Sensorik nicht direkt liefert.

Als Tracking bezeichnet man im Allgemeinen die Zuordnung von Rohdaten zu Objekten und das Schätzen deren Bewegungszustände. Für die hier dargestellte Applikation wird das MTT (Multiple Target Tracking)-Verfahren genutzt [62]. Dieses Tracking-Verfahren beinhaltet wiederum ein Kalman-Filter, dessen Zustandsgrößen folgende Objektattribute beinhalten:

$$\underline{x} = \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ v_x \\ v_y \\ a_x \\ a_y \\ w \\ l \end{pmatrix}. \quad (\text{F 5.53})$$

Hierbei handelt es sich um die relative Position (d_x, d_y) , die absoluten Geschwindigkeiten (v_x, v_y) und die absoluten Beschleunigungen (a_x, a_y) in longitudinaler und lateraler Richtung mit dem Eigenfahrzeugschwerpunkt als Koordinatenursprung. Zusätzlich erfolgt eine Schätzung der Objektbreite w und Objektlänge l . Dieser Zustandsvektor wird für alle detektierten Objekte aufgesetzt.

Eingangsgrößen des Kalman-Filters sind die Eigenfahrzeuggeschwindigkeit v_{EV} und die gefilterte Gierrate Ψ_{EV} aus Abschnitt 5.3.1.

Als Messdaten dienen die Rohdaten der Lidar-Sensorik in kartesischen Koordinaten $P_S(x_S/y_S)$. Die Zuordnung der Rohdaten zu einem detektierten Objekt erfolgt mittels einer Suchellipse. Um den Schwerpunkt eines bereits aufgesetzten Objekts wird dabei eine Suchellipse gelegt. Deren Länge und Breite ist zum einen abhängig von der aktuell geschätzten Objektlänge und -breite. Zum anderen wird der aktuelle Wert der Innovations-Kovarianzmatrix S_k für die Länge und Breite der Suchellipse berücksichtigt, da diese, wie in Abschnitt 5.2.3 beschrieben, Sensorfehler und Modellfehler vereint:

$$S_k = C_D P_k^* C_D^T + R_D = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & \dots & \dots \\ \dots & \sigma_y^2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}. \quad (\text{F 5.54})$$

Hierbei entsprechen σ_x und σ_y den Innovations-Standardabweichungen in x- und y-Richtung und geben somit eine Aussage über die Qualität der Beobachtung. Für ein dem Objekt zugeordnetes Sensorrohdatum muss

$$\frac{(x_s - d_x)^2}{\left(2\sigma_x + \frac{l}{2}\right)^2} + \frac{(y_s - d_y)^2}{\left(2\sigma_y + \frac{w}{2}\right)^2} \leq 1 \quad (\text{F 5.55})$$

gelten, wobei $P(d_x/d_y)$ der Objektposition und b der Objektbreite entsprechen. Liegen die Sensorrohdaten $P_S(x_S/y_S)$ innerhalb dieser Ellipse, werden sie dem Objekt zugeordnet. Wie aus (F 5.55) ersichtlich, wird jeweils der doppelte Wert der Standardabweichung für die Größe der Suchellipse verwendet. Somit liegen theoretisch 95,45% der Messwerte eines Objekts innerhalb der Ellipse. Die Suchellipse besitzt des Weiteren applikationsspezifische Maxima und Minima für die Länge und Breite, um sie nicht beliebig anwachsen oder verschwinden lassen zu können.

Die einem Objekt zugeordneten Messdaten werden einer Schwerpunktmittelung unterzogen und dann dem Kalman-Filter als ein Messwert zur Verfügung gestellt. Unter Berücksichtigung eines einfachen Punkt-Masse-Modells errechnet dieser die optimalen Werte für die Systemzustände und somit für die Objektattribute. Objektlänge und -breite werden auf Basis der longitudinalen und lateralen Ausdehnung der Messwerte innerhalb der Suchellipse geschätzt. Auf genauere Objekt-Modelle, wie sie in [63] verwendet werden, wird hier aufgrund fehlender Sensorgenauigkeit und -auflösung verzichtet.

Ist ein Messdatum keinem Objekt zugewiesen worden, wird für ihn ein neues Objekt aufgesetzt. Jedes Objekt besitzt als zusätzliche Objektattribute einen Qualitätswert, der berücksichtigt, mit wie vielen Messwerten der Track gestützt worden ist, eine einmalig vergebene Objekt-ID und eine Information darüber, wie lange das Objekt durchgehend durch Messdaten gestützt wurde (Objekt-Alter).

Für detaillierte Informationen bezüglich Mess- und Systemgleichungen, sowie der Strategie zum Aufsetzen und Löschen von Objekten soll hier nicht weiter eingegangen werden, es wird auf [62] verwiesen.

5.3.3 Die Objektauswahl

Aus den MTT-Objekten muss nun das für den Gassenbeobachter relevante Vorderfahrzeug FC gefunden werden. Des Weiteren wird dieses Vorderfahrzeug als Basis für die Längsregelung (Abschnitt 6.2) benötigt. Im Gegensatz zur reinen Längsführungsassistenz, bei der die Objektauswahl anhand einer Fahrschlauch-Prädiktion auf Basis fahrzeuginterner Sensorik stattfindet [64], kann hier das Vorderfahrzeug entlang der Solltrajektorie gefunden werden. Jedoch wird hier der dynamische, sich schnell ändernde Anteil der Solltrajektorie, repräsentiert durch die Krümmungsänderung κ'_T , nicht berücksichtigt. Es wird ein Suchbereich entlang der Solltrajektorie festgelegt, wie er in Bild 5.7 als FC_limit_in eingezeichnet ist. Befinden sich mehrere Fahrzeuge innerhalb dieses Suchbereichs, wird das dem Eigenfahrzeug am nächsten gelegene Fahrzeug als Vorderfahrzeug definiert. Um

ein häufiges Wechseln des gültigen Vorderfahrzeugs zu vermeiden, wird für das aktuelle Vorderfahrzeug der Suchbereich zur Seite hin erweitert, wodurch sich eine Hysterese ergibt. Die Fahrzeugbreite w_{FC} des Objekts geht in die Entscheidung, ob sich ein Objekt innerhalb des Suchschlauchs befindet, mit ein. In Bild 5.7 ist dieser Suchbereich als FC_limit_out bezeichnet. Weitere für die Objektauswahl zu berücksichtigenden Größen sind das Alter des Objekts age_{FC} , also wie lange ein Objekt durchgehend getrackt (und somit durch Messdaten gewichtet) worden ist, und die Objekt-Qualität $qual_{FC}$, die eine Aussage über die Beobachtungsqualität abhängig von σ_x und σ_y aus (F 5.54) bietet. Durch diese Einschränkungen soll vermieden werden, dass kurzzeitig auftretende Geisterziele als Vorderfahrzeug in der Gassenbeobachtung berücksichtigt werden.

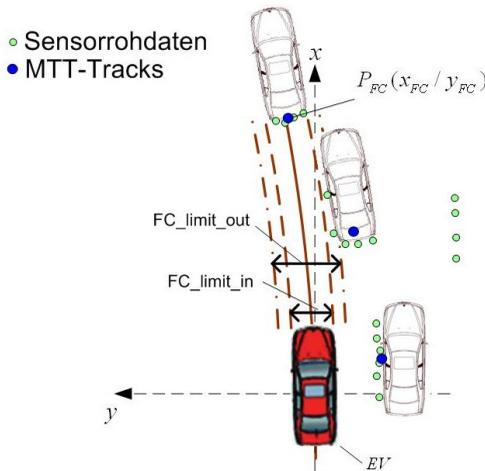


Bild 5.7: Suchbereiche für das Vorderfahrzeug entlang der Solltrajektorie

Ein gültiges Vorderfahrzeug mit den Positionskordinaten $P_{FC}(x_{FC}/y_{FC})$ muss also folgende Kriterien erfüllen:

- Objekt-Alter $age_{FC} >$ minimales Objekt-Alter
- Objekt-Qualität $qual_{FC} >$ minimale Objekt-Qualität
- für das bereits detektierte Vorderfahrzeug

$$2 \cdot \left| y_{FC} - \left(y_0 + x_{FC} \cdot \theta_{\Delta} + \frac{1}{2} \cdot x_{FC}^2 \cdot \kappa_T \right) \right| - w_{FC} < FC_limit_out \quad (F 5.56)$$

- für ein neues Vorderfahrzeug, z. B. aus Situation *Einscherer*

$$2 \cdot \left| y_{FC} - \left(y_0 + x_{FC} \cdot \theta_{\Delta} + \frac{1}{2} \cdot x_{FC}^2 \cdot \kappa_T \right) \right| - w_{FC} < FC_limit_in \quad (F 5.57)$$

Zum einen wird der Gültigkeitsbereich also durch die aktuelle Gassenbegrenzungstrajektorie, erweitert um die geschätzte Standardabweichung aus der Innovations-Kovarianzmatrix, begrenzt, zum anderen durch die Solltrajektorie (Bild 5.8). Um den Gültigkeitsbereich nicht zu stark einzuschränken, wird wie in Abschnitt 5.3.2 der doppelte Wert der Standardabweichung berücksichtigt. Wie bei der MTT-Suchellipse werden auch hier die Erweiterungsbereiche $2 \cdot \sigma_{yL}$ und $2 \cdot \sigma_{yR}$ begrenzt, um den Gültigkeitsbereich nicht beliebig anwachsen zu lassen.

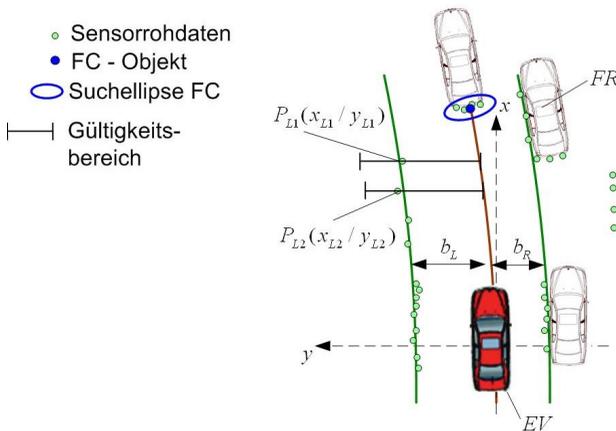


Bild 5.8: Begrenzungstrajektorien für gültige Gassenbegrenzung-Rohdaten

Entlang des Hecks vorausfahrender Fahrzeuge existieren meist zusätzliche Reflektionspunkte, wie am *FR* (Front Right) - Fahrzeug in Bild 5.8 schematisch dargestellt, die für die Berücksichtigung für die Gassenbegrenzungen unerwünscht sind, auch wenn sie (F 5.59) oder (F 5.60) erfüllen. Durch deren Berücksichtigung als Messdaten werden die Gassenbegrenzungslinien nach außen „gezogen“. Deshalb soll nun ein Algorithmus gefunden werden, der diese Rohdaten ausschließt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass sämtliche Rohdaten, die sich aus Sicht der Solltrajektorie senkrecht zu einem gültigen Rohdatum befinden, ausgeschlossen werden sollen. Es wird also für jedes gültige Rohdatum ein Ungültigkeitsbereich definiert, in dem weitere relevante Rohdaten als ungültig gesetzt werden. Exemplarisch ist in Bild 5.9 der Ungültigkeitsbereich der Reflektionsdaten des *FR*-Fahrzeugs eingezeichnet.

- gültige Gassenbegrenzungsdaten
- ungültige Gassenbegrenzungsdaten
- ◀ Ungültigkeitsbereich

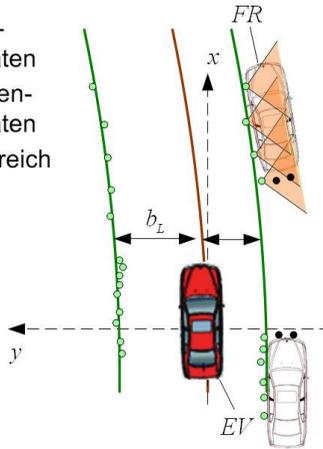


Bild 5.9: Ungültigkeitsbereich von Gassenbegrenzungs-Rohdaten

- gültige Gassenbegrenzungsdaten
- ungültige Gassenbegrenzungsdaten
- ◀ Ungültigkeitsbereich

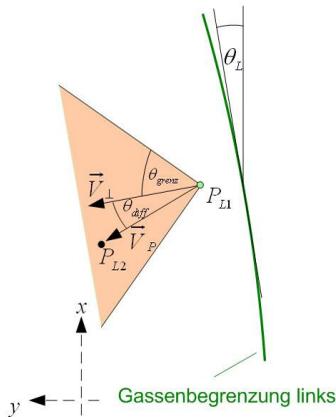


Bild 5.10: Aufspannen des Ungültigkeitsbereichs eines Gassenbegrenzungs-Rohdatums

Die Definition des Ungültigkeitsbereichs zeigt Bild 5.10: $P_{L1}(x_{L1}/y_{L1})$ ist hierbei ein gültiges Rohdatum, das einen Ungültigkeitsbereich aufspannt. Es wird untersucht, ob $P_{L2}(x_{L2}/y_{L2})$ in diesem Ungültigkeitsbereich liegt und somit als ungültig deklariert wird.

Die Steigung $\theta_L(x_L)$ der Tangente zur linken Gassenbegrenzung am Punkt $P_{L1}(x_{L1}/y_{L1})$ lautet

$$\frac{\partial y_L}{\partial x_L} = \theta_L(x_L) = \theta_\Delta + x_L \cdot \kappa_T + \frac{1}{2} \cdot x_L^2 \cdot \kappa_T' \quad (\text{F 5.61})$$

Der Vektor \vec{V}_\perp am Punkt P_{L1} senkrecht zur Gassenbegrenzung-Trajektorie ist bestimmt durch

$$\vec{V}_\perp = \begin{pmatrix} -\left(\frac{\partial y_L}{\partial x_L}\right) \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{F 5.62})$$

Der Vektor \vec{V}_P , den P_{L1} und P_{L2} aufspannen, ist definiert durch

$$\vec{V}_P = \begin{pmatrix} x_{L2} - x_{L1} \\ y_{L2} - y_{L1} \end{pmatrix}. \quad (\text{F 5.63})$$

Der Winkel θ_{diff} zwischen den Vektoren \vec{V}_\perp und \vec{V}_P errechnet sich aus

$$\theta_{diff} = \arccos \left(\frac{V_{\perp x} \cdot V_{Px} + V_{\perp y} \cdot V_{Py}}{\sqrt{V_{\perp x}^2 + V_{\perp y}^2} \cdot \sqrt{V_{Px}^2 + V_{Py}^2}} \right). \quad (\text{F 5.64})$$

Für Reflektionspunkte, die für die linke Gassenbegrenzung als nicht gültig gesetzt werden, muss

$$|\theta_{diff}| < \theta_{grenz} \quad (\text{F 5.65})$$

gelten.

Die Überprüfung wird nur für Punkte durchgeführt, für die gilt:

$$y_{L2} - y_{L1} > 0. \quad (\text{F 5.66})$$

Werden Reflektionspunkte der rechten Gassenbegrenzung untersucht, gilt

$$\vec{V}_\perp = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial y_R}{\partial x_R}\right) \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (\text{F 5.67})$$

Die Bedingung für auf ungültig zu setzende Reflektionspunkte der rechten Gassenbegrenzung lautet ebenfalls (F 5.65), wobei hier nur Punkte überprüft werden, für die

$$y_{R1} - y_{R2} > 0 \quad (\text{F 5.68})$$

gilt. Als Wert für den Grenzwinkel θ_{grenz} wird

$$\theta_{grenz} = 45^\circ \quad (\text{F 5.69})$$

angenommen, wodurch sich ein Öffnungswinkel des Ungültigkeitsbereichs von 90° ergibt.

Um die Gassenbegrenzungs-Rohdaten für die Berücksichtigung in der Messgleichung (F 5.40) zu finden, wird also folgendermaßen vorgegangen:

- Ausschluss der für FC berücksichtigten Rohdaten
- Ausschluss aller Rohdaten, deren x -Koordinaten jenseits der FC - x -Koordinate liegen

$$x_L < x_{FC}, x_R < x_{FC} \quad (\text{F } 5.70)$$

- Zuordnung relevanter Daten für die linke und rechte Gassebegrenzung mit (F 5.59) und (F 5.60)
- Definition der Ungültigkeitsbereiche aller gültigen Rohdaten und Ausschluss der Rohdaten, für die (F 5.65) gilt

5.4 Entwicklung des Gassenbeobachters in der Simulation

Der im vorigen Abschnitt vorgestellte Gassenbeobachter wurde in eine Matlab/Simulink - Entwicklungsumgebung [65] implementiert. Ziel der Simulation ist, das Verhalten der Solltrajektorie aus den Zustandsvariablen unter Verwendung künstlich erzeugter Messdaten zu untersuchen. Hierfür müssen passende Beobachterparameter für das Modellrauschen (Werte der Kovarianzmatrix des Prozessrauschens Q_D aus Abschnitt 5.2.3) gefunden werden. Des Weiteren wird eine für Situationen mit erhöhter Querdynamik optimierte Berücksichtigung der Vorderfahrzeugdaten in den Messgleichungen vorgestellt. Es werden zur Evaluierung in diesem Abschnitt nur die für die Trajektorienregelung relevanten Zustandsvariablen betrachtet, die Trajektorienregelung selbst wird in Abschnitt 6.1 genauer beschrieben.

5.4.1 Closed-Loop-Simulationsumgebung

Um die Funktionsweise des Gassenbeobachters verifizieren zu können, wird eine bestehende, Closed-Loop-Simulationsumgebung, implementiert in Matlab/Simulink, verwendet. Deren Aufbau ist in Bild 5.11 dargestellt.

Als Fahrzeugmodell dient hierbei ein vollständiges Einspurmodell, also ohne die in Abschnitt 5.3.1 getroffenen Vereinfachungen. In dieser Simulationsumgebung ist es möglich, den Fahrbahnverlauf frei zu gestalten. Das Verhalten umliegender Fahrzeuge kann beliebig beeinflusst werden, um die gewünschten Situationen zu erzeugen. Der zu testenden Anwendung, in diesem Fall der Stauassistentz-Algorithmik, werden diese Fahrzeuge zur Verfügung gestellt. Die Ausgangsgrößen des Stauassistentz-Systems, Sollbeschleunigung, -verzögerung und der Soll-Lenkradwinkel, werden wiederum dem Fahrzeugmodell zur Verfügung gestellt. Somit kann das Stauassistentz-System unter optimalen Bedingungen (ohne Sensorfehler) auf das gewünschte Verhalten hin untersucht werden. Das Diskretisierungsintervall T_{Sim} und somit die Abtastzeit der Simulation wird mit

$$T_{Sim} = 0,02s \quad (\text{F } 5.71)$$

gewählt.

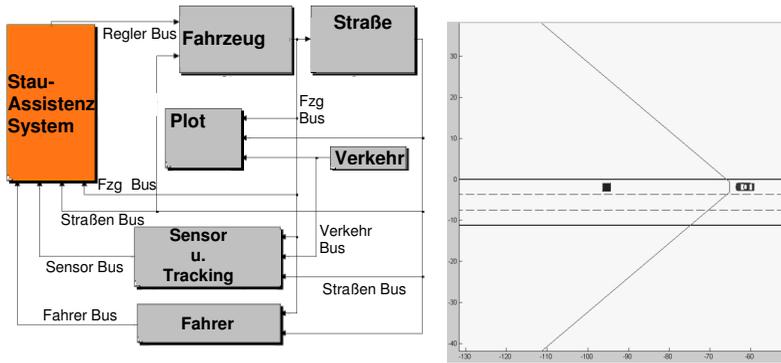


Bild 5.11: Komponenten der Closed-Loop-Simulationsumgebung mit Visualisierung des Szenarios

Die für die Trajektorienregelung benötigten Längs- und Querregelungskonzepte werden hier noch nicht betrachtet und in Kapitel 6 vorgestellt. Hierdurch kann die Qualität der Situationsinterpretation unabhängig vom Querregelungskonzept bewertet werden. In Kapitel 6.1.2 wird die Situationsinterpretation mit dem Querregelungskonzept, also der Trajektorienregelung, zusammengeführt und es erfolgt eine Stabilitätsbetrachtung des gesamten Querregelkreises.

5.4.2 Parametrierung des Beobachters

Kovarianzmatrix des Messrauschens R_D :

Der Wert für die Mess-Standardabweichung der Vorderfahrzeugposition σ_{yFC} , die als Messgröße über (F 5.40) im Gassenbeobachter berücksichtigt wird, kann aus der Innovations-Kovarianzmatrix des Trackers (F 5.54) direkt übernommen werden. Die Standardabweichung σ_{yL} und σ_{yR} der Sensorrohdaten für die Gassenbegrenzung im Messgrößenvektor können entweder durch Messreihen ermittelt oder, falls vorhanden, von der Spezifikation des Sensorhersteller übernommen werden. Da davon ausgegangen wird, dass sich die Messungen nicht gegenseitig beeinflussen, werden alle Nicht-Diagonalelemente der R_D -Matrix auf null gesetzt:

$$R_D = \begin{pmatrix} \sigma_{yFC}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{yL}^2 & 0 & \dots \\ \dots & 0 & \dots & 0 & \dots \\ & \dots & 0 & \sigma_{yR}^2 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & \dots \end{pmatrix}. \quad (F 5.72)$$

Die Standardabweichungen der Vorderfahrzeug- und Seitenbereichsdaten werden in der Simulation zu

$$\begin{aligned}\sigma_{y_{FC}} &= 0,01m \\ \sigma_{y_L} = \sigma_{y_R} &= 0,01m\end{aligned}\tag{F 5.73}$$

angenommen. Die relativ hohe Genauigkeit (im Vergleich zu realen Sensorgenauigkeit) basiert darauf, dass in der Simulation keine Sensorfehler betrachtet werden und deshalb den Daten der „virtuellen“ Sensorik stark vertraut werden kann.

Kovarianzmatrix des Prozessrauschens Q_D :

Es wird davon ausgegangen, dass (F 5.41) und (F 5.42) eine in den definierten Dynamikgrenzen gültige Modellierung des Fahrzeugverhaltens darstellen. Deshalb werden Änderungen im Trajektorienverlauf hauptsächlich über die Zustandsgröße Krümmungsänderung σ_{κ_T} im Modell berücksichtigt. Dies hat den Vorteil, dass sich kleine Änderungen der Vorderfahrzeugposition, beispielsweise durch Messrauschen, innerhalb eines Zeitschrittes kaum auf diejenigen Zustandsgrößen, auf denen die Querregelung basiert (y_0 , θ_Δ , κ_T), auswirken. Erst durch die Bewegungsgleichungen, also über mehrere Zeitschritte betrachtet, treten Änderungen im Trajektorienverlauf in diesen Zustandsgrößen in Erscheinung. Ein ähnliches Vorgehen wird im Tracking-Verfahren (Kapitel 5.3.2) genutzt. Hierbei werden Änderungen in der Objekt-Bewegung über dessen Beschleunigung im Bewegungsmodell des Objekts berücksichtigt [63].

Aus diesem Grund werden nur die Prozessrausch-Werte der Zustandsgrößen Krümmungsänderung σ_{κ_T} , und der Seitenbereichsbegrenzungs-Abstände σ_{b_L} und σ_{b_R} als wählbare Parameter angenommen um die Dynamik des Systems zu beeinflussen. In der Kovarianzmatrix des Prozessrauschens \underline{Q}_v , Q_v , soll davon ausgegangen werden, dass die Rauschparameter der Zustandsgrößen unkorreliert sind. Deshalb werden alle Nicht-Diagonalelemente der Q_D -Matrix auf null gesetzt:

$$Q_v = \begin{pmatrix} \sigma_{\kappa_T}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{b_L}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{b_R}^2 \end{pmatrix}.\tag{F 5.74}$$

Die Prozessrausch-Werte der Zustände Abstand, Winkelfehler und Trajektorienkrümmung, σ_{y_0} , σ_{θ_Δ} und σ_{κ_T} , werden über die Rauschverstärkungs-Matrix Γ in Q_D berücksichtigt [56]:

$$Q_D = \Gamma Q_v \Gamma' \cdot T^2.\tag{F 5.75}$$

Die zusätzliche Multiplikation mit dem Quadrat des Zeitintervalls T berücksichtigt das Diskretisierungsverfahren (F 5.38).

Über das Trajektorienmodell (F 5.2) kann nun bestimmt werden, wie sich die Rauschanteile σ_{y_0} , σ_{θ_Δ} und σ_{κ_T} auf das Prozessrauschen über (F 5.22), (F 5.8) und (F 5.9) innerhalb eines Zeitintervalls T auswirken. Somit gilt

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \frac{1}{6} \cdot (T_{V_{EV}})^3 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} \cdot (T_{V_{EV}})^2 & 0 & 0 \\ T_{V_{EV}} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{F 5.76})$$

Auf die Standardabweichung der Seitenbereichsbegrenzungs-Abstände σ_{bL} und σ_{bR} wird im Abschnitt 5.4.4.1 eingegangen.

5.4.3 Verhalten beim Folgen eines Vorderfahrzeugs

Stehen keine Informationen (Messdaten) über den Seitenbereich zur Verfügung, soll sich der Gassenbeobachter zur Berechnung der Solltrajektorie nur am Verhalten des Vorderfahrzeugs orientieren. Anforderung ist hierbei einerseits, dass die Solltrajektorie im geforderten Dynamikbereich möglichst genau mit der Trajektorie des Vorderfahrzeugs übereinstimmt. Andererseits sollen hochfrequente Schwingungen der Vorderfahrzeug-Querbewegung bei der Folgefahrt gedämpft werden. Deshalb muss bei der Modellierung für den Standardabweichungs-Wert der Krümmungsänderung σ_{κ_T} ein Kompromiss zwischen ausreichender Dynamik der Trajektorie und der Dämpfung von Vorderfahrzeug-Schwingungen gefunden werden.

Unter Berücksichtigung der Grenzen der Querdynamik (F 3.1), (F 3.3) und (F 3.5) aus Abschnitt 3.2.3) wird in der Closed-Loop-Simulationsumgebung eine Fahrbahn generiert, die aus folgenden Teilstücken besteht:

- gerade Fahrbahn der Länge 300 m, um den Gassenbeobachter zu starten und zu initialisieren
- Klothoidenstück, in dem sich die Krümmung der Fahrbahn von null auf $\kappa_{\max} = 0,004\text{m}^{-1}$ ändert, mit einer konstanten Krümmungsänderung von $\kappa'_{\max} = 0,00016\text{m}^{-2}$ über eine Länge von 25,6 m
- Kreisbahn mit einer konstanten Krümmung von $\kappa_{\max} = 0,004\text{m}^{-1}$ und einer Länge von 676 m

Die grafische Darstellung des Streckenverlaufs ist in Bild 5.12 dargestellt.

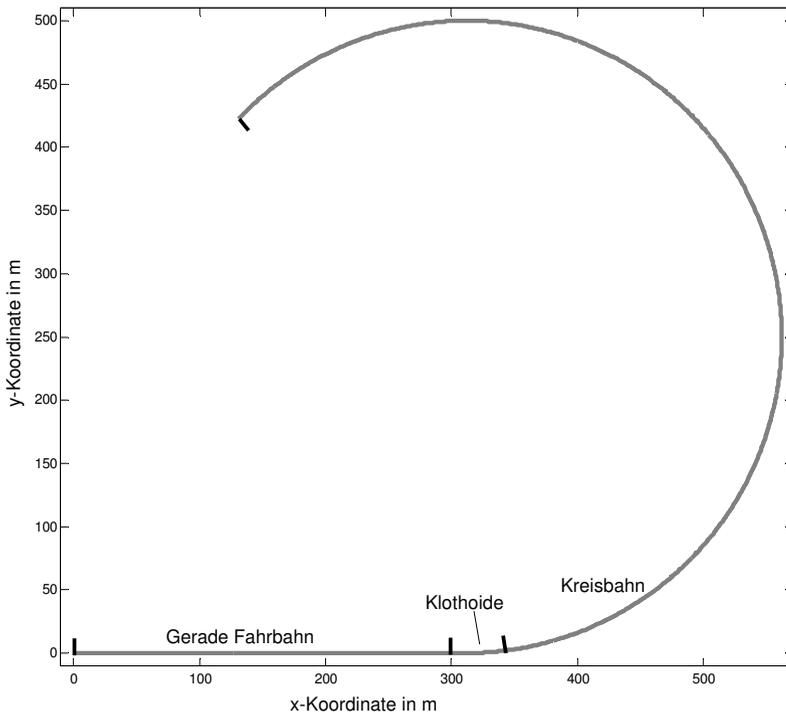


Bild 5.12: Fahrbahn, bestehend aus einem Geraden-, Klothoiden- und Kreisstück zur Simulation der Querdynamik-Grenzen

Auf dieser Strecke befindet sich ein Vorderfahrzeug, welches mit der maximalen Geschwindigkeit der Querführung (40 km/h) auf der Spurmitte fährt. Für die Längsregelung wird für den Sekundenabstand 2,5 s gewählt. Somit folgt das Eigenfahrzeug dem Vorderfahrzeug mit einem konstanten Abstand von etwa 28 m. Da sich das Vorderfahrzeug auf der Spurmitte befindet, kann das Verhalten des Gassenbeobachters anhand des Abstands der Solltrajektorie zur Fahrbahnmitte am Ort des Eigenfahrzeugs bewertet werden. Das bedeutet, je geringer die Abweichung der Solltrajektorie von der Fahrbahnmitte ist, desto genauer kann das Eigenfahrzeug dem Vorderfahrzeug innerhalb der betrachteten Dynamikgrenzen folgen. Im Folgenden soll, soweit möglich, das zeitliche Verhalten der Solltrajektorie betrachtet werden, weshalb die jeweiligen Querabweichungen an einer Zeitachse (Simulationsfortschritt) und nicht an einer Ortsachse (gefahrte Meter) angetragen werden.

Das Einregeln des Eigenfahrzeugs auf die Trajektorie wird, wie bereits erwähnt, hier noch nicht betrachtet.

