

---

# Gekapselte Trajektorienfolgeregelung für autonomes Fahren

Vom Fachbereich Maschinenbau an der  
Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## Dissertation

vorgelegt von

**Tobias Homolla M. Sc.**

aus Wiesbaden

Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller

Tag der Einreichung: 29.11.2022  
Tag der mündlichen Prüfung: 25.01.2023

Darmstadt 2023

D 17

---

Homolla, Tobias: Gekapselte Trajektorienfolgeregelung für autonomes Fahren  
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt  
Tag der mündlichen Prüfung: 25.01.2023

Dieses Dokument wird bereitgestellt von TUpriints – Publikationsservice der TU Darmstadt.  
<https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/>

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2023

Bitte verweisen Sie auf:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-231442

URI: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/23144>

Lizenz: CC BY-NC-ND 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (FZD) der Technischen Universität Darmstadt zur Bearbeitung des Forschungsprojekts UNICAR*agil*.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner, für die stets hilfreiche, unterstützende und zugleich fordernde Betreuung der Arbeit. Die regelmäßigen gemeinsamen Diskussionen haben die Zeit am Fachgebiet nachhaltig geprägt und die Dissertation in der jetzigen Form möglich gemacht. Weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Stiller für die Übernahme des Korreferats und das damit verbundene Interesse an der Forschungsarbeit.

Die Zeit bei FZD wird aufgrund der Vielzahl an positiven Erfahrungen in Erinnerung bleiben. Vielen Dank an die stets diskussionswilligen Kolleginnen und Kollegen, durch euch ist eine äußerst motivierende und freundschaftliche Atmosphäre am Fachgebiet entstanden. Selbiges gilt für die zahlreichen Abschlussarbeiter und studentischen Hilfskräfte.

Schlussendlich möchte ich Melissa, meiner Familie, Paul und Josie danken. Ohne eure Unterstützung über viele Jahre wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Darmstadt, November 2022.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Formelzeichen- und Indexverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XX</b>
<b>Kurzzusammenfassung</b> .....	<b>XXI</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit .....	1
1.2 Methodik der Arbeit und Forschungsfragen .....	4
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b> .....	<b>7</b>
2.1 Definitionen .....	7
2.1.1 Notation .....	7
2.1.2 Koordinatensysteme .....	8
2.1.3 Kapselung .....	11
2.1.4 Wiederverwendbarkeit und Austauschbarkeit .....	11
2.2 Grundlagen .....	12
2.2.1 IDEF0 Darstellung .....	12
2.2.2 Fahrzeug-Horizontaldynamik .....	13
2.2.3 Stabilitätsregelungen für Fahrzeuge .....	14
2.2.4 Regelungstechnische Grundlagen .....	15
2.2.5 Digitale Filter .....	18
2.3 Systemarchitekturen für Kraftfahrzeuge .....	18
2.3.1 Funktionsorientierte, dezentrale Systemarchitekturen für (automatisierte) Fahrfunktionen .....	19
2.3.2 Modulare und zentralisierte Systemarchitekturen für (automatisierte) Fahrfunktionen .....	21

2.3.3	Architektur der Bewegungsregelung für die automatisierte Fahrzeugführung	22
2.3.4	Systemarchitektur im Projekt UNICARagil .....	25
2.4	Stand der Technik für von der Kapselung betroffene Teilfunktionen .....	27
2.4.1	Lokalisierungsarchitekturen .....	27
2.4.2	Prädiktive Vorsteuerungen .....	28
2.4.3	Physikalische Umsetzbarkeit von Trajektorien .....	30
2.5	Zwischenfazit .....	32
<b>3</b>	<b>Systemarchitektur und resultierende Herausforderungen für die Bewegungsregelung .....</b>	<b>33</b>
3.1	Betrachtete Systemarchitektur .....	33
3.2	Aufgaben der Fahrdynamik- und Trajektorienregelung .....	36
3.2.1	Trajektorienfolgeregelung .....	36
3.2.2	Stabilisierungsregelung .....	37
3.2.3	Sicherstellung des Insassenkomforts .....	37
3.2.4	Selbstwahrnehmung und -bewertung .....	38
3.2.5	Randbedingungen für die Funktionserfüllung .....	38
3.2.6	Zusammenfassung .....	38
3.3	Anforderungsanalyse .....	39
3.3.1	Übergeordnete Anforderungen .....	40
3.3.2	Kapselungsbedingte Herausforderungen für die Bewegungsregelung.....	42
3.3.3	Anforderungsliste .....	45
3.4	Erweiterte Funktionsbeschreibung .....	46
3.5	Zusammenfassung und Zwischenfazit .....	48
<b>4</b>	<b>Sicherstellung konsistenter Lokalisierungsinformationen .....</b>	<b>49</b>
4.1	Anforderungsanalyse .....	49
4.2	Konzeptentwicklung .....	52
4.2.1	Offsetberechnung.....	53
4.2.2	Offsetkorrektur .....	54
4.2.3	Programmablauf .....	55
4.3	Zusammenfassung und Zwischenfazit .....	57
<b>5</b>	<b>Prädiktive Vorsteuerungsarchitektur.....</b>	<b>58</b>
5.1	Teilfunktionsspezifische Anforderungen.....	58
5.2	Konzeptentwicklung .....	62
5.2.1	Vorverarbeitung .....	63

5.2.2	Konzeptauswahl .....	66
5.2.3	Filterentwurf und -auslegung .....	68
5.3	Zusammenfassung .....	75
<b>6</b>	<b>Sicherstellung physikalisch umsetzbarer Soll-Trajektorien .....</b>	<b>78</b>
6.1	Teilfunktionsspezifische Anforderungen.....	78
6.1.1	Kinematische Grenzen .....	79
6.1.2	Dynamische Grenzen .....	81
6.1.3	Zusammenfassung der Anforderungen.....	82
6.2	Konzeptentwicklung .....	82
6.2.1	Kinematische Grenzen .....	82
6.2.2	Dynamische Grenzen .....	84
6.2.3	Gesamtschnittstelle .....	90
6.3	Zusammenfassung und Zwischenfazit .....	91
<b>7</b>	<b>Synthese einer Referenzarchitektur für die gekapselte FTR .....</b>	<b>92</b>
7.1	Teilfunktionen.....	92
7.1.1	Schnittstellenbeschreibung .....	93
7.1.2	Vorverarbeitung .....	94
7.1.3	Bestimmung des Kraftbedarfs .....	94
7.1.4	Control Allocation .....	97
7.1.5	Stellgrößenberechnung .....	99
7.2	Zusammenfassung .....	101
<b>8</b>	<b>Implementierung und Verifikation der Anforderungen an die gekapselte FTR</b>	<b>103</b>
8.1	Implementierung als ASOA Dienst .....	103
8.2	Testumgebungen .....	104
8.2.1	CarMaker Simulationsmodell .....	105
8.2.2	Software-in-the-Loop .....	105
8.2.3	Hardware-in-the-Loop .....	106
8.2.4	Realfahrzeuge .....	107
8.2.5	Planungsdienste .....	108
8.2.6	Parametrisierung der FTR .....	109
8.3	Verifikationstests .....	110
8.3.1	Validierung der Lokalisierung.....	110
8.3.2	Konsistente Lokalisierungsinformationen .....	115
8.3.3	Sicherstellung physikalisch umsetzbarer Trajektorien .....	121

8.3.4	Prädiktive Vorsteuerung .....	126
8.3.5	Weitere Versuche.....	130
8.4	Zusammenfassung .....	139
<b>9</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>141</b>
9.1	Zusammenfassung und Fazit .....	141
9.2	Ausblick .....	144
<b>A</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>146</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>162</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen.....</b>	<b>177</b>
	<b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>	<b>178</b>

# Formelzeichen- und Indexverzeichnis

Lateinische Buchstaben:

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$a$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Beschleunigung
$b$	-	Schrittweite
$c_\alpha$	$\frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$	Schräglaufsteifigkeit
$d$	-	Laplace Variable
$D$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Längsverzögerung
$E$	-	Ausführungsgrenzen
$ea, no, up$	-	Koordinatenachsen Navigationskoordinatensystem
$f$	Hz	Frequenz
$F$	N	Kraft
$g$	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Erdbeschleunigung
$i, j, k, o$	-	Laufvariablen
$l$	m	Radstand
$l_\psi$	m	Abstand Fahrzeugmittelpunkt-Radaufstandspunkt
$m$	kg	Fahrzeugmasse
$M$	Nm	Drehmoment
$n$	-	Anzahl
$O$	-	Landau Symbol
$p$	m	Position
$P$	W	Leistung
$\mathcal{P}$	m bzw. rad	Pose
$q$	-	Steigung
$r$	m	Radius
$R$	-	Rotationsmatrix
$\mathbb{R}$	-	Reeller Raum
$s, n$	-	Koordinatenachsen Frenet-Koordinatensystem
$t$	s	Zeit
$T$	-	Abbildung
$\mathcal{T}$	-	Soll-Trajektorie
$u$	-	Stellgröße
$v$	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Geschwindigkeit
$w$	m	Spurweite
$x, y, z$	-	Koordinatenachsen Fahrzeugkoordinatensystem
$X, Y, Z$	-	Koordinatenachsen ECEF-Koordinatensystem

Griechische Buchstaben:

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bezeichnung</b>
$\delta$	rad	Radlenkwinkel
$\Delta$	m bzw. rad	Abweichung
$\kappa$	1/m	Krümmung
$\lambda, \varphi, h$	rad bzw. m	Koordinatenachsen des GCS
$\mu$	-	Reibwert
$\psi$	rad	Gierwinkel
$\psi_c$	rad	Kurswinkel
$\tau$	s	Zeitkonstante / Zeitspanne
$\theta$	-	Koeffizienten der FIR-Filter
$\Theta$	kg · m <sup>2</sup>	Massenträgheitsmoment
$\xi$	-	Flag (Boolesche Variable)

Indizes:

<b>Zeichen</b>	<b>Bezeichnung</b>
$\psi$	Gierfreiheitsgrad
$\lambda, \varphi, h$	Koordinatenachsen des GCS
$F$	Frenet-Koordinatensystem
$G$	Geodätisches Koordinatensystem
$N$	Navigationskoordinatensystem
$V$	Fahrzeugkoordinatensystem / Fahrzeug
$a$	Beschleunigung
$ea, no, up$	Koordinatenrichtungen Navigationskoordinatensystem
$i, j, k, o$	Laufvariablen
$s, n$	Koordinatenrichtungen Frenet-Koordinatensystem
$v$	Geschwindigkeit
$x, y, z$	Koordinatenrichtungen Fahrzeugkoordinatensystem
act	Istgröße (actual)
c	Kurs (course)
d	Demand
diff	Differenz
drift	Drift (der FZS)
dyn	Dynamisch
err	Error
f	Front

<b>Zeichen</b>	<b>Bezeichnung</b>
ff	Vorsteuerung (feedforward)
FIR	Finite-Impulse-Response
FTR	Fahrdynamik- und Trajektorienregelung
FZS	Fahrdynamikzustandsschätzung
grenz	Grenzwert
GT	Ground Truth
korr	Korrigiert
Lok	Lokalisierung
max	Maximum
min	Minimum
NP	Neuplanung
off	Offset
pos	Position
PT1	PT1-Glied
r	Rear
real	Realer Wert
ref	Referenz
set	Sollgröße (setpoint)
sim	Simulation
sp	Spezifisch
t	Translation
TP	Trajektorienplanung
tr	Traction
traj	Trajektorie
Tt	Totzeit
w	Wheel

## Abkürzungsverzeichnis

A	Anforderung
ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
ASOA	Automotive Service-Oriented Software Architecture
ASR	Antriebsschlupfregelung
AUTOSAR	Automotive Open System Architecture
BLS	Bi-Level-Stabilisierung
DDS	Data Distribution Service
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECEF	Earth-Centered-Earth-Fixed
ECU	Electronic Control Unit
ENU	East-North-Up
ESC	Electronic Stability Control
ETRS89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989
FF	Forschungsfrage
FIR	Finite Impulse Response
FTR	Fahrdynamik- und Trajektorienregelung
FZD	Fahrzeugtechnik Darmstadt
FZS	Fahrdynamikzustandsschätzung
GCS	Global Coordinate System
GNSS	Global Navigation Satellite System
HiL	Hardware-in-the-Loop
HLS	High-Level-Stabilisierung
IDEF	Integration Definition
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIR	Infinite Impulse Response
IMU	Inertial Measurement Unit
ISO	Internationale Organisation für Normung
ITRS	Internationales Terrestrisches Referenzsystem
LKAS	Lane Keeping Assist System
LLS	Low-Level-Stabilisierung
LTI	Linear Time-Invariant

MCU	Motor Control Unit
MPC	Model Predictive Control
MPSoC	Multiprocessor System on a Chip
ODD	Operational Design Domain
PT	Powertrain
PTP	Precision Time Protocol
ROS	Robot Operating System
RTK	Real Time Kinematic
RTOS	Real Time Operating System
RTPS	Real-Time-Publish-Subscribe
SADT	Structured Analysis and Design Technique
SAE	Society of Automotive Engineers
SiL	Software-in-the-Loop
SOA	Service Oriented Architecture
SPA	Sense-Plan-Act
TAI	Temps Atomique International
TP	Trajektorienplanung
Z	Zustand

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Dynamische Rekonfiguration von Software-Diensten zur Laufzeit durch einen zentralen Orchestrator, basierend auf dem derzeitigen Fahrzeug-Betriebsmodus. Einzelne Dienste können dabei in verschiedenen makroskopischen Kontexten verwendet werden, ohne selbst Kenntnis über den Betriebsmodus zu besitzen. ....	3
Abbildung 1-2:	Methodik der Arbeit und zugehörige Forschungsfragen.....	6
Abbildung 2-1:	Darstellung des verwendeten ellipsoidischen Koordinatensystems mit den Achsen $\lambda$ , $\varphi$ und der Höhe $h$ über dem gewählten Referenzellipsoid. Weiterhin dargestellt ist das verwendete kartesische ECEF Koordinatensystem mit den Achsen $X$ , $Y$ und $Z$ . Eigene Darstellung nach Becker und Hehl. ....	9
Abbildung 2-2:	Darstellung des verwendeten kartesischen ECEF Koordinatensystems mit den Achsen $X$ , $Y$ und $Z$ sowie des lokalen kartesischen Navigationskoordinatensystems mit den Achsen $ea$ , $no$ und $up$ . Die Achsen $ea$ und $no$ bilden eine Tangentialebene an das Erdellipsoid im gewählten Ursprung des Systems. ....	9
Abbildung 2-3:	Verwendetes fahrzeugfestes Koordinatensystem. Die $x$ -Achse zeigt dabei in Richtung der Vorzugs-Fahrtrichtung des Fahrzeugs. ....	10
Abbildung 2-4:	Verwendetes Frenet-Koordinatensystem. Der Ursprung ist definiert durch die Soll-Position in der empfangenen Trajektorie, die Achsenrichtungen $s$ und $n$ ergeben sich aus der jeweiligen Soll-Geschwindigkeitsrichtung $\psi_{c,set}$ . Die Ist-Positionen $p_{act,ea}$ und $p_{act,no}$ liegen nicht auf dem Pfad der Trajektorie, was auf eine Regelabweichung hinweist. $p_{set,ea}$ und $p_{set,no}$ werden aus der diskreten Soll-Trajektorie interpoliert. ....	10
Abbildung 2-5:	Allgemeiner Knoten in IDEF0 Darstellung. ....	12
Abbildung 2-6:	Grundlegende Struktur einer Steuerung (a), Regelung (b) und einer Regelung mit zwei Freiheitsgraden (c). Eigene Darstellung nach Lunze. .	16
Abbildung 2-7:	Koexistenz verschiedener Fahrdynamikregelsysteme. Eigene Darstellung nach Laumanns. ....	20
Abbildung 2-8:	Rückführungsstrategien des fahrdynamischen Ist-Zustands innerhalb der Bewegungsregelung automatisierter Kraftfahrzeuge nach Werling. ....	23
Abbildung 2-9:	Prinzipskizze der E/E-Architektur im Projekt UNICARagil, angelehnt an die Struktur des menschlichen Gehirns. ....	25
Abbildung 2-10:	Seitliches Einparken des UNICARagil-Fahrzeugs autoSHUTTLE mit 90° Radlenkwinkel an allen Rädern durch Verwendung der unabhängigen Dynamikmodule. ....	26

Abbildung 2-11: Prinzipskizze der ASOA-Softwarearchitektur im Projekt UNICAR <i>agil</i> . Die Middleware ermöglicht die dynamische Rekonfiguration von Diensten basierend auf dem derzeitigen Fahrzeug-Betriebsmodus. ....	27
Abbildung 2-12: Prinzipskizze einer Lokalisierungsarchitektur mit unabhängigen Fusionsfiltern und einem nachgelagerten Voter zur Auswahl der besten Lösung (basierend auf zuvor definierten Qualitätskriterien). ....	28
Abbildung 3-1: Funktionale Beschreibung der automatisierten Fahrzeugführung auf oberster Ebene (Knoten A-0) in IDEF0 Darstellung. ....	34
Abbildung 3-2: Funktionsbeschreibung der automatisierten Fahrzeugführung nach dem SPA-Paradigma mit zugehörigen Teilfunktionen in IDEF0 Darstellung (Knoten A0). ....	35
Abbildung 3-3: Grundlegende Funktionsstruktur der gekapselten FTR in IDEF0 Darstellung (Knoten A3). ....	39
Abbildung 3-4: Entstehung eines lateralen Regelfehlers durch unabhängige und inkonsistente Lokalisierungsinformationen für die planende und ausführende Ebene der autonomen Fahrzeugführung. ....	43
Abbildung 3-5: Erweiterte Funktionsstruktur der FTR in IDEF0 Darstellung mit grau schraffierten notwendigen Erweiterungen als Gegenmaßnahmen für kapselungsbedingte Herausforderungen der FTR. ....	46
Abbildung 3-6: Komponenten der Teilfunktion Lokalisierungsangleichung in IDEF0 Darstellung mit grau schraffierten Erweiterungen zur Vermeidung eines Funktionalitäts- bzw. Performanceverlusts durch die Kapselung der FTR. ....	47
Abbildung 3-7: Komponenten der FTR-Teilfunktion Kraftbedarfsbestimmung in IDEF0 Darstellung mit grau schraffierten Erweiterungen zur Vermeidung eines Funktionalitäts- bzw. Performanceverlusts durch die durchgeführte Kapselung. ....	47
Abbildung 4-1: Grundlegende modulare Lokalisierungs- und Regelungsarchitektur als Ausgangssituation für die Entwicklung der Lokalisierungsangleichung. .	50
Abbildung 4-2: Programmablauf der Lokalisierungsangleichung. Der dargestellte Algorithmus wird mit der Frequenz der FTR ( $f_{FTR}$ ) innerhalb des Zyklus der FTR ausgeführt und ist den übrigen Berechnung vorangestellt. ....	56
Abbildung 5-1: Soll-Trajektorie mit beispielhaften, für die prädiktive Vorsteuerung genutzten, zukünftigen Systemzuständen. ....	63

Abbildung 5-2:	Prädiktive Vorsteuerung auf Basis eines einzelnen zukünftigen Sollwerts für die Soll-Beschleunigung des Fahrzeugs in der Soll-Trajektorie. Durch eine frühzeitige Anforderung der Soll-Beschleunigung (gepunktete Linie) wird eine Systemreaktion ohne Geschwindigkeitsfehler nach Erreichen des stationären Zustands erzielt. Der Aktor ist als lineares PT1-Glied mit der Zeitkonstante $\tau_{PT1} = 0,2$ s modelliert. ....	67
Abbildung 5-3:	Erforderlicher Ruck bzw. Stellrate für die in Abbildung 5-2 dargestellte Systemreaktion. Die Unstetigkeit zum Zeitpunkt $t = -0,2$ s erzeugt eine Überhöhung der Stellrate, was eine in praktischer Anwendung nicht aufzulösende Herausforderung für den beteiligten Aktor darstellt. ....	68
Abbildung 5-4:	Beispielhafte Impulsantwort des kombinierten Systems aus dem PT1 Aktor in Abbildung 5-2 und einer prädiktiven Vorsteuerung auf Basis der gespiegelten Aktor-Systemdynamik. ....	69
Abbildung 5-5:	Beispielhafte Reaktion des Stellantriebs auf einen Einheitssprung (gepunktete Linie) der Soll-Beschleunigung mit (durchgezogene Linie) und ohne (gestrichelte Linie) prädiktive Vorsteuerung auf Basis der gespiegelten Aktor-Systemdynamik. ....	70
Abbildung 5-6:	Sprungartige Umplanung der Soll-Trajektorie aufgrund eines zuvor unerkannten Objekts. ....	72
Abbildung 5-7:	Filterkoeffizienten des ursprünglichen IIR-Filters (nur die ersten 50 Elemente sind dargestellt) und des angepassten FIR-Filters. ....	73
Abbildung 5-8:	Übersicht der entwickelten prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur auf Basis von FIR-Filtern in IDEF0 Darstellung (Knoten A311). ....	77
Abbildung 6-1:	Zulässige Positionen für den Momentanpol des Fahrzeugs (graue Fläche) bei Annahme der Radlenkwinkelgrenzen des UNICARagil-Projekts ( $\delta_{1 4,max} = 90^\circ$ and $\delta_{1 4,min} = -60^\circ$ am linken Vorder- und rechten Hinterrad sowie $\delta_{2 3,max} = 60^\circ$ und $\delta_{2 3,min} = -90^\circ$ am rechten Vorder- und linken Hinterrad). Die gestrichelten Linien stellen die orthogonalen Vektoren an den Grenzen der Radlenkwinkel dar, die den zulässigen Bereich für den Momentanpol des Fahrzeugs begrenzen. Die Spurweite $w$ und der Radstand $l$ des Fahrzeugs korrespondieren mit den Verbindungslinien der Radaufstandspunkte. ....	80
Abbildung 6-2:	Beschleunigungsgrenzen des Fahrzeugs, dargestellt als modifizierter Kamm'scher Reibungskreis. Die Längsbeschleunigung im Frenet-Koordinatensystem wird durch die spezifische Antriebsleistung und die aktuelle Geschwindigkeit begrenzt. Die Längsverzögerung und die Querschleunigung werden nur durch die Reibwertverhältnisse zwischen Reifen und Fahrbahn begrenzt. Die Achsen werden in Abhängigkeit von der Straßenneigung $q_s$ und $q_n$ verschoben. ....	86

Abbildung 7-1:	Entwickelte Reglerarchitektur, bestehend aus einer unabhängigen prädiktiven Vorsteuerung und einer linearen Zustandsrückführung. Die Vorsteuerung und Zustandsrückführung wird für jeden der drei unabhängigen Freiheitsgrade des Fahrzeugs unabhängig implementiert und die Kraftbedarfe anschließend summiert. ....	95
Abbildung 7-2:	Kinematische Beziehungen zur Berechnung der für die Gierbewegung benötigten Kräfte. Die Zerlegung von $M_{d,\psi}$ maximiert den Hebelarm $l_\psi$ zur Fahrzeugmitte, so dass das Giermoment mit dem geringsten möglichen Kräften an den Radaufstandspunkten erzeugt wird. ....	98
Abbildung 7-3:	Programmablauf der FTR und der unterstützenden Dienste der Trajektorienvorverarbeitung und Ausführungsgrenzenbestimmung. Grün markierte Schritte sind zur Vermeidung kapselungsbedingter Defizite zwingend erforderlich. Dargestellt ist jeweils ein Zyklus der Dienste. ....	102
Abbildung 8-1:	Softwarearchitektur des ASOA-Dienstes der FTR. ....	104
Abbildung 8-2:	Gesamtarchitektur der verwendeten SiL-Testumgebung mit dem synchronisierten CarMaker Programmzyklus und der über ROS angebotenen online-TP. Die Wahl zwischen on- und offline-TP erfolgt durch Umschaltung vor der Trajektorienvorverarbeitung. ....	106
Abbildung 8-3:	Grundlegende Struktur der verwendeten HiL-Testumgebung. ....	107
Abbildung 8-4:	Dienstarchitektur innerhalb der Realfahrzeuge im Projekt UNICAR <i>agil</i> . ....	108
Abbildung 8-5:	Versuchsaufbau zur Überprüfung der Genauigkeit der FZS während der Fahrt. Eigene Darstellung in Anlehnung an Holder et al. ....	111
Abbildung 8-6:	Hinterlassene Spurmarkierung im Rasierschaum nach Fahrt durch den Versuchsaufbau. ....	111
Abbildung 8-7:	Positionierung des Fahrzeugs relativ zu den bekannten, GCS-referenzierten Messpunkten unter Zuhilfenahme eines Kreuzlinienlasers. Die Außenkante des dargestellten Reifens stimmt mit der Position des bekannten Messpunkts überein. ....	112
Abbildung 8-8:	Dynamischer Positionsfehler der FZS bei Fahrten mit 5 km/h und 15 km/h. ....	113
Abbildung 8-9:	Statischer Positionsfehler der FZS während der 6-minütigen Messung im Stillstand. ....	114
Abbildung 8-10:	Testszenario für die Lokalisierungsangleichung. Die rote Linie zeigt den translatorischen Pfad der von Gottschalg und Leinen real gefahrenen Trajektorie durch den Darmstädter "Citytunnel". ....	116
Abbildung 8-11:	Aus der Messung von Gottschalg und Leinen extrahierte Posendrift der FZS bei Fahrt durch den Darmstädter "Citytunnel". ....	117
Abbildung 8-12:	Modellierter "Citytunnel" innerhalb der CarMaker-Simulation. ....	117
Abbildung 8-13:	Posenabweichung des Fahrzeugs bei Tunneldurchfahrt mit deaktivierter Lokalisierungsangleichung. ....	118

Abbildung 8-14: Posenabweichung des Fahrzeugs bei Tunneldurchfahrt mit aktivierter Lokalisierungsangleichung.....	119
Abbildung 8-15: Einfluss eines hohen Gradienten des Posen-Offsets auf die Lokalisierungsangleichung.....	120
Abbildung 8-16: Zuziehende Kreisfahrt als Testmanöver für die Begrenzung der Fahrzeug-Querbesehleunigung. Die Kurvenkrümmung steigt mit der gefahrenen Strecke monoton an. ....	122
Abbildung 8-17: Anfahrt an einer 10 %igen Steigung als Testmanöver für die Beschleunigungsbegrenzung durch die Aktorik des Fahrzeugs. ....	123
Abbildung 8-18: Von der TP geplante Soll-Längsgeschwindigkeiten des Fahrzeugs für die zuziehende Kreisfahrt. ....	124
Abbildung 8-19: Absolute Positionsabweichung des Fahrzeugs während des Szenarios der zuziehenden Kreisfahrt.....	124
Abbildung 8-20: Längs-Positionsabweichung des Fahrzeugs während der Anfahrt an einer 10 %igen Steigung. ....	125
Abbildung 8-21: Szenario zum Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur. Dargestellt ist das Ego-Fahrzeug (gelb), der translatorische Pfad der gefahrenen Soll-Trajektorie und ein ausparkendes Fahrzeug als dynamisches Hindernis (blau). Die grüne Fläche symbolisiert eine Verdeckung, z. B. durch Baumbewuchs. ....	127
Abbildung 8-22: Längsabweichung des Fahrzeugs während des Szenarios zum Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur. ....	128
Abbildung 8-23: Querabweichung des Fahrzeugs während des Szenarios zum Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur. ....	128
Abbildung 8-24: Gierabweichung des Fahrzeugs während des Szenarios zum Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur. ....	129
Abbildung 8-25: Doppelter Fahrstreifenwechsel als Testszenario für die Robustheit ggü. Latenzen der Planungsebene. Der Gierwinkel des Fahrzeugs wird so gewählt, dass während des gesamten Manövers $\psi_{set} = \psi_{c,set}$ gilt. ....	131
Abbildung 8-26: Translatorischer Pfad der beiden gefahrenenen Soll-Trajektorien zum Nachweis der Unabhängigkeit der gekapselten FTR von der Quelle der empfangenen Soll-Trajektorie. Die Soll-Trajektorie der ersten TP führt von links nach rechts und wird in Vorzugsrichtung abgefahren. Die Soll-Trajektorie der zweiten TP wird von rechts nach links entgegen der Vorzugsrichtung (ohne Wenden) befahren. Am rechten Ende des Pfades findet eine dynamische Rekonfiguration durch den Orchestrator statt. ....	133