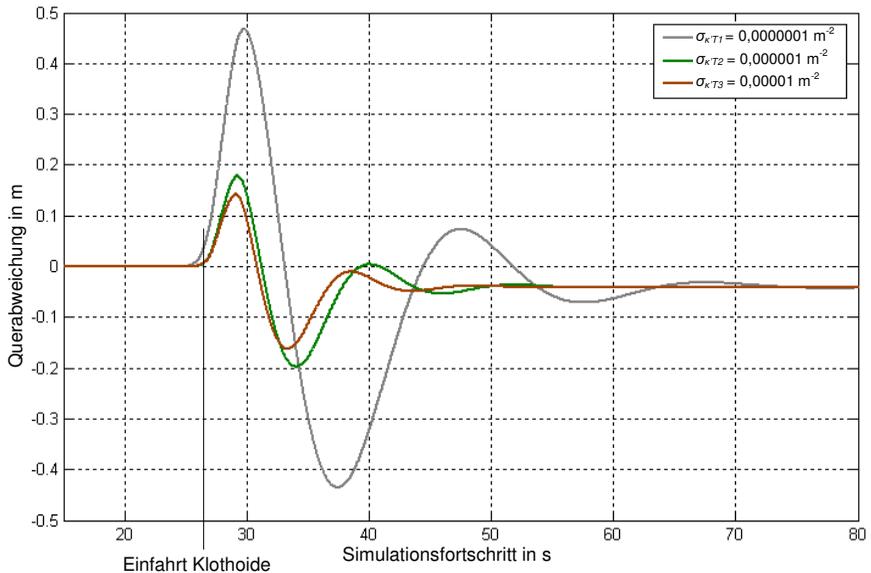


Bild 5.13: Querabweichung der Solltrajektorie zur Fahrbahnmitte am Ort des Vorderfahrzeugs ohne Berücksichtigung der FC-Historie

Die Querabweichung der Solltrajektorie zur Fahrbahnmitte bei Variation der Prozessrauschen-Standardabweichung σ_{kT} ist in Bild 5.13 dargestellt. Das Maximum der Abweichung tritt hier beim Passieren des Klothoidenstücks (ab Sekunde 27) auf. Es zeigt sich, dass eine maximale Querabweichung von 0,13 m auch bei weiterer Erhöhung der Prozessrauschen-Standardabweichung nicht unterschritten wird.

Auch eine Erhöhung der Standardabweichungen in (F 5.72) bringt nicht den gewünschten Effekt: Beispielsweise wirkt sich eine Erhöhung der Krümmungs-Standardabweichung insofern negativ aus, da sich dann starke Änderungen der Querablage des Vorderfahrzeugs im Kalman-Filter direkt auf die Krümmung der Solltrajektorie auswirken und somit die Kurve im Klothoidenstück „geschnitten“ wird. Um die maximale Querabweichung von der Vorderfahrzeug-Spur weiter zu minimieren und somit ein besseres Folgeverhalten zu erreichen, wird im Folgenden ein neuer Ansatz zur Berücksichtigung der Vorderfahrzeug-Position im Kalman-Filter betrachtet.

5.4.3.1 Die Berechnung der Vorderfahrzeug-Historie

Um das Folgeverhalten zu verbessern, wird hier ein Ansatz gewählt, der die Historie der Vorderfahrzeug-Position bei jedem Zeitschritt im Kalman-Filter berücksichtigt. Um dies zu erreichen, wird die Historie des Vorderfahrzeugs aus der Sicht des Eigenfahrzeugs berechnet. Somit erhält man Trajektorien-Punkte des Vorderfahrzeugs, wie sie in Bild 5.14 dargestellt sind.

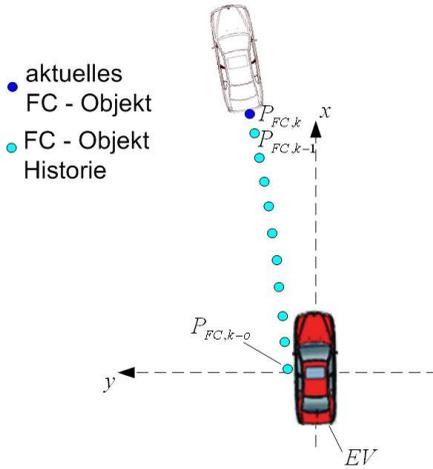


Bild 5.14: Historie der Vorderfahrzeugbewegung aus der Sicht des Eigenfahrzeugs

Um die Historie des Vorderfahrzeugs aus der Sicht des Eigenfahrzeugs zu errechnen, muss die Bewegung des Eigenfahrzeugs während eines Zeitintervalls T berücksichtigt werden [54]. Der Algorithmus zur Berechnung der Historie aus [54] wird durch die Annahmen

$$\begin{aligned}
 \sin \beta_{EV} &= \beta_{EV} \\
 \cos \beta_{EV} &= 1 \\
 \sin(\dot{\Psi}_{EV} \cdot T) &= \dot{\Psi}_{EV} \cdot T \\
 \cos(\dot{\Psi}_{EV} \cdot T) &= 1
 \end{aligned} \tag{F 5.77}$$

vereinfacht.

Wobei β_{EV} dem Schwimmwinkel und $\dot{\Psi}_{EV}$ der Gierrate des Eigenfahrzeugs entspricht. Die Verschiebung der Vorderfahrzeugposition P_{FC} durch das Gieren des Eigenfahrzeugs während eines Zeitintervall T errechnet sich zu

$$\begin{pmatrix} x'_{FC} \\ y'_{FC} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\dot{\Psi}_{EV} \cdot T) & -\sin(-\dot{\Psi}_{EV} \cdot T) \\ \sin(-\dot{\Psi}_{EV} \cdot T) & \cos(-\dot{\Psi}_{EV} \cdot T) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{FC} \\ y_{FC} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} x_{FC} + \dot{\Psi}_{EV} \cdot T \cdot y_{FC} \\ -\dot{\Psi}_{EV} \cdot T \cdot x_{FC} + y_{FC} \end{pmatrix}. \tag{F 5.78}$$

Das Eigenfahrzeug bewegt sich während eines Zeitschritts um

$$\begin{pmatrix} \Delta x_{EV} \\ \Delta y_{EV} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{EV} \\ v_{EV} \cdot \beta_{EV} \end{pmatrix} \cdot T. \quad (\text{F } 5.79)$$

Somit kann unter Berücksichtigung von (F 5.77) und (F 5.78) der erste Vorderfahrzeug-Historienpunkt $P_{FC,k-1}$ über

$$P_{FC,k-1} = P_{FC,k} + \begin{pmatrix} \dot{\Psi}_{EV} \cdot y_{FC} \\ -\dot{\Psi}_{EV} \cdot x_{FC} \end{pmatrix} \cdot T - \begin{pmatrix} v_{EV} \\ v_{EV} \cdot \beta_{EV} \end{pmatrix} \cdot T \quad (\text{F } 5.80)$$

ermittelt werden, wobei $P_{FC,k}$ der aktuell gemessenen Vorderfahrzeug-Position zum Zeitschritt k entspricht.

Es können mit diesem Verfahren alle Historienpunkte bis hin zum Eigenfahrzeug, also bis zur y-Achse im Fahrzeugkoordinatensystem, in jedem Zeitschritt k errechnet werden. Somit erhält man die Punkte $P_{FC,k-1}$ bis $P_{FC,k-o}$, wobei letzterer dem der y-Achse am nächsten liegenden Historienpunkt entspricht. Der Fehler, der durch die Vereinfachung in (F 5.77) entsteht, wird jedes Mal, wenn (F 5.80) auf einen Messpunkt ausgeführt wird, aufintegriert. Jedoch kann angenommen werden, dass dieser Fehler bei dem für das Stauassistentz-System relevanten Dynamikbereich, vor allem im Vergleich zur Genauigkeit von Gierrate und Schwimmwinkel, vernachlässigbar ist.

5.4.3.2 Die Vorderfahrzeug-Historie als Messdatum des Gassenbeobachters

Um das Folgeverhalten zu verbessern, wird nun neben der aktuellen Position des Vorderfahrzeugs auch dessen Historie im Gassenbeobachter berücksichtigt. Durch diese Maßnahme soll auch im Dynamik-Grenzbereich eine stärkere Bindung der Solltrajektorie an die Bewegung des Vorderfahrzeugs erreicht werden. Somit wird die Messgleichung (F 5.15) wie folgt erweitert:

$$\begin{pmatrix} y_{FC,k} \\ \cdot \\ y_{FC,k-o} \\ y_{L1} \\ \cdot \\ y_{Lm} \\ y_{R1} \\ \cdot \\ y_{Rn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{FC,k} & \frac{1}{2} \cdot x_{FC,k}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{FC,k}^3 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{FC,k-o} & \frac{1}{2} \cdot x_{FC,k-o}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{FC,k-o}^3 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{L1} & \frac{1}{2} \cdot x_{L1}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{L1}^3 & 1 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{Lm} & \frac{1}{2} \cdot x_{Lm}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{Lm}^3 & 1 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{R1} & \frac{1}{2} \cdot x_{R1}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{R1}^3 & 0 & -1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{Rn} & \frac{1}{2} \cdot x_{Rn}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{Rn}^3 & 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ \theta_\Delta \\ \kappa'_T \\ \kappa'_R \\ b_L \\ b_R \end{pmatrix}. \quad (\text{F } 5.81)$$

Durch die mehrfache Verwendung der Vorderfahrzeug-Historie wird hier eine Forderung an die Messdaten des Kalman-Filters verletzt, nämlich die zeitliche Unkorreliertheit der Messdaten. Dies wird für die folgende Untersuchung toleriert und hat zur Folge, dass das Trajektorienmodell (F 5.6) bei hoher Dynamik des Vorderfahrzeugs gegenüber dem Modell zur Berechnung der Vorderfahrzeug-Historie aus (F 5.80) an Bedeutung abnimmt.

Wird nun die in Bild 5.12 dargestellte Strecke in der Simulation mit der geänderten Messdatengleichung durchlaufen, ergibt sich für die Querabweichung der Solltrajektorie am Ort des Eigenfahrzeugs der in Bild 5.15 dargestellte Verlauf. Die maximale Querabweichung und somit der maximale Fehler der Solltrajektorie liegt bei gleicher Dämpfung ($\sigma_{\kappa T}$ -Wert) deutlich unter dem in Bild 5.13 dargestellten Verlauf.

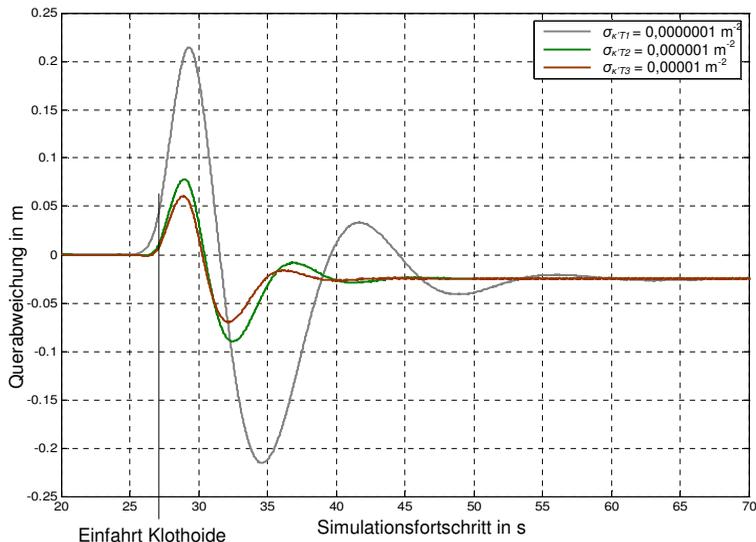


Bild 5.15: Querabweichung der Solltrajektorie zur Fahrbahnmitte am Ort des Vorderfahrzeugs mit Berücksichtigung der FC-Historie

Somit kann bei entsprechender Wahl der Prozessrauschen-Standardabweichung $\sigma_{\kappa T}$ ein maximaler Fehler an den Systemgrenzen der Querdynamik von 0,07 m erreicht werden. Auch hier hat eine weitere Erhöhung des $\sigma_{\kappa T}$ -Werts im Vergleich zu $\sigma_{\kappa T3}$ wenig Effekt.

Die somit erreichte Genauigkeit des Folgeverhaltens beim Passieren des Klothoidenstücks wird als ausreichend erachtet. Auch der konstante Querabweichungsfehler von 0,03 m während der Durchfahrt des Kreisstücks wird akzeptiert.

In Bild 5.16 ist der Verlauf der Querabweichung bei Geschwindigkeiten von 10, 30 und 50 km/h in Abhängigkeit der gefahrenen Wegstrecke bei $\sigma_{\kappa T} = 0,00001 \text{ m}^2$ angetragen. Es zeigt sich, dass die Solltrajektorie auch außerhalb der Querführungs-Grenzgeschwindigkeit eine ausreichende Genauigkeit aufweist.

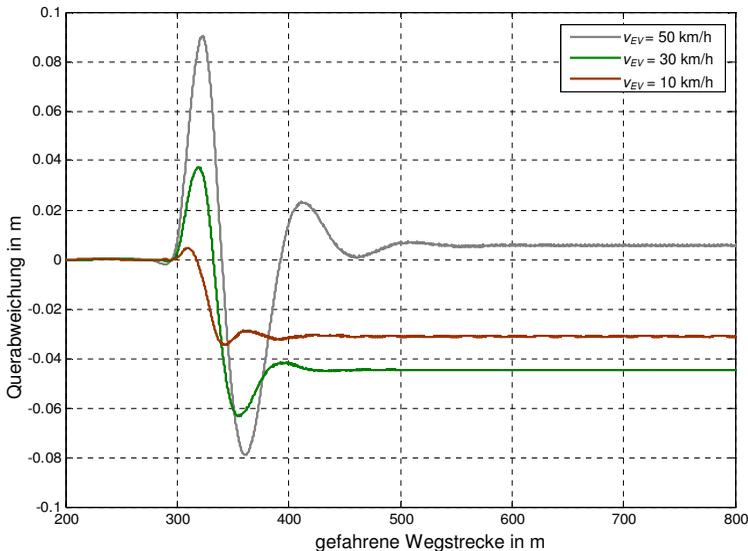


Bild 5.16: Querabweichung der Solltrajektorie bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ($\sigma_{\kappa T} = 0,00001 \text{ m}^{-2}$)

5.4.4 Die Berücksichtigung der Gassenbegrenzungsdaten im Gassenbeobachter

Folgend wird der Einfluss der Gassenbegrenzungsdaten im Gassenbeobachter über die Messgleichung (F 5.81) untersucht. Einerseits wird durch diese Methode das Folgeverhalten direkt durch die Seitenbereichsdaten beeinflusst, andererseits kann durch die Beobachtung der seitlichen Abstände b_L und b_R zur Gassenbegrenzung (Abschnitt 5.1.4) das geforderte Ausweichen und die Übernahmeaufforderung bei zu nahen seitlichen Objekten in der Systemdefinition (Abschnitt 3.4) realisiert werden.

5.4.4.1 Einfluss der Gassenbegrenzungsdaten auf das Folgeverhalten

Es sollen nun Gassenbegrenzungsdaten in der Simulation generiert werden, die einen Korridor für das Eigenfahrzeug darstellen. Für Position, Öffnungswinkel und Reichweite dieser virtuellen Sensorik wird die Sensor-Spezifikation aus Abschnitt 4.2.1 verwendet. Der hier erzeugte Korridor hat eine Breite von 4 m. Ziel ist es, unangenehme Schwingungen der Vorderfahrzeug-Querbewegung, denen der Fahrer des Eigenfahrzeugs nicht folgen will, durch die örtlich konstanten Gassenbegrenzungsdaten des Korridors zu dämpfen. Die Reflektionsdaten dieses Korridors aus der Sicht des Eigenfahrzeugs, die als Messdaten im Gassenbeobachter berücksichtigt werden, sind in Bild 5.17 dargestellt.

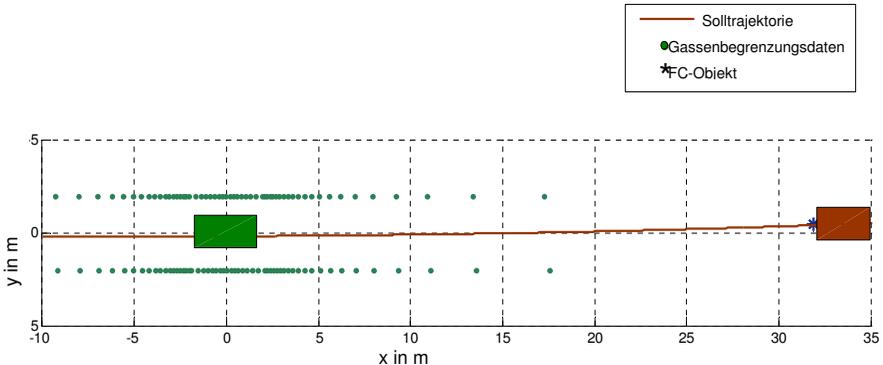


Bild 5.17: Gültige Gassenbegrenzungsdaten des simulierten Korridors von 4m Breite im Fahrzeugkoordinatensystem

Um eine ausreichend hohe Berücksichtigung der Gassenbegrenzungs-Abstände für die Solltrajektorie zu erreichen, wird das Prozessrauschen der Gassenbegrenzungs-Abstände im Folgenden auf

$$\sigma_{bL} = \sigma_{bR} = 0,001m \quad (F 5.82)$$

gesetzt.

Das Vorderfahrzeug soll nun eine Schwingung von 0,1 Hz mit einer Amplitude von 0,5 m ausführen. Das Vorderfahrzeug und das Eigenfahrzeug bewegen sich mit 40 km/h auf einer geraden Fahrbahn mit einem Sekundenabstand von 2,5 s. Es wird, analog zum vorhergehenden Abschnitt, die Amplitude der Schwingung des Eigenfahrzeugs bei einer Folgefahrt anhand des y-Abstandes der Solltrajektorie zur Fahrbahnmitte betrachtet. Das Ergebnis dieser Simulation bei $\sigma_{\kappa T} = 0,00001 \text{ m}^{-2}$ mit und ohne Berücksichtigung der Korridor-Messdaten ist in Bild 5.18 dargestellt.

Es zeigt sich, dass durch die Verwendung des besagten Wertes von $\sigma_{\kappa T}$, mit dem bei der Folgefahrt in Bild 5.15 noch ausreichende Genauigkeit erreicht wird, auch ohne Berücksichtigung der Korridor-Messdaten eine Schwingungsdämpfung auf eine Amplitude von 0,35 m (Anregung 0,5 m) eintritt. Durch Verwendung der Korridor-Messdaten wird eine weitere Dämpfung der Schwingung auf eine Amplitude von 0,2 m erreicht.

Somit wurde gezeigt, dass es vorteilhaft für die Beobachtung der Solltrajektorie ist, nicht nur Informationen über das Vorderfahrzeug, sondern auch Informationen über seitliche Fahrzeuge und Randbebauungen für deren Berechnung zu berücksichtigen. Vorausgesetzt wird hierbei jedoch die in (F 5.82) als relativ hoch angenommene Sensorgenauigkeit. Der Verwendung von Nahbereichs-Sensorik, die ein höheres Rauschen aufweist, muss in (F 5.72) berücksichtigt werden. Dann werden Seitenbereichsdaten für die Gassenbeobachtung schwächer gewichtet, was beispielsweise den in Bild 5.18 dargestellten gewünschten Effekt vermindert.

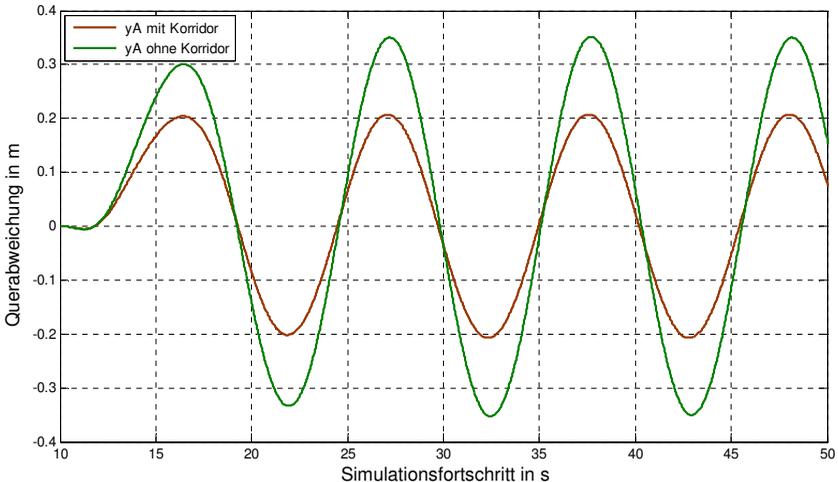


Bild 5.18: Verringerung der Amplitude einer Folgefahrt-Schwingung durch Berücksichtigung der Korridor-Messdaten

5.4.4.2 Systemreaktion auf zu nahe seitliche Objekte

Die Beobachtung der seitlichen Abstände der Gassenbegrenzungen b_L und b_R sollen im Folgenden dafür verwendet werden, eine Ausweichbewegung bei Unterschreitung von Mindestabständen zu realisieren. Diese Ausweichbewegung wird aus dem Grenzwert für den minimalen seitlichen Abstand (Systemfunktion *Ausweichen* aus Abschnitt 3.4), die zu 0,75 m definiert wurde, abgeleitet. Aus Sicherheitsgründen soll das Ausweichen bereits ab 1 m seitlichen Abstand beginnen. Grund hierfür ist, dass sich bei der hier gewählten Dynamik für b_L und b_R (aus der Berücksichtigung der Seitendaten für die Solltrajektorie in Abschnitt 5.4.4.1) bei der in Bild 5.19 dargestellten Annäherung ein örtlicher Versatz von bis zu 0,25 m von b_L zum sich nähernden Objekt ergibt.

Zur Bestimmung des Grenzwertes b_{avoid} , ab dessen Unterschreitung von b_L und b_R seitlichen Objekten ausgewichen wird, muss die Breite des Eigenfahrzeugs w_{EV} mit berücksichtigt werden. b_{avoid} berechnet sich zu

$$b_{avoid} = 1m + 0,5 \cdot w_{EV}. \quad (F 5.83)$$

Auf die Eignung hinsichtlich der geforderten Funktionalität, nämlich dem Ausweichen eines seitlichen Objektes, werden im Folgenden zwei Varianten untersucht.

Variante 1: Variation der Prozessrauschen-Parameter

Für die Realisierung einer Ausweichbewegung bietet sich an, der Prozessrauschen-Standardabweichung des beobachteten y-Abstandes der Solltrajektorie zum

Eigenfahrzeugs σ_{y_0} im Gegensatz zu (F 5.75) kurzzeitig einen höheren Wert zuzuweisen. In der Kalman-Filtertheorie bedeutet dies, dass bei zu nahen seitlichen Objekten die Filtergleichungen bei der Bewegung eines Fahrzeugs entlang der Trajektorie (Abschnitt 5.1.2) fehlerbehaftet sind. Die Zustandsvariable y_0 wird dann nicht nur über (F 5.2) gestützt, sondern auch direkt über die Messwerte der Gassenbegrenzungsdaten in der Messgleichung (F 5.81). Zusätzlich wird dem Prozessrauschen σ_{bL} und σ_{bR} der Wert null zugewiesen. Hierdurch soll der seitliche Abstand konstant gehalten werden.

Ein seitlich sich näherndes Objekt kann in der Simulationsumgebung durch einseitige Verengung des Korridors aus Bild 5.17 simuliert werden. Um ein sich näherndes seitliches Fahrzeug zu simulieren, werden nur Messwerte berücksichtigt, deren x-Koordinaten innerhalb von ± 2 m liegen. Es wird nun eine Annäherung dieses linken Fahrzeugs von 2,5 m auf 1,5 m innerhalb von 10 s betrachtet. Bei einer Eigenfahrzeugbreite von $w_{EV} = 2$ m und (F 5.82) gilt $b_{avoid} = 2$ m. Die Trajektorienregelung wird wiederum nicht berücksichtigt, weshalb die Ausweichbewegung anhand des Verlaufes des Abstandes der Solltrajektorie zur Spurmitte am Ort des Eigenfahrzeugs (Zustandsgröße y_0) betrachtet wird.

Das Ergebnis dieser Simulation (Bild 5.19) zeigt, dass die Ausweichbewegung bei konstant nahem Seitenfahrzeug (Verlauf von y_0) rückläufig ist. Einem länger verbleibenden Fahrzeug im Nahbereich wird also anfangs ausgewichen, jedoch nähert sich hier das Eigenfahrzeug im Laufe der Zeit wieder seiner ursprünglichen Trajektorie, was einem Zurücklenken auf das zu nahe Fahrzeug entspricht. Wünschenswert wäre hier ein dauerhaft konstanter y_0 -Wert von -0,5 m, um einen definierten Abstand zum seitlichen Fahrzeug einhalten zu können. Außerdem kann hieraus kein definierter Zeitpunkt für eine Übernahmeaufforderung abgeleitet werden.

Das in Bild 5.19 dargestellte Verhalten beruht auf der Tatsache, dass sich der Gassenbeobachter zum Zeitpunkt des Umschaltens im eingeschwungenem Zustand befindet und sich der Einfluss der neuen Prozessrausch-Parameter nicht sofort vollständig auf die Schätzfehler-Varianz der Zustände auswirken. Eine Möglichkeit dem entgegenzuwirken wäre, einen Reset der Schätzfehler-Kovarianzmatrix P durchzuführen, damit sich das gewünschte Verhalten durch die geänderten Parameter sofort einstellt. Ein weiteres Problem dieser Variante ist jedoch, dass ein verbleibendes nahes Seitenfahrzeug in der Modellierung nicht berücksichtigt wird und sich ein andauernder Modellfehler ausbildet, da das Folgen des Vorderfahrzeugs nicht mehr direkt möglich ist.

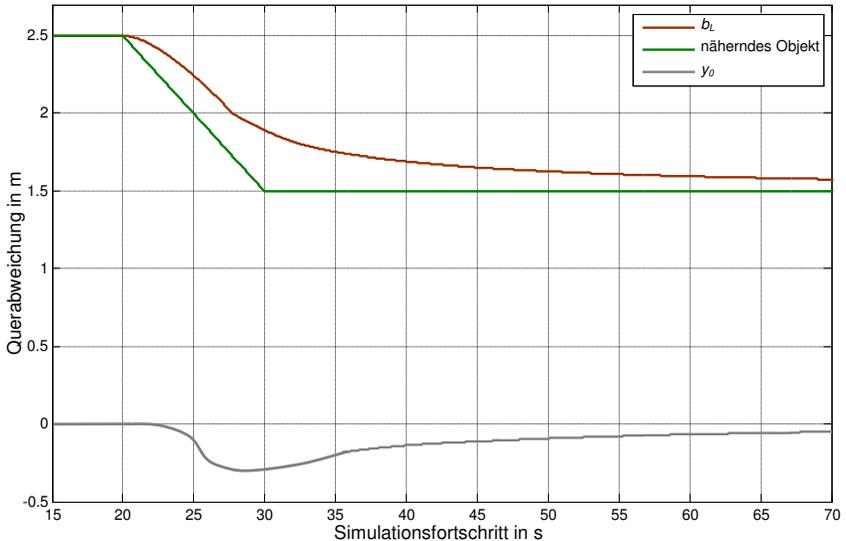


Bild 5.19: Verlauf von b_L und y_0 in der Variante „Variation der Prozessrauschen-Parameter“ bei einem sich seitlich nähernden Fahrzeug

Da diese Methode also hier nicht zum gewünschten Ziel führt, wird nun eine zweite Variante vorgestellt.

Variante 2: Berechnung eines zusätzlichen Querablagen-Offsets

Bei dieser Methode wird anhand der Werte des seitlichen Abstandes b_L und b_R bei Unterschreitung von b_{avoid} ein zusätzlicher, zu y_0 addierter Querablagen-Offset y_{Offset} errechnet. Gilt also $b_L < b_{avoid}$, errechnet sich y_{Offset} zu

$$y_{Offset} = b_L - b_{avoid} \quad (\text{F 5.84})$$

Analog dazu gilt bei $b_R < b_{avoid}$

$$y_{Offset} = b_{avoid} - b_R \quad (\text{F 5.85})$$

Sind beide Voraussetzungen erfüllt, kann y_{Offset} zu

$$y_{Offset} = b_L - b_R \quad (\text{F 5.86})$$

berechnet werden.

Die Prozessrauschen-Parameter werden im Gegensatz zur Variante 1 nicht verändert.

Den Verlauf von $y_{Offset+y_0}$ und somit der Ausweichtrajektorie bei einem sich annähernden seitlichen Objekt stellt Bild 5.20 dar. Es zeigt sich, dass sich durch diese Methode ein definierter Ausweichabstand zur ursprünglichen Trajektorie einstellt. Bewegt sich das seitlich zu nahe Objekt wieder weg vom Eigenfahrzeug (Simulationszeit 60s - 70s), geht die Ausweichtrajektorie wieder in die ursprüngliche Trajektorie über. Durch das deterministische Verhalten der Ausweichtrajektorie kann durch diese Methode die Sicherheitsfunktion *Ausweichen* eines seitlich zu nahen Objektes realisiert werden.

Aus Bild 5.20 kann eine weitere Systemgrenze abgeleitet werden: nähert sich ein seitliches Fahrzeug schneller als die hier dargestellten 0,1 m/s, ist nicht mehr gewährleistet, dass der Offset zwischen b_L und sich seitlich näherndem Objekt in Bild 5.20 den in (F 5.83) berücksichtigten maximalen Versatz von 0,25 m unterschreitet.

Umgerechnet in einen minimalen Sekundenabstand b_{sec} bei $b_{avoid} - 0,5 \cdot w_{EV} = 0,75m$ und einer Näherungsgeschwindigkeit von 0,1 m/s kann hier die Systemgrenze

$$b_{sec_min} = 7,5s \tag{F 5.87}$$

definiert werden.