Abbildung 8-27:	Von der FTR berechnete Soll-Lenkwinkel für die 4 Dynamikmodule des Fahrzeugs während des Szenarios zum Nachweis der Unabhängigkeit der gekapselten FTR von der Quelle der empfangenen Soll-Trajektorie. Der Zeitpunkt der Umschaltung der TP-Dienste ist durch die gestrichelte vertikale Linie gekennzeichnet.....	134
Abbildung 8-28:	Soll-Gierwinkel und Soll-Kurswinkel für einen Slalom ohne Gierbewegung des Fahrzeugs. Die Nulllage der Winkel ergibt sich aus der Ausrichtung der Runway des "August-Euler-Flugplatzes" in Griesheim. .	135
Abbildung 8-29:	Soll-Gierwinkel und Soll-Kurswinkel für eine konstante Translation des Fahrzeugs mit einer gleichzeitigen Rotation um die Hochachse. ....	136
Abbildung 8-30:	Soll-Gierwinkel und Soll-Kurswinkel für einen seitlichen Einparkvorgang.	136
Abbildung 8-31:	Von der FTR berechnete Soll-Lenkwinkel für den Slalom ohne Gieraktivität des Fahrzeugs.....	137
Abbildung 8-32:	Regelabweichungen der drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs in Frenet-Koordinaten während des Slaloms ohne Gieraktivität des Fahrzeugs. ....	137
Abbildung 8-33:	Von der FTR berechnete Soll-Lenkwinkel für die konstante Translation mit Rotation um die Hochachse des Fahrzeugs. ....	138
Abbildung 8-34:	Regelabweichungen der drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs in Frenet-Koordinaten während der konstanten Translation mit Rotation um die Hochachse des Fahrzeugs. ....	138
Abbildung 8-35:	Regelabweichungen der drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs in Frenet-Koordinaten während des seitlichen Einparkens des Fahrzeugs. ....	139
Abbildung A-1:	Zustände und mögliche Transitionen der FTR. ....	147
Abbildung A-2:	Gesamtarchitektur des eingesetzten CarMaker Simulationsmodells des UNICARagil Fahrzeugs autoSHUTTLE mit elektrischer Einzelradaktorik.	149
Abbildung A-3:	Normierte Impulsantwort der Antriebsaktorik bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 10 km/h, gesampelt mit $f_{\text{FIR}} = 100$ Hz.....	151
Abbildung A-4:	Normierte Impulsantwort der Lenkaktorik bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 10 km/h, gesampelt mit $f_{\text{FIR}} = 100$ Hz. ....	152
Abbildung A-5:	Kumulierte Summe der Koeffizientenwerte der Antriebs-IIR über der Anzahl der Filterelemente.....	152
Abbildung A-6:	Kumulierte Summe der Koeffizientenwerte der Lenkungs-IIR über der Anzahl der Filterelemente.....	153
Abbildung A-7:	Finale FIR-Filterkoeffizienten zur Kompensation der Systemdynamik der Antriebsaktorik. ....	153
Abbildung A-8:	Finale FIR-Filterkoeffizienten zur Kompensation der Systemdynamik der Lenkaktorik.....	154

Abbildung A-9:	Differenz zwischen Längs-Positionsabweichung während des Referenzszenarios ohne Umschaltung sowie der Simulation mit sprungartiger Umschaltung der Soll-Trajektorie zur Untersuchung des Einflusses einer fehlerhaften Prädiktion im Rahmen der Vorsteuerung. ....	155
Abbildung A-10:	Differenz zwischen Quer-Positionsabweichung während des Referenzszenarios ohne Umschaltung sowie der Simulation mit sprungartiger Umschaltung der Soll-Trajektorie zur Untersuchung des Einflusses einer fehlerhaften Prädiktion im Rahmen der Vorsteuerung. ....	156
Abbildung A-11:	Differenz zwischen Gierabweichung während des Referenzszenarios ohne Umschaltung sowie der Simulation mit sprungartiger Umschaltung der Soll-Trajektorie zur Untersuchung des Einflusses einer fehlerhaften Prädiktion im Rahmen der Vorsteuerung. ....	156
Abbildung A-12:	Differenz zwischen den Regelabweichungen während Szenario 1 und 2 zum Nachweis der Robustheit ggü. Latenzen der Planungsebene. ....	157
Abbildung A-13:	Differenz zwischen den Regelabweichungen während Szenario 1 und 3 zum Nachweis der Robustheit ggü. Jitter der Planungsebene. ....	157

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Kategorien der Aktuierung von mechatronischen Systemen auf Basis der Definition von Bernhard. ....	14
Tabelle 3-1:	Abgeleitete Anforderungen für gekapselte FTR innerhalb der definierten Systemarchitektur. ....	45
Tabelle 4-1:	Teilfunktionsspezifische Anforderungen für die Lokalisierungsangleichung. ....	52
Tabelle 5-1:	Teilfunktionsspezifische Anforderungen für die prädiktive Vorsteuerungsarchitektur der FTR in einer gekapselten Systemarchitektur. ....	61
Tabelle 5-2:	Relevante Größen aus der Soll-Trajektorie zur Berechnung der Aktoraktivität. ....	65
Tabelle 6-1:	Teilfunktionsspezifische Anforderungen für die Sicherstellung physikalisch umsetzbarer Soll-Trajektorien. ....	83
Tabelle 8-1:	Verwendete Reibwerte für die Versuche zur Begrenzung der maximalen Querschleunigung. ....	122
Tabelle 8-2:	Verwendete Grenzen für die Versuche zur Analyse der maximalen Längsbeschleunigung. ....	123
Tabelle 8-3:	Testszenarien zum Nachweis der Robustheit der FTR ggü. Latenzen der Planungsebene. ....	131
Tabelle A-1:	Anforderungen an gekapselte FTR, verwendete Verifikationsmethode und Testergebnisse. ....	158
Tabelle A-2:	Gesamtstruktur der von der TP bereitgestellten Soll-Trajektorie im GCS-Koordinatensystem. ....	159
Tabelle A-3:	Gesamtstruktur der Soll-Trajektorie nach der Trajektorienvorverarbeitung im Navigationskoordinatensystem. ....	160
Tabelle A-4:	Gesamtstruktur der Schnittstelle zur FZS. ....	160
Tabelle A-5:	Gesamtstruktur der Schnittstelle zu den Dynamikmodulen. ....	161

## Kurzzusammenfassung

Die Bewegungsregelung als Teil der autonomen Fahrzeugführung besteht aus den beiden Teilfunktionen der Bewegungsplanung und Bewegungsausführung. Beide wurden im Kontext von Fahrerassistenzsystemen und Anwendungen aus der Robotik bereits intensiv untersucht, jedoch haben bestehende Ansätze gemein, dass sie häufig auf einen spezifischen Anwendungsfall zugeschnitten sind sowie die beiden Teilfunktionen als Einheit betrachten und daher integriert entwickeln.

In der jüngeren Vergangenheit haben modulare, serviceorientierte Systemarchitekturen für Kraftfahrzeuge an Bedeutung gewonnen, sowohl als Forschungsgegenstand als auch in kommerziellen Produkten. Sie sollen u. a. die resultierende Systemkomplexität senken, die Wiederverwertbarkeit von entwickelten Modulen in verschiedenen Anwendungen fördern sowie die Wart- und Updatebarkeit der Fahrzeuge verbessern. Die Modularisierung durch funktionale Trennung der Bewegungsplanung und –ausführung ermöglicht die konsequente Kapselung der ausführenden Fahrdynamik- und Trajektorienregelung (FTR), mit dem Ziel der Minimierung von Abhängigkeiten innerhalb des konsistenten Gesamtsystems. Dies legt die Grundlage für eine dynamische Rekonfiguration der Dienste im Fahrzeug, basierend auf dem derzeitigen Betriebsmodus.

Neben den genannten Vorteilen führt die Entkopplung der beiden Teilfunktionen der Bewegungsregelung zu neuartigen Herausforderungen wie inkonsistenten Lokalisierungsinformationen, einer grundlegenden Asynchronität der Funktionen und der Notwendigkeit, die Bewegungsplanung möglichst ohne fahrzeugspezifische Adaptionen zu gestalten. Aufbauend auf dieser Analyse leiten sich folgende grundlegenden Forschungsfragen ab:

- Welche Gesamtfunktion und Teilfunktionen muss eine FTR in der betrachteten Systemarchitektur erfüllen?
- Welche Anforderungen an eine FTR entstehen durch eine funktionale Trennung von Bewegungsplanung und -ausführung?
- In welchen Teilbereichen der Reglerentwicklung und -auslegung entstehen durch die Kapselung Nachteile? Wie kann diesen Nachteilen begegnet werden, so dass sie kein Defizit darstellen?
- Welche Folgen hat die Funktionstrennung, insbesondere auf die Architektur der Bewegungsregelung?

Aufbauend auf einer Anforderungsdefinition an die betrachtete FTR liegt als Ergebnis der Arbeit eine Analyse der Herausforderungen für die Bewegungsregelung innerhalb der definierten Sys-

temarchitektur vor. Um die Auswirkungen dieser Herausforderungen auf die Fahrzeugführung zu minimieren, sind geeignete Gegenmaßnahmen erforderlich.

Durch die Trennung der planenden und ausführenden Ebene führen inkonsistente Lokalisierungs-  
informationen zu unerwünschtem Verhalten wie einer systematischen Regelabweichung. Die  
Arbeit stellt den Lösungsraum dar, um solche Effekte zu vermeiden. So wird u. a. gezeigt, dass  
eine zusätzliche Lokalisierungsangleichung in Form einer Posen-Offsetkorrektur erforderlich ist,  
um den Einfluss abweichender Lokalisierungsinformationen auf die Regelgüte zu minimieren.

Die Planung kinematisch und dynamisch nicht umsetzbarer Trajektorien hat einen negativen  
Einfluss auf die Fahrzeugführung und muss daher verhindert werden. Es wird dargelegt, dass  
über eine Rückmeldung von kinematischen und dynamischen Grenzen an die Bewegungsplanung  
sichergestellt werden kann, dass die Planungsebene nur erfüllbare Aufgaben an die FTR stellt und  
dass der Planungsalgorithmus darüber hinaus nicht an das betrachtete Fahrzeug adaptiert werden  
muss.

Anforderungen hinsichtlich der Unabhängigkeit von einer konkreten Planungsinstanz sowie der  
Robustheit ggü. Planungslatenzen und Asynchronitäten werden durch die Definition einer geeig-  
neten Trajektorienschnittstelle erfüllt. Die Schnittstelle ermöglicht darüber hinaus die Ausnutzung  
der Kenntnis zukünftiger Systemzustände im Rahmen einer prädiktiven Vorsteuerung, wodurch  
eine Umsetzung des transienten Fahrzeugverhaltens im offenen Regelkreis ermöglicht und somit  
eine Anpassung der Bewegungsplanung auf die nachgelagerte Aktorik verhindert wird. Zusätzlich  
wird demonstriert, dass die Planungsinstanz Anforderungen hinsichtlich der Übergänge zwischen  
geplanten Trajektorien erfüllen muss, da die FTR Limitationen bei einer dynamischen Änderung  
der Trajektorie unterliegt.

Auf Basis der zuvor identifizierten Handlungsbedarfe wird eine Referenzarchitektur und  
-implementierung für die FTR entwickelt sowie in Versuchen mit Simulationen und Realfahr-  
zeugen nachgewiesen, dass die zuvor identifizierten Herausforderungen mit den aufgezeigten  
Lösungen beherrscht werden können. Mit der Arbeit wird somit die Grundlage für informierte Ent-  
scheidungen über die Fahrzeug-Systemarchitektur gelegt, da die mit einer funktionalen Trennung  
der planenden und ausführenden Ebene verbundenen Vor- bzw. Nachteile transparent ersichtlich  
sind. Die so gewonnene Flexibilität bei der Gestaltung der übergeordneten Systemarchitektur  
unterstützt Zielsetzungen wie die Modularisierung und Serviceorientierung, für die in der Zukunft  
eine stetig steigende Bedeutung erwartet wird.

## **Abstract**

The motion control as part of autonomous vehicle guidance consists of the two sub-functions motion planning and motion execution. Both have already been studied intensively in the context of driver assistance systems and applications from robotics, but existing approaches have in common that they are often tailored to a specific use case as well as consider the two sub-functions as a unit and therefore develop them in an integrated manner.

In the recent past, modular, service-oriented system architectures for motor vehicles have gained importance, both as a research subject and in commercial products. Modularization is intended to, among other things, reduce the resulting system complexity, promote the reusability of developed modules in different applications, and improve the maintainability and updatability of vehicles. Functional separation of motion planning and execution enables the encapsulation of the executing trajectory tracking control, with the goal of minimizing dependencies within the consistent overall system. This lays the foundation for dynamic reconfiguration of the involved services based on the current vehicle operating mode.