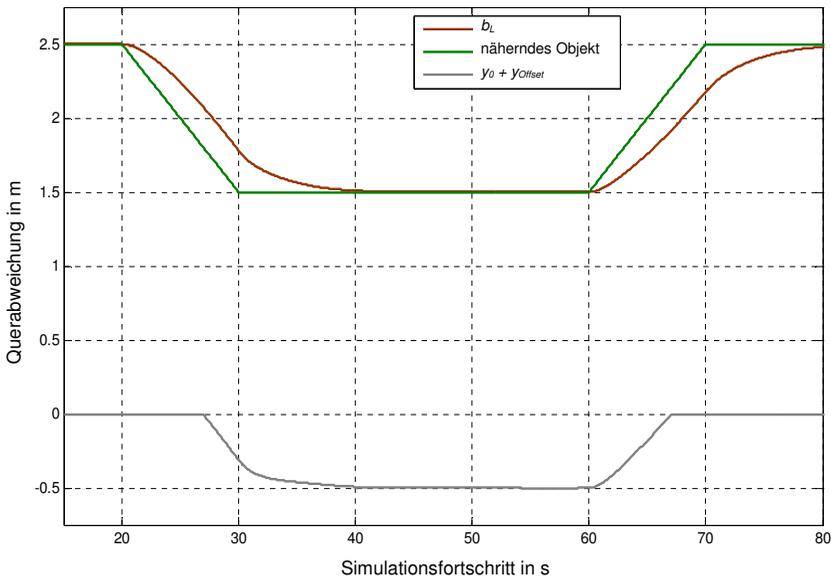


Bild 5.20: Verlauf von $y_{Offset+y_0}$ bei einem sich nähernden seitlichen Fahrzeug

5.5 Der Spurwechsel des Vorderfahrzeug-Objekts

In diesem Abschnitt wird der nun definierte Gassenbeobachter in Verbindung mit den Situationen *Einscherer* und *Ausscherer* betrachtet. Da die Position des Vorderfahrzeugs als die dominante Messgröße des Kalman-Filters und somit der Berechnung der Gassenbeobachter-Solltrajektorie angenommen werden kann, führt der Spurwechsel des Vorderfahrzeugs zu einem ungewünschten Systemverhalten: Dem Vorderfahrzeug würde bei dessen Spurwechsel gefolgt werden. Befindet sich nun auf Höhe des Eigenfahrzeugs ein seitliches Fahrzeug auf derjenigen Spur, auf die das Vorderfahrzeug wechselt, bewegt sich die Solltrajektorie und somit das Eigenfahrzeug auf dieses Fahrzeug zu. Der Fahrer bekommt zwar aufgrund der Absicherung des Seitenbereichs, die im vorigen Abschnitt beschrieben wurde, eine Übernahmehinweisaufforderung. Jedoch muss er dann zügig reagieren, um durch eine Übernahme der Querverführung einen Unfall zu vermeiden. Es ist zu erwarten, dass sich ein solches Systemverhalten negativ auf die Akzeptanz des Stauassistenz-Systems auswirkt.

Eine Möglichkeit, diesem Folgen entgegenzuwirken, wäre, die Trajektorie durch Verkleinerung der Prozessrauschen-Standardabweichung σ_{xT} träger zu machen. Hierdurch könnten aber die Dynamik-Anforderungen, wie sie in Abschnitt 5.4.3 dargestellt wurden, nicht mehr eingehalten werden. Eine stärkere Gewichtung der Gassenbegrenzungsdaten bringt auch nur dann den gewünschten Erfolg, nämlich der Kompensation der Querbewegung des Vorderfahrzeugs, wenn sich auf mindestens einer Seite der Fahrbahn eine stabile Randbebauung befindet. Da man nicht davon ausgehen kann, dass jede Fahrbahn diese stabile, zum Straßenverlauf parallele Randbebauung hat, wird diese Möglichkeit nicht weiter verfolgt.

Es soll nun eine Methode untersucht werden, die es ermöglicht, die Situation *Ausscherer* frühzeitig zu erkennen. Steht diese Information zur Verfügung, kann das Vorderfahrzeug bei seinem Spurwechsel „losgelassen“, also im Gassenbeobachter nicht mehr als gültiges Messdatum berücksichtigt werden, bis der Spurwechsel abgeschlossen ist. An seiner Stelle wird das neue Vorderfahrzeug als gültiges Vorderfahrzeug-Messdatum verwendet. Analog dazu soll die Situation *Einscherer* frühzeitig erkannt werden, damit das einscherende Fahrzeug erst dann als gültiges Vorderfahrzeug-Messdatum berücksichtigt wird, wenn der Einschervorgang abgeschlossen ist. Zusätzlich kann die Information über einen anstehenden Einschervorgang bei der Längsführung genutzt werden, um frühzeitig den Wunschabstand zum neuen Vorderfahrzeug einzuregeln. Dies ist vor allem für die Situation *Drängler* relevant, da bei einem nah einschierenden Fahrzeug frühzeitig verzögert werden und somit die Situation durch die Längsregelung entschärft werden kann.

5.5.1 Zur Verfügung stehende Klassifikationsalgorithmen

Die Erkennung von Spurwechselvorgängen des Vorderfahrzeugs soll anhand von Methoden der Künstlichen Intelligenz erfolgen. Ziel ist es, die Wahrscheinlichkeit eines Spurwechsels zum aktuellen Zeitpunkt zu errechnen. Anhand eines Vergleichs der Spurwechselwahrscheinlichkeit mit einem Schwellwert wird dann die Entscheidung „Spurwechsel ja/nein“ getroffen. Als Eingangsgrößen oder Merkmale des Klassifikationsalgorithmus können grundsätzlich alle zur Verfügung stehenden Informationen über die umliegenden Fahrzeuge verwendet werden. Auch

Eigenfahrzeugdaten und Daten aus der Gassenbeobachtung kommen hierfür in Frage.

Um Systeme zu beschreiben, die ein nicht-deterministisches Verhalten aufweisen, werden häufig probabilistische Verfahren eingesetzt. [91] setzt sich unter anderem mit der Auswahl eines Verfahrens für die hier dargestellte Fragestellung auseinander. Es wurden Bayes'sche Netze [66], Neuronale Netze [67] und Entscheidungsbäume [68] hinsichtlich ihrer Eignung für die Erkennung von Spurwechselforgängen des Vorderfahrzeugs untersucht.

Neuronale Netze können eine Lösung der Problemstellung darstellen. Ein entscheidender Nachteil ist jedoch die fehlende Einsehbarkeit der Entscheidungsfindung. Der Prozess der sukzessiven Gewichtsaktualisierungen macht es unmöglich, die Funktionsweise eines neuronalen Netzes nachzuvollziehen. Außerdem kann ohne erneutes Training der Netze kein weiteres Attribut hinzugefügt werden.

Entscheidungsbäume bieten bei geringer Anzahl von Blättern einen guten Überblick über dessen Funktionalität. Über verschiedene, vielfach erprobte Algorithmen kann ein automatisierter Aufbau eines Klassifikators anhand von Trainingsdaten erfolgen. Bei vielen Trainingsdaten mit verrauschten Größen neigen Entscheidungsbäume jedoch dazu, zu groß und nicht mehr nachvollziehbar zu werden.

In [91] kam Gertges zu dem Ergebnis, das sich Bayes'sche Netze am Besten für die hier gestellten Anforderungen an einen Klassifikator eignen: Es kann sehr gut unsicheres und auch fehlendes Wissen behandelt werden. Eine Erweiterung des Netzes durch neue Knoten ist auf einfache Weise möglich und erfordert meist keine Änderung der bestehenden Strukturen.

Im Folgenden sollen Bayes'sche Netze zur Berechnung einer Spurwechselwahrscheinlichkeit des Vorderfahrzeugs verwendet werden.

5.5.2 Grundlagen zu Bayes'sche Netze

Bayes'sche Netze dienen der Verarbeitung von unsicherem Wissen. Analog dazu wird im menschlichen Verstand eine Theorie durch logische Überlegungen und Fakten überprüft und beibehalten oder verworfen. Dabei werden im Verstand auch Informationen verwendet, die von unsicheren Quellen stammen oder unvollständig sind. Diese Unsicherheit der Informationen kann vom menschlichen Verstand entsprechend berücksichtigt werden. In diesen Netzen wird das unsichere Wissen in Form von Wahrscheinlichkeiten dargestellt. Dabei müssen diese Wahrscheinlichkeiten nicht empirisch belegt sein, sondern können durch einen Experten festgelegt werden. Ein Wetterexperte könnte beispielsweise die Wahrscheinlichkeit für einen Sturm bei tief fliegenden Vögeln mit 70 % annehmen. Diese Wahrscheinlichkeit ist dabei eine Einschätzung des Experten und nicht das Resultat einer Untersuchung darüber, wie oft es Sturm gab, wenn zuvor tief fliegende Vögel beobachtet wurden. Wahrscheinlichkeiten dieser Art beschreiben daher keine statistische Auftrittswahrscheinlichkeit (*frequentistische Wahrscheinlichkeit*) sondern der subjektive Glaube einer Person an eine Theorie (*degree of belief*).

Um neues Wissen zu erhalten, muss bei der Wahrscheinlichkeitsberechnung verschiedenes unsicheres Wissen miteinander kombiniert werden. Dazu werden die Wahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Ereignisse miteinander kombiniert. Seien A und B zwei beliebige Ereignisse, sind $P(A)$ und $P(B)$ die *a-priori*

Wahrscheinlichkeiten von A und B . Sie geben die Wahrscheinlichkeit der Ereignisse ohne äußere Einflüsse an und sollen unabhängig voneinander auftreten.

Die *bedingte Wahrscheinlichkeit* $P(A | B)$ gibt die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass das Ereignis A eintritt, falls Ereignis B schon eingetreten ist:

$$P(A | B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad \text{mit } P(B) \neq 0. \quad (\text{F 5.88})$$

$P(A \cap B)$ entspricht hierbei der *Verbundwahrscheinlichkeit* der Ereignisse A und B und entspricht einer logischen UND-Verknüpfung:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B). \quad (\text{F 5.89})$$

Der Satz von Bayes ermöglicht das Berechnen einer *a-posteriori* Wahrscheinlichkeit $P(B | A)$ aus den a-priori Wahrscheinlichkeiten $P(A)$ und $P(B)$ und der bedingten Wahrscheinlichkeit $P(A | B)$:

$$P(B | A) = \frac{P(A | B) \cdot P(B)}{P(A)}. \quad (\text{F 5.90})$$

Das Bayes'sche Netz ist ein gerichteter azyklischer Graph, in dem die Knoten Zufallsvariablen und die Kanten bedingte Abhängigkeiten zwischen diesen Variablen beschreiben. Jedem dieser Knoten ist eine Tabelle zugeordnet, in der die bedingten Wahrscheinlichkeiten für alle Zustandskombinationen seiner Elternknoten hinterlegt sind. Diese Tabelle gibt an, welchen Wert der entsprechende Knoten annimmt, wenn die Wahrscheinlichkeiten seiner Elternknoten bekannt sind. Die Anzahl der bedingten Wahrscheinlichkeiten eines Knotens wächst exponentiell mit der Anzahl der Elternknoten. Die Pfeilrichtung der Kanten bestimmt die bedingte Abhängigkeit zwischen zwei Knoten im Netz. Ein Beispiel für ein Bayes'sches Netz mit der Wahrscheinlichkeit für Stau als Elternknoten ist in Bild 5.21 dargestellt. Als Indizien für einen Stau können die messbaren Größen Verkehrsdichte k , Verkehrsstärke q und mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsstroms v_m (s. Abschnitt 2.1) gesehen werden. Jeder Knoten des hier dargestellten Netzes kann zwei Zustände annehmen. Jeder der beiden Zustände besitzt einen Wahrscheinlichkeitswert, wobei sich deren Werte stets zu 1 addieren.

Der obere Zustand „Stau“ besitzt in dem Fall keine Elternknoten, von denen der Zustand des Knotens abhängen könnte. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass kein a-priori-Wissen über den Zustand der Strecke vorhanden ist. Der Zustand des Knotens wird daher so initialisiert, dass beide Zustände gleich wahrscheinlich sind. Die Tabellen mit den bedingten Wahrscheinlichkeiten für die unteren drei Knoten geben die bedingten Wahrscheinlichkeiten für die Zustände der Knoten bei bekannten Zuständen der Elternknoten an. Ohne weitere Informationen stellt das Beispielnetz im vorliegenden Zustand lediglich dar, wie die Wahrscheinlichkeiten der Zustände voneinander abhängen. Da im Netz bei der Initialisierung kein Wissen über die einzelnen Zustände vorherrscht, wird der Zustand Stau mit der Wahrscheinlichkeit $P(S) = 0,5$ vorbelegt.

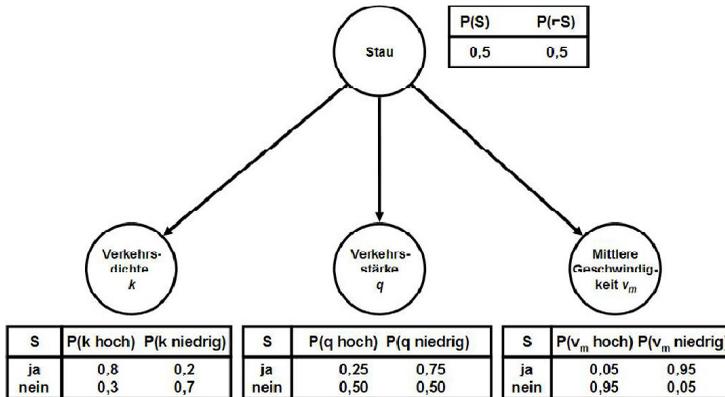


Bild 5.21: Beispiel für ein Bayes'sches Netz mit der Wahrscheinlichkeit für Stau als Elternknoten

Das Einbringen von neuem Wissen über den Zustand eines Knotens wird als *Evidenz* bezeichnet. Dies geschieht im Allgemeinen durch das Auftreten neuer Tatsachen, die beispielsweise aus den Messwerten eines Sensors gewonnen werden. Eine Evidenz wirkt sich durch die Vernetzung der Zustände über bedingte Wahrscheinlichkeiten auf die Zustände aller Knoten aus. Diese Auswirkung neuer Informationen entlang der Kanten auf die Zustände der anderen Knoten wird als *Inferenz* bezeichnet. Jeder Knoten generiert dabei Nachrichten, die er an seine direkten Nachbarknoten weitergibt. Hierbei wird zwischen kausalen Nachrichten (π -messages), entlang der Pfeilrichtung, und diagnostischen Nachrichten (λ -messages), entgegen der Pfeilrichtung, unterschieden.

Detaillierte Ausführungen zu Bayes'schen Netzen können in [66] und [67] gefunden werden.

5.5.3 Bayes'sche Netze zur Erkennung von Spurwechseln

Folgende vier Situationen sollen anhand der Bayes'schen Netze klassifiziert werden:

- **Situation *Ausscherer nach links*:** Spurwechsel des Vorderfahrzeugs auf die linke Nachbarspur
- **Situation *Ausscherer nach rechts*:** Spurwechsel des Vorderfahrzeugs auf die rechte Nachbarspur
- **Situation *Einscherer von links*:** Spurwechsel eines Fahrzeugs von der rechten Nachbarspur vor das eigene Fahrzeug
- **Situation *Einscherer von rechts*:** Spurwechsel eines Fahrzeugs von der linken Nachbarspur vor das eigene Fahrzeug

5.5.3.1 Die Extraktion der Merkmale

Bei der Modellierung eines Bayes'schen Netzes hat die Erzeugung der Merkmale einen besonderen Stellenwert. Diese Merkmale bilden die Eingangswerte und nehmen somit wesentlichen Einfluss auf die Berechnungen im Netz. Zur Extraktion der Merkmale stehen Informationen über umliegende Fahrzeuge aus dem Tracking der Sensorrohdaten (vgl. Abschnitt 5.3.2) sowie Eigenfahrzeugdaten (vgl. Abschnitt 5.3.1) und die Daten aus dem Gassenbeobachter (vgl. Abschnitt 5.2) zur Verfügung.

Hierzu muss die Objektauswahl aus Abschnitt 5.3.3 erweitert werden, um weitere, für einen Spurwechsel des Vorderfahrzeugs relevante Fahrzeuge aus den Tracking-Objekten extrahieren zu können. Diese zusätzlichen Objekte sind in Bild 5.22 dargestellt. Als relevante, auch für die Sensorik erfassbare Objekte gelten das Fahrzeug links (*FL - Front Left*), das Fahrzeug rechts (*FR - Front Right*), die sich zwischen Vorderfahrzeug und Eigenfahrzeug auf der Nebenspur befinden. Falls sich mehrere Fahrzeuge auf der linken oder rechten Spur zwischen Vorderfahrzeug und Eigenfahrzeug befinden, sollen diese als *FL2* und *FL3* beziehungsweise *FR2* und *FR3* für die Spurwechselerkennung berücksichtigt werden.

Wie in der Objektauswahl in Abschnitt 5.3 wird in den folgenden Betrachtungen der dynamische, sich schnell ändernde Anteil der Solltrajektorie, repräsentiert durch die Krümmungsänderung κ'_T , nicht berücksichtigt.

Für die Auswahl des Fahrzeugs *FL* ergeben sich somit die folgenden Kriterien, wobei Δy_{FLmax} den maximalen seitlichen Abstand eines Fahrzeugs auf der Nebenspur zur Solltrajektorie bezeichnet:

- Objekt-Alter $age_{FL} >$ minimales Objekt-Alter
- Objekt-Qualität $qual_{FL} >$ minimale Objekt-Qualität
- Fahrzeug befindet sich zwischen Vorderfahrzeug und Eigenfahrzeug

$$0 < x_{FL} < x_{FC} \quad (F 5.91)$$

- Fahrzeug befindet sich auf der Nebenspur, wobei Δy_{FLmax} die angenommene Spurbreite der Nebenspur bezeichnet

$$2 \cdot \left(y_{FL} - (y_0 + \Delta y_{FLmax} + x_{FL} \cdot \theta_{\Delta} + \frac{1}{2} \cdot x_{FL}^2 \cdot \kappa'_T) \right) < FC_limit_out \quad (F 5.92)$$

- Erfüllen mehrere Fahrzeuge die genannten Kriterien, wird jenes Fahrzeug als Fahrzeug *FL* gesetzt, welches den geringsten longitudinalen Abstand zum Eigenfahrzeug (x - Attribut aus dem MTT) besitzt. Die weiteren Fahrzeuge, die diese Kriterien erfüllen, werden als *FL2* und *FL3* gesetzt.

Analog dazu können die Fahrzeuge *FR*, *FR2* und *FR3* durch Anpassung der Vorzeichen in (F 5.92) ausgewählt werden.

Ein weiteres, für die Spurwechselerkennung relevantes Fahrzeug ist das Fahrzeug vor dem Vorderfahrzeug-Objekt *nFC* (*next Front Center Vehicle*). Bei einem Spurwechsel des Vorderfahrzeugs wird davon ausgegangen, dass dieses Objekt aus der Sensorverdeckung des Vorderfahrzeugs auftaucht. Aus diesem Grund wird es einen relativ geringen lateralen Abstand zum Vorderfahrzeug besitzen, jedoch

wird das Merkmal mit der schlechtesten Qualität entfernt. Anschließend wird erneut das Ergebnis der Klassifikation bestimmt und bewertet. Im Folgenden werden die hierbei als relevant bewerteten Merkmale aufgeführt.

Hierzu zählen

- **Querabstand des Vorderfahrzeugs zur Solltrajektorie Δy_{FC}**

Bei entsprechender gedämpfter Solltrajektorie (vgl. Abschnitt 5.4.4.1) tritt bei erhöhter Vorderfahrzeug-Querdynamik ein Querabstand des Vorderfahrzeugs zur Solltrajektorie auf. Wird nun davon ausgegangen, dass bei einem Vorderfahrzeug-Spurwechsel eine höhere Querdynamik als bei einer Fahrt ohne Spurwechsel auftritt, kann diese Information als Merkmal für einen Spurwechsel verwendet werden. Durch stabile Gassenbegrenzungsdaten kann dieses Merkmal bei einem Spurwechsel stärker ausgeprägt sein, da dann die Trajektorie nicht nur auf den Vorderfahrzeugdaten basiert. Der Querabstand des Vorderfahrzeugs zur Solltrajektorie errechnet sich aus der Position des Vorderfahrzeugs und den Zustandsgrößen des Gassenbeobachters:

$$\Delta y_{FC} = y_{FC} - \left(y_0 + x_{FC} \cdot \theta_{\Delta} + \frac{1}{2} \cdot x_{FC}^2 \cdot \kappa_T \right). \quad (F 5.95)$$

- **Quergeschwindigkeit des Vorderfahrzeugs v_{yFC}**

Ein Indiz für seinen Spurwechsel ist eine erhöhte Quergeschwindigkeit des Vorderfahrzeugs. Jedoch kann bei Betrachtung dieser erhöhten Quergeschwindigkeit alleine nicht zwischen einem Spurwechsel und der Einfahrt in eine Kurve oder einer Änderung des longitudinalen Abstandes zum Vorderfahrzeug innerhalb der Kurve unterschieden werden. Da die Vorderfahrzeugquerbewegung bei fehlenden Gassenbegrenzungsdaten stark in die Berechnung der Solltrajektorie mit eingeht, wird hier anstelle der relativen Quergeschwindigkeit zur Solltrajektorie die absolute Quergeschwindigkeit des Vorderfahrzeugs als ein für einen Spurwechsel relevantes Merkmal genutzt.

- **Krümmungsänderung der Solltrajektorie κ'_T**

Auch ein hoher Wert für die Krümmungsänderung der Solltrajektorie kann ein Indiz für einen Spurwechsel sein, da besonders bei fehlenden stabilen Gassenbegrenzungsdaten die Solltrajektorie auf der Vorderfahrzeugbewegung basiert und bei Spurwechsel höhere κ'_T -Werte auftreten.

- **Trackalter des Fahrzeugs vor dem Vorderfahrzeug age_{nFC}**

Im Stau wird bei einem Spurwechsel des Vorderfahrzeugs von einem sich auf der gleichen Fahrspur befindlichen Fahrzeug vor dem Vorderfahrzeug nFC ausgegangen. Aus diesem Grund ist es sehr wahrscheinlich, dass bei einem Überholvorgang des Vorderfahrzeugs das Fahrzeug vor dem Vorderfahrzeug aus der Verdeckung (des Vorderfahrzeugs) heraus von der Sensorik erkannt wird. Geschieht dies, setzt das hier genutzte Tracking-Verfahren innerhalb eines relevanten Bereichs ein neues, relativ „junges“ Objekt auf. Die Existenz eines nFC und dessen Alter kann somit als Merkmal für einen Spurwechselvorgang des Vorderfahrzeugs gewertet werden.

- **Querposition der Fahrzeuge links und rechts neben dem Vorderfahrzeug zur Solltrajektorie Δy_{FL} und Δy_{FR}**

Falls diese vorhanden sind, kann anhand eines kleiner werdenden Abstandes der seitlichen Fahrzeuge zur Solltrajektorie auf einen Einscherer geschlossen werden. Auch ist ein konstanter Abstand des Seitenfahrzeugs zur Solltrajektorie ein Indiz für die Einfahrt in eine Kurve. Somit kann zwischen einer Kurveneinfahrt und einem Spurwechsel des Vorderfahrzeugs unterschieden werden, wenn die Relativposition der Seitenfahrzeuge zur Solltrajektorie mit berücksichtigt wird. Der Abstand des linken und rechten Fahrzeugs neben dem Vorderfahrzeug (Bild 5.22) zur Solltrajektorie errechnet sich zu

$$\Delta y_{FL/FR} = y_{FL/FR} - \left(y_0 + x_{FL/FR} \cdot \theta_\Delta + \frac{1}{2} \cdot x_{FL/FR}^2 \cdot \kappa_T \right). \quad (F 5.96)$$

- **Quergeschwindigkeit der Fahrzeuge links und rechts neben dem Vorderfahrzeug relativ zur Solltrajektorie Δv_{yFL} und Δv_{yFR}**

Ein weiteres Indiz für einen Einscherer ist eine erhöhte Quergeschwindigkeit des seitlichen Fahrzeugs in Richtung der Solltrajektorie. Deren Auftreten in Verbindung mit einem geringen Querabstands des Seitenfahrzeugs zur Solltrajektorie kann als Merkmal für einen Einscherer gewertet werden. Um die relative Quergeschwindigkeit eines Seitenfahrzeugs zur Solltrajektorie berechnen zu können, wird nun eine Soll-Quergeschwindigkeit des Seitenfahrzeugs errechnet, wenn es sich parallel zur Solltrajektorie bewegt. Bewegt sich beispielsweise das Fahrzeug FL mit dem konstanten Abstand Δy_{FL} zur Trajektorie, gilt

$$y_{FL}(t) = (y_0 + \Delta y_{FL}) + x_{FL}(t) \cdot \theta_\Delta + \frac{1}{2} \cdot x_{FL}(t)^2 \cdot \kappa_T. \quad (F 5.97)$$

Hieraus folgt für die zeitliche Änderung der Lateralposition entlang der Trajektorie abhängig von einem sich ändernden longitudinalen Abstand, also der Soll-Quergeschwindigkeit

$$\dot{y}_{FL}(t) = (\theta_\Delta + x_{FL}(t) \cdot \kappa_T) \cdot \dot{x}_{FL}(t), \quad (F 5.98)$$

wobei $\dot{x}_{FL}(t)$ die zeitliche Änderung der x-Koordinate des Punktes auf der Trajektorie und somit der Längsgeschwindigkeit des Fahrzeugs FL relativ zum Eigenfahrzeug aus dem Tracking darstellt.

$$\dot{x}_{FL} = v_{xFL} \quad (F 5.99)$$

Die relative Quergeschwindigkeit des Fahrzeugs FL zur Solltrajektorie Δv_{yFL} kann somit als Differenz dessen absoluter Quergeschwindigkeit v_{yFL} und der Soll-Quergeschwindigkeit dargestellt werden:

$$\Delta v_{yFL} = v_{yFL} - (\theta_\Delta + x_{FL} \cdot \kappa_T) \cdot v_{xFL}. \quad (F 5.100)$$

Genauso kann die relative Quergeschwindigkeit des Fahrzeugs *FR* zur Solltrajektorie errechnet werden. Somit wurde erreicht, dass eine erhöhte, (zur Eigenfahrzeug-Trajektorie) relative Quergeschwindigkeit, die bei einer Veränderung des longitudinalen Abstandes in einer Kurve auftreten, in Bezug auf die Solltrajektorie normiert wurden und dann nicht als erhöhte Quergeschwindigkeiten im Sinne eines Einscherers bei der Spurwechselerkennung gewichtet werden.

Falls diese existieren, werden Quergeschwindigkeit und die Querposition der Fahrzeuge *FL2*, *FL3*, *FR2* und *FR3* als zusätzliche Merkmale berücksichtigt. Dass nicht alle Merkmale vollständig voneinander unabhängig sind, wird hier toleriert.

5.5.3.2 Topologie der Bayes'schen Netze

Für jede der vier zu klassifizierenden Situationen wird ein Bayes'sches Netz aufgebaut. Da für alle Klassifikatoren die selben Merkmale zur Verfügung stehen, wäre auch ein Netz für alle zu detektierenden Situationen denkbar. Der Vorteil von vier unterschiedlichen Klassifikatoren liegt in der besseren Übersichtlichkeit, zudem können die Klassifikatoren unabhängig voneinander verändert werden.

Für die vorliegende Problemstellung wird die in Bild 5.23 am Beispiel des Klassifikators *Ausscherer links* dargestellten Netztopologie gewählt, wie sie auch in [69] verwendet wurde. Bei dieser Art des Aufbaus stellt der oberste Knoten stets das Ergebnis der Klassifikation dar. Die Sensorknoten bilden die Basis der Struktur. Im Gegensatz zu einer Netztopologie, bei dem der unterste Knoten das Ergebnis der Klassifikation darstellt, sind hier die Tabellen mit den bedingten Wahrscheinlichkeiten deutlich kleiner.

Über einen Sensorknoten wird jedes Merkmal im Netzwerk berücksichtigt. Jeder Sensorknoten sendet seine diagnostischen Nachrichten bei einer Messung des entsprechenden Wertes zum zugehörigen Zwischenknoten. Die Zwischenknoten gewichten, wiederum über diagnostische Nachrichten, die einzelnen Merkmale für den Ereignisknoten. Grundsätzlich könnten Sensorknoten und Zwischenknoten zu einem Knoten zusammengefasst werden, Zwischenknoten stellen jedoch eine gute Möglichkeit dar, die Ergebnisse der einzelnen Äste unterschiedlich zu gewichten. Somit kann bei Verwendung des Netzes der Einfluss einzelner Merkmale verstärkt oder abgeschwächt werden, ohne die Eigenschaften der Sensorknoten zu verändern. Dies kann beispielsweise bei einer Anpassung an eine neue Umfeld-sensorik von Vorteil sein, da hierdurch erwartungsgemäß genauere Sensordaten über den Zwischenknoten stärker gewichtet werden können.

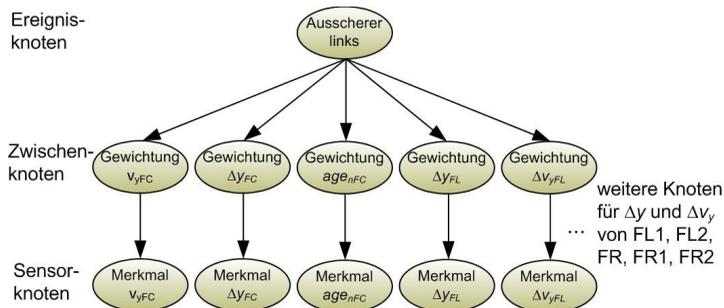


Bild 5.23: Topologie der Bayes'schen Netze am Beispiel des Klassifikators *Ausscherer links*

5.5.3.3 Parametrierung der Klassifikatoren mittels SiL-Simulation

Damit eine ausreichende Anzahl von Spurwechselforgängen für die Evaluierung der Klassifikatoren zur Verfügung steht, wird der Gassenbeobachter in Verbindung mit dem Klassifikationsalgorithmus in die Verkehrssimulation *PELOPS (Programmsystem zur Entwicklung Längsdynamischer mikrooskopischer Verkehrsprozesse in Systemrelevanter Umgebung)* [70] implementiert. Diese Simulationsumgebung wurde dafür entwickelt, den Effekt von baulichen Maßnahmen im Verkehrsnetz und Fahrerassistenzsystemen auf den Verkehrsfluss zu untersuchen. So kann beispielsweise die Ausstattung eines bestimmten Anteils der simulierten Fahrzeuge mit ACC auf ihre Auswirkungen auf den Verkehrsfluss hin untersucht werden.