In addition to the aforementioned benefits, the separation of the sub-functions leads to novel challenges, such as inconsistent localization information, a fundamental asynchrony of functions, and the need to design motion planning without vehicle-specific adaptations. Building on this analysis, the following research questions are derived:

- Which overall function and sub-functions must a trajectory tracking control fulfill in the system architecture under consideration?
- Which requirements for a trajectory tracking control arise from a functional separation of motion planning and execution?
- In which areas of controller development and design does the encapsulation result in disadvantages? How can these disadvantages be counteracted so that they do not represent a deficit?
- What are the consequences of the separation of functions, especially on the architecture of the motion control?

Based on a definition of requirements for the trajectory tracking control under consideration, the result of the work is an analysis of the challenges for motion control within the defined architecture. Appropriate countermeasures are required to minimize the impact of these challenges on the overall performance of the vehicle control system.

Due to the separation of the planning and execution levels, inconsistent localization information lead to undesired behavior such as a systematic control error. The work presents the solution space

to avoid such effects. Among other things, it is shown that an additional localization alignment in the form of a pose offset correction is required to minimize the influence of deviating localization information on the control performance.

The planning of kinematically and dynamically unfeasible trajectories has a negative influence on the trajectory tracking control and must therefore be prevented. It is shown that a feedback of kinematic and dynamic limits to the motion planning algorithms can ensure that the planning stage only presents achievable tasks to the trajectory tracking control and that the planning algorithm does not need to be adapted to the vehicle under consideration.

Requirements regarding the independence from a specific planning instance as well as the controller's robustness towards planning latencies and asynchronies are fulfilled by the definition of a suitable trajectory interface. Furthermore, the interface allows the exploitation of knowledge about future system states in the context of a predictive feedforward control, enabling an open-loop execution of transient vehicle behavior and preventing a necessary adaptation of the motion planning to the downstream actuator systems. In addition, it is demonstrated that the planning algorithms must satisfy requirements regarding transitions between planned trajectories, since the trajectory tracking control is subject to limitations when the trajectory changes dynamically.

Based on the previously identified required actions, a reference architecture and implementation for the trajectory tracking control is developed and it is demonstrated in experiments in simulations and with real vehicles that the previously identified challenges can be handled with the developed solutions. The research thus enables informed decisions on the system architecture used for automated vehicles since the advantages and disadvantages related to a functional separation of planning and control stages are evident for developers. The flexibility gained in the design of the higher-level system architecture hence supports objectives such as modularization and service-orientation, which are expected to become increasingly important in the future.

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Bereits ohne die Integration automatisierter Fahrfunktionen sind moderne Kraftfahrzeuge komplexe technische Systeme, die aus einer Vielzahl verschiedener Hard- und Softwarekomponenten bestehen. Zur Darstellung übergeordneter (Fahr-)Funktionen ist erforderlich, dass die einzelnen Komponenten in einer Systemarchitektur miteinander integriert werden, wobei häufig ein Spannungsfeld gegensätzlicher Zielsetzungen berücksichtigt werden muss. In der Vergangenheit wurde dazu häufig eine funktionsorientierte, dezentrale Architektur gewählt, in der die Komponenten auf eine vorab festgelegte Art und Weise miteinander kombiniert werden, um eine bestimmte Funktion zu realisieren. Wird auf diese Weise eine weitere Funktion zum Gesamtsystem hinzugefügt, kann es zu unnötigen Redundanzen der beteiligten Hard- und Software und somit zu einer Steigerung der Systemkomplexität kommen<sup>1</sup>.

Durch die stetig steigende Anzahl an Funktionen moderner Kraftfahrzeuge ist die funktionsorientierte Herangehensweise bei der Entwicklung der Systemarchitektur an zunehmende Grenzen gestoßen<sup>2a</sup>. So ist die Anzahl verschiedener Steuergeräte innerhalb der Fahrzeuge kontinuierlich angestiegen<sup>3</sup>. Noch deutlicher ist dieser Effekt anhand der im Fahrzeug vorhandenen Softwarezeilen (Lines-of-Code) zu erkennen. Im Zeitraum von 2010 bis 2016 stiegen die Lines-of-Code von durchschnittlich ca. 10 Millionen auf ca. 150 Millionen Zeilen an<sup>4</sup>. Durch die zunehmende Verbreitung automatisierter Fahrfunktionen wird erwartet, dass sich dieser Effekt noch signifikant verstärkt und über 300 Millionen Lines-of-Code erforderlich werden, falls keine geeigneten Gegenmaßnahmen getroffen werden<sup>5</sup>.

Die angeführte steigende Komplexität bringt eine Vielzahl von negativen Effekten mit sich. So steigt der Aufwand für Tests zur Freigabe der entwickelten Funktionen und damit auch die damit verbundenen Kosten überproportional an<sup>2a</sup>. Gleichzeitig sinken die Zeiträume zwischen (notwendigen) Updates der Funktionen, da zum Zeitpunkt des Verkaufs oft noch nicht alle erforderlichen Tests durchgeführt werden konnten und deshalb Funktionen erst nachträglich aktiviert bzw. verbessert werden<sup>6,7</sup>. Vor dem Hintergrund der sehr hohen Testaufwände zum

---

<sup>1</sup> Kugele, S. et al.: On Service-Oriented Architecture for Automotive Software (2017), S. 199.

<sup>2</sup> Staron, M.: Automotive Software Architectures (2021), a: S. 55; b: S. 55-61; c: S. 59.

<sup>3</sup> Roland-Berger: Consolidation in Vehicle Electronic Architectures (2015), S. 6.

<sup>4</sup> Burkacky, O. et al.: Rethinking Car Software And Electronics Architecture (2018), S. 1.

<sup>5</sup> Lazard; Roland-Berger: Global Automotive Supplier Study (2017), S. 49.

<sup>6</sup> Koegel, M.; Wolf, M.: Auto update – safe and secure over-the-air software update (2018), S. 4.

<sup>7</sup> Humig, C.: Flexible und skalierbare Fahrzeugarchitekturen für Upgrades (2020), S. 18.

Sicherheitsnachweis automatisierter Fahrzeuge und der ggf. erforderlichen erneuten Testung bei Änderungen am betrachteten System wird erwartet, dass selbst große Automobilhersteller hinsichtlich der Testaufwände an ihre Grenzen geraten<sup>8</sup>.

Um diesen Problemen entgegenzuwirken, wird aktiv an Ansätzen zur Komplexitätsreduktion geforscht, ohne dabei den Funktionsumfang bzw. die Performance der Systeme negativ zu beeinflussen<sup>2b</sup>. Ein möglicher Ansatz zur Realisierung einer solchen Reduktion ist die Verwendung servicorientierter Systemarchitekturen (SOA). Bei diesen werden einzelne (Teil-)Funktionen als unabhängige Dienste bereitgestellt, die im Fahrzeug dynamisch rekonfiguriert werden können<sup>9</sup>. So kann bspw. abhängig vom derzeitigen Fahrzeug-Betriebsmodus eine unterschiedliche Kombination von Diensten miteinander verschaltet sein, ohne dass die einzelnen Teilfunktionen redundant implementiert sind (vgl. Abbildung 1-1). Dies bietet das Potential, die Komplexität und somit auch die Testaufwände signifikant zu senken<sup>10</sup>. Wird eine solche serviceorientierte Architektur konsequent umgesetzt, kann neben der Softwarekomplexität auch die Hardwarekomplexität gesenkt werden, indem zentralisierte Steuergeräte (ECUs) eingesetzt werden<sup>2c</sup>. Implementierte Dienste können dynamisch auf verschiedenen Steuergeräten orchestriert und so die Anzahl der unterschiedlichen und unnötig redundanten ECUs verringert werden. Schlussendlich können Hersteller auf diese Weise ein Baukastenprinzip etablieren und Komponenten nach Bedarf austauschen<sup>11</sup>.

Die Bewegungsregelung als Teil der automatisierten Fahrzeugführung besteht aus den beiden Teilfunktionen der Bewegungsplanung und der Bewegungsausführung. Die meisten etablierten Ansätze behandeln die beiden Funktionen als Einheit und entwickeln sie integriert<sup>13</sup>, aber ihre Trennung bietet die Möglichkeit, die zuvor aufgezeigten Vorteile einer modularen serviceorientierten Systemarchitektur auszunutzen. So ist es durch die Trennung bspw. möglich, dass eine mit der Bewegungsausführung betraute FTR je nach Betriebsmodus des Fahrzeugs Soll-Trajektorien aus verschiedenen Planungsdiensten erhält, ohne dabei selbst Kenntnis über den Betriebsmodus besitzen oder einen internen Moduswechsel durchführen zu müssen. Durch die konsequente Trennung der Teilfunktion soll weiterhin die Austausch- und Wiederverwendbarkeit der Komponenten gefördert werden.

Neben diesen gewichtigen Vorteilen bringt die starke Entkopplung der Bewegungsregelung auch zusätzliche Herausforderungen mit sich. Da beide Teilfunktionen für die automatisierte Fahrzeugführung aufeinander abgestimmt sein müssen, um ihr volles Potential auszuschöpfen, sind durch die Entkopplung durch eine einfache Trennung Nachteile hinsichtlich der Performance der Bewegungsregelung zu erwarten. Dies ist bspw. durch die resultierende Asynchronität der

---

<sup>8</sup> Wachenfeld, W.; Winner, H.: Die Freigabe des autonomen Fahrens (2015), S. 458.

<sup>9</sup> Rumez, M. et al.: An Overview of Automotive Service-Oriented Architectures (2020), S. 221853.

<sup>10</sup> Klamann, B. et al.: Defining Pass-/Fail-Criteria for Particular Tests (2019), S. 169.

<sup>11</sup> Butzkamm, C.; Brand, K.: Serviceorientierte E/E-Architektur (2020), S. 30.

<sup>12</sup> Woopen, T. et al.: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures (2018), S. 15.

<sup>13</sup> Rupp, A.; Stolz, M.: Survey on Control Schemes for Automated Driving on Highways (2017).

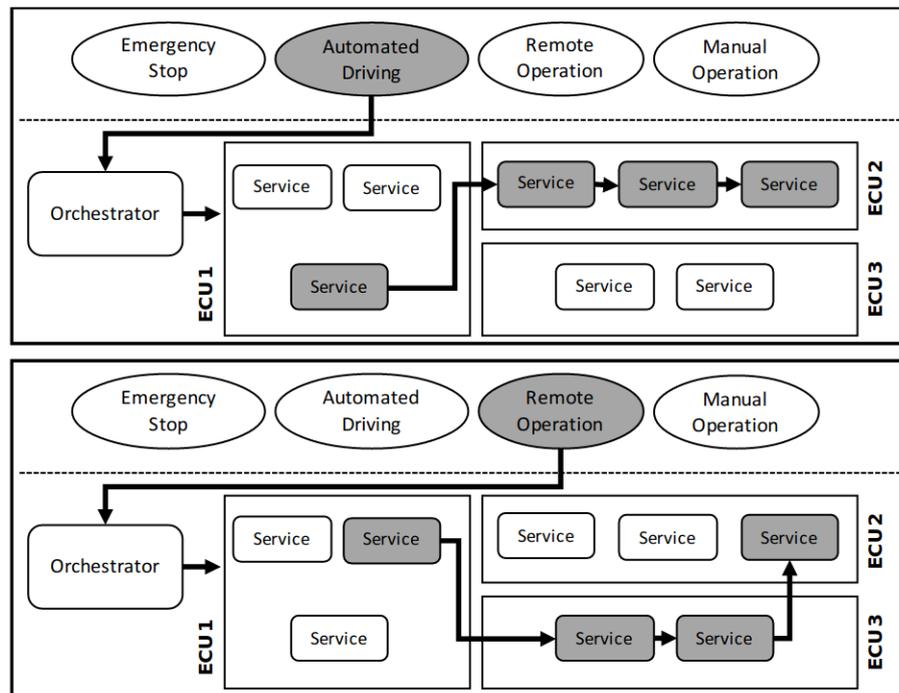


Abbildung 1-1: Dynamische Rekonfiguration von Software-Diensten zur Laufzeit durch einen zentralen Orchestrator, basierend auf dem derzeitigen Fahrzeug-Betriebsmodus<sup>12</sup>. Einzelne Dienste können dabei in verschiedenen makroskopischen Kontexten verwendet werden, ohne selbst Kenntnis über den Betriebsmodus zu besitzen.

Teilfunktionen, inkonsistente Lokalisierungsinformationen und die eingeschränkte Informations- teilung bedingt.

Die übergeordnete Zielsetzung dieser Arbeit besteht daher darin, zur Ausnutzung der zuvor definierten Vorteile einer modularen, gekapselten Systemarchitektur eine starke Entkopplung der beiden Teilfunktionen zu erwirken und gleichzeitig die dadurch neu entstandenen Defizite für die automatisierte Fahrzeugführung zu beherrschen. Als Ergebnis der Arbeit liegt eine Analyse vor, ob und wie die Auswirkungen der zuvor identifizierten Herausforderungen beherrscht werden können, so dass diese kein Defizit für die automatisierte Fahrzeugführung darstellen. Es wird eine mögliche Lösung in Form einer Referenzarchitektur aufgezeigt, die diese Aspekte leistet. Ohne die aufgezeigten Maßnahmen wäre die Anwendung der gesamten modularen, serviceorientierten Systemarchitektur für die automatisierte Fahrzeugführung durch die Defizite in der Domäne der Bewegungsregelung eingeschränkt.

Es wird dabei bewusst keine Aussage über die Sinnhaftigkeit der Anwendung einer modularen, serviceorientierten Systemarchitektur für einen bestimmten Anwendungsfall getroffen. Da die Wahl einer Systemarchitektur immer von einer Vielzahl unterschiedlicher und oftmals gegenläufiger Zielsetzungen beeinflusst wird, muss diese Entscheidung stets im Kontext einer bestimmten Applikation getroffen werden.

## 1.2 Methodik der Arbeit und Forschungsfragen

Zur Erreichung der zuvor definierten Zielsetzung wird ein mehrstufiges Vorgehen gemäß Abbildung 1-2 gewählt. Die in Abschnitt 1.1 bereits in Grundzügen vorgestellte modulare, serviceorientierte Systemarchitektur wird in Kapitel 3 ausführlich definiert und als Referenzarchitektur für das Gesamtfahrzeug verwendet. Sie bildet damit die Basis für alle weiteren Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit.

Anschließend wird eine Funktionsanalyse und -definition für eine gekapselte FTR innerhalb der übergeordneten Systemarchitektur vorgenommen, um die gewünschte Sollfunktion der FTR abzuleiten. Diese ist erforderlich, da sich aus der Systemarchitektur bereits signifikante Änderungen hinsichtlich der von der FTR zu erfüllenden Funktion im Vergleich zu konventionellen, integrierten Systemen ergeben (Forschungsfrage 1). Darauf aufbauend findet eine Anforderungsanalyse an die FTR zur Beantwortung von Forschungsfrage 2 statt.

**FF 1:** Welche Gesamtfunktion und Teilfunktionen muss eine gekapselte FTR in der betrachteten Systemarchitektur erfüllen?

**FF 2:** Welche Anforderungen an eine FTR entstehen durch die funktionale Trennung von Bewegungsplanung und -ausführung?

Da die Analyse des Stands der Technik keine gezielte Untersuchung der Einflüsse einer Kapselung auf die FTR aufzeigt, schließt sich in dieser Arbeit in Kapitel 3 eine entsprechende Analyse an. Um die notwendigen Handlungsbedarfe zur Beherrschung der aus der Kapselung der FTR entstehenden Herausforderungen abzuleiten, wird die zuvor definierte Funktion hinsichtlich potentieller negativer Einflüsse durch die Kapselung analysiert. Es zeigt sich, dass durch eine einfache Trennung der Bewegungsplanung und -ausführung kapselungsbedingte Defizite entstehen. Die identifizierten Teilbereiche der FTR mit Handlungsbedarf werden anschließend hinsichtlich möglicher Gegenmaßnahmen untersucht und so Forschungsfrage 3 beantwortet.

**FF 3:** In welchen Teilbereichen der Reglerentwicklung und -auslegung entstehen durch die Kapselung Nachteile? Wie kann diesen Nachteilen begegnet werden, so dass sie kein Defizit darstellen?

Zur Konkretisierung der identifizierten Handlungsbedarfe und als Vorbereitung einer Referenzarchitektur für die gekapselte FTR werden die notwendigen Gegenmaßnahmen in den nachfolgenden Kapiteln 4 bis 6 detailliert und konkrete technische Lösungen präsentiert. Übergeordnete Zielsetzung ist dabei, die Einflüsse der architektonischen Herausforderungen möglichst gering zu halten. Dazu wird der jeweilige Lösungsraum analysiert und aufgezeigt, welche Erweiterungen bzw. Anpassungen unbedingt erforderlich sind. Des Weiteren wird aufgezeigt, in welchen Bereichen im Rahmen der Applikation der FTR für einen bestimmten Anwendungsfall Gestaltungsspielräume für sekundäre Zielsetzungen genutzt werden können. Die Kapitel 4 bis 6 beantworten somit die Forschungsfragen 4 bis 7.

**FF 4:** Wie kann sichergestellt werden, dass die Planungsebene nur erfüllbare Aufgaben an die ausführende Ebene stellt? Welcher Informationsaustausch zwischen den Ebenen ist dazu erforderlich?

**FF 5:** Wie kann ein negativer Einfluss inkonsistenter Lokalisierungsinformationen vermieden werden?

**FF 6:** Wie kann das von der Planungsebene bereitgestellte Wissen über die zukünftigen Systemzustände zur Funktionserfüllung der FTR genutzt werden?

**FF 7:** Wie können bei der Architekturentwicklung unnötige Spezialisierungen in Bezug auf die verwendete Aktorik verhindert werden?

Auf Basis der ausgestalteten Gegenmaßnahmen wird in Kapitel 7 eine Referenzarchitektur und -implementierung der gekapselten FTR synthetisiert, um eine konkrete Umsetzung der Maßnahmen gegen die jeweiligen Herausforderungen aufzuzeigen. Die Referenzimplementierung bildet somit die Grundlage, die identifizierten Herausforderungen innerhalb eines konsistenten Gesamtsystems soweit zu adressieren, dass ihre Auswirkungen gering gehalten werden und sie nicht länger ein Defizit darstellen. Auf weiterhin vorhandene Freiheitsgrade bei der Applikation für eine konkrete Anwendung wird gezielt eingegangen. Die entwickelte Architektur beantwortet somit Forschungsfrage 8.

**FF 8:** Welche Folgen hat die Funktionstrennung, insbesondere auf die Architektur der Bewegungsregelung?

Die präsentierte Referenzimplementierung wird anschließend auf die Fahrzeuge im Forschungsprojekt UNICAR*agil* appliziert (Kapitel 8). Dabei wird sowohl auf ein Simulationsmodell in der Simulationsumgebung IPG CarMaker als auch auf die Realfahrzeuge des Projekts zurückgegriffen. Durch die Durchführung und Auswertung abgeleiteter Testfälle wird die Wirksamkeit der zuvor theoretisch motivierten und hergeleiteten Maßnahmen gegen die kapselungsbedingten Nachteile im konsistenten Gesamtsystem nachgewiesen und so Forschungsfrage 9 beantwortet.

**FF 9:** Können die identifizierten Herausforderungen im Rahmen einer Applikation auf ein reales Fahrzeug beherrscht werden?

Als Gesamtergebnis der Arbeit liegt somit eine Analyse der Vor- und Nachteile für die Anwendung einer modularen, serviceorientierten Architektur für die Bewegungsregelung autonomer Fahrzeuge vor. Mit Hilfe der Analyse können zukünftig für spezifische Anwendungsfälle fundierte und informierte Entscheidungen für Systemarchitekturen autonomer Kraftfahrzeuge in Bezug auf die eingesetzte Bewegungsregelungsarchitektur getroffen werden.

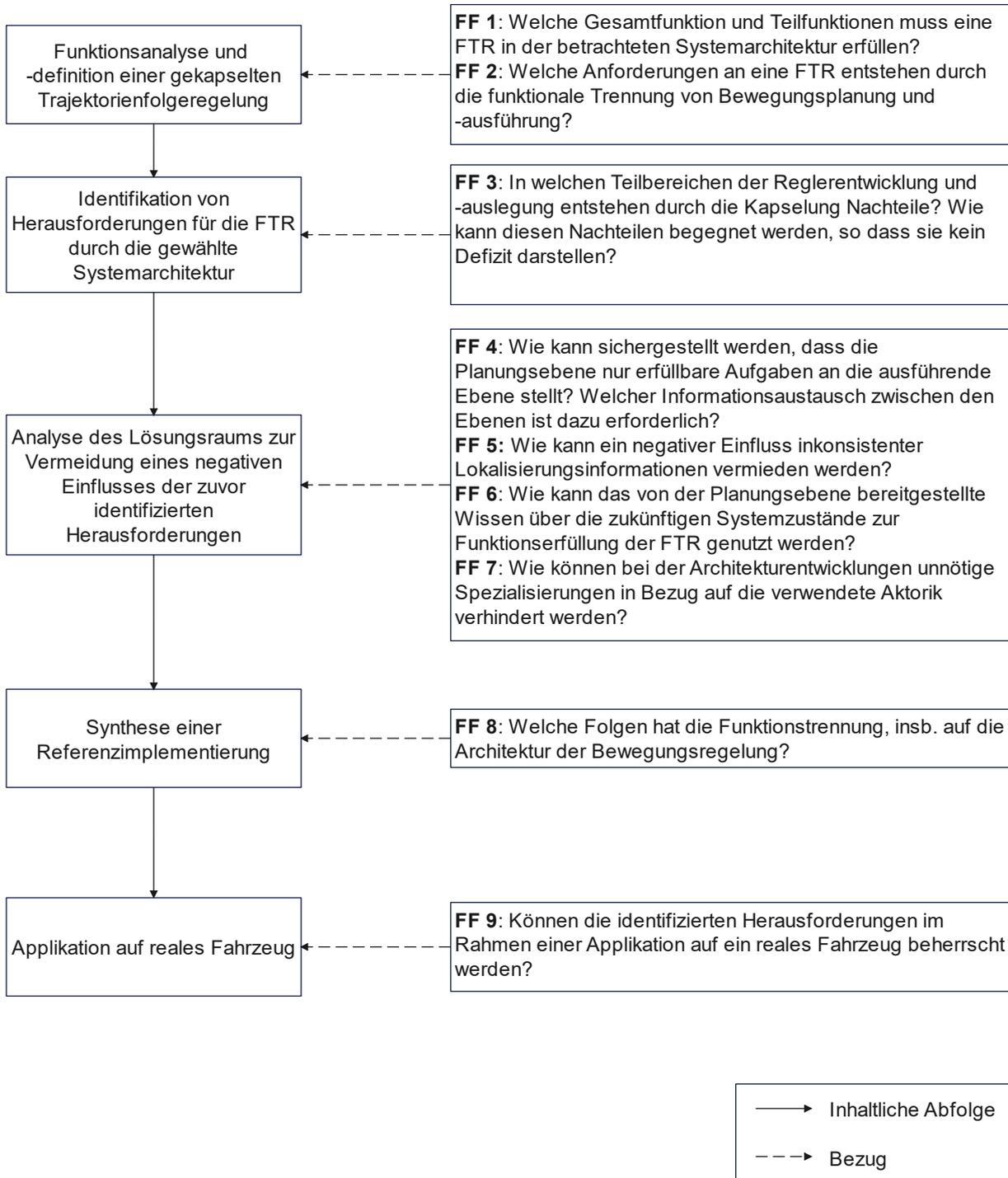


Abbildung 1-2: Methodik der Arbeit und zugehörige Forschungsfragen.

---

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Bevor in den nachfolgenden Kapiteln die in Abschnitt 1.2 definierten methodischen Arbeitsschritte durchgeführt werden, werden im nun folgenden Kapitel 2 die notwendigen Grundlagen zum weiteren Verständnis der Arbeit geschaffen. Das Kapitel gliedert sich dabei in zwei wesentliche Teile.

Zunächst werden in den Abschnitten 2.1 bis 2.3 erforderliche Definitionen vorgenommen, allgemeine physikalische Grundlagen präsentiert sowie etablierte Systemarchitekturen für Kraftfahrzeuge und Bewegungsregelungen vorgestellt. Im zweiten Teil wird der Stand der Technik für von der Kapselung betroffene Teilbereiche der Bewegungsregelung ausführlich vorgestellt. Die Auswahl der diskutierten Teilbereiche stellt einen inhaltlichen Vorgriff auf die Ergebnisse der Defizitanalyse in Kapitel 3 dar, ist jedoch erforderlich, um den notwendigen Überblick über den relevanten Stand der Technik zu geben und somit ein Verständnis für die weiteren Schritte zu schaffen.

### 2.1 Definitionen

#### 2.1.1 Notation

Bei der Angabe von Variablen und Formelzeichen innerhalb dieser Arbeit kommt die folgende Notation zum Einsatz:

$$\text{Koordinatensystem} \overset{\text{Operator}}{\text{Variable}} \overset{\text{Exponent}}{\text{Index}}$$

Indizes zur Beschreibung bzw. Konkretisierung einer Variable werden unten rechts angegeben. Oben rechts sind ausschließlich Exponenten notiert. Mittig oberhalb der Variablen können Operatoren wie bspw. zeitliche Ableitungen in Punktnotation angegeben werden. Unten links wird das verwendete Koordinatensystem der Variable notiert (vgl. nachfolgender Abschnitt 2.1.2), sofern die Zuordnung zu einem Koordinatensystem für die dargestellten Berechnungen bzw. für das allgemeine Verständnis relevant ist. Mehrdimensionale Variablen (Vektoren und Matrizen) werden fett dargestellt. Die übrigen Notationregeln sind der Norm DIN 1338 entnommen<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> DIN: DIN 1338 - Formelschreibweise und Formelsatz (2011).

## 2.1.2 Koordinatensysteme

In den weiteren Ausführungen innerhalb dieser Arbeit werden verschiedene Koordinatensysteme verwendet. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Systeme und die Beziehungen zueinander definiert.

### Globales ellipsoidisches Koordinatensystem

Zur Angabe globaler Positionen unter Berücksichtigung der gekrümmten Erdoberfläche wird ein geodätisches Referenzsystem als global ellipsoidisches Koordinatensystem (global coordinate system - GCS) verwendet. Zum Einsatz kommt dabei das Europäische Terrestrische Referenzsystem 1989 (ETRS89), das auf dem International Terrestrial Reference System (ITRS) aufbaut<sup>15</sup>. ETRS89 ist fest verbunden mit der eurasischen Kontinentalplatte, so dass für Anwendungen innerhalb der Grenzen der Kontinentalplatte keine weiteren Drifts im Zeitverlauf berücksichtigt werden müssen<sup>16</sup>. Größen in diesem Koordinatensystem werden in dieser Arbeit mit dem vorangestellten Index  $G$  angegeben. Zur weiteren Verwendung werden sie zunächst in ein global kartesisches Koordinatensystem transformiert<sup>18a</sup> (vgl. Abbildung 2-1). Auch der umgekehrte Weg von einem global kartesischen in ein global ellipsoidisches System ist möglich<sup>19</sup>.