Fahrer und Fahrzeug werden in *PELOPS* als *Fahrer-Fahrzeug-Einheit (FFE)* dargestellt. Zur Erzeugung von Simulationen mit vielen Verkehrsteilnehmern ist eine zufällige Generierung von FFEs mit vorgegebenen Mittelwerten und Standardabweichungen bei einigen Größen (z. B. Zielgeschwindigkeit) möglich. Durch die Streuung der FFE-Eigenschaften entstehen FFEs, die sich unterschiedlich verhalten. Fahrzeuge bewegen sich somit wie im realen Straßenverkehr unterhalb und oberhalb der vorgeschriebenen Geschwindigkeit und bevorzugen das Fahren auf unterschiedlichen Spuren. Dadurch entstehen während der Simulation häufig Situationen, in denen Fahrzeuge die Spur wechseln. Das Spurwechselverhalten der Fahrzeuge wurde in [71] hinsichtlich eines realistischen Verhaltens optimiert. Somit können durch dieses Werkzeug die Bayes'schen Netze in Verbindung mit dem Gassenbeobachter parametrierung und verifiziert werden.

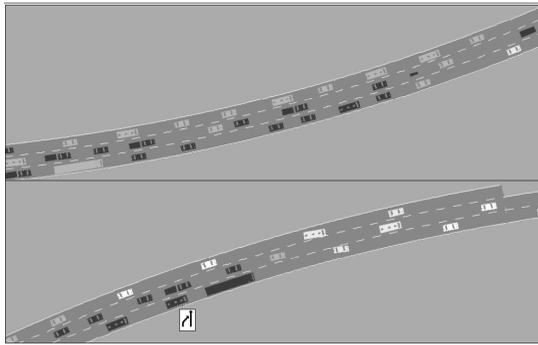


Bild 5.24: Darstellung eines Stauszenarios in PELOPS

Die zu diesem Zweck erstellte Strecke in PELOPS besteht aus Geraden-, Kurven- und Klothoidenbereichen, wobei auch die Systemgrenzen für Krümmung und Krümmungsänderungen aus (F 3.3) und (F 3.5) umgesetzt wurden. Die Anzahl der Spuren wird mit drei festgelegt. Für eine Länge von 150 Meter existiert auf der Hälfte der Strecke eine Verengung auf zwei Spuren, um Stop&Go-Verkehr zu provozieren. Zur Erzeugung des Szenarios werden 380 Fahrzeuge zufällig generiert. Diese können zunächst nur zu Streckenbeginn eingesetzt werden. Zur Erzeugung einer Stop&Go-Situation werden gegen Ende der Strecke alle Spuren durch still stehende Fahrzeuge gesperrt. Dadurch wird die Entstehung eines Staus z. B. durch eine Streckensperrung simuliert. Nach dem Durchlauf der Simulation ist die gesamte Strecke mit Fahrzeugen gefüllt, die Positionen der Fahrzeuge werden nach der Simulation gespeichert. Die zu Beginn eingesetzten, still stehenden Fahrzeuge werden entfernt und eine erneute Simulation gestartet. Die Visualisierung nach Abschluss dieser Simulation zeigt ein Auflösen des Staus. Da jedoch Fahrzeuge, die die Strecke verlassen, wieder zu Beginn eingesetzt werden, ist das Fassungsvermögen der Strecke schnell erschöpft. Gegen Ende dieses zweiten Simulationslaufes sind die Fahrzeuge über die gesamte Strecke verteilt. Diese Konstellation der Fahrzeuge wird gespeichert und als Grundlage für die Entwicklung von Klassifikationsalgorithmen verwendet. Die Visualisierung dieses Verkehrsszenarios zeigt einen Verkehrsfluss gemäß der Definition aus Abschnitt 2.1 (Bild 5.24). Häufig kommt es dabei zum Stillstand des Verkehrsflusses. Nach kurzer Zeit ist jedoch eine Weiterfahrt möglich. Durch die unterschiedlichen Fahreigenschaften der FFEs, die während der zufälligen Erzeugung entstanden sind, kommt es, wie bereits erwähnt, häufig zu Spurwechseln.

Der in Matlab/Simulink implementierte Klassifikationsalgorithmus in Verbindung mit dem Gassenbeobachter kann nun mittels Software-in-the-Loop(SiL)-Simulation evaluiert werden. Hierfür wird eine FFE-Einheit ausgewählt, dem die Algorithmik zugewiesen wird. Trifft ein Spurwechsel des Vorderfahrzeugs unserer FFE-Einheit zu, werden die aufgezeichneten Daten im Nachhinein mit einem Signal gekennzeichnet, um für die Parametrierung der Netze den genauen Anfangs- und Endzeitpunkt eines jeden Spurwechsels zur Verfügung zu haben. Dieses Signal wird im Folgenden mit *Zielfunktion V* bezeichnet. Zusätzlich wird ein einfaches Sensormodell erstellt, das die Verdeckungsgebiete und die Verzögerung der verwendeten Sensorik modelliert.

5.5.3.4 Granularisierung der Eingangswerte

Jedes der beschriebenen Merkmale hat anstelle von diskreten Zuständen und deren Wahrscheinlichkeiten einen kontinuierlichen Verlauf. Um die Merkmale als Eingang für die Sensorknoten verwenden zu können, werden Methoden der *Fuzzy-Logik* [72] verwendet.

Der Wertebereich der Merkmale wird zunächst *granularisiert*, also in mehrere linguistische Variablen aufgeteilt. Ziel dieser Aufteilung ist es, physikalische Werte in dimensionslose, unscharfe Mengen zu transformieren. Da hauptsächlich geometrische Merkmale und ihre zeitlichen Ableitungen verwendet werden, wird eine Einteilung in die drei Zugehörigkeitsfunktionen g_1 , g_2 und g_3 als sinnvoll erachtet. Eine Aufteilung in eine größere Anzahl von Zugehörigkeitsfunktionen würde zwar eine präzisere Unterteilung der Werte ermöglichen, aber auch die Anzahl der Zugehörigkeitswerte unüberschaubar groß werden lassen.

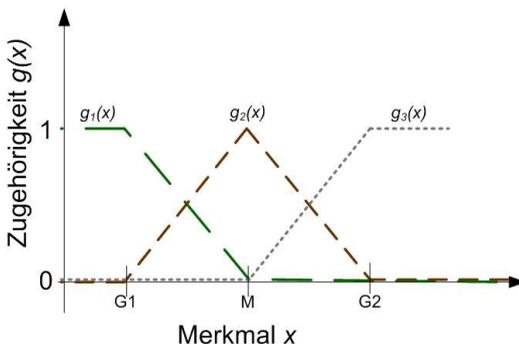


Bild 5.25: Zugehörigkeitsfunktionen der Merkmale bei der Granularisierung

Die Zugehörigkeitsfunktionen werden, wie in Bild 5.25 dargestellt, als symmetrische Dreiecksfunktionen realisiert, die sich jeweils überschneiden. Somit wird einem festen Wert des Merkmals keine feste linguistische Variable zugewiesen, sondern ein kontinuierlicher Übergang zwischen den linguistischen Variablen bei einem sich kontinuierlich ändernden Wert des Merkmals erreicht.

Die Bestimmung der drei Grenzen $G1$, M und $G2$ erfolgt anhand des Lerndatensatzes für jedes Merkmal einzeln. Für die Grenzen gilt $G1 < M < G2$, wobei die Abstände $M - G1$ und $G2 - M$ nicht gleich sein müssen. Nimmt ein Merkmal während eines Spurwechsels zu, wird zunächst die Grenze $G1$ auf den Default-Wert des Merkmals gesetzt (bei der Quergeschwindigkeit des Vorderfahrzeugs v_{yFC} wäre dieser 0 m/s). Analog dazu wird $G2$ auf den Default-Wert gesetzt, wenn die Werte des Merkmals während eines Spurwechsels abnehmen. Nachdem $G1$ bzw. $G2$ auf den Default-Wert gesetzt worden ist, werden die Werte M und $G2$ bzw. $G1$ bestimmt. Beispielsweise wird beim Klassifikator *Ausscherer links* für das Merkmal v_{yFC} zuerst die Grenze $G1$ auf den Default-Wert 0 gesetzt, danach wird M aus den Quergeschwindigkeiten aller Situationen *Ausscherer links* bestimmt. M wird so gesetzt, dass links von M genauso viele Werte gegen einen Spurwechsel sprechen wie rechts von M dafür:

$$\frac{\sum v_{yFC} < M \mid_{FC \text{ links}=0}}{\sum v_{yFC} \mid_{FC \text{ links}=0}} = \frac{\sum v_{yFC} > M \mid_{FC \text{ links}=1}}{\sum v_{yFC} \mid_{FC \text{ links}=1}}, \quad (\text{F 5.101})$$

wobei FC_links der Zielfunktion V für einen Spurwechsel links entspricht und somit eine Aussage darüber beinhaltet, ob in diesem Moment tatsächlich ein Spurwechsel stattfindet.

Die Grenze G_2 wird dann aus den Maxima der Werte des Merkmals bestimmt, die während den Spurwechselvorgängen *Ausscherer links* auftreten. Hier bietet sich an, den Mittelwert über diesen Maximalwerten zu bilden:

$$G_2 = \frac{\sum_i \max(v_{yFC} \mid_{\text{Spurwechsel } i})}{\sum_i i} \quad (\text{F 5.102})$$

Dieser Vorgang wird für alle Merkmale aller Klassifikatoren wiederholt. Somit stehen nun für alle Merkmale diskrete Zustände und deren Wahrscheinlichkeiten zur Verfügung, die dem Sensorknoten zugeführt werden können.

5.5.3.5 Die Gewichtung der Merkmale

Entscheidend für die Qualität des Klassifikators ist die Wahl der Werte für die bedingten Wahrscheinlichkeiten der Zwischen- und Sensorknoten. Es sollen hier nur die Sensorknoten gelernt werden. In den Zwischenknoten werden anfangs alle Merkmale gleich gewichtet. Über diese Knotenebene kann dann eine manuelle Anpassung der Gewichtung vorgenommen werden, ohne die gelernten Sensorknoten-Tabellen ändern zu müssen. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Zwischenknoten für den Lernansatz nicht berücksichtigt (Bild 5.26).

Für die automatisierte Gewichtung der Merkmale wurden in [92] zwei Lernverfahren, die eine *bekannte* Netzstruktur und *vollständige* Trainingsdaten voraussetzen, untersucht, der Frequentistische und der Bayes'sche Lernansatz. [92] kommt zu dem Ergebnis, dass wegen der geringeren Komplexität der Frequentistische Ansatz dem Bayes'schen Lernansatz für die hier dargestellte Problematik vorzuziehen ist. Aufgrund der hohen Anzahl von Spurwechselvorgängen, die durch die Simulationsumgebung zur Verfügung steht, kann von einem Konvergieren der Gewichtungsfaktoren bei Frequentistischen und Bayes'schen Lernansatz ausgegangen werden. Beim Frequentistischen Lernansatz wird das Netz gesucht, welches mit höchster Wahrscheinlichkeit die vorhandenen Lerndaten erzeugt haben kann. Dieser Lernansatz basiert auf der Maximierung der *Likelihood* der Daten unter Betrachtung der möglichen Modelle (*Maximum-Likelihood-Methode*, [73]). Im Folgenden werden mit $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_j\}$ die Übergangstabellen der i Knoten des Bayes'schen Netzes und mit θ_{ijk} die Tabelleneinträge der Bayes'schen Netze bezeichnet. Dabei steht i für den Zustandsknoten, j für die Zustandskombinationen des Knotens und k für die Zustandskombinationen der Elternknoten.

Die bedingten Wahrscheinlichkeiten werden mit der Maximum-Likelihood-Methode nach folgender Vorschrift geschätzt:

$$\hat{\theta}_{ijk} = \frac{N_{ijk}}{\sum_j N_{ijk}} \quad (\text{F 5.103})$$

N_{ijk} bezeichnet hierbei die Häufigkeiten der durch die Indizes i , j und k gegebenen Zustandskombinationen über alle Lerndaten. Die Zuordnung der Häufigkeiten erfolgt wiederum über die Zielfunktion V , die die Information beinhaltet, ob bei einem bestimmten Messwert tatsächlich ein Spurwechsel stattfand. Bild 5.26 zeigt die Netzstruktur und die Anzahl der Zustände am Beispiel des Sensorknoten 1 (Merkmal *Quergeschwindigkeit des Vorderfahrzeugs* v_{yFC}). In Tabelle 5.1 werden alle Auftrittshäufigkeiten der Zustandskombinationen von Sensorknoten 1 über alle Messdaten eingetragen. Daraus kann dann über (F 5.103) die Tabelle mit den geschätzten bedingten Wahrscheinlichkeiten für den Knoten berechnet werden (Tabelle 5.2).

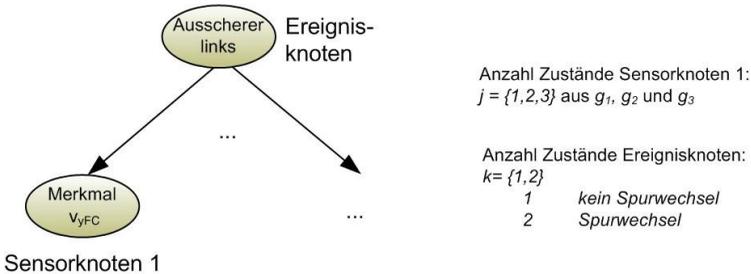


Bild 5.26: Netzstruktur für das Lernverfahren ohne Zwischenknoten und Zustände

$i = 1$	$k = 1$	$k = 2$
$j = 1$	N_{111}	N_{112}
$j = 2$	N_{121}	N_{122}
$j = 3$	N_{131}	N_{132}
$\sum_j N_{ijk}$	$N_{111} + N_{121} + N_{131}$	$N_{112} + N_{122} + N_{132}$

Tabelle 5.1: Häufigkeiten der Zustandskombinationen

$i = 1$	$k = 1$	$k = 2$
$j = 1$	$\hat{\theta}_{111}$	$\hat{\theta}_{112}$
$j = 2$	$\hat{\theta}_{121}$	$\hat{\theta}_{122}$
$j = 3$	$\hat{\theta}_{131}$	$\hat{\theta}_{132}$

Tabelle 5.2: geschätzte bedingte Wahrscheinlichkeiten

5.5.4 Bewertung der Klassifikatoren

Zur Bewertung der Klassifikatoren und zum Finden von Schwellwerten für die Information Spurwechsel/kein Spurwechsel aus der Spurwechselwahrscheinlichkeit wird die Knotenwahrscheinlichkeit des Ereignisknoten mit der Zielfunktion V des Klassifikators verglichen. Dazu wird die *Receiver Operating Characteristic (ROC)* Methode [74] verwendet.

Da die Klassifikatoren Werte zwischen null und eins ausgeben können, muss eine Schwelle gefunden werden, die die Grenze der Entscheidung Spurwechsel/kein Spurwechsel darstellt. Für die Festlegung der Schwelle muss die Kritikalität von Fehlentscheidungen des Klassifikators berücksichtigt werden.

Die *confusion matrix* [74] bietet einen Überblick über die Qualität einer Klassifikation bei fester Schwelle. In ihr ist festgehalten, wie oft die vier unterschiedlichen Fälle, die bei einer Klassifikation auftreten können, vorkommen:

- a : Spurwechsel findet nicht statt, Klassifikator löst nicht aus
- b : Spurwechsel findet nicht statt, Klassifikator löst aus
- c : Spurwechsel findet statt, Klassifikator löst nicht aus
- d : Spurwechsel findet statt, Klassifikator löst aus

Für die confusion matrix C_B gilt:

$$C_B = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}. \quad (\text{F 5.104})$$

Mit Hilfe von a , b , c und d können weitere Größen angegeben werden: die *true positive rate TP* und die *false positive rate FP*.

$$\begin{aligned} TP &= \frac{d}{c+d} \\ FP &= \frac{b}{a+b} \end{aligned} \quad (\text{F 5.105})$$

Werden FP und TP für unterschiedliche Schwellen von null bis eins berechnet, ergeben sich mehrere Wertepaare für FP und TP. Diese Wertepaare, eingetragen in ein Koordinatensystem, werden als ROC-Kurve bezeichnet. Hierbei ist FP an die x-Achse und TP an die y-Achse angetragen (Bild 5.26).

Der Punkt $FP = 0$ und $TP = 1$ ist der Punkt des optimalen Klassifikators: Erreicht ein Klassifikator bei einer bestimmten Schwelle diesen Punkt, werden alle Spurwechsel erkannt und es gibt kein fälschliches Auslösen des Klassifikators.

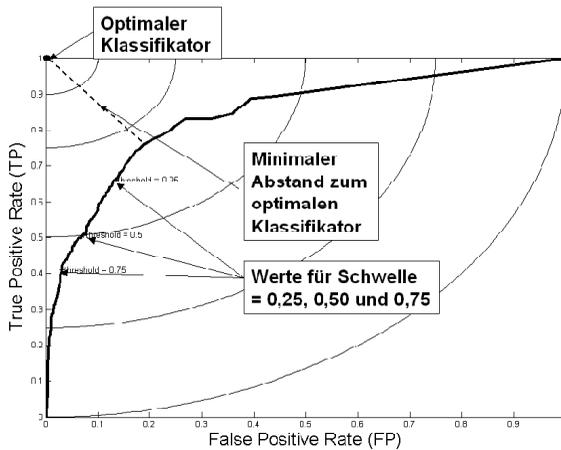


Bild 5.26: ROC-Kurve für den Klassifikator *Ausscherer links*

Die ROC-Kurve bietet eine anschauliche Möglichkeit, die optimale Schwelle auf Basis der Simulationsdaten zu bestimmen. Sind TP und FP gleich zu gewichten, kann diejenige Schwelle, bei der der Abstand zum optimalen Klassifikator am geringsten ist, als optimale Schwelle betrachtet werden. Da aber hier nicht erforderlich ist, dass ein Spurwechsel als gültiger Spurwechsel während der gesamten (in der Zielfunktion V verzeichneten) Spurwechseldauer erkannt wird, sind wesentlich geringere Werte von TP als 1 vertretbar. Wesentlich kritischer jedoch sind kleine Werte von FP , da dann der Klassifikator fälschlicherweise auslöst. Aus diesem Grund wird für die Berechnung des Abstandes zum optimalen Klassifikator d_{opt} eine gewichtete Funktion verwendet [73]:

$$d_{opt} = \sqrt{w(1-TP)^2 + (1-w)FP^2} . \quad (F 5.106)$$

Als Schwelle für die Spurwechselwahrscheinlichkeit wird derjenige Wert genommen, für den d_{opt} den geringsten Wert annimmt.

Durch den in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen neuartigen Ansatz steht nun eine Methode zur Verfügung, die es ermöglicht, Spurwechselvorgänge im Vorderfahrzeugbereich frühzeitig zu erkennen. Eine detaillierte Auswertung und Bewertung der unterschiedlichen Klassifikatoren, auch im Realfahrzeug, wird in [91] und [92] vorgenommen. [92] zeigt, dass die in der Simulation entwickelten Klassifikationsalgorithmen gut auf das Realfahrzeug und somit auf reale Spurwechselvorgänge übertragbar sind.

5.5.5 Reaktion des Gassenbeobachters auf einen Spurwechsel

Wurde ein Spurwechsel des Vorderfahrzeugs durch den Klassifikationsalgorithmus detektiert, muss im Folgenden eine sinnvolle Reaktion des Gassenbeobachters auf diese Situation gefunden werden.

Situation Ausscherer nach links oder rechts:

Hierbei ist entscheidend, dass bei einem Spurwechsel des Vorderfahrzeugs dieses möglichst frühzeitig nicht mehr als gültiges Vorderfahrzeug-Objekt FC im Gassenbeobachter berücksichtigt wird. Sobald der Spurwechsel detektiert wurde, soll das neue Vorderfahrzeug (nFC -Objekt aus der erweiterten Objektauswahl in Abschnitt 5.5.3.1) anstelle des FC -Objekts als Messdatum fungieren. Dieser Zustand hält so lange an, bis das alte Vorderfahrzeug aus dem Suchbereich der Objektauswahl für das Vorderfahrzeug (F 5.56) herausgefahren ist. Ab diesem Zeitpunkt gilt der Spurwechsel als abgeschlossen, da dann das nFC -Objekt zum FC -Objekt wird. Das FC -Objekt kann nun wieder als gültiges Messdatum im Gassenbeobachter berücksichtigt werden.

Situation Einscherer von links oder rechts:

Bei einem Einschervorgang erfolgt der Übergang auf das neue Vorderfahrzeug automatisch, da dieses zwischen dem alten Vorderfahrzeug und dem Eigenfahrzeug in den für die Vorderfahrzeug-Objektauswahl relevanten Suchbereich (F 5.57) einschert. Aufgrund des geringeren longitudinalen Abstands zum Eigenfahrzeug (x -Attribut aus dem MTT) wird dieses Fahrzeug in der Objektauswahl als neues Vorderfahrzeug gesetzt. Zu diesem Zeitpunkt besitzt das neue Vorderfahrzeug jedoch einen erhöhten d_y -Wert, da es sich noch nicht vollständig auf seiner Zielspur befindet. Dies würde, vor allem wenn die Solltrajektorie nur durch Vorderfahrzeugdaten (ohne Gassenbegrenzungsdaten) gestützt wird, zu einer leichten lateralen Bewegung der Solltrajektorie und somit des Eigenfahrzeugs in Richtung des einscherenden Fahrzeugs führen. Um dies zu vermeiden, wird das neue Vorderfahrzeug bei einem detektierten Einschervorgang nicht sofort als gültiges FC -Objekt für die Querführung gesetzt. Es wird erst nach einer Totzeit t_{cid} (*cut-in delay*) als Messdatum im Gassenbeobachter verwendet. Somit tritt während des Einschervorgangs ein Zeitraum t_{cid} auf, in dem kein Vorderfahrzeug-Messdatum im Gassenbeobachter berücksichtigt wird. Als Dauer für den Zeitraum hat sich durch Betrachtung verschiedener Einschervorgänge

$$t_{cid} = 2s \quad (\text{F 5.107})$$

als sinnvoller Wert herausgestellt. Während dieses Zeitraums ist die Beobachtbarkeit des Gassenbeobachters nicht erfüllt, was in Abschnitt 5.7 betrachtet wird.

Für die Längsregelung wird das als Einscherer erkannte Fahrzeug bei einem detektierten Einschervorgang sofort als Messdatum genutzt, da dann frühzeitig der Wunschabstand auf das neue Vorderfahrzeug eingeregelt werden kann.

5.6 Der Verifikations-Block – Vergleich der Trajektorien

Zur Berechnung der Solltrajektorie stehen im Optimalfall zum einen die Daten aus der Gassenbeobachtung, basierend auf der Bewegung umliegender Objekte und der Randbebauung, zur Verfügung. Zum anderen liefert die videobasierte

Bildverarbeitung Daten über die Fahrspurmarkierungen. Somit stehen, vorausgesetzt Fahrzeuge *und* Fahrbahnmarkierungen werden detektiert, zwei prinzipiell unterschiedliche Trajektorien-Informationen zur Verfügung. Um diese Informationen für die Solltrajektorien-Berechnung zu nutzen, können grundsätzlich folgende Varianten in Betracht gezogen werden:

1. Querregelung basierend auf der Trajektorie des Gassenbeobachters, Verifikation der Gassenbeobachter-Trajektorie mit den Daten der Fahrspurerkennung
2. Querregelung basierend auf den Fahrspur-Daten, Verifikation dieser mit der Gassenbeobachter-Trajektorie
3. Berücksichtigung der Fahrspur-Daten als Messgröße im Gassenbeobachter, keine Verifikation

Steht keine Information über die Fahrbahnmarkierungen zur Verfügung, beispielsweise durch Verdeckung dieser durch Vorderfahrzeuge, kann die Querführung durch Regelung auf die Gassenbeobachter-Daten in allen Varianten aufrecht erhalten werden,

Bei Voruntersuchungen zu der Akzeptanz-Studie, auf die in Kapitel 8 eingegangen wird, wurde eine Systemauslegung des Stauassistenten-Systems untersucht, die Variante 1 entspricht [75]. Hierbei basierte die Querführung rein auf den Daten des Gassenbeobachters, obwohl Fahrbahnmarkierungen erkennbar waren. In diesem Vorversuch wurde häufig von Probanden bemängelt, dass Lenkbewegungen stattfanden, obwohl diese aus ihrer Sicht nicht notwendig waren. Ursache dieser Lenkbewegungen waren Querbewegungen des Vorderfahrzeugs in der Spur, welche über (F 5.81) für die Gassenbeobachter-Trajektorie berücksichtigt wird. Aus diesem Grund wird, bei eindeutig erkennbaren Fahrbahnmarkierungen, Variante 2 bevorzugt.

Variante 3 hat den Vorteil, dass ein Überblenden von Fahrspur- auf Gassenbeobachter-Trajektorie bei Verlust der Fahrbahnmarkierungen entfällt, da dieses Überblenden durch den Beobachter geschieht. Die Fahrspur-Daten werden als Messdatum einfach nicht mehr berücksichtigt. Gibt die Bildverarbeitung jedoch fehlerhafte Fahrbahnmarkierungen aus, beispielsweise durch Bordsteinkanten oder durch Ausbesserungen des Straßenbelags, werden diese nicht durch die Bewegung umliegender Fahrzeuge verifiziert. Der Beobachter gibt dann eine Trajektorie aus, die eine gewichtete Mittelung der Fahrzeugbewegung und der falschen Fahrspur darstellt, je nachdem, welche Messdaten im Beobachter mit einem geringeren Rauschen versehen werden. Diese Mittelung geschieht auch bei stark differierenden Messdaten.

Insgesamt erweist sich bei vorhandener Redundanz Variante 2 als am sinnvollsten. Es wird auf die Fahrspur-Daten geregelt, wenn diese verfügbar sind, wodurch sich ein komfortables Querregelverhalten ergibt. Stehen keine Daten über Fahrbahnmarkierungen zur Verfügung, wird auf die Gassenbeobachter-Trajektorie übergeblendet. Die Verifikation geschieht durch Vergleich der Trajektorie und der Fahrspurmitte am Ort des Vorderfahrzeugs, wodurch man eine gewisse Vorausschau für die Verifikation und somit eine frühzeitige Erkennung einer größeren Abweichung erhält. Ein Vorausschau-Punkt, der weiter entfernt liegt als der Längsabstand zum Vorderfahrzeug ist nicht sinnvoll, da für die

Gassenbeobachter-Trajektorie keine Messdaten jenseits der Vorderfahrzeug-Position berücksichtigt werden.
Somit muss für eine gültige Verifikation

$$\left(y_0 + x_{FC} \cdot \theta_{\Delta} + \frac{1}{2} \cdot x_{FC}^2 \cdot \kappa_T \right) - \left(y_{0,Bv} + x_{FC} \cdot \theta_{\Delta,Bv} + \frac{1}{2} \cdot x_{FC}^2 \cdot \kappa_{T,Bv} \right) < 0.5 \cdot w_{EL} \quad (F 5.108)$$

gelten, wobei y_0 , θ_{Δ} und κ_T den Trajektorien-Größen der Gassenbeobachtung entsprechen und κ_T^j , der sich schnell ändernde Anteil der Gassenbeobachter-Trajektorie, nicht berücksichtigt wird. Der Abstand zur Spurmitte $y_{0,Bv}$, die Orientierung $\theta_{\Delta,Bv}$ und die Krümmung $\kappa_{T,Bv}$ entsprechen den jeweiligen Parametern aus der Bildverarbeitungs-Trajektorie. Betrachtet wird, wie bereits erwähnt, die laterale Abweichung der Trajektorien an der x-Position des Vorderfahrzeugs x_{FC} . Übersteigt diese Abweichung den halben Wert der Eigenfahrspur-Breite w_{EL} (Width Ego-Lane), wird die Verifikation als nicht erfüllt angesehen. Es erfolgt eine Übernahmemaufforderung an den Fahrer.

Stehen keine Informationen über die Fahrbahnmarkierungen zur Verfügung, erfolgt die Querregelung alleinig auf den Daten der Gassenbeobachter-Trajektorie, es findet keine Verifikation statt. Da der Verlust der Fahrspur-Information vor allem im Niedergeschwindigkeitsbereich (<20 km/h) sehr häufig auftreten kann, beispielsweise durch Überdeckung durch die Vorderfahrzeuge, wird davon abgesehen, bei nichtvorhandenen Fahrspur-Daten die Querführung nicht zur Verfügung zu stellen. Bei Verlust der Fahrbahnmarkierungen während der Querregelung muss von der Bildverarbeitungs-Trajektorie auf die Gassenbeobachter-Trajektorie möglichst komfortabel übergeblendet werden, vor allem bei höherer Differenz von y_0 und $y_{0,Bv}$ zum Zeitpunkt des Umschaltens.

Bei ungültiger Gassenbeobachter-Trajektorie, beispielsweise durch das Nichtvorhandensein eines Vorderfahrzeugs, wird die Querführung auch bei vorhandenen Fahrspur-Daten nicht zur Verfügung gestellt, was in Kapitel 7 (HMI) berücksichtigt werden muss.

Ein Sonderfall tritt auf, wenn nur eine Fahrbahnmarkierung aus der Bildverarbeitung zur Verfügung steht. Auch für diesen Fall stehen verschiedene Varianten der Messdaten-Berücksichtigung für die Situationsinterpretation zur Verfügung:

1. Querregelung basierend auf der Gassenbeobachtung, keine Berücksichtigung der einen Fahrbahnmarkierung für die Regelung, aber Verifikation der Gassenbeobachtung auf derjenigen Seite, auf der sich die Fahrbahnmarkierung befindet
2. Querregelung basierend auf den Daten der einen Fahrbahnmarkierung unter Berücksichtigung einer geschätzten Breite (aus früheren Messdaten mit zwei Fahrbahnmarkierungen), Verifikation über (F 5.108)
3. Berücksichtigung der Orientierung $\theta_{\Delta,Bv}$ und der Krümmung $\kappa_{T,Bv}$ der einen Fahrbahnmarkierung als Messgröße im Gassenbeobachter, keine Verifikation

Die Querregelung auf Basis nur einer Fahrbahnmarkierung in Variante 2 hat zwar hinsichtlich des Regelungskomforts Vorteile, jedoch wird hier eine Verengung der Fahrspur nicht berücksichtigt, da von einer konstanten Fahrsprungbreite ausgegangen wird. Auch ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass es sich bei den Daten aus der

Bildverarbeitung nicht um eine Fahrstreifenbegrenzung, sondern um sonstige Abweichungen am Fahrbahnbelag handelt. Im Gegensatz dazu verifizieren sich zwei detektierte Fahrbahnmarkierungen hinsichtlich Orientierung und Krümmung durch die verwendeten Fahrspurmodelle in der Bildverarbeitung gegenseitig.

Bei Betrachtung des Querregelungskomforts ist Variante 3 der 1. Variante zu bevorzugen. Aus dem Grund soll Variante 3 hier genauer betrachtet werden. Für die Berücksichtigung der Orientierung $\theta_{\Delta, Bv}$ und der Krümmung $\kappa_{T, Bv}$ bei der Gassenbeobachtung wird für diesen Fall (F 5.15) wie folgt erweitert:

$$\begin{pmatrix} y_{FC} \\ y_{Ll} \\ \cdot \\ y_{Lm} \\ y_{Rl} \\ \cdot \\ y_{Rn} \\ \theta_{\Delta, Bv} \\ \kappa_{T, Bv} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x_{FC} & \frac{1}{2} \cdot x_{FC}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{FC}^3 & 0 & 0 \\ 1 & x_{Ll} & \frac{1}{2} \cdot x_{Ll}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{Ll}^3 & 1 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{Lm} & \frac{1}{2} \cdot x_{Lm}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{Lm}^3 & 1 & 0 \\ 1 & x_{Rl} & \frac{1}{2} \cdot x_{Rl}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{Rl}^3 & 0 & -1 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{Rn} & \frac{1}{2} \cdot x_{Rn}^2 & \frac{1}{6} \cdot x_{Rn}^3 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_0 \\ \theta_{\Delta} \\ \kappa_T \\ \kappa'_T \\ b_L \\ b_R \end{pmatrix} \quad (F 5.109)$$

Um das Vorderfahrzeug im Vergleich zur den Fahrspur-Daten schwächer zu gewichten, wird keine Vorderfahrzeug-Historie wie in (F 5.81) berücksichtigt. Für die Erweiterungswerte der Kovarianzmatrix des Messrauschens R_D aus (F 5.72), $\sigma_{\theta, Bv}$ und $\sigma_{\kappa, Bv}$, müssen nun die Werte so gewählt werden, dass sich die Solltrajektorien-Größen θ_{Δ} und κ_T stark an den Werten aus der Bildverarbeitung orientieren. Somit werden Schwingungen des Vorderfahrzeugs durch die detektierte Fahrspurmarkierung gedämpft, was sich positiv auf den Regelungskomfort auswirkt. Eine Verifikation der Fahrspurmarkierung kann nun insofern erfolgen, dass bei Überquerung dieser des Vorderfahrzeugs, ohne dass ein Vorderfahrzeug-Spurwechsel erkannt wurde, eine Übernahmeaufforderung generiert werden kann:

$$\left(y_{L, Bv} + x_{FC} \cdot \theta_{\Delta, Bv} + \frac{1}{2} \cdot x_{FC}^2 \cdot \kappa_{T, Bv} \right) - y_{FC} < 0, \quad (F 5.110)$$

wenn die linke Fahrspurmarkierung detektiert wurde, und

$$\left(y_{R, Bv} + x_{FC} \cdot \theta_{\Delta, Bv} + \frac{1}{2} \cdot x_{FC}^2 \cdot \kappa_{T, Bv} \right) - y_{FC} > 0, \quad (F 5.111)$$

wenn die rechte Fahrspurmarkierung detektiert wurde. $y_{R, Bv}$ und $y_{L, Bv}$ geben jeweils den Abstand der jeweiligen detektierten Spurmarkierung zum Eigenfahrzeug an.

In diesem Abschnitt wurden Methoden vorgestellt, um die durch die Sensorik zur Verfügung gestellten redundanten Informationen über die Fahrspur und

umliegenden Objekte für die Berechnung und Verifikation der Solltrajektorie zu nutzen. Somit steht nun die Querführungs-Solltrajektorie zur Verfügung, auf die durch Aufbringen eines Lenkradmoments die Querregelung stattfinden kann.

5.7 Die Beobachtbarkeit der Gassenbeobachter-Systemzustände

Im Folgenden soll die Beobachtbarkeit des Gassenbeobachters betrachtet werden. Um die Konvergenz der Gassenbeobachtung zu gewährleisten, muss die Beobachtbarkeit der Systemzustände sichergestellt werden.

Die Beobachtbarkeitsmatrix wird hierfür wie folgt aufgestellt [63]:

$$O_k = \begin{pmatrix} C_k \\ C_{k+1} \cdot A_k \\ C_{k+2} \cdot A_{k+1} \cdot A_k \\ \vdots \\ C_{k+n-1} \cdot A_{k+n-2} \cdot \dots \cdot A_k \end{pmatrix} \quad (F \quad 5.112)$$

n entspricht hierbei der Anzahl der Zustände. Die Beobachtbarkeit ist dann erfüllt, wenn die Beobachtbarkeitsmatrix O_k für jeden Zeitpunkt k den Rang n besitzt:

$$\text{Rang}(O_k) = n \quad (F \ 5.113)$$

Das mit (F 5.39) und (F 5.81) beschriebene diskretisierte System erfüllt diese Voraussetzungen dann nicht, wenn eine der folgenden Situationen eintrifft:

1. Es steht kein Vorderfahrzeug-Objekt als Messwert, auch nicht aus der Vorderfahrzeug-Historie, zur Verfügung.
2. Es steht kein Messwert der linken Gassenbegrenzung zur Verfügung.
3. Es steht kein Messwert der rechten Gassenbegrenzung zur Verfügung.
4. Die Eigengeschwindigkeit reduziert sich zu null ($v_{EV} = 0$).

Die Konvergenz des Filters kann also nicht über die gesamte Beobachtungsdauer gewährleistet werden, da diese vier Fälle innerhalb der Querführungs-Systemgrenzen auftreten können. Das Divergenz-Verhalten kann im Kalman-Filter anhand der Diagonalelemente der Schätzfehler-Kovarianzmatrix P betrachtet werden. Diese treffen eine Aussage über die Beobachtungsqualität des jeweiligen Systemzustands. Je größer die zum Systemzustand gehörenden Diagonalelemente der P -Matrix, desto niedriger ist die Qualität der Beobachtung des Systemzustands. Im Folgenden werden die vier Situationen im Einzelnen betrachtet und mögliche Lösungsansätze diskutiert.

1. Kein Vorderfahrzeug-Objekt als Messwert

Grundsätzlich ist eine Bedingung für die Querführung ein vorhandenes, von der Sensorik und dem Tracking erkanntes und validiertes Vorderfahrzeug-Objekt. Kurzfristig kann es jedoch bei einem erkannten Einscherer notwendig sein, das

Vorderfahrzeug für den Zeitraum t_{cid} (Abschnitt 5.5.5) nicht als Messdatum für die Beobachtung zu berücksichtigen. Wird nun innerhalb dieses Zeitraums kein Vorderfahrzeug-Messdatum in der *Measurement Update* - Routine des Kalman-Filters aus Abschnitt 5.2.3 berücksichtigt, steigen die entsprechenden Diagonalelemente der P -Matrix exponentiell an. Das Filter divergiert, da die Beobachtbarkeit aller Zustandsgrößen im Kalman-Filter nicht mehr erfüllt ist. Um numerische Probleme bei der Berechnung der Filtergleichungen zu vermeiden, wird anstelle der Nicht-Berücksichtigung des Vorderfahrzeugs in den Filtergleichungen dem Vorderfahrzeug-Messdatum ein sehr hoher Messfehler zugesprochen ($\sigma_{y_{FC}} = 100m$). Hierdurch divergiert das Kalman-Filter langsamer, das Messdatum des Einscherers wird jedoch wegen seines hohen Messfehlers für die Solltrajektorie faktisch nicht berücksichtigt. Der Anstieg der Schätzfehler-Varianz des Zustands y_0 für einen Ausfall des Vorderfahrzeug-Datums für 4 Sekunden ist exemplarisch in Bild 5.27 dargestellt. Diese Erhöhung der Schätzfehler-Varianz wird akzeptiert, da sie sich, sobald das Vorderfahrzeug-Objekt wieder als gültig erachtet wird, innerhalb weniger Sekunden wieder zurückbildet. Einzig wird bei der dann folgenden starken Berücksichtigung des Vorderfahrzeugs dem Messwert im Kalman-Filter etwas mehr Gewicht zugesprochen, wodurch sich die Solltrajektorie schnell auf das neue Vorderfahrzeug anpasst.

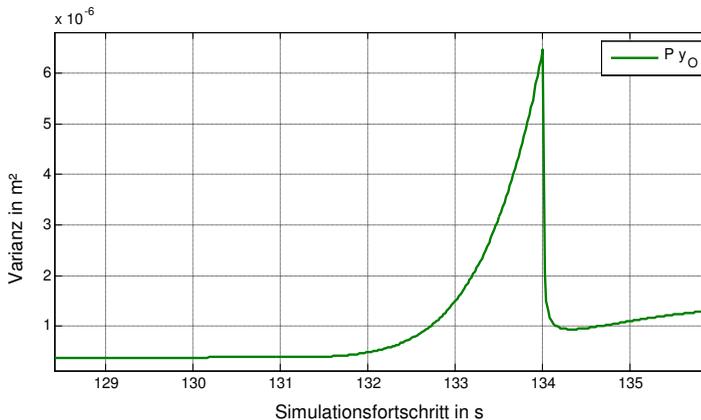


Bild 5.27: Anstieg der Schätzfehler-Varianz des Zustands y_0 bei Nicht-Berücksichtigung des Vorderfahrzeugs in Sek. 130 -134

2. und 3. Keine Gassenbegrenzungs-Daten als Messwert

Die Situation, dass dem Gassenbeobachter keine Daten über die linke oder rechte Gassenbegrenzung zur Verfügung stehen, kann auch über einen längeren Zeitraum eintreten. In diesem Falle können die jeweiligen Systemzustände b_L und b_R nicht mehr beobachtet werden. Um in diesen Zeitraum ein Ansteigen der Schätzfehler-Varianz der Zustände b_L und b_R zu vermeiden, werden den Prozessfehler-Standardabweichungen σ_{b_L} und σ_{b_R} , also dem Prozessrauschen, bei

entsprechenden fehlenden Gassenbegrenzungsdaten der Wert Null zugewiesen. Somit wird ein Divergieren des Filters vermieden [63].

4. Eigenfahrzeug-Stillstand ($v_{EV} = 0$)

Auch diese Situation befindet sich innerhalb der Querführungs-Systemgrenzen und kann eine unbestimmte Zeit andauern. Da hierbei die Nicht-Diagonalelemente der Systemmatrix A_D in (F 5.39) Null werden, sind die Systemzustände y_0 , θ_Δ , κ_T und κ_T über das Vorderfahrzeug-Datum nicht mehr vollständig beobachtbar. Um ein Divergieren des Filters zu vermeiden, wird auch hier der Prozessfehler-Standardabweichung der Krümmungsänderung σ_{κ_T} der Wert Null zugewiesen. Es wird also angenommen, dass sich die Solltrajektorie im Eigenfahrzeug-Stillstand nicht ändert. Aus Sicht des Fahrers unerwünschte Lenkradbewegungen im Stillstand, basierend auf einer Änderung der Solltrajektorie, bleiben aus. Einzig eine Änderung von b_L und b_R ist erwünscht, um den Fahrer auch im Stillstand auf ein sich näherndes Seitenfahrzeug durch eine Übernahmeanforderung aufmerksam machen zu können.

Die in diesem Kapitel beschriebene Situationsinterpretation für Stausituationen beinhaltet zum einen die Berechnung einer Trajektorie anhand der Bewegung umliegender Fahrzeuge. Durch diesen neuartigen Ansatz steht eine zu der Fahrspurerkennung durch Bildverarbeitung redundante Information über die Querführungstrajektorie zur Verfügung. Zum anderen kann durch die Beobachtung der Gassenbegrenzung ein Ausweichen vor seitlich zu nahen Objekten und eine Übernahmeanforderung realisiert werden. Des Weiteren wurden die Erkennung von Sondersituationen bezüglich des Vorderfahrzeug-Wechsels und deren algorithmische Reaktion der Gassenbeobachtung aufgeführt. Zusätzlich wurden Methoden vorgestellt, die durch die Sensorik zur Verfügung gestellte redundante Information (Fahrspurmarkierungen und umliegenden Objekte) für die Berechnung und Verifikation der Solltrajektorie zu nutzen. Das nun folgende Kapitel beinhaltet die Einregelung der Solltrajektorie für die Quer- und der Längsführung.

6 Regelungstechnische Ansätze für die Quer- und Längsführung

Die regelungstechnischen Anforderungen in der Längs- und Querregelung sind einerseits, ein für den Fahrer komfortables Fahrzeugverhalten innerhalb der Systemgrenzen zu realisieren. Andererseits ist eine ausreichende Genauigkeit der Regelung erforderlich, um beispielsweise in der Längsregelung bei einer Beschleunigung des Vorderfahrzeugs nicht zu große Abstände zum Vorderfahrzeug zu erhalten. Weitere Anforderung an die Regelung ist die Robustheit gegenüber Störeinflüssen und abweichenden Fahrzeugparametern. Aus diesem Grund soll im Folgenden auf Regelstrategien, die komplexe Fahrzeugmodelle voraussetzen, verzichtet werden.

6.1 Die Querregelung entlang einer vorgegebenen Bahn

Unter Zuhilfenahme der linearen Differentialgleichungen des Einspurmodells wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl unterschiedlicher Reglerkonzepte für die Führung

von Fahrzeugen entlang einer vorgegebenen Bahn entwickelt [24], [76], [77]. Das Regelziel ist die Einregelung der geforderten Bahn und somit das asymptotische Ausregeln des Abstands zur Trajektorie y_0 zu Null. Um dieses Regelziel zu erreichen wird sich eines Zustandsreglers bedient, der anhand der Zustandsgrößen Trajektorienabstand y_0 , Winkelfehler θ_Δ und Trajektorienkrümmung κ_T einen Solllenkradwinkel δ_{STWA_soll} errechnet. Ein unterlagerter Lenkradwinkelregler regelt den Solllenkradwinkel über die Lenkrad-Momentenschnittstelle im Fahrzeug (Abschnitt 4.3.2) ein. Fahrzeugseitig steht der aktuelle Lenkradwinkel δ_{STWA} zur Verfügung. Die hieraus entstehende Regelstruktur ist in Bild 6.1 abgebildet.

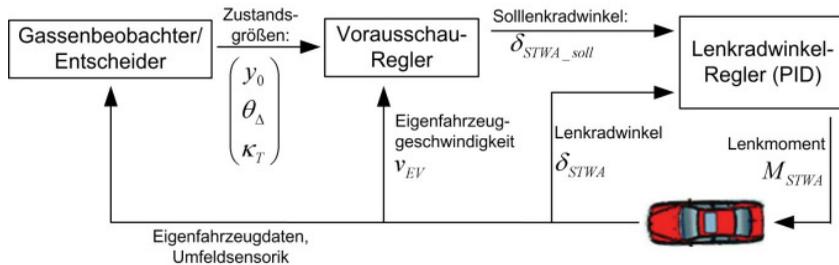


Bild 6.1: Struktur der Querregelung

6.1.1 Der Prädiktions-Regler

Eine Anforderung an den Regler ist, dass er sich innerhalb der Querdynamik-Systemgrenzen stabil verhält. Da das Regelgesetz auch bei einer Geschwindigkeit von $v_{EV} = 0$ gültig sein muss, wird hier kein Differenzialgleichungsansatz wie in [76] verwendet, da hierbei die Soll-Gierrate $\dot{\Psi}_{Soll}$ als Stellgröße verwendet wird und diese im Fahrzeugstillstand unabhängig von den Zustandsgrößen null ist. Stattdessen wird ein Ansatz gewählt, der durch eine vorausschauende Messung eine spurgenaue Regelung erzeugt und als Stellgröße die Sollkrümmung κ_{soll} des Eigenfahrzeugs ausgibt:

$$\kappa_{soll} = -(v_{EV} \cdot \theta_\Delta \cdot t_{prev} + y_0) \cdot P_{prev} + \kappa_T. \quad (F 6.1)$$

Die Regelabweichung (Trajektorienabstand y_0) wird also hier nicht zum aktuellen Zeitpunkt betrachtet, sondern zu einem Zeitpunkt in der Zukunft t_{prev} , um dem Regelkreis Stabilität zu verleihen. Diese zukünftige Regelabweichung wird über P_{prev} für die Stellgröße (Sollkrümmung κ_{soll}) gewichtet und hat somit die Einheit m^{-2} . Die aktuelle Krümmung der Trajektorie κ_T wird vorgesteuert. Die Sollkrümmung steht gemäß dem Einspurmodell bei Annahme einer konstanten Kreisfahrt im linearen, aber geschwindigkeitsabhängigen Zusammenhang mit der eigentlichen Stellgröße, dem Solllenkradwinkel:

$$\delta_{STWA_soll} = I_{EV} \cdot \left((l_v + l_h) + m_{EV} v_{EV}^2 \cdot \frac{\left(\frac{l_h}{c_v} - \frac{l_v}{c_h} \right)}{l_v + l_h} \right) \cdot \mathbf{K}_{soll}. \quad (\text{F } 6.2)$$

l_{EV} entspricht hierbei der Lenkübersetzung des Eigenfahrzeugs.

6.1.2 Betrachtung der Stabilität des Querregelkreises

Um die Reglerstabilität bewerten zu können, muss ein Modell für den Lenkstrang gefunden werden. Unter Berücksichtigung eines PID-Reglers zum Einregeln des Lenkradwinkels über das Lenkradmoment wurde in [77] ein Lenkungsmodell für den Versuchsträger (Kapitel 9) definiert. Dieses Modell besteht aus einem Totzeit-Glied, einer Ratenbegrenzung und einem Verzögerungsglied erster Ordnung (Bild 6.2).

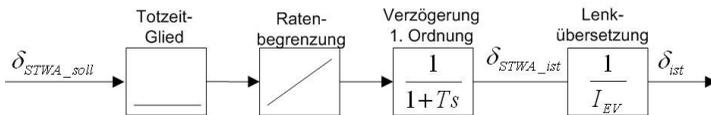


Bild 6.2: Blockschaltbild des Lenkungsmodells [77]

Um nun eine Stabilitätsbetrachtung machen zu können, müssen Systemgleichungen für das gesamte Querbewegungssystem, bestehend aus dem Lenkungsmodell, dem Einspurmodell und den Bewegungsgleichungen des Gassenbeobachters (GB) entlang der Trajektorie, aufgestellt werden (Bild 6.3).

Für die Aufstellung der Systemgleichungen wird das Totzeit-Glied des Lenkungsmodells, das eine nicht-rationale Übertragungsfunktion besitzt, durch Reihenentwicklung als PT_1 -Glied rational approximiert:

$$e^{-sT_{tot}} \approx \frac{1}{1 + sT_{tot}} \quad (\text{F } 6.3)$$

Die diskrete Systemgleichung des PT_1 -Glieds erhält man durch Euler-Diskretisierung zu

$$x_{k+1} = \left(1 - \frac{T}{T_{tot}}\right)x_k + \frac{T}{T_{tot}}u_k, \quad (\text{F } 6.4)$$

wobei T wiederum der Abtastzeit des diskreten Systems entspricht.

Die Ratenbegrenzung wird aufgrund der zu erwartenden niedrigen Querdynamik vernachlässigt. Somit modellieren zwei hintereinandergeschaltete PT_1 -Glieder die Lenkung.

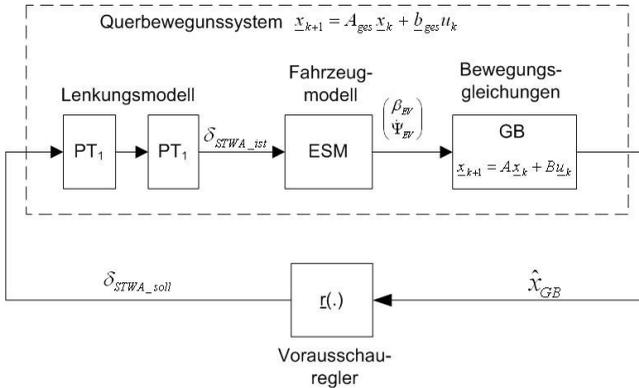


Bild 6.3: Regelkreis der Querregelung

Der gesamte Querregelkreis ist in Bild 6.3 dargestellt. Für die Stabilitätsbetrachtung werden nun das Lenkungsmodell, das Fahrzeugmodell und die Gassenbeobachter-Bewegungsgleichungen zu einem Querbewegungssystem zusammengefasst:

$$\begin{pmatrix} y_{0,k+1} \\ \theta_{\Delta,k+1} \\ \kappa_{EV,k+1} \\ \delta_{ist,k+1} \\ \delta_{LM,k+1} \end{pmatrix} = \overbrace{\begin{pmatrix} 1 & T \cdot v_{EV} & a_{13} & a_{14} & 0 \\ 0 & 1 & -T \cdot v_{EV} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{D0} & b_{D0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{pmatrix}}^{A_{ges}} \cdot \overbrace{\begin{pmatrix} y_{0,k} \\ \theta_{\Delta,k} \\ \kappa_{EV,k} \\ \delta_{ist,k} \\ \delta_{LM,k} \end{pmatrix}}^{b_{ges}} + \delta_{STWA_soll} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_5 \end{pmatrix}$$

$$a_{13} = T \cdot v_{EV} \cdot \frac{(m_{EV} v_{EV}^2 + c_v l_v - c_h l_h)}{(c_v + c_h)}$$

$$a_{14} = -T \cdot v_{EV} \frac{c_v}{(c_v + c_h)}$$

$$a_{44} = 1 - \frac{T}{T_{tot}}, a_{45} = \frac{T}{T_{tot}}$$

$$a_{55} = 1 - \frac{T}{T_{PT1}}, b_5 = \frac{T}{T_{PT1}} \cdot \frac{1}{I_{EV}}$$

(F 6.5)

Hierbei entspricht T_{PT1} der Verzögerungszeit des PT_1 -Gliedes im Lenkmodell. Als Hilfs-Zustand zwischen den beiden PT_1 -Gliedern des Lenkmodells wurde δ_{LM} hinzugefügt. a_{D0} und b_{D0} entsprechen den diskreten Systemmatrizen des Einspurmodells aus (F 5.56).

Der Regelvektor r aus (F 6.1) und (F 6.2) bei Annahme einer konstanten Lenkübersetzung ergibt sich zu

$$\underline{r} = r_K \cdot (r_1 \quad r_2 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

$$r_K = I_{EV} \cdot \left((l_v + l_h) + m_{EV} v_{EV}^2 \cdot \frac{\left(\frac{l_h}{c_v} - \frac{l_v}{c_h} \right)}{l_v + l_h} \right) \quad (\text{F } 6.6)$$

$$r_1 = -P_{prev}$$

$$r_2 = -v_{EV} \cdot t_{prev} \cdot P_{prev}$$

Für die Reglerparameter haben sich folgende Werte als guter Kompromiss zwischen Reglerstabilität und Reglerperformance im Realfahrzeug erwiesen:

$$P_{prev} = 0.006 \text{ } \text{lm}^{-2}$$

$$t_{prev} = 3 \text{ s.} \quad (\text{F } 6.7)$$

Für die Bewertung der Reglerstabilität werden im Folgenden die Nullstellen des charakteristischen Polynoms des Gesamtsystems betrachtet und für verschiedene Geschwindigkeiten in der z-Ebene aufgetragen (Bild 6.4).

$$\det[z\mathbf{I} - (\mathbf{A}_{ges} - \underline{b}_{ges} \cdot r)] \quad (\text{F } 6.8)$$

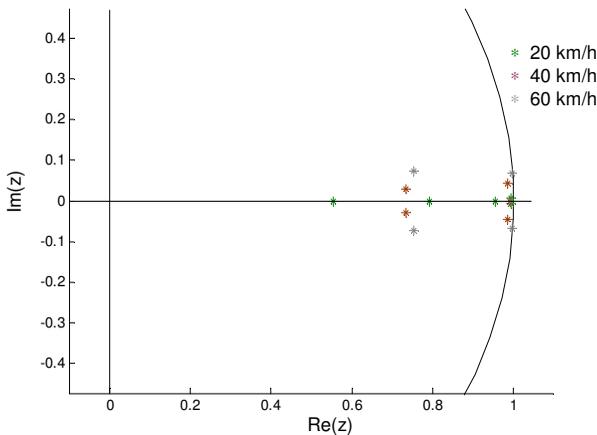


Bild 6.4: Nullstellen des charakteristischen Polynoms bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Alle Polstellen des charakteristischen Polynoms sind innerhalb des Einheitskreises der z-Ebene, was nach [78] Voraussetzung für ein stabiles Regelungssystem ist. Eine Bewertung des Querregelungsverhaltens im Realfahrzeug findet in Kapitel 9 statt.

6.2 Die Längsregelung

Der Regelalgorithmus für die Längsführung hat die Aufgabe, die in Abschnitt 3.4 definierten Längsführungsanforderungen in Motor- und Bremsmoment für den Fahrer komfortabel umzusetzen, um einen sicheren zeitlichen Abstand zum Vorderfahrzeug einzuregeln. Ist kein Vorderfahrzeug vorhanden oder wird die vom Fahrer gesetzte Geschwindigkeit vom Vorderfahrzeug überschritten, soll die gesetzte Geschwindigkeit eingeregelt werden. Die Struktur der Längsregelung ist in Bild 6.5 dargestellt.

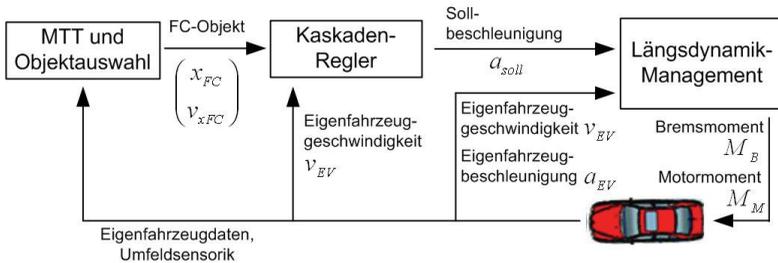


Bild 6.5: Struktur der Längsregelung

Die Objektauswahl (Abschnitt 5.3.3) liefert die relevanten Daten des aktuellen *FC*-Objekts, auf dem die Längsregelung basieren soll. Dies entspricht im Normalfall auch dem *FC*-Objekt, das für die Querverregelung berücksichtigt wird. Bei einem erkannten Einschervorgang durch die Spurwechselerkennung (Abschnitt 5.5) kann jedoch das seitlich einscherende Objekt frühzeitig als Führungsfahrzeug für die Längsregelung benutzt werden, noch bevor es durch die Objektauswahl als *FC*-Objekt gesetzt wird. Hierdurch erfolgt eine frühzeitige Reaktion der Längsregelung auf ein einscheresendes Fahrzeug.

Der Kaskadenregler

Die Aufgabe des in [12] entwickelten Kaskadenreglers für den Niedergeschwindigkeitsbereich ist, anhand der aus dem Tracking zur Verfügung stehenden Daten über das *FC*-Objekt (longitudinaler Abstand zum Eigenfahrzeug x_{FC} und Absolutgeschwindigkeit $v_{x,FC}$) den vom Fahrer wählbaren Sekundenabstand t_a einzuregeln.

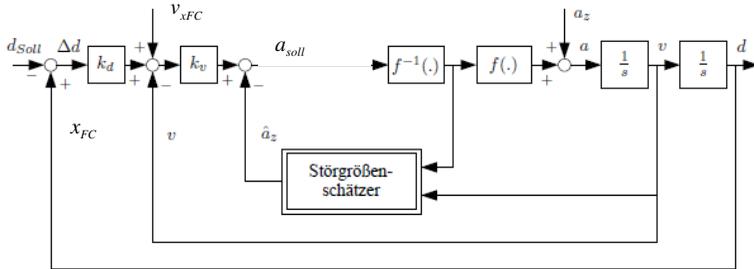


Bild 6.6: Grundstruktur des Kaskadenreglers mit Störgrößenschätzung aus [12]

Der Sollabstand d_{soll} errechnet sich aus dem Sekundenabstand und einem Sicherheitsabstand d_0 über

$$d_{soll} = v_{EV} \cdot t_a + d_0. \quad (\text{F } 6.9)$$

d_0 berücksichtigt Verzögerungen in der Sensorik und im Tracking und verhindert ein Auffahren auf das Vorderfahrzeug bei dessen Stillstand. Zur Berechnung des Sollabstandes wird die Eigenfahrzeuggeschwindigkeit verwendet.

Wie aus der Reglerstruktur in Bild 6.6 erkennbar, errechnet sich die Sollbeschleunigung zu

$$a_{soll} = k_v (v_{xFC} + k_d (d_{ist} - d_{soll}) - v_{EV}) - \hat{a}_z. \quad (\text{F } 6.10)$$

Die äußere Regelkaskade gewichtet über k_d die Differenz zwischen Soll- und Istabstand zum Vorderfahrzeug. Die daraus entstehende Geschwindigkeit wird der Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs zur zweiten Führungsgröße addiert. Die Differenz zur Eigenfahrzeuggeschwindigkeit wird mit k_v für die Sollbeschleunigung gewichtet. a_z entspricht der Beschleunigungsstörung, die über den Störgrößenschätzer zu \hat{a}_z geschätzt und für die Sollbeschleunigungsberechnung berücksichtigt wird. Die Störgröße berücksichtigt Störungen von außen, die bei der Modellierung nicht berücksichtigt wurden, wie z. B. Steigungen im Straßenverlauf, Einflüsse durch Wind oder unterschiedliche Fahrzeugbelastung.

Das Längsdynamik-Management

Das Längsdynamik-Management setzt die aus dem Kaskadenregler errechnete Sollbeschleunigung bedarfsgerecht in ein Motor- oder Bremsmoment um. Diese können über die in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Momentenschnittstellen des Versuchsträgers in der entsprechenden Aktorik umgesetzt werden. Hierfür muss der Antriebsstrang modelliert werden. Auf eine detaillierte Beschreibung des Antriebsstrangs, wie es in [79] erarbeitet wurde, soll hier verzichtet werden. Primäres Ziel ist eine robuste Reglerauslegung, die auch bei Parameterungenauigkeiten eine ausreichende Reglerperformance bietet. Aus diesem Grund wird das vereinfachte Antriebsstrangmodell nach [12], wie es in Bild 6.7 dargestellt ist, invertiert. Es berücksichtigt vereinfachte Annahmen für den Automatik-Wandler, der Getriebeübersetzung, des Differenzials und des

Reifenrollradius. Wird dieses Modell invertiert, kann ein direkter Zusammenhang zwischen Sollbeschleunigung und Motormoment hergestellt werden. Dem Luftwiderstand bei höheren Geschwindigkeiten kann durch einen zusätzlichen, cw-Wert abhängigen Sollbeschleunigungs-Offset entgegengewirkt werden.