### Global kartesisches Koordinatensystem

Als Zwischenschritt für die Nutzung global ellipsoidischer Größen kommt ein global kartesisches Koordinatensystem zum Einsatz (vgl. Abbildung 2-1). Der Ursprung dieses Systems ist im Erdmittelpunkt und die Achsen sind mit der Erde fest verbunden (earth-centered-earth-fixed - ECEF), weshalb keine Einflüsse durch die Erdrotation berücksichtigt werden müssen. Nachteilig an diesem System ist die Tatsache, dass eine Bewegung auf der Erdoberfläche immer eine Änderung in mindestens 2 der kartesischen Koordinatenrichtungen verursacht.

### Lokales Navigationskoordinatensystem

Um dem Nachteil der mehrdimensionalen Änderungen bei jeder Bewegung innerhalb des ECEF Systems zu begegnen, kommt weiterhin ein lokales Navigationskoordinatensystem zum Einsatz. Dieses wird aus Größen im ECEF System berechnet und verfügt über einen Ursprung in der Planungspose der jeweils verwendeten Soll-Trajektorie<sup>20</sup>, während die Achsen stets in Richtung Osten, Norden und Oben (east, north, up - ENU) zeigen. Die east-north Ebene des ENU-Systems

---

<sup>15</sup> Soler, T.; Marshall, J.: A note on frame transformations with applications to geodetic datums (2003), S. 27.

<sup>16</sup> Für Anwendungen auf anderen Kontinentalplatten existieren vergleichbare Systeme<sup>17</sup>.

<sup>17</sup> Szabova, M.; Duchon, F.: Survey Of GNSS Coordinates Systems (2016), S. 38-39.

<sup>18</sup> Becker, M.; Hehl, K.: Geodäsie (2012), a: S. 26; b: S. 12.

<sup>19</sup> Vermeille, H.: Direct transformation to geodetic coordinates (2002).

<sup>20</sup> Die Planungspose beschreibt die Pose im GCS, auf deren Basis die Soll-Trajektorie geplant wurde. Sie liegt aufgrund der Zykluszeit der Trajektorienplanung i. d. R. hinter dem ersten Aufpunkt einer Soll-Trajektorie.

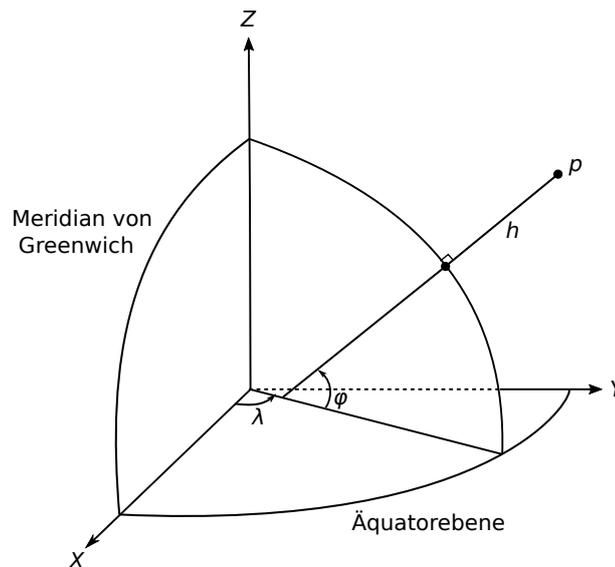


Abbildung 2-1: Darstellung des verwendeten ellipsoidischen Koordinatensystems mit den Achsen  $\lambda$ ,  $\varphi$  und der Höhe  $h$  über dem gewählten Referenzellipsoid. Weiterhin dargestellt ist das verwendete kartesische ECEF Koordinatensystem mit den Achsen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ . Eigene Darstellung nach Becker und Hehl<sup>18b</sup>.

stellt daher eine mitbewegte Tangentialebene an das Referenzellipsoid des GCS dar (vgl. Abbildung 2-2). Größen in lokalen Navigationskoordinaten werden mit dem vorangestellten Index  $N$  gekennzeichnet.

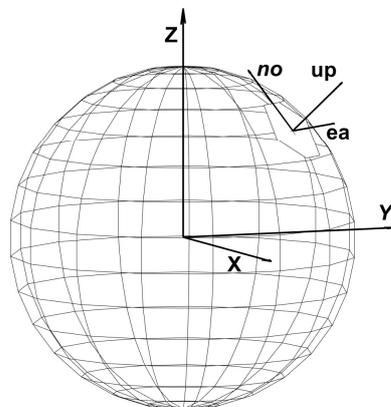


Abbildung 2-2: Darstellung des verwendeten kartesischen ECEF Koordinatensystems mit den Achsen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  sowie des lokalen kartesischen Navigationskoordinatensystems mit den Achsen  $ea$ ,  $no$  und  $up$ . Die Achsen  $ea$  und  $no$  bilden eine Tangentialebene an das Erdellipsoid im gewählten Ursprung des Systems.

## Fahrzeugkoordinatensystem

Für Berechnungen innerhalb des Fahrzeugs kommt das fahrzeugfeste Koordinatensystem mit dem vorangestellten Index  $V$  sowie den Achsen  $x$ ,  $y$  und  $z$  zum Einsatz (vgl. Abbildung 2-3).

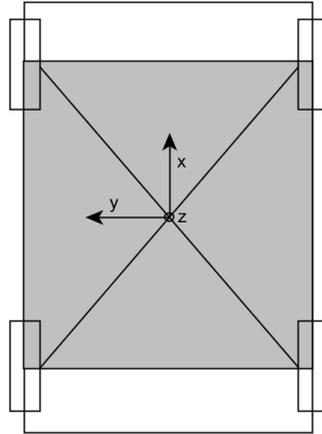


Abbildung 2-3: Verwendetes fahrzeugfestes Koordinatensystem. Die  $x$ -Achse zeigt dabei in Richtung der Vorzugs-Fahrtrichtung des Fahrzeugs.

## Frenet-Koordinatensystem

Das letzte verwendete Koordinatensystem ist ein Frenet-Koordinatensystem (Index  $F$ ). Der Ursprung dieses Systems liegt in der momentanen Soll-Position des Fahrzeugs, entnommen aus der derzeit gültigen Soll-Trajektorie. Die Längsachse  $s$  zeigt dabei stets in Richtung des Soll-Kurswinkels  $\psi_{c,set}$  innerhalb der Soll-Trajektorie (vgl. Abbildung 2-4).

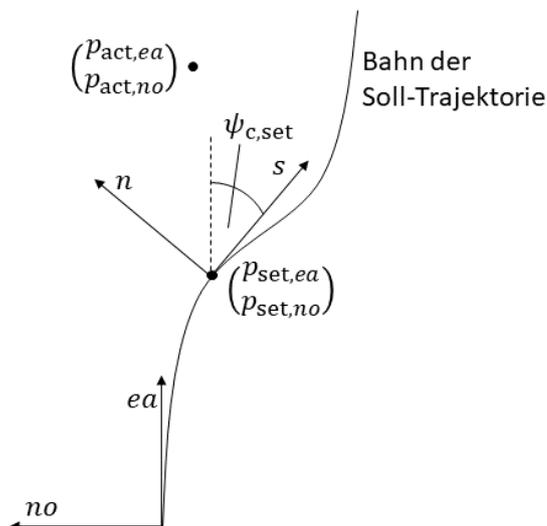


Abbildung 2-4: Verwendetes Frenet-Koordinatensystem<sup>21</sup>. Der Ursprung ist definiert durch die Soll-Position in der empfangenen Trajektorie, die Achsenrichtungen  $s$  und  $n$  ergeben sich aus der jeweiligen Soll-Geschwindigkeitsrichtung  $\psi_{c,set}$ . Die Ist-Positionen  $p_{act,ea}$  und  $p_{act,no}$  liegen nicht auf dem Pfad der Trajektorie, was auf eine Regelabweichung hinweist.  $p_{set,ea}$  und  $p_{set,no}$  werden aus der diskreten Soll-Trajektorie interpoliert.

### 2.1.3 Kapselung

Im Kontext dieser Arbeit wird unter Kapselung die konsequente Minimierung von Abhängigkeiten eines Dienstes bzw. eines Moduls verstanden. Dies beinhaltet, Informationen dieses Moduls nur soweit wie unbedingt zur Vermeidung von Defiziten nötig zu verteilen, Schnittstellen zu standardisieren und so die Austausch- bzw. Wiederverwendbarkeit sicherzustellen. Weiterhin wird vermieden, Informationen, wie bspw. das Wissen über Fahrzeugparameter, innerhalb der Systemarchitektur redundant abzuspeichern.

Die Kapselung verfolgt u. a. die Zielsetzungen, die Systemkomplexität zu senken, die Wart- und Updatebarkeit zu verbessern sowie verteilte Entwicklungen innerhalb komplexer Entwicklungsprojekte zu fördern. Des Weiteren wird das aus der unvollständigen Pflege redundant abgelegten Wissens drohende Risiko von Inkonsistenzen innerhalb des Systems reduziert.

### 2.1.4 Wiederverwendbarkeit und Austauschbarkeit

Die beschriebenen Zielsetzungen der Kapselung der FTR umfassen die Sicherstellung der Wiederverwendbarkeit und Austauschbarkeit des verwendeten Dienstes.

Die Norm ISO/IEC 25010 definiert die Wiederverwendbarkeit (reusability) einer Software als den *„Grad, in dem ein System in mehr als einem System oder beim Bau anderer Systeme verwendet werden kann“*<sup>22a</sup>. In der Literatur existiert eine Vielzahl weiterer Definitionen<sup>23</sup> und die konkrete Umsetzung stellt einen eigenen Zweig des Software-Engineering dar<sup>24</sup>, jedoch verdeutlicht die zuvor genannte Definition bereits die Zielsetzung im Kontext dieser Arbeit. Fahrzeughersteller sollen durch die Kapselung der FTR in die Lage versetzt werden, einen zuvor entwickelten Dienst in verschiedenen Fahrzeugen bzw. Fahrzeugvarianten zu verwenden, ohne die Software dabei mit erhöhtem Aufwand an jede Fahrzeugausprägung anpassen zu müssen. Dies bezieht sich insbesondere auf die notwendigen Interaktionen mit anderen Funktionen innerhalb der Wirkkette des autonomen Fahrens wie bspw. der Trajektorienplanung (TP).

Die Austauschbarkeit einer Software (replaceability) wird von der Norm ISO/IEC 25010 als der *„Grad, in dem ein Produkt ein anderes spezifiziertes Softwareprodukt für denselben Zweck in derselben Umgebung ersetzen kann“*<sup>22b</sup> definiert. Diese Eigenschaft steht in enger Verbindung zur zuvor diskutierten Wiederverwendbarkeit, betrachtet den Sachverhalt jedoch aus der Perspektive des Produkts. Angewendet auf das Thema dieser Arbeit besteht die Zielsetzung, dass verschiedene Implementierungen der FTR in einem Fahrzeug eingesetzt werden können, ohne dass (hohe) Aufwände zur Adaption entstehen.

---

<sup>21</sup> Homolla, T.; Winner, H.: Encapsulated trajectory tracking control for autonomous vehicles (2022), S. 301.

<sup>22</sup> ISO/IEC-JTC-1/SC-7: ISO/IEC 25010:2011 - Systems and software engineering (2011), a: S. 15; b: S. 16.

<sup>23</sup> Ahmar, I. et al.: Taxonomy, Definition, Approaches of Software Reusability (2014), S. 2397-2398.

<sup>24</sup> Sommerville, I.: Software Engineering (2018), S. 492-497.

## 2.2 Grundlagen

Innerhalb dieses Abschnitts werden relevante Grundlagen für das weitere Verständnis der Arbeit dargelegt. Aufgrund der oftmals sehr umfangreichen Themenbereiche wird dabei eine Fokussierung auf die Darstellung der wesentlichen Aspekte im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen. Für eine vollständige Beschreibung weiterführender Zusammenhänge wird jeweils auf die einschlägige Literatur verwiesen.

### 2.2.1 IDEF0 Darstellung

Zur Visualisierung von Funktionsstrukturen in variierenden Detailgraden kommt die sog. IDEF0 Darstellung zum Einsatz. IDEF ("Integration DEFINition") ist eine Familie von Beschreibungssprachen für verschiedene Anwendungsfälle aus dem Bereich des Software- und Systems-Engineering. IDEF0 wird dabei zur Beschreibung von Abfolgen in Funktionen bzw. Teilfunktionen genutzt und bietet eine übersichtliche Darstellung hierarchischer Strukturen<sup>25</sup>. Die Notation ist eine Weiterentwicklung der Structured Analysis and Design Technique (SADT)<sup>26</sup>.

Ein IDEF0 Diagramm besteht aus Knoten und Signalen. Signale werden dabei in 4 unterschiedliche Klassen eingeteilt und über die Position an einem Knoten eindeutig zugeordnet (vgl. Abbildung 2-5). Jeder Knoten kann dabei durch ein weiteres Sub-Diagramm ausdetailliert werden und dabei aus einer beliebigen Zahl weiterer Sub-Knoten bestehen. Die Nummerierung der Knoten beginnt dabei auf oberster Ebene immer mit Knoten A-0, der aus einem einzelnen Knoten A0 besteht. Die in A0 enthaltenen Sub-Knoten werden aufsteigend nummeriert (A1, A2, etc.). Knoten auf tieferen Ebenen der Funktionsstruktur werden durch Verkettung mit der übergeordneten Knoten-Nummer benannt (A11, A12, etc.). Auf diese Weise entsteht eine graphische Top-Down-Struktur für die Gesamtfunktion eines beschriebenen Systems.