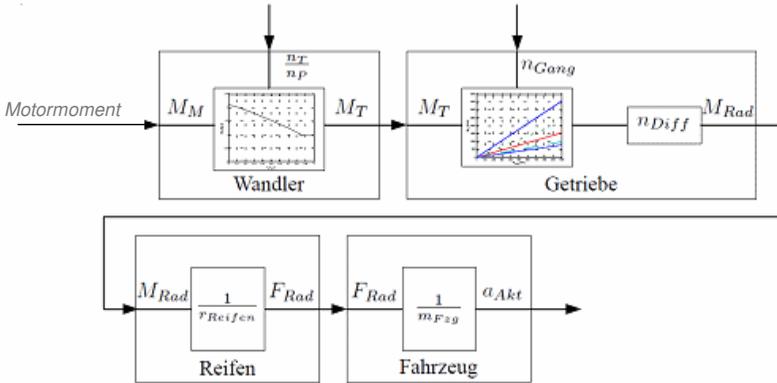


Bild 6.7: Vereinfachtes Antriebsstrangmodell nach [12]

Das im Fahrzeug verbaute Bremssystem erlaubt eine sehr schnelle Umsetzung der erforderlichen Bremsmomente. Aus diesem Grund können hier Totzeiten und Trägheiten vernachlässigt werden. Der Bremsmomentenschnittstelle wird somit ein Bremsmoment vorgegeben, das proportional zu der gewünschten Sollverzögerung ist. Insbesondere ist bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten ($v_{EV} < 6$ km/h) die Überlagerung des antreibenden Motormomentes, das seine Ursache in der Aktivierung des Leerlaufreglers hat, zu berücksichtigen. Hier wird ein geschwindigkeitsabhängiger Bremsmomentenanteil vorgesteuert. Bei Fahrzeugstillstand wird zusätzlich ein Bremsmoment addiert, um den Stillstand sicherzustellen.

Nun stehen für die Fahrsimulation und für das Realfahrzeug, die in den nun folgenden Kapiteln beschrieben werden, das regelungstechnische Werkzeug in der Längs- und Querverführung zur Verfügung. In Verbindung mit der Situationsinterpretation aus Kapitel 5 kann nun der funktionale Teil des Stauassistenten-System realisiert werden.

7 Das HMI des Stauassistenten-Systems

In diesem Kapitel werden aus den Anforderungen an ein Stauassistenten-System in Kapitel 3 und den in Kapitel 5 und 6 beschriebenen situationsbeobachtungs- und regelungstechnischen Grenzen des Stauassistenten-Systems ein Anzeige- und Bedienkonzept (HMI) spezifiziert und definiert. Dieses kann dann in Kapitel 8 zusammen mit dem funktionalen Systemanteil hinsichtlich Fahrerakzeptanz bewertet werden.

7.1 Anforderung an das HMI

Gegenüber einem reinen Längsführungssystem (ACC Stop&Go) steigen die Anforderungen an das HMI bei zusätzlicher Querführungsunterstützung. Diese stellt einen neuen Betriebszustand (Mode) dar, der allerdings nur in bestimmten Situationen (Stau, stockender Verkehr) zur Verfügung stehen soll. Er setzt, um verfügbar zu sein, verschiedene Bedingungen, wie z. B. $v_{EV} < 40$ km/h voraus. Die vom Fahrer zu lernenden logischen Verknüpfungen müssen im Sinne einer einfachen Bedienung so gering wie möglich gehalten werden, um eine so genannte „Mode Confusion“ [80] zu vermeiden. Diese Fehleinschätzung und Verwirrung bezüglich des Zustands eines aktuell aktivierten Systems wird vom RESPONSE 3 Code of Practice berücksichtigt – hier ist die wichtigste und grundlegendste Anforderung die Beherrschbarkeit durch den Fahrer („Controllability“) [33]. Durch ein schlüssiges HMI-Konzept sollen auch die in [81] festgestellten Verständnisprobleme in der Bedienung des Invent-Stauassistenten vermieden werden.

Im Rahmen der Fahrimulator-Untersuchungen, auf die in Kapitel 8 genauer eingegangen wird, wurde ein HMI für das Stauassistenten-System entwickelt, das die hier geforderte Beherrschbarkeit der zusätzlichen Querführungs-Funktionalität sicherstellen soll. Im Rahmen einer Voruntersuchung wurden hierfür zwei HMI-Varianten miteinander verglichen und bewertet [75]. Das aus dieser Voruntersuchung optimierte Anzeige- und Bedienkonzept, aufgeteilt in Längs- und Querführungsanteil, wird im Folgenden dargestellt.

7.2 Das Längsführungs-HMI

Die Bedienung der Längsführung erfolgt entsprechend dem Seriensystem ACC Stop&Go über einen Lenkstockhebel, der folgende Bedienmöglichkeiten vorsieht:

- System aktivieren und Geschwindigkeit setzen (SET)
- gesetzte Wunschgeschwindigkeit erhöhen oder verringern ($v_{Wunsch} \hat{u}$ / $v_{Wunsch} \hat{d}$)
- Wunschabstand zum Vorderfahrzeug in 4 möglichen Stufen einstellen
- System deaktivieren und in den StandBy-Zustand versetzen (OFF)
- System nach dem Deaktivieren (durch Off oder manuellen Bremsengriff) wieder mit alter Wunschgeschwindigkeit einschalten (RESUME)

Wenn das Fahrzeug mit ACC selbständig hinter einem anhaltenden Vorderfahrzeug hält, fährt es innerhalb einer bestimmten Zeit t_{stand} wieder selbständig an, sobald das Vorderfahrzeug anfährt. Nach Überschreitung der Zeit muss der Fahrer das Anfahren manuell durch Betätigung der Resume-Taste oder Antippen des Gaspedals anstoßen. Hier wurde diese minimale Standzeit zu

$$t_{stand} = 3 \text{ s} \quad (\text{F 7.1})$$

gewählt. Die Aufforderung zu diesem Go-Request bekommt der Fahrer rein visuell im Kombi. Kommt der Fahrer dieser Aufforderung nicht nach, geht die Längsführung nach einer festgesetzten Zeit in den StandBy-Zustand über.

7.3 Das Querführungs-HMI

Das ACC muss beim Einschalten der Querführung bereits aktiviert sein, eine Nutzung ohne ACC ist nicht vorgesehen. Weitere Anschlagbedingungen sind

- Geschwindigkeit unter 40 km/h
- (gültiges) Vorderfahrzeug-Objekt vorhanden
- Fahrzeug befindet sich nicht in einer engen Kurve ($|\kappa_T| < \kappa_{\max}$)

Aktiviert der Fahrer die Querführung mittels der Querführungstaste, wird ihm dieser aktive Zustand einerseits mit entsprechenden Kammerleuchten im Kombi als auch mit Hilfe eines grünen Leuchtrings am Lenkrad kommuniziert (Bild 7.1).



Bild 7.1: Querführungstaste (1) und Lenkstockhebel (2), Anzeigen bei aktiver Querführung

Gegenüber den eher konventionellen Kammerleuchten hat der Leuchtring am Lenkrad den Vorteil, dass er deutlich besser sichtbar ist und Änderungen des Systemzustands über den Leuchtring auch peripher wahrgenommen werden können. Die Integration des Leuchtrings im Querführungs-Bedienelement, dem Lenkrad, trägt außerdem zum Verständnis des Systems bei.

Im Falle einer Aktivierung über der Systemgrenze von 40 km/h wird die Querführung in den StandBy-Modus versetzt (nicht aktiv regelnd). Dieser Modus wird nur im Kombi, jedoch nicht mit Leuchtringen angezeigt. Sinkt die Geschwindigkeit anschließend unter 40 km/h, wird die Querführung automatisch aktiv geschaltet. Auf diese Weise ist der Fahrer nicht gezwungen, die Vorbedingungen des Systems zu kennen – er kann die Aktivierung jederzeit vornehmen.

Für den Fall einer fehlenden Einschaltvoraussetzung unter 40 km/h wird der Aktivierungsversuch allerdings mit einer Fehlermeldung quittiert.

Während der aktiven Querführung kann der Fahrer die Hände am Lenkrad lassen (um z.B. die Regeltätigkeit haptisch zu überwachen), muss es aber nicht. Aufgrund der Zwangskopplung an das ACC wird die Querführung (temporär) mit abgeschaltet, sobald der Fahrer die Bremse betätigt. Einzige Ausnahme ist das automatische Warten hinter einem Fahrzeug, das bis zum Stillstand gebremst hat, analog zur Serienauslegung des ACC Stop&Go, das bei Betätigung der Bremse im Stand nicht

in den StandBy-Zustand schaltet. Der letzte Einschaltzustand der Querführung wird bei Wiederaufnahme des ACC (RESUME) wieder hergestellt, um dem Fahrer das Wiedereinschalten der Querführung zu ersparen. Detaillierte Informationen über das HMI des Stauassistenten-Systems sind in [93] zu finden.

Für den Fahrer ist es jederzeit möglich, das maximale Lenkmoment von 3,5 Nm zu übersteuern. Um diese Übersteuerung zu detektieren, wird das Torsionsmoment an der Lenkstange gemessen. Übersteigt diese einen gewissen Wert, wird angenommen, dass der Fahrer die aktive Querregelung übersteuern möchte. Geschieht dies, schaltet sich die Querführung ganz ab und muss neu aktiviert werden.

7.4 Warnstrategie bei Überschreitung der Systemgrenzen

7.4.1 Systemgrenzen der Längsführung

Kann eine Situation durch die Längsführung nicht aufgelöst werden, da die maximale Verzögerung, die vom Längsführungssystem zur Verfügung gestellt werden kann (Abschnitt 3.2.2), nicht ausreicht, erfolgt eine akustische und visuelle Übernahmeaufforderung, wie sie im Seriensystem ACC Stop&Go umgesetzt wurde. Dies kann beispielsweise bei einer Vollbremsung des Vorderfahrzeugs oder bei einem knappen Einscherer vor dem Eigenfahrzeug geschehen. Um das Stauassistenten-System nicht bei schlechten Straßenverhältnissen zur Verfügung zu stellen (Abschnitt 3.1.4), soll die Längs- und Querführung bei Ansprechen der Sicherheitssysteme ABS (Anti-Blockier-System) oder DSC (Dynamische Stabilitäts Control) mit entsprechender akustischer und visueller Übernahmeaufforderung abgeschaltet werden. Es wird davon ausgegangen, dass bei den niedrig angesetzten Beschleunigungsgrenzen erst bei extrem schlechten Straßenverhältnissen und somit niedrigen Reibwerten eines der benannten Sicherheitssysteme anspricht.

7.4.2 Systemgrenzen der Querführung

Eine Systemgrenze der Querführung, die sehr häufig über- und unterschritten wird, ist die Grenzgesewindigkeit von 40 km/h. Löst sich beispielsweise der Stau auf und das Fahrzeug beschleunigt bei aktiviertem System bis an die Systemgrenze, hängt das weitere Systemverhalten vom Fahrer ab. Hat er die Hände bereits am Lenkrad, wird die Systemgrenze unter Ausblendung des Lenkmoments einfach überschritten und das Fahrzeug beschleunigt (max. bis zur aktuellen ACC-Setzgeschwindigkeit). Eine Bestätigung des Fahrers ist nicht erforderlich – das abnehmende Lenkmoment oberhalb von 40 km/h und der abgeschaltete Leuchtring zeigen ihm das Abschalten der Querregelung haptisch und visuell an.

Hat der Fahrer die Hände bei 40 km/h nicht am Lenkrad, endet die Beschleunigung und es wird eine niedrig priorisierte Übernahmeaufforderung ausgegeben. Diese fordert den Fahrer dezent zum Übernehmen des Lenkrads auf, allerdings nur optisch mit Hilfe des blinkenden grünen Leuchtrings und der Kammerleuchte. Sobald der Fahrer zum Lenkrad greift, setzt ACC die Beschleunigung mit ausrampendem Lenkmoment fort.

Da diese niedrig priorisierte Übernahmeaufforderung keine Warnung im eigentlichen Sinne darstellt, kann sie der Fahrer auch ignorieren, z.B. weil er antizipiert, dass der Verkehr in den nächsten Sekunden wieder unter 40 km/h fallen wird. Auf diese Weise sind typische Stauwellen, in denen der Verkehr zwischen Stop&Go-Strecken und Phasen um 40 km/h schwankt, ohne zusätzliche Bedienung fahrbar. Auch die Situation *Scheinbare Stauauflösung* ist ohne zusätzlichen An- und Abschaltaufwand der Querführung für den Fahrer zu lösen.

Das Halten der Geschwindigkeit bei 40 km/h wird ohne Warnausgabe solange fortgesetzt, bis die Funktion nicht mehr aufrechterhalten werden kann, beispielsweise bei einem Verlust des Vorderfahrzeug-Objekts. In diesem Fall wird eine massivere Warnung als Handlungsaufforderung ausgegeben, gekennzeichnet durch einen rot blinkenden Leuchtring, einen Warnton sowie ein Warnsymbol im Kombi. Dieselbe hoch priorisierte Übernahmeaufforderung wird dann ausgegeben, wenn die aktive Querführung aufgrund eines Fehlers oder bei Überschreiten einer Systemgrenze nicht mehr aufrecht erhalten werden kann. Dies geschieht bei folgenden Systemgrenzen der Querführung, die auf den Systemanforderungen aus Abschnitt 3.4 und situationsbeobachtungs- und regelungstechnischen Grenzen des Stauassistenten-Systems (Kapitel 5) basieren:

- Verlust des gültigen Vorderfahrzeug-Objekts
- Überschreiten der maximalen Krümmung ($|\kappa_T| > \kappa_{\max}$) und der maximalen Krümmungsänderung $|\kappa'_T| > \kappa'_{\max}$
- Differieren von Fahrspurlinien und Gassendaten im Verifikations-Block (F 5.112) in Abschnitt 5.6
- Unterschreiten des minimalen seitlichen Abstandes der Gassenbegrenzung ($b_{L/R} < b_{TOR}$), wobei aus den Anforderungen aus Abschnitt 3.4 gilt:

$$b_{TOR} = 0,75m + 0,5 \cdot w_{EV}$$
- Systemgrenze aus Abschnitt 5.4.4.2: ein sich schnell näherndes seitliches Objekt, bei dem gilt $b_{\text{sec_min}} > b_{\text{sec}}$

Der für die hoch priorisierte Übernahmeaufforderung genutzte Warnton weicht von demjenigen der Längsführung ab, um den Fahrer die Möglichkeit der Unterscheidung zu geben.

Sobald der Fahrer nach dieser akuten Warnung die Hände ans Lenkrad legt, schaltet sich die Querführung ab und muss wieder aktiviert werden. Wird jedoch auch diese kritische Übernahme-Aufforderung ignoriert, geht das System selbstständig in einen FailSafe-Modus über und bremst das Fahrzeug moderat in den Stillstand.

Die Unterscheidung zwischen dezenter Handlungsaufforderung an der Grenze von 40 km/h und akuter Warnung (kritische Übernahmeaufforderung bei Systemausfall) ist nötig, damit der Fahrer die Dringlichkeit erkennt und nur so stark wie nötig gewarnt wird.

Der Vorteil des hier gewählten Interaktionskonzepts bei Über- und Unterschreitung der Systemgrenze 40 km/h liegt darin, dass der Fahrer bei dieser Schwelle nur eine intuitive Interaktion durchführen muss: Die Hände ans Lenkrad legen und die Lenkung übernehmen. Es ist nicht nötig, den Übergang in den nicht-regelnden Zustand durch Drücken einer Taste zu bestätigen, wie es in [81] umgesetzt wurde.

8 Das Stauassistentz-System in der Fahr-simulation

Grundsätzlich wurde der Wunsch des Fahrers nach einem hohen Unterstützungsgrad in Stausituationen mehrfach durch Untersuchungen bestätigt, beispielsweise im Rahmen des INVENT-Projektes *STA* [23]. Es treten jedoch bei der Realisierung dieses hoch automatisierten Assistenzsystems einige grundsätzliche Fragen in Verbindung mit der hier dargestellte Systemausprägung auf.

- Wird durch die zusätzliche Übernahme der Querführung ein Mehrwert gegenüber einem reinen ACC Stop&Go geschaffen?
- Ist die Kundenwertigkeit auch bei einem aus Fahrersicht nicht perfekten System mit Systemgrenzen und Systemfehlern vorhanden?
- Kann der Fahrer trotz der vorrangig überwachenden Tätigkeit die Übernahme der Quer- und Längsführung in kritischen Situationen meistern (Out-of-the-Loop Performance Problem [82])?

Diese Fragen wurden im Rahmen einer Untersuchung, die unter Mitwirkung des Interdisziplinären Zentrums für Verkehrswissenschaften Würzburg (IZVW) im Dynamischen Simulator der BMW Group (Bild 8.1, [83,84]) stattfanden, adressiert.



Bild 8.1: Dynamischer Simulator der BMW Group

Die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebene funktionale Ausprägung des Stauassistentz-Systems wird zu diesem Zweck im Fahr-simulator in eine Umgebung, in der auch die Systemgrenzen erlebt werden können, implementiert. Anstelle der Real-Sensorik verwendet man Sensormodelle, die die Sensorkonfiguration im Realfahrzeug bezüglich Reichweite, Überdeckung und Öffnungswinkeln simulieren, jedoch keine Sensorfehler berücksichtigen.

8.1 Die Akzeptanz-Untersuchung im Fahrsimulator

8.1.1 Die Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde mit $N = 32$ Probanden durchgeführt, davon 7 Frauen. Die Probanden waren zwischen 24 und 61 Jahre alt ($m = 40$, $sd = 12.2$). 72 % der Fahrer gaben an, mehrfach im Monat, 47% sogar mehrfach pro Woche im Stau zu stehen.

Zu Beginn des Versuches wurde den Probanden das System in einer Vorbereitungsfahrt erklärt und die Bedienung geübt. Die eigentliche Versuchsstrecke bestand aus Stauabschnitten auf der Autobahn sowie auf der Landstraße. Es wurde eine ca. 45minütige Strecke einmal mit ACC Stop&Go und einmal mit dem um die Querführung erweiterten System durchfahren. Durch den direkten Vergleich mit ACC Stop&Go kann der zusätzliche Nutzen der Querführungsfunktion direkt erfasst werden.

Während der Versuchsdurchführung wurden die Fahrer instruiert, das jeweilige Assistenzsystem so häufig wie möglich zu nutzen. Des Weiteren sollte, wenn es die Verkehrssituation zulässt, eine Trackingaufgabe [94] mit Punktezahl auf einem Laptop am Beifahrersitz durchgeführt werden. Diese soll eine Beschäftigung mit Nebentätigkeiten simulieren und zum Zeitpunkt von kritischen Situationen eine gezielte Ablenkung erzielen.

Das in Bild 8.2 dargestellte Geschwindigkeitsprofil der Staufahrt wurde an einen Realstau (Profil des Kölner Ringstaus aus INVENT [23]) angelehnt. Im Simulatorszenario wurde dieses Geschwindigkeitsprofil denjenigen Fahrzeugen zugewiesen, die den Stau erzeugen. Für das Eigenfahrzeug ist ein ähnliches Geschwindigkeitsprofil zu erwarten, da dieses den stauerzeugenden Fahrzeugen direkt folgt.

Um das Szenario realistisch zu gestalten und um die Reaktion der Probanden auf Übernahmeaufforderungen zu testen, wurden Systemgrenzen und Systemfehler im Szenario gezielt dargestellt. Die Häufigkeit dieser Übernahmeaufforderung war so gewählt, wie sie in einem realen System zu erwarten wären. Die kritischen Situationen, die zu den hoch priorisierten Übernahmeaufforderungen führen, treten jeweils nach einem längeren Zeitraum des Systemnutzens (mindestens 5 Minuten) auf, um ein gewisses Systemvertrauen aus Sicht des Fahrers zu erreichen. Bild 8.2 zeigt in Verbindung mit Tabelle 8.1 die zeitliche Abfolge der kritischen Situationen, auf die im folgenden Abschnitt genauer eingegangen wird.

8.1.2 Die kritischen Situationen

Im Folgenden werden die kritischen Situationen aufgeführt, die in Verbindung mit der in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen funktionalen Ausprägung des Stauassistenten-Systems zu Übernahmeaufforderungen führen. Zudem wird eine weitere Situation beschrieben, bei der sich der Vorteil der Gassenbeobachtung gegenüber einer rein auf Fahrspurmarkierungen basierenden Systemausprägung zeigt. Bei der Ausführung der Situationen wird auf die jeweilige Systemreaktion eingegangen.

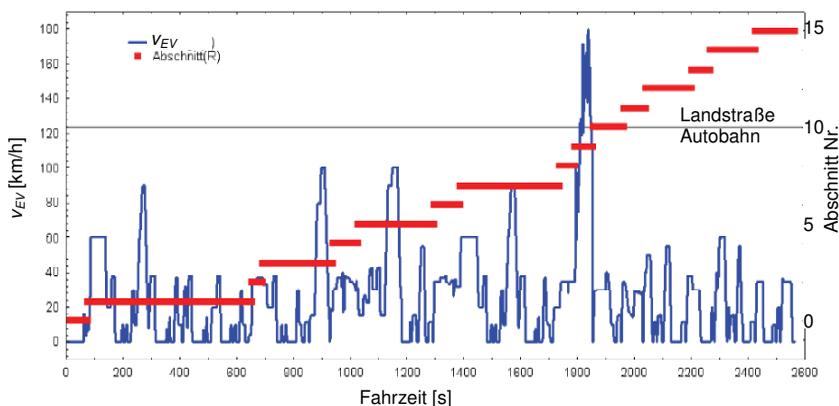


Bild 8.2: Geschwindigkeitsprofil des Simulator-Versuchs und Aufteilung in Streckenabschnitte

Abschnitt	Name	Kategorie
0	Autobahneinfahrt	Start
1	Stop&Go	Stauabschnitt
2	Seitliches Fahrzeug zu nahe	Krit. Situation
3	Autobahn Stau 1	Stauabschnitt
4	Drängler (knapper Einscherer)	Krit. Situation
5	Autobahn Stau 2	Stauabschnitt
6	Kritischer Ausscherer	Krit. Situation
7	Autobahn Stau 3	Stauabschnitt
8	Fahrspurm. vs. Bewegung umliegender Fzge.	Krit. Situation
9	Autobahn Ende	Freie Fahrt
10	Ausfahrt Autobahn	Freifahrt
11	Eins. gesperrte Fahrbahn auf der Landstraße	Krit. Situation
12	Landstraße Stau 1	Stauabschnitt
13	Stark gekrümmte Kurve	Krit. Situation
14	Landstraße Stau 2	Stauabschnitt
15	Landstraße Ende	Freie Fahrt

Tabelle 8.1: Streckenabschnitte des Simulator-Versuchs

Geschwindigkeitsschwelle von 40 km/h

Diese Systemgrenze tritt in dem in Bild 8.2 dargestellten realistischen Geschwindigkeitsprofil häufig auf, wenn der gesamte Stau und somit auch das längsgeregelt Eigenfahrzeug diese Schwelle über- oder unterschreitet.

Da die Fahrer instruiert wurden, das Stauassistenten-System so häufig wie möglich zu nutzen, konnte davon ausgegangen werden, dass bei Unterschreiten der 40 km/h - Grenze die Längsführung aktiv war und die Querführung im StandBy. Das Unterschreiten der Geschwindigkeitsschwelle aus dem Querführungs-StandBy erfordert an sich keine Fahrerreaktion. Die Querführung wird automatisch aktiviert und der Fahrer bekommt über die Anzeige im Kombi und dem Ring im Lenkrad die Information, dass er die Hände vom Lenkrad nehmen kann (Bild 7.1).

Die Systemreaktion bei Überschreitung der Systemgrenze ist, wie in Abschnitt 7.4.2 erwähnt, abhängig davon, ob der Fahrer in dem Augenblick die Hände am Lenkrad hat. Ist dies der Fall, erfordert diese Situation keine Interaktion des Fahrers. Das Lenkmoment wird über eine Rampenfunktion abgeschaltet und die Querführung geht über in den StandBy-Zustand. Auf die Längsführung hat diese Situation keinen Einfluss, das Fahrzeug beschleunigt auf die Zielgeschwindigkeit über 40 km/h. Hat der Fahrer bei Überschreitung der Quergeschwindigkeitsgrenze die Hände nicht am Lenkrad, bekommt er über den Leuchtring und dem Lenkradsymbol im Kombi, die nun blinken, die dezente Handlungsaufforderung, die Hände ans Lenkrad zu legen und die Querführung zu übernehmen. Während dieser Übernahmeaufforderung beschleunigt das Fahrzeug nicht über 40 km/h. Sobald der Fahrer die Übernahmeaufforderung angenommen hat und die Hände ans Lenkrad legt, geht die Querführung in den StandBy-Modus über und das Fahrzeug beschleunigt auf die Zielgeschwindigkeit.

Go-Request

Im Versuchsszenario wird häufig die gewählte minimale Stillstandsphase aus (F 7.1), ab der ein Go-Request erzeugt wird und das Anfahren bestätigt werden muss, überschritten. Reagiert der Fahrer darauf nicht, beispielsweise weil er sich zu stark mit der Nebenaufgabe beschäftigt, geht die Längsführung in den StandBy-Zustand über und muss neu aktiviert werden.

Drängler (knapper Einscherer)

Ein Fahrzeug schert knapp vor dem Eigenfahrzeug ein und bremst, es erfolgt eine Übernahmeaufforderung der Längsführung, da die maximale Verzögerung der Längsführung nicht ausreicht, um die Situation zu entschärfen (Bild 8.3 A). Hier können die Reaktionszeiten der unterschiedlichen Assistenzgrade (ACC Stop&Go und Stauassistenten-System) direkt verglichen werden, da diese Übernahmeaufforderung in beiden Staufahrten auftritt. Dadurch kann eine Aussage über die sich eventuell verändernde Fahreraufmerksamkeit durch die zusätzliche Querführung getroffen werden.

Seitliches Fahrzeug zu nahe

Das seitliche Fahrzeug weicht einem in seine Fahrbahn ragenden stehenden Fahrzeug aus und kommt dabei dem Eigenfahrzeug sehr nahe (Bild 8.3 B). Dies wird durch die (modellierete) Seitenbereichs-Sensorik detektiert. Erst wird der in (F 5.88) eingeführte Schwellwert b_{avoid} unterschritten, dann b_{TOR} . Dies führt zu der in Abschnitt 5.4.4.2 beschriebenen Ausweichbewegung bis hin zur Übernahmeaufforderung der Querführung an den Fahrer.

Kritischer Ausscherer

In einem Streckenabschnitt ohne Spurmarkierung, in dem sich die Querführung an den umliegenden Objekten orientiert, wechselt das Vorderfahrzeug langsam die Spur. Dieser Spurwechselvorgang wird anhand der Bayes'schen Netze aus Abschnitt 5.5.3 nicht erkannt, weil der Schwellwert für die Spurwechselwahrscheinlichkeit nicht überschritten wird. Die Querführung folgt dem Vorderfahrzeug wegen dessen starker Gewichtung bei der Gassenbeobachtung. Durch diesen Systemfehler bewegt sich das Eigenfahrzeug auf das silberne Fahrzeug auf der linken Fahrspur zu (Bild 8.4 A). Wenn das Seitenfahrzeug zu nahe ist (Unterschreitung von b_{TOR}), erfolgt zwar eine hoch priorisierte Übernahmeaufforderung, jedoch würde ein zu spätes Eingreifen des Fahrers zu einem von seinem Fahrzeug verursachten Unfall führen. Deshalb stellt diese Situation einen kritischen Systemfehler der Querführungsfunktion dar.

Stark gekrümmte Kurve

Im vorstädtischen Bereich auf der Landstraße passiert das Eigenfahrzeug eine Kurve, deren Krümmung die maximale Krümmung (F 3.3) überschreitet (Bild 8.4 B). Es wird eine hoch priorisierte Übernahmeaufforderung in der Querführung generiert, da die querdynamische Systemgrenze überschritten wird. Das zusätzliche Lenkmoment wird über eine Rampenfunktion zurückgenommen, um ein schnelles Zurückstellen des Lenkrads durch die Rückstellkräfte zu vermeiden.

Fahrbahnmarkierungen vs. Bewegung umliegender Fahrzeuge

An einem Streckenabschnitt auf der Autobahn ist erst die linke Fahrspur, dann die rechte Fahrspur gesperrt (Bild 8.5 A). Zwischen diesen Streckensperrungen wechseln alle Fahrzeuge auf die aus ihrer Sicht linke Fahrspur. Da Fahrspurmarkierungen vorhanden sind und von der modellierten Fahrspurerkennung erfasst werden können, tritt eine Diskrepanz zwischen den Fahrspurlinien und der Bewegung der umliegenden Objekte auf. Wie in Abschnitt 7.4.2 beschrieben, führt diese Situation zu einer hoch priorisierten Übernahmeaufforderung quer.

Einseitig gesperrte Fahrbahn auf der Landstraße

Auf der Landstraße ist ein Streckenabschnitt realisiert, auf dem die rechte Fahrspur wegen einer Baustelle gesperrt ist (Bild 8.5 B). Dies entspricht der in Bild 2.4 dargestellten Situation aus der Situationsklassifikation in Abschnitt 2.2.2. Fahrspurlinien sind nicht vorhanden, Verkehr und Gegenverkehr müssen sich eine Fahrspur teilen. Die Vorfahrtsregelung erfolgt mittels einer Baustellenampel.

Da keine Fahrspurlinien und Seitenfahrzeuge detektiert werden können, orientiert sich die Querführung einzig am Vorderfahrzeug. Das Eigenfahrzeug folgt dem Vorderfahrzeug beim Wechsel auf die freie Fahrspur und durch die Baustelle. Diese Situation führt zu keiner Übernahmeaufforderung, es kann aber das Systemvertrauen der Probanden beim Durchfahren dieser komplexen Fahrsituation mit der Querführung betrachtet werden.

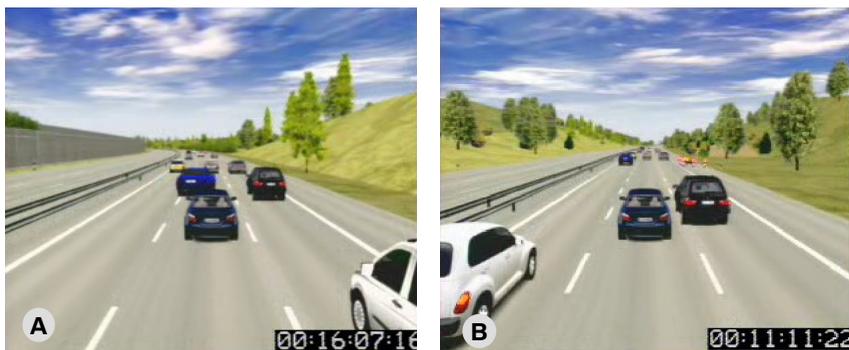


Bild 8.3: Situationen *Drängler* (A) und *Seitliches Fahrzeug zu nahe* (B), Perspektivische Ansicht, Eigenfahrzeug ist das dunkelblaue Fahrzeug auf der mittleren Spur



Bild 8.4: Situationen *kritischer Ausscherer* (A), *stark gekrümmte Kurve* (B)

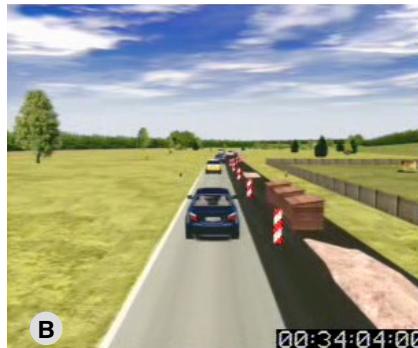


Bild 8.5: Situationen *Fahrspurmarkierungen vs. Bewegung umliegender Fahrzeuge* (A) und *einseitig gesperrte Fahrbahn* (B)

8.1.3 Bewertung des Kundennutzens durch die Probanden

Im Anschluss an beide Systemfahrten wurden die Fahrer gefragt, ob sie anstelle eines ACC Stop&Go lieber das erweiterte System mit zusätzlicher Querföhrungsfunktion in ihrem Fahrzeug hätten. 81 % der Fahrer beantworten diese Frage mit „Ja“. Nur 19 % möchten die Querföhrungsfunktion nicht. Die weiteren Ergebnisse der Fragebögen können folgendermaßen zusammengefasst werden.

- Die Fahrt mit Stauassistenz-System ist weniger anstrengend ($F(1,31) = 9.05, p = 0.005$).
- Bei der Fahrt mit Stauassistenz-System föhlen sich die Fahrer sicherer ($F(1,31) = 4.39, p = 0.044$).
- Mit dem Stauassistenz-System beschäftigen sich die Fahrer stärker mit Nebentätigkeiten ($F(1,31) = 15.96, p = 0.000$).

- Mit dem Stauassistenten-System fühlen sich die Fahrer bei Nebentätigkeiten sicherer ($F(1,31) = 7.14$, $p = 0.012$).

Die Probanden wurden außerdem nach dem größten Nutzen der Querführungsfunktion bzw. nach der größten von ihr ausgehenden Gefahr befragt. Die Ergebnisse hierzu sind in Tabelle 8.1 dargestellt. Die am häufigsten genannten Vorteile sind aus Sicht der Probanden eine Entlastung bei Fahrten auf der Autobahn bzw. im Stau sowie ein erhöhtes Sicherheitsgefühl bei Nebentätigkeiten. Es besteht ein starker Wunsch im Stau Nebentätigkeiten (wie z.B. Radio, Navigation, Telefon) auszuüben. Die größte Gefahr aus Sicht der Probanden ist, dass man sich zu stark mit Nebentätigkeiten beschäftigt, sodass auf kritische Situationen nicht mehr rechtzeitig reagiert werden kann.

Hauptnutzen	Risiken
Entlastung im Stau auf Autobahnen entspannteres Fahren möglich (N=16)	Fahrer beschäftigt mit anderen Dingen, kann auf kritische Situationen nicht mehr rechtzeitig reagieren (N=20)
Sicherheit bei Nebentätigkeiten (N=7)	Benutzung innerorts (N=5)
Weniger Unfälle / größere Sicherheit (N=4)	Ermüdung / schläft ein (N=2)
Man ermüdet weniger (N=1)	System lenkt falsch (N=2)
	Man bemerkte Übergang bei 40km/h oder Go-Request nicht , behindert Verkehr (N=1)
	Zu viel Info durch System (N=1)
Kein / geringer Nutzen (N=6)	Keine Gefahr (N=1)

Tabelle 8.1: Hauptnutzen und Risiken des Stauassistenten-Systems aus Sicht der Fahrer (in Klammern Anzahl Fahrer)

Ein Indikator für die Akzeptanz der Querführungsfunktion durch die Fahrer ist deren Bereitschaft, bei aktiver Querführung die Hände vom Lenkrad zu nehmen. Sie tun dies bei aktiver Querführung ca. 80 % der Zeit (min = 5 %, max = 98 %) und damit deutlich häufiger als bei ausgeschalteter Querführung bzw. in der Fahrt mit ACC (Bild 8.6). Die Möglichkeit, die Hände bei aktiver Querführung vom Lenkrad zu nehmen, wurde positiv bewertet. Die Fahrer gaben an, es sei komfortabel und wenig gefährlich (Bild 8.6).

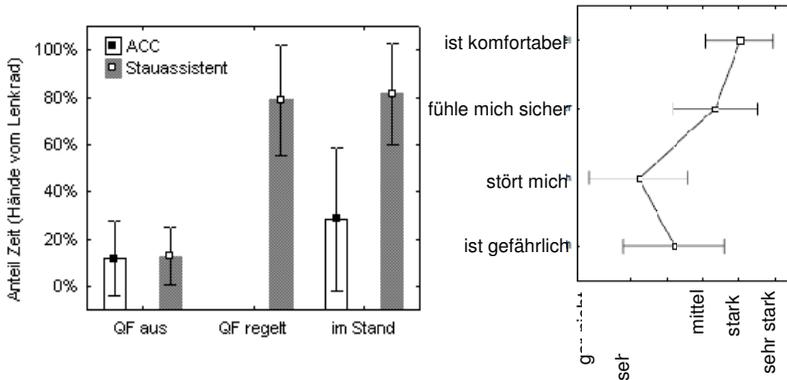


Bild 8.6: Zeitanteil, in dem bei ausgeschalteter Querführung, bei aktiv regelnder Querführung sowie im Stand die Hände vom Lenkrad genommen werden (links); Bewertung der Möglichkeit, die Hände vom Lenkrad zu nehmen (rechts)

Die geringe Anzahl von Übersteuerung der Querführung mit durchschnittlich 2,5 Mal pro Fahrt ist ein weiteres Indiz für die Zufriedenheit der Fahrer mit der Querführung. Im Gegensatz dazu wurde die Längsführung ca. 24 Mal pro Fahrt übersteuert, um stärker zu beschleunigen oder um zu bremsen (Bild 8.7).

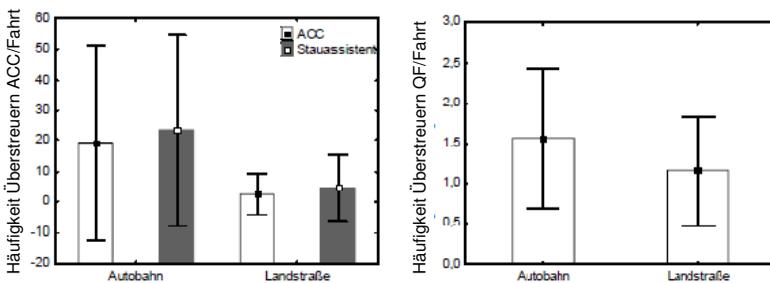


Bild 8.7: Häufigkeit der Übersteuerung in der Längsführung (links) und in der Querführung (rechts)

8.1.4 Versuchsergebnisse zur Beherrschbarkeit der Systemgrenzen

Es sollen nun die Reaktion der Fahrer auf die kritischen Situationen aus Abschnitt 8.1.2 betrachtet werden. Für die Systementwicklung ist hierbei interessant, inwiefern die hier dargestellten Systemgrenzen auch unter Ablenkung für den Fahrer zu kontrollieren sind.

Geschwindigkeitsschwelle von 40 km/h

Die niedrig priorisierte Übernahmeaufforderung bei 40 km/h wird zwischen 5 und 18 Mal in einer Fahrt erreicht, je nachdem, ob der Fahrer bereits vor der Geschwindigkeitsschwelle die Hände am Lenkrad hatte oder nicht. Es gibt nur zwei Fahrer, die hier mindestens einmal zu spät reagieren, sodass das Vorderfahrzeug-Objekt verloren wird und eine hoch priorisierte Übernahmeaufforderung erzeugt wird. Ansonsten wird der Aufforderung, die Hände ans Lenkrad zu nehmen, im Mittel nach 2,17 Sekunden nachgekommen. Die etwas hoch erscheinende Reaktionszeit basiert darauf, dass im Szenario Situationen auftreten, bei der sich das Vorderfahrzeug nur kurz über 40 km/h befindet. Fahrer, die diese Situation richtig interpretiert haben, sahen keinen Handlungsbedarf zur Übernahme, wodurch eine mehrere Sekunden andauernde Übernahmeaufforderung entstehen konnte.

Go-Request

Ein Go-Request (Aufforderung zum Anfahren) tritt in einer Fahrt ca. 28 Mal auf. Die Fahrer bestätigen das Anfahren in der Regel im zur Verfügung stehenden Zeitraum. Bei dem geringen Anteil verpasster Go-Requests zeigt sich ein Einfluss der Querführung: In der Fahrt mit dem Stauassistenten-System werden diese statistisch signifikant häufiger verpasst als in der Fahrt mit ACC, von durchschnittlich 0,8 auf 1,7 verpasste Go-Requests pro Fahrt ($F(1,30) = 5.08, p = 0.032$) (Bild 8.8). Zum einen kann der Effekt auf die dezente Anzeige des Go-Requests im Kombi zurückzuführen sein, die im Vergleich zum Leuchtring im Lenkrad kaum in der Peripherie wahrnehmbar ist, vor allem in Verbindung mit dem aktivierten Leuchtring. Zum anderen kann dies aber auch als ein Indiz für abnehmende Aufmerksamkeit bei zusätzlicher Querführung gedeutet werden. Eine Möglichkeit, dem entgegenzuwirken, wäre eine zweistufige Übernahmeaufforderung, die in der zweiten Stufe den Go-Request akustisch untermalt.

Drängler (knapper Einscherer)

In der Situation knapper Einscherer reagieren die Fahrer in der Fahrt mit Querführung statistisch signifikant langsamer auf die Übernahmeaufforderung der Längsführung als in der Fahrt mit ACC ($F(1,21) = 3.84, p = 0.063$). Die durchschnittliche Reaktionszeit steigt von 0,95 s auf 1,03 s (Bild 8.8). Auch dies kann als ein Anzeichen auf abnehmende Aufmerksamkeit durch die zusätzliche Querführung gewertet werden, wobei der Anstieg der Reaktionszeit von 80 ms als nicht kritisch gesehen wird.

Seitliches Fahrzeug zu nahe

Stark gekrümmte Kurve

Fahrspurmarkierungen vs. Bewegung umliegender Fahrzeuge

Die mittlere Reaktionszeit auf diese Situationen, die zu einer hoch priorisierten Übernahmeaufforderung quer führen, unterscheidet sich kaum. Im Mittel wird nach 1,29 s auf die Übernahmeaufforderung reagiert, der Fahrer übernimmt dann wieder die Querführung.

Kritischer Ausscherer

Bei dieser Situation wird in einem Abschnitt ohne Spurmarkierungen der Spurwechsel des Vorderfahrzeugs nicht erkannt. Das Eigenfahrzeug folgt dem Vorderfahrzeug auf die andere Fahrspur. Dort befindet sich ein weiteres Fahrzeug, auf das das Eigenfahrzeug durch die aktivierte Querführung zusteuert. 5 Probanden reagierten auf den Systemfehler bevor die Übernahmeaufforderung wegen des zu nahen seitlichen Fahrzeugs eintrat. Bei den 27 Probanden, die erst nach der Übernahmeaufforderung die Querführung übernahmen, kam es zu einem

Spurversatz von durchschnittlich 50 cm (Bild 8.9). Die Situation wird von allen Probanden ohne Unfall aufgelöst, jedoch mit deutlich erhöhten Lenkwinkelgeschwindigkeiten (bis zu 370 %s, Bild 8.10). Der minimal aufgetretene Seitenabstand zum Seitenfahrzeug war bei der hier verwendeten Parametrierung 43 cm (\varnothing 80 cm). Übernimmt der Fahrer die Lenkung dagegen, bevor die Übernahmeaufforderung ausgelöst wird, gibt es bezüglich der Spurhaltung keine Unterschiede zur Fahrt mit ACC.

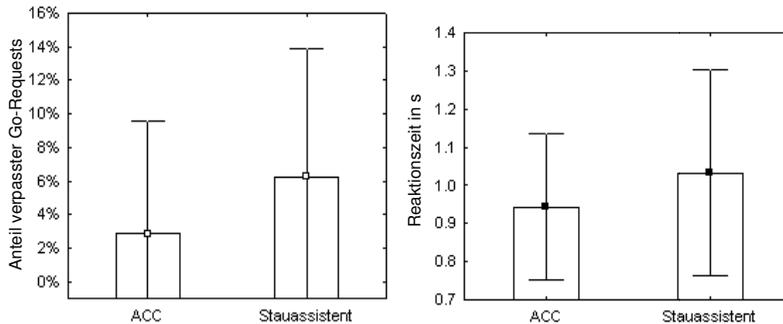


Bild 8.8: Anteil verpasster Go-Requests (links); Reaktionszeit in der Situation kritischer Einscherer (rechts) jeweils getrennt für die beiden Systeme

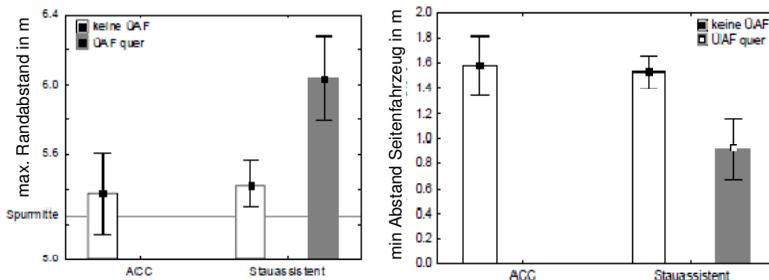


Bild 8.9: Maximale Spurauslenkung nach links (links) bzw. berechneter minimaler Abstand zum Seitenfahrzeug (rechts) in der Situation *kritischer Ausscherer*

Die Bearbeitung der Trackingaufgabe hat keinen Einfluss auf die Abweichung von der Sollspur und somit auf die Reaktionszeit in dieser Situation. Zusammenfassend kann bei dem hier dargestellten Systemfehler in Verbindung mit den verwendeten Übernahmeaufforderungs-Schwellwerten für (F 5.88) davon ausgegangen werden, dass der Fahrer rechtzeitig die Fahrzeugführung übernimmt. Jedoch wirkt sich das Auftreten des Systemfehlers auf jeden Fall negativ auf die Akzeptanz des Stauassistent-Systems aus, was sich unter anderem durch die erhöhten Lenkwinkelgeschwindigkeiten („reißen“ am Lenkrad) gezeigt hat. Insgesamt hat sich das Auftreten dieses Fehlers jedoch nicht entscheidend auf die Bewertung und somit der Akzeptanz des Stauassistent-Systems beim Systemvergleich ausgewirkt.

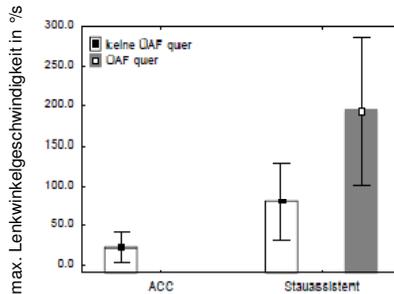


Bild 8.10: Maximale Lenkwinkelgeschwindigkeiten bei dem Systemfehler *kritischer Ausscherer*

Einseitig gesperrte Fahrbahn auf der Landstraße

Bei der Querführung durch die Landstraßen-Baustelle, bei der langsam erst auf die linke Spur, dann wieder auf die rechte Spur gewechselt wird, überließen die Fahrer die Querführung dem System. Als Maß für das Vertrauen der Fahrer in das Stauassistent-System beim Durchfahren der Baustelle wird deren Bereitschaft, hier die Hände vom Lenkrad zu nehmen bzw. die Nebenaufgabe zu bearbeiten, gewählt. In der Baustellensituation nehmen die Fahrer bei Fahrt mit Querführung einen Großteil der Zeit die Hände vom Lenkrad und überlassen die Spurhaltung der Querführung (Vergleich zu ACC $F(1,29) = 11.52, p = 0.000$). Dies führt aber nicht zu übermäßigem Systemvertrauen. Im Vergleich zur Fahrt mit ACC wird die Nebenaufgabe in der Fahrt mit Stauassistent-System nicht stärker bearbeitet.

8.2 Diskussion der Fahrsimulator-Untersuchungsergebnisse

Es zeigt sich eine hohe Akzeptanz des Stauassistent-Systems durch die Fahrer. Dieses positive Bild zeichnet sich sowohl in der Befragung als auch in der Bereitschaft ab, die Querführung dem System zu überlassen. Hauptbegründung für die gute Bewertung ist, dass so Fahren im Stau deutlich entspannter und weniger anstrengend ist.

Als die größte vom System ausgehende Gefahr wird die Möglichkeit angesehen, sich zu weit aus der Fahraufgabe zurückzuziehen und somit in kritischen Situationen verspätet zu reagieren. Diesem Effekt wirkt die Tatsache entgegen, dass trotz des teilautonomen Fahrens bedingt durch das gewählte Interaktionskonzept relativ häufig Bedieneingaben erforderlich sind, um die Fahrt und damit den Verkehrsfluss aufrecht zu erhalten. Bei einer detaillierten Betrachtung der erforderlichen Fahrerreaktionen lassen sich Anzeichen auf das Out-of-the-Loop Performance Problem finden: In der Fahrt mit dem Stauassistent-System werden tendenziell mehr Go-Requests verpasst, was sich bei dem hier dargestellten TestszENARIO durch einen Anstieg von durchschnittlich 0,8 verpassten Go-Request bei ACC auf 1,7 verpasste Go-Requests mit Stauassistent pro Fahrt zeigt. Des Weiteren reagieren hier die Probanden tendenziell langsamer auf Übernahmeaufforderungen des ACC.

Es ist bei der dargestellten Konfiguration ein leichter Anstieg der durchschnittlichen Reaktionszeit von 0,95 s auf 1,03 s zu verzeichnen. Trotzdem kommt es in kritischen Situationen mit Systemwarnung nie zu Kollisionen. Die Fahrer können immer rechtzeitig übernehmen.

Es ist zu prüfen, inwieweit die in dieser Simulatorstudie beobachtete abnehmende Out-of-the-Loop Performance simulatorspezifisch ist und quantitativ auf Feldbedingungen übertragbar ist. Es ist zu erwarten, dass unter realen Bedingungen Risikobewusstsein und Situationswahrnehmung höher sind und damit grundsätzlich diese Phänomene in ihrer Anzahl und Intensität verringert auftreten. Andererseits kann aus dieser Untersuchung kein Langzeitverhalten der Fahrer mit diesem System abgeleitet werden. Hierbei ist wiederum anzunehmen, dass die Fahrer ein stärkeres Systemvertrauen aufbauen und sich mehr mit Nebentätigkeiten beschäftigen. Diese Reliability / Overtrust (Übervertrauen) - Problematik wird in [85] beschrieben.

Die in Abschnitt 3.4 geforderte „Controllability“ der untersuchten Systemgrenzen und Systemfehler kann aufgrund der gewählten Stichprobe in Bezug auf den RESPONSE 3 Code of Practice [33] als erfüllt betrachtet werden. Dort wird gefordert, dass die Kontrollierbarkeit von einer Stichprobe, die aus mindestens 20 unbedarften Probanden besteht, nachgewiesen werden muss.

9 Das Stauassistentz-System im Realfahrzeug

Dieses Kapitel befasst sich mit der Umsetzung des Stauassistentz-Systems im Realfahrzeug. Es wird im Speziellen auf die verwendete Sensorik eingegangen, auf deren Daten in Verbindung mit den Eigenfahrzeugdaten die Längs- und Querführung basiert. Das Anzeige- und Bedienkonzept wird aus der Fahrsimulation übernommen.

9.1 Der Versuchsträger

Als Versuchsträger steht ein Fahrzeug zur Verfügung, das die Eigenfahrzeugdaten-Sensorik aus Abschnitt 4.1 besitzt. Somit stehen Eigenfahrzeuggeschwindigkeit, Gierrate und der Lenkradwinkel für die Situationsinterpretation und Längs- und Querregelung zur Verfügung. Lenkradmoment, Motor- und Bremsmoment werden über die Schnittstellen der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Aktorik an das Fahrzeug weitergegeben und dort umgesetzt.

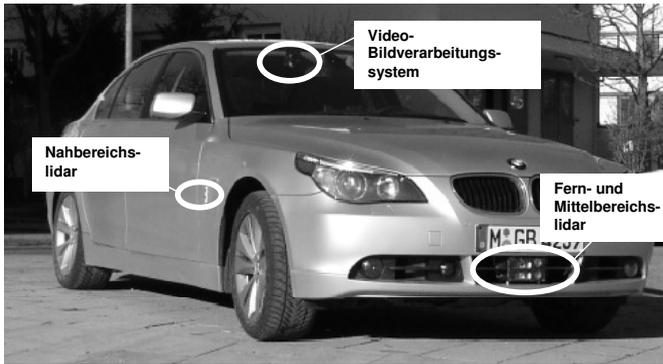
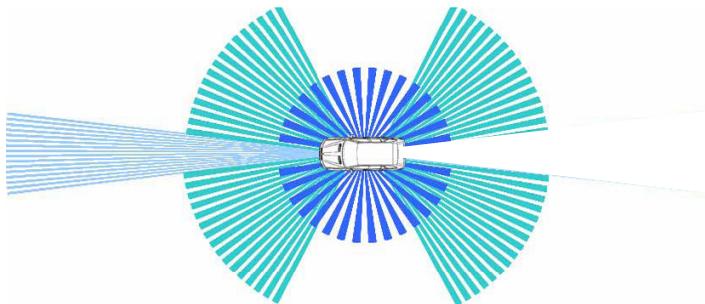


Bild 9.1: Versuchsträger für die Darstellung des Staussistenz-Systems mit Sensorkonfiguration

9.1.1 Die Sensorkonfiguration des Versuchsträgers

Als Abstands-Sensorik wird auf eine Lidar-Sensorik zurückgegriffen, wie in Abschnitt 4.2.3 gefordert. In Bild 9.2 ist die Sensorkonfiguration des verwendeten Versuchsträgers, aufgeteilt in Fern- Mittel- und Nahbereich, dargestellt.

Fern- und Mittelbereichslidar sind dabei an der Mitte der vorderen Stoßstange angebracht und arbeiten mit dem Multi-Beam Verfahren. Die Nahbereichslidare für die Abdeckung des Seitenbereichs, bei denen es sich um Lidar-Scanner handelt, sind am vorderen Kotflügel unter dem Seitenblinker angebracht (Bild 9.1).



Fernbereichslidar

- 150m
- 14° Öffnungswinkel
- 16 Strahlen

Mittelbereichslidar

- 60m
- 54° Öffnungswinkel
- 32 Strahlen

Nahbereichslidar

- 20m
- 160° Öffnungswinkel
- 16 Strahlen

Bild 9.2: Sensorkonfiguration des Versuchsträgers [86]

Die Detektion der Fahrspurmarkierungen erfolgt mittels eines Video-Bildverarbeitungssystems. Hierfür wird die von der Firma MobilEye angebotene *EPM (EyeQ Processing Module, [47])* Plattform verwendet. Die Videokamera dieser Plattform befindet sich neben der Befestigung für den Rückspiegel an der Frontscheibe.

Somit entspricht die hier verwendete Sensorkonfiguration den Anforderungen des Stauassistenten-Systems aus Kapitel 4.

9.1.2 Die Rapid-Prototyping Plattform

Die Umsetzung des Algorithmus für das Stauassistenten-System im Realfahrzeug geschieht mittels einer echtzeitfähigen Rapid Prototyping Plattform, der *dSpace Autobox* [87]. Dieses System ermöglicht, in Simulink programmierte Reglerstrukturen auf eine Plattform mit Realzeit-Betriebssystem kompilieren zu können. Mit der von dSpace zur Verfügung gestellten Software ist es möglich, die bereits in der Closed-Loop Simulationsumgebung und in der Fahrsimulation entwickelten Simulink-Strukturen im Realfahrzeug zu nutzen. Die Autobox beinhaltet *CAN (Controller Area Network [88])*- und Ethernet-Schnittstellen, um die Eigenfahrzeugdaten und die Daten der Umfeldsensorik berücksichtigen zu können. Zusätzlich werden über diese Schnittstellen die Zustände der Bedienelemente (Lenkstockhebel, Lenkradtasten, kapazitive HandsOn-Detection) eingelesen und die Anzeigeelemente im Kombi und die Leuchtringe am Lenkrad angesteuert.



Bild 9.3: Die dSpace-Autobox [87] (links), Anzeigeconcept im Realfahrzeug (rechts)

Im Versuchsträger wurde das Kombi-Instrument durch ein Display ersetzt, um zusätzlich zu den Standardanzeigen (z. B. Geschwindigkeit und Motordrehzahl) beliebige Anzeigeelemente mittels Flash-Programmierung [89] darstellen zu können. Ein zusätzlicher Rechner steuert das Display an und erhält mittels CAN- und Ethernet-Schnittstellen die entsprechenden Fahrzeug- und Systemzustands-Daten.

Diese werden verwendet, um die Eigenfahrzeugdaten und die Systemzustände des Stauassistenten-Systems im Kombi-Display anzuzeigen. Somit kann wiederum die identische Software für das Kombi-Element aus der Fahrsimulation im Realfahrzeug verwendet werden. Zusätzlich wurden die Leuchtringe in das Lenkrad des Fahrzeugs integriert (Bild 9.3).

9.2 Der Stauassistenten-Algorithmus im Realfahrzeug

Im Folgenden werden Teilfunktionen der Situationsinterpretation und die Querregelung im Realfahrzeug hinsichtlich ihrer Performance betrachtet.

9.2.1 Verhalten beim Folgen eines Vorderfahrzeugs

Es soll nun das Folgen der Solltrajektorie von Vorderfahrzeug-Bewegungen bewertet werden, wenn Seitendaten und Informationen über die Fahrbahnmarkierungen nicht zur Verfügung stehen. Hierfür wird analog zu Abschnitt 5.4.3 der unregelmäßige Fall betrachtet. Somit können die Querposition y_{FC} und die Querabweichung der Solltrajektorie zum Eigenfahrzeug y_0 direkt im zeitlichen Verlauf verglichen werden. Das Eigenfahrzeug fährt dabei geradeaus mit einer Geschwindigkeit von $v_{EV} \approx 30$ km/h, und einem konstanten Abstand von 28 m zum Vorderfahrzeug. Dieses fährt anfangs ca. 0,5 m links versetzt vom Eigenfahrzeug und beginnt ca. bei Sekunde 14 auf einen Querversatz nach rechts von ca. 1,25 m zu fahren. Diesen Querversatz behält es dann bei. In Bild 9.4 ist der zeitliche Verlauf der y-Ablage des Vorderfahrzeugs (y_{FC}) und der Abstand des Eigenfahrzeugs zur Solltrajektorie (y_0) abgebildet. Es ist zu sehen, dass die Solltrajektorie der Vorderfahrzeugbewegung mit einem Sekundenabstand von ca. 3,5 s folgt, was in etwa den Sekundenabstand zwischen Eigenfahrzeug und Vorderfahrzeug entspricht. Somit wurde für diese Situation gezeigt, dass bei entsprechender Trajektorienregelung der Vorderfahrzeugbewegung mit ausreichender Genauigkeit gefolgt werden kann.

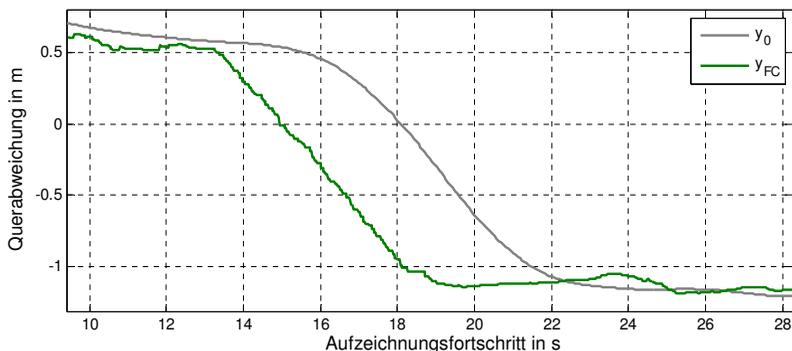


Bild 9.4: Das Folgeverhalten der Solltrajektorie im Realfahrzeug ($v_{EV} = 30$ km/h, $x_{FC} = 28$ m)

9.2.2 Systemreaktion auf ein nahes seitliches Objekt

Analog zu Abschnitt 5.4.4.2 soll nun das Ausweichen eines seitlich zu nahen Objektes im Realfahrzeug betrachtet werden. Im Speziellen wird der Verlauf der Zustandsgröße b_L bei einem sich seitlich nähernden Fahrzeug untersucht. Bei dieser Situation hat das Vorderfahrzeug eine konstante Geschwindigkeit $v_{xFC} = 33 \text{ km/h}$, das Eigenfahrzeug folgt diesem mit einem Sekundenabstand von 2,5 s. Links vom Eigenfahrzeug befindet sich nun ein weiteres Fahrzeug, dass sich dem Eigenfahrzeug langsam nähert. Die Sensorrohdaten, die Gassenbeobachter-Solltrajektorie und die linke Gassenbegrenzung dieser Situation sind in Bild 9.5 in der Vogelperspektive dargestellt: Die validierten linken Seitenbereichsdaten (vgl. Abschnitt 5.3.4) werden für die Beobachtung der Gassenbegrenzung berücksichtigt. Die Nahbereichsdaten auf der rechten Seite sind zu weit entfernt, sie werden im Gassenbeobachter nicht berücksichtigt.