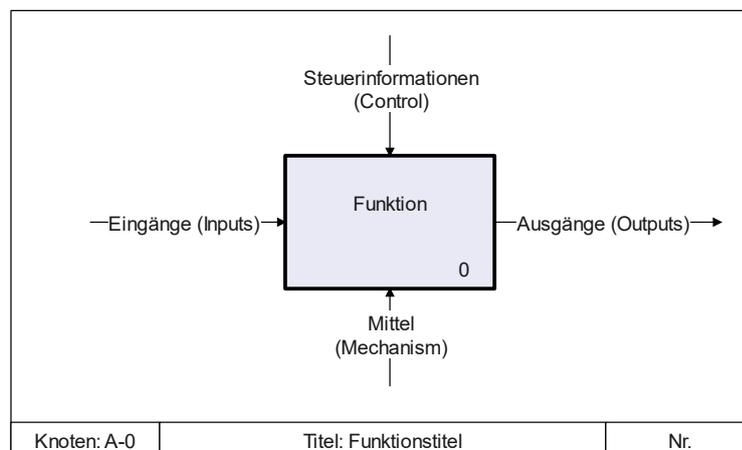


Abbildung 2-5: Allgemeiner Knoten in IDEF0 Darstellung. Eigene Darstellung in Anlehnung an<sup>25</sup>.

<sup>25</sup> DAUP: System Engineering Fundamentals (2001), S. 51.

<sup>26</sup> Ahmed, F. et al.: Using SADT in simulation conceptual modeling (2014).

## 2.2.2 Fahrzeug-Horizontaldynamik

Straßengebundene Kraftfahrzeuge verfügen bei der Modellierung als Starrkörper über insgesamt sechs Freiheitsgrade (Translation in bzw. Rotation um drei Raumrichtungen). Von diesen sechs Freiheitsgraden sind durch die Bindung des Fahrzeugs an die Fahrbahnoberfläche jedoch nur die zwei horizontalen Freiheitsgrade der Translation in Längs- und Querrichtung sowie der rotatorische Freiheitsgrad um die Fahrzeug-Hochachse ( $z$ -Achse des Fahrzeug-Koordinatensystems, siehe Abbildung 2-3) unabhängig<sup>27</sup>.

Konventionelle Fahrzeuge mit Vorderachslenkung stellen durch die kinematischen Verzwängungen der einzelnen Räder ein nicht-holonomes System dar<sup>28a</sup>. Die drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs können daher nicht unabhängig voneinander beeinflusst werden. Dieser Umstand kann am Beispiel einer Parklücke verdeutlicht werden, die nur geringfügig größer als das parkende Fahrzeug ist. Durch die Einschränkung, dass die Räder des Fahrzeugs nur entlang ihrer Längsrichtung abrollen können<sup>28b</sup>, ist es möglich, dass ein Fahrzeug eine Parklücke physikalisch nicht erreichen kann, obwohl die Abmessungen für die Länge des Fahrzeugs ausreichend sind. Für die Führung nicht-holonomer Fahrzeuge ist daher stets der Verlauf der Systemzustände über mehrere Zeitschritte zu berücksichtigen, da andernfalls die gewünschten Systemzustände nicht zuverlässig erreicht werden können<sup>28c</sup>.

Durch die Nutzung von Einzelradaktorik werden Kraftfahrzeuge in ein holonomes System überführt (falls keine Lenkwinkelgrenzen erreicht werden), so dass die einzelnen Freiheitsgrade unabhängig voneinander manipuliert werden können. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass jedes Rad individuelle Lenkwinkel annehmen kann und somit die weiterhin vorhandene Randbedingung, dass nur Bewegungen entlang der Abrollrichtung des Rades möglich sind, keine Einschränkung der Fahrzeugbewegung bedingt<sup>29</sup>. Bezogen auf die (automatisierte) Fahrzeugführung vereinfacht die Nutzung von Einzelradaktorik daher das Erreichen gewünschter Systemzustände, da keine Abfolge von Stellgrößen berücksichtigt werden muss und die drei Freiheitsgrade unabhängig beeinflusst werden können.

Unabhängig von der verwendeten Aktorarchitektur sind Fahrzeuge aufgrund der eingeschränkten Radbewegung entlang der Abrollrichtung kinematischen Verzwängungen unterworfen. Für eine schräglaufrfreie Fahrt, d. h. eine Fahrt ohne Bewegung der Räder quer zu ihrer Abrollrichtung<sup>30</sup>, ist es erforderlich, dass sich die Normalen aller vier Räder auf ihre Abrollrichtung in einem gemeinsamen Punkt treffen. Dieser Schnittpunkt ist als Momentanpol bekannt und beschreibt den

<sup>27</sup> Schramm, D. et al.: Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen (2018), S. 7.

<sup>28</sup> Qu, Z.: Cooperative Control of Dynamical Systems (2009), a: S. 21; b: S. 19; c: S. 86.

<sup>29</sup> Eine alltägliche Anwendung mit vergleichbarer Kinematik ist von Einkaufswagen bekannt.

<sup>30</sup> Das Auftreten eines begrenzten Schräglaufs ist während der Fahrt unvermeidlich bzw. zur Aufbringung von Seitenkräften i. d. R. erwünscht. Ein zu hoher Schräglauf erhöht jedoch den Reifenverschleiß signifikant und kann aufgrund der Degressivität des Querkraftaufbaus im Reifen zu instabilen Fahrzeugzuständen führen.

zu einem bestimmten Zeitpunkt gültigen Rotationsmittelpunkt der Fahrzeugbewegung<sup>31</sup>. Die Lage des Momentanpols des Fahrzeugs bedingt damit unmittelbar die Lenkwinkel aller vier Räder.

Die drei unabhängigen Freiheitsgrade des Fahrzeugs werden in den meisten Anwendungen von unterschiedlichen Aktoren beeinflusst. Anhand der Anzahl der Freiheitsgrade und Aktoren lassen sich Kraftfahrzeuge (bzw. allgemein mechatronische Systeme) in verschiedene Kategorien einteilen (siehe Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Kategorien der Aktuierung von mechatronischen Systemen auf Basis der Definition von Bernhard<sup>32a</sup>.

<b>Verhältnis Aktoren - Freiheitsgrade</b>	<b>Bezeichnung</b>
Anzahl Aktoren < Anzahl Freiheitsgrade	Unteraktuiert
Anzahl Aktoren = Anzahl Freiheitsgrade	Quadratisch
Anzahl Aktoren > Anzahl Freiheitsgrade	Überaktuiert

Im Rahmen dieser Arbeit ist insbesondere die Kategorie der überaktuierten Fahrzeuge relevant, da bei der Verwendung der Einzelradaktorik mit je einem Lenk- und Antriebsaktor eine 8 zu 3 Überaktuierung vorliegt (8 Aktoren und 3 unabhängige Freiheitsgrade). Solche Systeme verfügen über zusätzliche Freiheitsgrade bei der Verteilung der Stellgrößen auf die einzelnen Aktoren, da mit unterschiedlichen Kombinationen von Stellgrößen dieselbe makroskopische Fahrzeugbewegung realisiert werden kann<sup>32b</sup>. Die Teilfunktion der Auflösung der Überaktuierung durch sekundäre Zielsetzungen ist in der Literatur als Control Allocation bekannt. Durch eine auf die jeweilige Zielsetzung angepasste Verteilung der Stellgrößen kann bspw. die Fahrzeugstabilität erhöht<sup>33</sup>, die Energieeffizienz gesteigert<sup>34,35,36</sup> oder die benötigte Rechenleistung reduziert werden<sup>37</sup>.

### 2.2.3 Stabilitätsregelungen für Fahrzeuge

Eine der wichtigsten fahrdynamischen Eigenschaften straßengebundener Kraftfahrzeuge ist ihre Stabilität in möglichst allen auftretenden Fahrsituationen. Van Zanten und Kost definieren Stabilitätsregelungen daher als *„Fahrzeugassistenzsysteme [...] da sie dem Fahrzeug dabei helfen, kontrollierbar zu bleiben“*<sup>38a</sup>. Die Aufgabe der Stabilitätsregelung besteht somit darin, das reale Verhalten des Fahrzeugs dem Sollverhalten anzupassen, wenn dies aufgrund fahrdynamischer Grenzen gefährdet ist.

---

<sup>31</sup> Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: Dynamik der Kraftfahrzeuge (2014), S. 615.

<sup>32</sup> Bernhard, S.: Folgeregelung für quadratische, über- und unteraktuierte Systeme (2020), a: S. 12; b: S. 2.

<sup>33</sup> Moseberg, J.-E.: Regelung der Horizontalbewegung eines überaktuierten Fahrzeugs (2016), S. 61.

<sup>34</sup> Reinold, P.: Selbstoptimierende Fahrdynamikregelung mit Einzelradaktorik (2017), S. 74.

<sup>35</sup> Johansen, T. A.; Fossen, T. I.: Control allocation—A survey (2013), S. 16.

<sup>36</sup> Huang, Y. et al.: Performance Enhancement of an Overactuated Vehicle (2021), S. 39.

<sup>37</sup> Peters, Y.: Ein Beitrag zur Entwicklung eines zentralen Fahrwerkreglers (2020), S. 34.

<sup>38</sup> van Zanten, A.; Kost, F.: Bremsenbasierte Assistenzfunktionen (2015), a: S. 724; b: S. 727-728.

Stabilitätsregelungen sind vielfältig erprobt und z. T. innerhalb der Europäischen Union für Neufahrzeuge vorgeschrieben<sup>39</sup>. Bekannt sind insbesondere die Antriebsschlupfregelung (ASR), das Antiblockiersystem (ABS) und die elektronische Stabilitätskontrolle (ESC). ABS und ASR haben dabei die primäre Aufgabe, den Radschlupf auf den stabilen Teil der  $\mu$ -Schlupf-Kurve zu begrenzen und somit das Auftreten einer Instabilität beim Beschleunigen bzw. Verzögern des Fahrzeugs zu verhindern<sup>38b</sup>. ESC verfolgt hingegen die Zielsetzung, Abweichungen zwischen der Soll- und Ist-Giertrate bzw. des Soll- und Ist-Schwimmwinkels des Fahrzeugs zu erkennen und durch gezielte radindividuelle Bremsingriffe zu verringern. Auf diese Weise kann ein Unter- bzw. Übersteuern des Fahrzeugs verhindert werden, wie es insbesondere in dynamischen Kurvenfahrten andernfalls auftreten kann<sup>38a,40</sup>.

## 2.2.4 Regelungstechnische Grundlagen

Für hochautomatisierte und autonome Fahrzeuge ist die Fahrzeugführung ausschließlich durch Algorithmen erforderlich<sup>41</sup>. Um dieses Ziel zu erreichen, ist ein Einsatz der regelungstechnischen Konzepte der Steuerung und Regelung erforderlich.

Lunze definiert die Steuerung als offenen Regelkreis, d. h. ohne Rückführung der Ausgangsgröße<sup>42a</sup>. In einer Steuerung werden daher ausschließlich auf Basis der Führungsgröße Stellgrößen für die Aktorik des Systems berechnet (vgl. Abbildung 2-6a). Dies bietet den Vorteil, dass die Stellgrößen ohne zeitlichen Verzug generiert werden und zudem keine Instabilitäten auftreten können. Die fehlende Rückführung wirkt sich nachteilig aus, wenn externe Störungen vorhanden sind oder die Dynamik der Strecke nicht korrekt vorhergesehen wurde, da in diesen Fällen die gewünschte Ausgangsgröße nicht zuverlässig erreicht wird<sup>42a</sup>.

Werden die Stellgrößen hingegen auf Basis der Abweichung zwischen Führungs- und Ausgangs- bzw. Zustandsgröße bestimmt, liegt eine rückgekoppelte Regelung vor (vgl. Abbildung 2-6b). Diese bietet den Vorteil, dass auf Modellfehler und externe Störung reagiert werden kann. Gleichzeitig können rückgekoppelte Regelkreise jedoch instabil werden und bieten zudem ein schlechteres Zeitverhalten bei der Umsetzung der Führungsgröße, da zunächst Regelabweichungen entstehen müssen, bevor eine Reaktion erfolgt.

Die beiden Ansätze der Steuerung und Regelung können im Rahmen einer sog. Zwei-Freiheitsgrade-Struktur miteinander kombiniert werden (vgl. Abbildung 2-6c). In diesem Fall setzt sich die Stellgröße für die Aktorik aus einer Superposition einer unabhängigen (Vor-)Steuerung und einer Regelung zusammen. Der Ansatz ermöglicht die Ausnutzung der spezifischen Vorteile beider Konzepte, da durch die Vorsteuerung eine hohe Dynamik bei der Umsetzung der Führungsgröße

<sup>39</sup> Europäisches-Parlament: Verordnung (EU) 2019/2144 (2019).

<sup>40</sup> HeiBing, B. et al.: Fahrwerkhandbuch (2013), S. 556.

<sup>41</sup> On-Road Automated Driving (ORAD) committee: J3016 - Taxonomy and Definitions (2021), S. 26.

<sup>42</sup> Lunze, J.: Regelungstechnik 1 (2020), a: S. 9; b: S. 4; c: S. 11; d: S. 11-12; e: S. 69; f: S. 111.