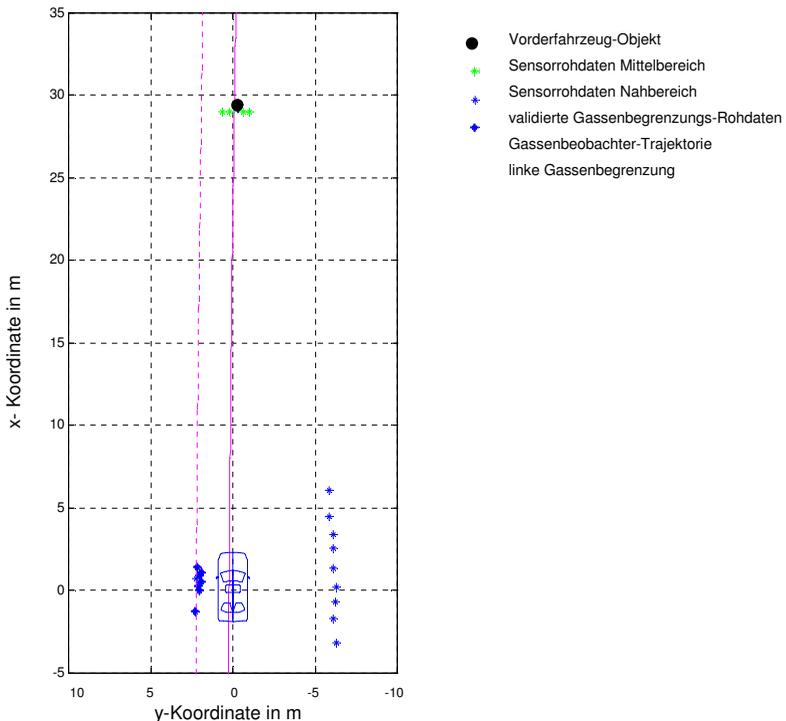


Bild 9.5: Vogelperspektive einer seitlichen Annäherung mit Sensorrohdaten, Gassenbeobachter-Trajektorie und Gassenbegrenzung

Der zeitliche Verlauf des Abstandes der linken Gassenbegrenzung zur Solltrajektorie b_L während des Annäherungsvorgangs ist in Bild 9.6 dargestellt. Zusätzlich ist der Offset zum Ausweichen eines seitlich zu nahen Objekts y_{Offset} , der in Abschnitt

5.4.4.2 definiert wurde, angetragen. Da $b_{avoid} = 2$ m gewählt wurde, ist zu sehen, dass ab dem Zeitpunkt, wenn b_L den Wert von 2 m unterschreitet, der zusätzliche Offset zur Solltrajektorie y_{Offset} in Simulationszeit 8 s in Erscheinung tritt. In dieser Situation weicht das Eigenfahrzeug also dem seitlichen Fahrzeug aus. Bei einer Parametrierung von $b_{TOR} = 1,5$ m bekommt der Fahrer bei Simulationszeit 9,5 s zusätzlich eine Übernahmeaufforderung.

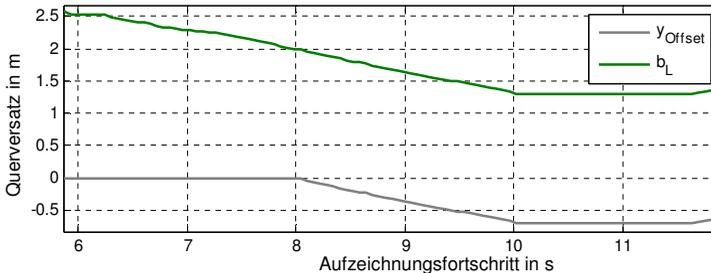


Bild 9.6: Verlauf des seitlichen Abstandes der Gassenbegrenzung zur Solltrajektorie b_L während einer seitlichen Annäherung ($b_{avoid} = 2$ m, $b_{TOR} = 1,5$ m)

9.2.3 Die Querregelung

Für die Querregelung muss im Realfahrzeug ein Kompromiss zwischen Regelungskomfort und -genauigkeit gefunden werden. Wiederum wird eine Folgefahrt bei 35 km/h und einem Sekundenabstand von 2,5 s betrachtet. Mit der in Abschnitt 6.1.2 verwendeten Parametrierung wird nun bei aktiver Querregelung ein konstanter Querversatz von $y_0 = 2$ m durch Gegenlenken erzeugt. Die Berücksichtigung des Torsionsmoments zur Übernahme der Querführung bei Gegenlenken wird für diese Messung abgeschaltet. Somit wird bei Loslassen des Lenkrads der Querversatz y_0 ausgeregelt. Der zeitliche Verlauf des Eigenfahrzeug-Abstandes zur Solltrajektorie ist in Bild 9.7 dargestellt. Es zeigt sich ein robustes Ausregelverhalten der Querregelung in Verbindung mit dem Gassenbeobachter in dieser Situation.

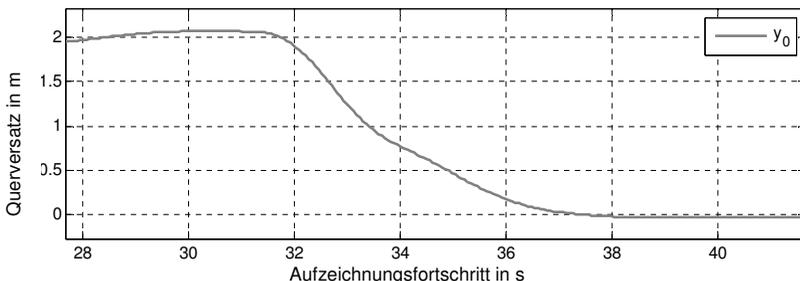


Bild 9.7: Verlauf des Abstandes zur Solltrajektorie y_0 beim Ausregeln eines Querversatzes ($v_{EV} = 35$ km/h, $x_{FC} = 25$ m)

10 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit thematisiert die Entwicklung eines Stauassistentz-Systems, das den Fahrer im Stau in der Längs- und Querführung unterstützen soll. Zunächst galt die Frage des Einsatzbereiches zu klären. Es wurde eine subjektive Situationsklassifikation durchgeführt, um die Randbedingungen für dieses System festzulegen. Diese Situationen wurden hinsichtlich ihrer Relevanz für das Stauassistentz-System bewertet. Zusammen mit einer fahrdynamischen Betrachtung von Stausituationen, in der die Systemeinschränkungen und Systemgrenzen festgelegt wurden, konnte dann eine konkrete Systemdefinition erfolgen.

Die Systemdefinition, die als Lastenheft betrachtet werden kann, teilt das System in folgende Funktionsbereiche:

- Fahrumfelderfassung
- Situationsinterpretation
- Regelungstechnik und Aktorik
- HMI-Konzept

Für die Fahrumfelderfassung wurden verschiedene Sensortypen hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für die Längs- und Querführung betrachtet. Die Sensorbereiche wurden aufgeteilt in einen Fern-, Mittel- und Nahbereich (Seitenbereich) und eine Fahrspureerkennung. Es stellte sich heraus, dass sich die Lidar-Sensorik für den Fern-, Mittel- und Nahbereich am besten eignen. Um die Fahrbahnmarkierungen erkennen zu können, wurde ein Video-Bildverarbeitungssystem präferiert.

Für die Querführungs-Trajektorie standen aufgrund der verwendeten Sensorik redundante Informationen zur Verfügung: Zum einen die Daten aus der Fahrspureerkennung, zum anderen die Positions- und Bewegungsdaten umliegender Fahrzeuge. Die redundanten Informationen wurden anfangs getrennt voneinander betrachtet. Für die Berechnung einer freien Gasse nach vorne auf Basis umliegender Fahrzeuge wurde ein Kalman-Filter entwickelt, der Gassenbeobachter. Unter Verwendung eines Trajektorienmodells und innerhalb der Systemgrenzen gültigen Bewegungsgleichungen wird hier eine Trajektorie für die Querführung errechnet. Zusätzlich erfolgt eine Beobachtung der linken und rechten Gassenbegrenzung, damit bei seitlich zu nahen Fahrzeugen oder Randbebauungen ein leichtes Ausweichen und eine Übernahmeaufforderung erzielt werden kann. Eine Closed-Loop-Simulationsumgebung diente dazu, den Gassenbeobachter zu applizieren und zu optimieren. Da das Vorderfahrzeug-Objekt als stark gewichtetes Messdatum in die Beobachtung mit eingeht, müssen die Situationen, in denen sich das Vorderfahrzeug ändert (ausscherendes Vorderfahrzeug und Einscherer vor dem Fahrzeug) gesondert betrachtet werden. Hierfür wurde ein Klassifikationsalgorithmus entwickelt, der mit Hilfe Bayes'scher Netze Spurwechsel im Vorderfahrzeugbereich erkennt. Werden Spurwechsel erkannt, kann die entsprechende algorithmische Reaktion darauf erfolgen.

Um die zur Verfügung stehende Redundanz für die Solltrajektorie zu nutzen, zog man verschiedene Möglichkeiten in Betracht. Es erschien hier am sinnvollsten, auf die Daten der Fahrspureerkennung zu regeln und diese mit den Daten des Gassenbeobachters zu verifizieren. Stehen keine gültigen Fahrspurdaten zur Verfügung, wird auf Basis der Gassenbeobachter-Daten quergeregelt.

Um die Querführung auf die Solltrajektorie mittels eines additiven Lenkradmoments durchführen zu können, wurde ein Querregler entwickelt und hinsichtlich seiner Stabilität innerhalb der Systemgrenzen betrachtet. Die Längsregelungsstrategie wurde analog zum ACC S&G - Seriensystem gewählt.

Die nun zur Verfügung stehende funktionale Ausprägung des Stauassistenten-Systems wurde im dynamischen Simulator hinsichtlich Kundenakzeptanz und Beherrschbarkeit der Systemgrenzen untersucht. Hierfür wurde ein intuitives HMI-Konzept entwickelt, das sich vor allem beim Übergang der Geschwindigkeits-Systemgrenze und beim Anzeigekonzept als besonders nutzerfreundlich erwiesen hat. Die Untersuchungen im Simulator ergaben, dass aus Fahrersicht ein starker Wunsch nach einem hohen Automatisierungsgrad in Stausituationen besteht. Auch die Systemeinschränkungen und Systemgrenzen des Stauassistenten-Systems wurden von den Probanden akzeptiert. Es deuteten sich jedoch Anzeichen von Out-of-the-Loop Performance Problemen an, bedingt durch den hohen Automatisierungsgrad.

Das Stauassistenten-System wurde in Verbindung mit dem HMI-Konzept in einem Versuchsträger umgesetzt, der die Spezifikationen hinsichtlich Fahrfelderfassung und Aktorik erfüllt. Einzelne, in der Simulation entwickelte Funktionsteile, wurden im Realfahrzeug verifiziert.

Der Gewinn gegenüber dem Stand der Technik liegt darin, dass hier zusätzlich zur Fahrspurerkennung die Bewegung umliegender Fahrzeuge für die Querführungstrajektorie unter Verwendung seriennaher Sensorik berücksichtigt wird. Somit ergibt sich eine höhere Systemverfügbarkeit und -sicherheit für die Längs- und Querführung im Stau. Des Weiteren wurde ein intuitives HMI-Konzept, das auf das Anzeige- und Bedienkonzept des Serien - ACC Stop&Go Systems basiert, entwickelt. Erstmals wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Fahrimulator-Studie durchgeführt, die sich mit der Akzeptanz *und* den Systemgrenzen eines hoch automatisierten Assistenzsystems, auch hinsichtlich der Out-of-the-Loop Performance, beschäftigt hat. Die Fahrsimulation wurde hierbei als Entwicklungsumgebung für ein Fahrerassistenz-System vorgestellt.

Bei der Betrachtung der Systemausprägung müssen weitere Untersuchungen zeigen, inwieweit auch bei Sensorfehlern oder in anderen anspruchsvollen Situationen – z.B. beim Überqueren nicht vorfahrtsberechtigter Straßen (Ampelkreuzungen, Stopp-Schilder) oder im innerstädtischen Bereich mit Fußgängern – die Beherrschbarkeit und Systemsicherheit gewährleistet werden kann. Allgemein muss untersucht werden, inwiefern Systemgrenzen, die nicht zu einer Übernahmeaufforderung führen, beim hoch assistierten Fahren und zusätzlicher Ablenkung (z. B. durch Nebenaufgaben) wahrgenommen werden und beherrschbar sind (Situation Awareness [90]). Außerdem müssen Langzeitstudien zeigen, wie sich ein über einen längeren Zeitraum aufgebautes Systemvertrauen auf die Wahrnehmbarkeit kritischer Situationen und somit auf die Beherrschbarkeit der Systemgrenzen auswirken. Auch rechtliche und produkthaftungstechnische Fragen müssen hinsichtlich der Längs- und Querführungsunterstützung im Straßenverkehr geklärt werden.

Werden diese Fragen positiv beantwortet, kann der Fahrer im Stau entlastet werden. Dies ist aus Fahrersicht insofern wünschenswert, als dass hier keine Freude am Fahren mehr besteht. Bei einer hohen Systemreife besteht zudem die Möglichkeit, die durch den hohen Assistenzgrad freigewordenen mentalen Kapazitäten anderweitig zu nutzen, beispielsweise in Verbindung mit dem im Fahrzeug

verbauten Infotainment-System. In jedem Fall wird der Unterstützung in Längs- und Querführung im Stau ein hohes Potential an Komfort- und Sicherheitsgewinn im Straßenverkehr zugesprochen.

Literaturverzeichnis

- [1] ADAC Statistik: *Fakten aus dem Verkehrsbereich*, Ausgabe 2008, <http://www.adac.de/Verkehr/Statistiken/Verkehrsdaten>
- [2] Verkehrsunfallstatistik der Autobahnpolizei Köln 2005, Autobahnpolizei Köln 2006, <http://www.autobahnpolizei-koeln.de>
- [3] Statistisches Bundesamt: *Datenreport 2004*, Bundeszentrale für politische Bildung, Bonn 2005
- [4] Pauli B.; Schindler T.: *Telematikdienste, ein Ausweg aus dem drohenden Verkehrschaos?*, Arbeitsbericht der Veranstaltung "Teledienste - Trendanalyse und Bewertung" am Lehrstuhl für Allgemeine und Industrielle Betriebswirtschaftslehre, TU München, 2001
- [5] Ohem, E: *Chancen und Risiken moderner Fahrerassistenzsysteme*, ADAC Fachgespräch, Juni 2005
- [6] Braess, H. H. und Reichart, G.: *PROMETHEUS: Vision des intelligenten Automobils auf der intelligenten Strasse – Versuch einer kritischen Würdigung*, ATZ, Vol. 97 (4) und 97 (6), 1995, S. 200-205 und 330-334
- [7] Schierge, F.: *Welche Fahrerassistenz wünschen sich die Fahrer? Methoden und Ergebnisse zur Nutzerakzeptanz von FAS aus der Forschungsinitiative INVENT*, Der Fahrer im 21. Jahrhundert, VDI-Bericht Nr. 1919, S. 207-220. Düsseldorf, 2005
- [8] Grimmer, W.; Adelt, P. J.; Stephan, E. R.: *Die Akzeptanz von Navigations- und Verkehrsführungssystemen der Zukunft*, eine AXA Direkt Verkehrsstudie, Deutscher Psychologen Verlag, Bonn, 1995
- [9] Freymann, R.: *Aktive Sicherheit: Eine wesentliche Technologie zur Erhöhung der allgemeinen Verkehrssicherheit*. VDI Jahrbuch 2006 Fahrzeug- und Verkehrstechnik, S. 286-308, VDI Verlag, Düsseldorf, 2006
- [10] aktiv Website, *Aktive Sicherheit*, Teilprojekt Aktive Gefahrenbremsung, 2008, <http://aktiv-online.org>
- [11] Prestl, W.; Sauer, T.; Steinle, J.; Tschernoster, O.: *The BMW Active Cruise Control ACC SAE 2000-01-0344*, München, 2000
- [12] Adiprasito, B.: *Fahrzeuglängsführung im Niedergeschwindigkeitsbereich*, Dissertation am Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, 2004
- [13] Mayr, R.: *Regelungsstrategien für die automatische Fahrzeugführung: Längs- und Querregelung, Spurwechsel- und Überholmanöver*, Springer-Verlag, 2001

- [14] *Review of the National Automated Highway System Research Program*, Committee for a Review of the National Automated Highway System Consortium Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D. C., 1998
- [15] California PATH Program: *Partners for Advanced Transit and Highways*, Annual Report, 2001, <http://www.path.berkeley.edu>
- [16] Karamitsos, F.: *DRIVE*, Concise Encyclopaedia of Traffic and Transportation Systems, 1991
- [17] Voy, Chr.; Hamm, L.; Panik, F.; Reister, D.: *PROMETHEUS, ein europäisches Forschungsprojekt zur Gestaltung des Straßenverkehrs der Zukunft*, VDI-Berichte Nr. 612, 1986
- [18] Becker, S.; Brausewetter, C.; Brockmann, M.; Carrea, P.; Clarke, N.; Hoffmann, O.; Ingrosso, M.; Kraus, R.; Mihim, J.; Niu, R.; Watts, D.: *UDC – Driver Behaviour in City Cruising*, Projekt TR 1060 Urban Drive Control, Internal Deliverable D3.02, Brüssel, 1996
- [19] Clarke, N.; Hayward, M.: *AC-Assist: Anti-Collision Autonomous Support and Safety Intervention System*. Exploitation Plan and Technology Implementation Report, Coventry, Aachen, 1999
- [20] Vlassenroot, S.: *Trial on intelligent speed adaption in Ghent, Belgium: the first European trial with politicians, academics and car-constructor as role-models in ISA-driving*. Tenth International Conference on Urban Transport and the Environment in the 21st Century, 19 - 21 May 2004, Dresden, Germany
- [21] MoTIV: *Mobilität und Transport im Intermodalen Verkehr*. Programmbeschreibung des vom BMBF geförderten Kooperationsprojekts der deutschen Automobil- und Zulieferindustrie, Bonn, 1996
- [22] *CHAUFFEUR 2 Final report*, Deliverable D24, 2003
- [23] INVENT Ergebnisbericht: *Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik*, Kirchheim unter Teck, 2005, <http://www.invent-online.de>
- [24] Weilkes, M; Bürkle, L: *Stauassistent – teilautomatisierte Fahrzeugführung mit kombinierter Längs- und Querregelung*, Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2004
- [25] Sandkühler, D.: *Analyse von Stausituationen für die Entwicklung eines Stauassistenten im Rahmen von INVENT*, INVENT Abschlussbericht, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, 2002
- [26] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Begriffsbestimmungen*, Nr. 220, 1989
- [27] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Handbuch zur Bemessung von Straßenverkehrsanlagen*, Köln 2001.

- [28] Breitenberger, S.: *Einschätzung aktueller Verkehrszustände aus fahrzeuggenerierten Daten*, Diplomarbeit, Technische Universität München, 1997
- [29] Prevent Website, Subproject SAFELANE, 2008, <http://prevent-ip.org>
- [30] ADAC: *Weniger Stau – Mehr Mobilität*, ADAC Broschüren, Sept. 1999
- [31] RAS-L: *Richtlinien für die Anlage von Straßen – Linienführung*, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf, 1995
- [32] Weise, G.; Durth, W.; Kleinschmidt, P.; Lippold, Ch.: *Straßenbau, Planung und Entwurf*, Verlag für Bauwesen, Berlin, 1995
- [33] Schwarz, J. et al.: *Code of Practice for the Design and Evaluation of ADAS (V3.0)*, RESPONSE 3, 2006
- [34] Schwarz, J.: *Code of Practice für die Entwicklung, Validierung und Markteinführung von künftigen Fahrerassistenzsystemen (ADAS)*, Rechtliche Rahmenbedingungen zur Einführung von Fahrerassistenzsystemen, Bergisch Gladbach, 2007
- [35] Deutsche Bundesregierung: *Gesetzliche Neuregelungen zum 1. Mai 2006*, RegierungOnline, Berlin, Mai 2006, <http://www.bundesregierung.de>
- [36] Neukum, A; Mayser, C. et al: *ACC-Stop&Go: Fahrerverhalten an funktionalen Systemgrenzen*, M. Maurer & Stiller C., 5. Workshop Fahrerassistenzsysteme (FAS 2008), S. 141-150. Karlsruhe, 2008
- [37] RAS-Q: *Richtlinien für die Anlage von Straßen – Querführung*, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Straßenentwurf, 1996
- [38] Robert Bosch GmbH: *Autoelektrik Autoelektronik*, 4. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig, 2002
- [39] Detlefsen J.: *Radartechnik*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, NewYork, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, 1989
- [40] Göbel, J.: *Radartechnik*, VDE Verlag, Berlin, 2001
- [41] Wagner, K. P.: *Winkelauflösende Radarverfahren für Kraftfahrzeuganwendungen*, Dissertation am Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik, TU München, 1997
- [42] Agha A.: *Entwicklung von Postprocessing-Algorithmen für automotiv Radarsysteme*, Dissertation an der TU Hamburg, 2001
- [43] Fuerstenberg, K.; Dietmayer, K.: *Multilayer Laserscanner for robust Object Tracking and Classification in Urban Traffic Scenes*, Proceedings of ITS 2002, 9th World Congress on Intelligent Transport Systems, Chicago, Oktober 2002

- [44] Fuerstenberg, K.; Schulz R.: *Laserscanners for Driver Assistance*, Proceedings of WIT 2006, 3rd International Workshop on Intelligent Transportation, Hamburg, März 2006
- [45] Neumeier, S.; Färber G.: *Videobasierte Umfelderkennung bei Straßenfahrzeugen*, Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenzsysteme, Garching bei München, April 2006
- [46] Gentile, R., Katz, D., Lukasiak, T.: *Video-Techniken für mehr Sicherheit im Auto*, Teil 2, HANSER automotive - electronics systems 5-6/2005, Jahrgang 4, S.66-71
- [47] MobilEye Website, 2008, <http://www.mobileye-vision.com>
- [48] Citroën Website, <http://www.citroen.com>
- [49] Mengel, P.; Listl, L.: *Three- Dimensional CMOS Image Sensor for Pedestrian Protection and Collision Mitigation*, 10th International Forum on Advanced Microsystems for Automotive Applications, Berlin, April 2006
- [50] Lange, R.: *3D Time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS/CCD-technology*, Siegen, 2000
- [51] ZF-Lenksysteme, <http://www.zf-lenksysteme.com>
- [52] Donges, E.; Naab, K.: *Regelssysteme zur Fahrzeugführung und -stabilisierung in der Automobiltechnik*, at-Automatisierungstechnik, Oldenburger Wissenschaftsverlag, Mai 1996
- [53] Cramer, H.: *Modelle zur multisensoriellen Erfassung des Fahrzeugumfeldes mit Hilfe von Schätzverfahren*, Forschungsberichte der Professur Nachrichtentechnik, Band 2, Shaker Verlag, Aachen, 2006
- [54] Gehring, S.: *Design, Simulation, and Implementation of a Vision-Based Vehicle-Following System*, Dissertation an der Fakultät für Physik an der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, Sindelfingen 2000
- [55] Westhues, A.: *Einsatz eines parametrischen Straßenmodells für modellbasierte Detektion und Verfolgung des Straßenrandes mit Hilfe eines Lasermesssystems*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Nachrichtentechnik an der TU Chemnitz, Dezember 2006
- [56] Y. Bar-Shalom: *Estimation and Tracking: principles, techniques, and software*, Artech House, Boston, London, 1993
- [57] Föllinger, O.: *Regelungstechnik - Einführung in die Methoden und ihre Anwendung*, Hüthig Verlag Heidelberg, achte, überarbeitete Auflage, 1994
- [58] Welch, G.; Bishop, G.: *An Introduction to the Kalman-Filter*, ACM, Chapel Hill, 2001
- [59] Isemann, R.: *Digitale Regelssysteme*, Band II. Springer-Verlag, zweite, überarbeitete Auflage, 1987

- [60] Zomotor, A.: *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*, 2. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, 1991
- [61] Funk, K. et al.: *Singularitätsfreies Einspurmodell für Fahrerassistenzfunktionen und Aktive Sicherheit*, Vehicle System Dynamics, noch nicht veröffentlicht
- [62] de Castro Bonfim, C.: *Flexible Multisensor Fusion*, Master Thesis, Lehrstuhl für Realzeitsysteme, TU München, Nov. 2004
- [63] Kämpchen, N.: *Feature-Level Fusion of Laser Scanner and Video Data for Advanced Driver Assistance Systems*, Dissertation an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik der Universität Ulm, 2007
- [64] Bauer, H.: *Adaptive Fahrgeschwindigkeitsregelung ACC*, Robert Bosch GmbH, Verlag Christiani P., 2002
- [65] The Mathworks: *Matlab The Language of Technical Computing Using MATLAB Graphics*, Version 6, 2002
- [66] Pearl, J.: *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Network of Plausible Inference*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1988
- [67] Mitchell, T.: *Machine Learning*, McGraw Hill Series in Computer Science, 1997
- [68] Quinlan J.R.: *C4.5: Programs for Machine Learning*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993
- [69] Dagli, I.; Breuel G.; Schnittenhelm H.: *Einscherer-Erkennung mit erweiterter Umgebungserfassung – eine Machbarkeitsstudie*, Vehicle Safety 2010, VDI Fahrzeug- und Verkehrstechnik, 2003
- [70] Christen, F.; Benmimoun A., Breuer, K.; Sandkühler, D.: *Verwendung des Verkehrsflusssimulationswerkzeugs PELOPS mit HiL-Funktionalität bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen*. Technischer Bericht, Institut für Kraftfahrwesen RWTH Aachen, 2004
- [71] Ehmanns, D.: *Modellierung des taktischen Fahrerhaltens bei Spurwechselforgängen*, Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen Aachen, 2002
- [72] Kiendl, H.: *Fuzzy Control methodenorientiert*, Oldenbourg Verlag, 1997
- [73] Wittig, F.: *Maschinelles Lernen Bayes'scher Netze für benutzeradaptive Systeme*, Promotion an der Universität des Saarlandes, Informatik, Dezember 2002
- [74] Hamilton, H. J.: *Knowledge Discovery in Databases*, Department of Computer Science, University of Regina, Regina, 2007, <http://www.cs.uregina.ca>
- [75] Gradenegger, B.; Krüger, H.-P.: *Abschlussbericht ACCNG - Prüfung von HMI und Kundennutzen*, Interner Bericht, 2007

- [76] Naab, K.: *Heading Control – Ein System zur Fahrerunterstützung bei der Spurhaltung*, Seminar Fahrerassistenzsysteme, Haus der Technik Essen, Essen, 1998
- [77] Waldmann, P.: *Entwicklung eines Fahrzeugführungssystems zum Erlernen der Ideallinie auf Rennstrecken*, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, 2008
- [78] O. Föllinger: *Lineare Abtastsysteme-Methoden der Regelungs- und Automatisierungstechnik*, Oldenbourg Verlag, 5. Auflage, München 1993
- [79] Germann, S.: *Modellbildung und modellgestützte Regelung der Fahrzeuglängsdynamik* Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 309, VDI Verlag, Düsseldorf, 1997
- [80] Degani, A.: *Do you know what mode you're in? An analysis of mode error in everyday things*, Human-automation interaction: Research and practice. M. Mouloua and J.M. Koonce (Hrsg.). Lawrence Erlbaum, Mahwah, N.J., 1997
- [81] Krüger, H.-P. et al.: *AP 2100 Erstellen eines Modells des Lernverhaltens, INVENT Abschlussbericht Fahrverhalten und Mensch-Maschine-Interaktion (FVM)*, IZVW, Würzburg, 2002
- [82] Endsley, M. R.; Kiris, E. O.: *The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation*, Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society, Volume 37, Juni 1995
- [83] Wisselmann, D. et al.: *ConnectedDrive - ein methodischer Ansatz für die Entwicklung zukünftiger Assistenzsysteme*, Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, Garching, 2004
- [84] BMW Group München: *BMW Group Innovationstag 2006: Fahrerassistenzsysteme*, Pressemitteilung, 2006, <http://www.press.bmw.de>
- [85] Wickens, C. D.: *Imperfect and Unreliable Automation and its Implication for Attention Allocation and Situation Awareness*, Technical Report, University of Illinois, August 2000
- [86] RASSHOFER, R.; GRESSER, K.: *Multifunktionale Fahrumgebungserfassung durch lidarbasierte Rundumsensorik*, 4. Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS 2006, Löwenstein, Oktober 2006
- [87] dSpace Website, 2008, <http://www.dspace.de>
- [88] Etschberger, K.: *Controller-Area-Network Grundlagen, Protokolle, Bausteine, Anwendungen*, Carl Hanser Verlag München Wien, zweite, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, 2000
- [89] Adobe Website, Adobe Flash, 2008, <http://www.adobe.com/de/products/flash>
- [90] Endsley, M. R.; Garland D. J.: *Situation Awareness Analysis and Measurement*, Lawrence Erlbaum Associates, 2000

Betreute Diplomarbeiten, Veröffentlichungen und Patente

- [91] Gertges, J. P.: *Erkennung von Spurwechsellvorgängen umliegender Fahrzeuge im Stau auf Basis von Klassifikationsalgorithmen*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik an der Universität Dortmund, Januar 2007
- [92] Neumann, F.: *Weiterentwicklung einer Erkennung von Spurwechsellvorgängen umliegender Fahrzeuge im Stau auf Basis Bayesscher Netze*, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Prozessleittechnik an der TU Dresden, November 2008
- [93] Lindberg, T.; Schaller, T.; Gradenegger, B.: *Stauassistentz – Unterstützung des Fahrers durch Übernahme der Quer- und Längsführung im Stau*, 4. VDI-Fachtagung *Fahrer im 21. Jahrhundert – Human Machine Interface*. Braunschweig, 2007
- [94] Schaller, T.; Schiehlen, J.; Gradenegger, B.: *Stauassistentz – Unterstützung des Fahrers in der Quer- und Längsführung: Systementwicklung und Kundenakzeptanz*, 3. Tagung *Aktive Sicherheit durch Fahrerassistentz*, Garching, 2008
- [95] Schaller, T.; Funk, K.: *Querführung im Stau mit Lidar-Rundumsensorik*, DE102006021177 A1, EP1852325A, 2006
- [96] Schweigert, M.; Schambeck, B.; Lindberg T.; Schaller, T.: *Fahrer-Assistentz MMI / ABK für Querführungssysteme*, DE102007052258A, 2007