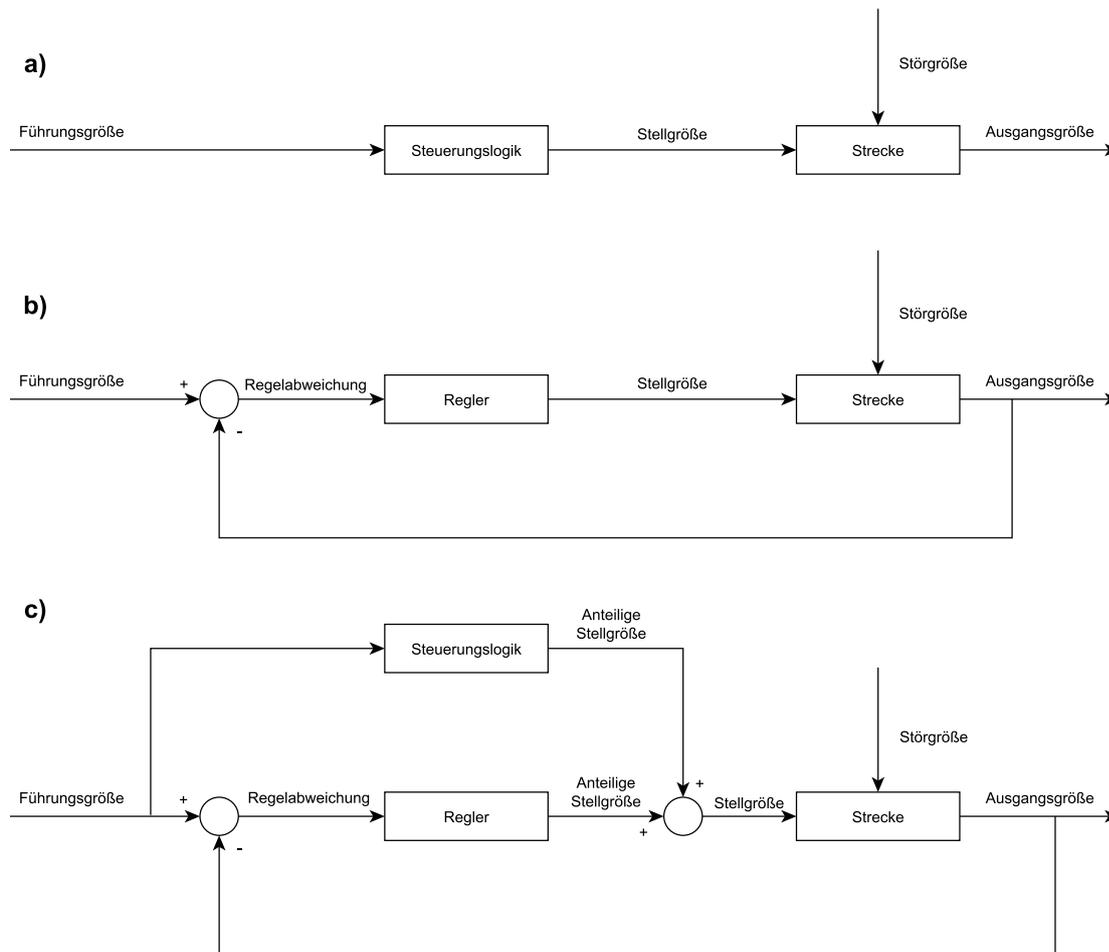


Abbildung 2-6: Grundlegende Struktur einer Steuerung (a), Regelung (b) und einer Regelung mit zwei Freiheitsgraden (c). Eigene Darstellung nach Lunze: a)<sup>42a</sup>, b)<sup>42b</sup>, c)<sup>42c</sup>.

ermöglicht wird und gleichzeitig eine Kompensation von Fehlern durch die Rückkopplung erfolgt.<sup>42d</sup>

Bei der Nutzung einer Zwei-Freiheitsgrade-Struktur kann die Vorsteuerung und Zustandsrückführung unabhängig voneinander entwickelt und ausgelegt werden<sup>42d</sup>, was signifikante Vorteile bietet. Insbesondere kann die Zustandsrückführung deutlich steifer, d. h. mit niedrigeren Zeitkonstanten, ausgelegt werden als in einer reinen Regelungsarchitektur, da nur das Störverhalten des Systems betroffen ist<sup>43</sup>.

Für den Entwurf von Steuerungen und Regelungen existieren eine Vielzahl verschiedener Verfahren, basierend auf den jeweiligen systemtheoretischen Eigenschaften der betrachteten Strecke. Dabei spielt insbesondere die Linearität der Strecke eine wesentliche Rolle für die Auslegung des Reglers. Ist das Superpositionsprinzip für eine Regelstrecke gültig, kann diese als linear betrachtet<sup>42e</sup> und eine weitestgehend vollständige mathematische Theorie angewendet werden<sup>44a</sup>.

<sup>43</sup> Rathgeber, C.: Trajektorienplanung und -folgeregelung (2016), S. 22.

<sup>44</sup> Adamy, J.: Nichtlineare Systeme und Regelungen (2018), a: S. 1; b: S. 96; c: S. 97; d: S. 28.

Für nichtlineare Systeme ist die zugehörige Theorie noch lückenhaft und der Reglerentwurf somit signifikant erschwert<sup>44a</sup>. Oftmals können für den Reglerentwurf nichtlinearer Systeme jedoch Linearisierungen um einen relevanten Arbeitspunkt vorgenommen werden. Wenn die Abweichungen von diesem Arbeitspunkt klein gehalten werden, kann auf diese Weise das Verhalten des nichtlinearen Systems ausreichend approximiert und die Anwendung linearer Regelungstechniken ermöglicht werden<sup>42f</sup>.

In der praktischen Anwendung von Regelungen kommt dem Stabilitätsnachweis, d. h. dem Nachweis, dass beschränkte Eingangssignale auch beschränkte Ausgangssignale erzeugen, eine wichtige Bedeutung zu. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass instabile Regelkreise schwerwiegende Folgen bis zur Zerstörung des Systems und Schädigung des Umfeld haben können<sup>45</sup>. Für lineare Systeme existieren dabei zahlreiche Verfahren zum Nachweis der Stabilität, wie bspw. das Hurwitz-Kriterium auf Basis der Übertragungsfunktion des Systems<sup>46a</sup> oder das Nyquist-Kriterium auf Basis der zugehörigen Ortskurve<sup>46b</sup>. Für nichtlineare Systeme gestaltet sich der Stabilitätsnachweis ungleich schwieriger und ist mit dem derzeitigen Wissensstand nicht in allen Fällen möglich<sup>44b</sup>. Insbesondere der sog. Ljapunov-Funktion kommt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle zu. Wenn für eine Ruhelage des betrachteten nichtlinearen Systems eine Ljapunov-Funktion gefunden werden kann, garantiert dies die (asymptotische) Stabilität für einen definierten Bereich um diese Ruhelage<sup>44c</sup>. Eine weitere Herausforderung bei der Regelung nichtlinearer Systeme stellt die Vermeidung von Dauerschwingungen, sog. Grenzyklen, dar<sup>44d</sup>.

Viele Regelstrecken sind zudem Parameterschwankungen unterworfen. Dies kann bspw. durch Alterungseffekte oder betriebspunktabhängige Systemdynamiken verursacht werden und schränkt die Anwendbarkeit von Reglern mit festen Parametern ein. Der Teilbereich der robusten Regelung versucht diese Problematik durch den Einsatz adaptiver oder besonders robuster Regelgesetze zu beherrschen. Dabei können sowohl Systemunsicherheiten als auch externe Störungen im Rahmen der Reglersynthese berücksichtigt werden<sup>47</sup>. Verfügt ein zu regelndes System über mehrere zu regelnde Freiheitsgrade (wie bspw. ein Kraftfahrzeug, vgl. Abschnitt 2.2.2), ist es aus regelungstechnischer Sicht wünschenswert, dass alle Freiheitsgrade unabhängig voneinander manipuliert werden können. Dies ist jedoch i. A. nicht gegeben, so dass es erforderlich sein kann, die Verkopplungen der einzelnen Freiheitsgrade bereits beim Entwurf der Regelung zu berücksichtigen<sup>48</sup>.

Eine weitere Herausforderung vieler realer Regelstrecken stellen Totzeiten dar, die unmittelbar aus der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit physikalischer Größen sowie der Taktzeit digitaler Regelkreise resultieren. Diese wirken sich negativ auf die Stabilität von Regelkreisen aus und müssen daher beim Reglerentwurf und der Stabilitätsanalyse berücksichtigt werden<sup>46c</sup>.

---

<sup>45</sup> Stein, G.: Respect the unstable (2003), S. 13.

<sup>46</sup> Stiller, C.: Grundlagen der Mess- und Regelungstechnik (2006), a: S.87; b: S. 92; c: S. 97.

<sup>47</sup> Hrycej, T.: Robuste Regelung (2018), S. 30-31.

<sup>48</sup> Lunze, J.: Regelungstechnik 2 (2020), S. 10.

## 2.2.5 Digitale Filter

In der digitalen Signalverarbeitung wird unter dem Begriff digitale Filter eine Vielzahl verschiedener Algorithmen zur Manipulation von Signalen subsumiert<sup>49a</sup>. Digitale Filter bieten die Möglichkeit, eine hohe Vielfalt verschiedener Eigenschaften zu realisieren, wie bspw. eine frequenzselektive Anpassung des Eingangssignals zur Darstellung eines Tief- oder Hochpassverhaltens. Alle digitalen Filter haben gemein, dass sie ausschließlich wert- und zeitdiskrete Eingangssignale verarbeiten<sup>49b</sup>. Im Rahmen dieser Arbeit werden dabei ausschließlich lineare Filter betrachtet, die aufgrund des Superpositionssatzes ermöglichen, das gesuchte Ausgangssignal aus einer Überlagerung von Impulsantworten darzustellen. Dabei gliedern sie sich in die zwei Kategorien der Infinite Impulse Response (IIR) Filter<sup>49a</sup> und Finite Impulse Response (FIR) Filter<sup>49c</sup>.

IIR Filter sind dabei rekursive Filter, die aufgrund ihrer internen Rückkopplung eine unendliche Impulsantwort aufweisen. Während Filter dieser Kategorie aufgrund der internen Rückkopplung oft mit geringerer Filterordnung im Vergleich zu FIR Filtern realisiert werden können, ist aufgrund der vorhandenen Pole außerhalb des Ursprung der z-Ebene die Stabilität des Filters nicht garantiert.<sup>49a</sup>

FIR Filter hingegen sind nichtrekursiv und weisen aufgrund der Pole im Ursprung der z-Ebene immer ein stabiles Verhalten auf. Es ist dabei möglich, ein IIR Filter mit einem korrespondierenden FIR Filter zu approximieren. Um dabei die Abbildungstreue zu erhalten, ist eine höhere Filterordnung im Vergleich zum ursprünglichen IIR Filter erforderlich.<sup>49d</sup>

Für beide Arten von digitalen Filtern existieren eine Vielzahl verschiedener Auslegungsmethoden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird für die ausführliche Diskussion der verschiedenen Verfahren auf die einschlägige Literatur verwiesen.

## 2.3 Systemarchitekturen für Kraftfahrzeuge

Kraftfahrzeuge bestehen aus einer großen Zahl verschiedener Komponenten, die für die Darstellung übergeordneter Funktionen im Rahmen einer Systemarchitektur miteinander kombiniert werden müssen. Dabei sind bei der Entwicklung der Systemarchitektur die Interessen verschiedener Gruppen ("Stakeholder") wie bspw. der Nutzer, System- und Sicherheitsingenieure, aber auch Zulassungsbehörden und Juristen betroffen<sup>50</sup>. Die Anforderungen der verschiedenen Stakeholder können signifikant voneinander abweichen und somit unterschiedliche Vorstellungen über die bevorzugte Ausgestaltung der Systemarchitektur vorherrschen<sup>51</sup>.

---

<sup>49</sup> Meyer, M.: Signalverarbeitung (2021), a: S. 264; b: S. 150; c: S. 287; d: S. 287.

<sup>50</sup> Weilkens, T. et al.: Model-Based System Architecture (2016), S. 131-132.

<sup>51</sup> Smith, B. W.: Lawyers and engineers should speak the same robot language (2016), S. 78.

Innerhalb dieses Abschnitts werden zunächst die zwei Designparadigmen der funktionsorientierten, dezentralen Systemarchitektur sowie der Modularisierung vorgestellt. Anschließend werden spezifische Aspekte der Systemarchitektur der Bewegungsregelung sowie der Fahrzeuge im Forschungsprojekt UNICAR*agil* betrachtet.

### 2.3.1 Funktionsorientierte, dezentrale Systemarchitekturen für (automatisierte) Fahrfunktionen

Bei der Entwicklung von Kraftfahrzeugen hat für lange Zeit ein funktionsorientierter und dezentralisierter Ansatz Anwendung gefunden. Dabei werden alle notwendigen Komponenten in Hard- und Software zur Realisierung einer bestimmten Funktion isoliert betrachtet und in das Fahrzeug eingebracht<sup>52a,53</sup>.

Im besten Fall findet eine friedliche Koexistenz der verschiedenen Systeme statt und die isolierte Betrachtung führt ausschließlich zu unnötigen Redundanzen und einer erhöhten Komplexität des Gesamtsystems<sup>54a,55,56</sup>. Die Vermeidung gegenseitiger Beeinflussung der verschiedenen Funktionen erfordert jedoch zusätzliche Aufmerksamkeit und führt u. U. dazu, dass das Gesamtsystem unterhalb seiner theoretischen Möglichkeiten bleibt, da Eingriffsschwellen entsprechend tolerant abgestimmt werden müssen<sup>54a,52b,53</sup>.

Der funktionsorientierte, dezentrale Ansatz kann am Beispiel von Fahrdynamikregelungen verdeutlicht werden. Rieth und Raste beschreiben bspw. die parallele Koexistenz von vier unterschiedlichen Systemen zur Beeinflussung der Querdynamik (Überlagerungslenkung, aktive Stabilisatoren, ESC und elektronisches Differenzial) mit jeweils eigener Sensorik, Datenverarbeitung und Regelung<sup>53</sup>. Auch Laumanns beschreibt die Koexistenz verschiedener Regelsysteme für Bremse, Lenkung und Wankbeeinflussung eines Fahrzeugs<sup>54b</sup> (siehe Abbildung 2-7). Die verschiedenen Systeme werden dabei z. T. in verschiedenen Abteilungen der Hersteller unabhängig entwickelt und appliziert<sup>56</sup>.

Auch für automatisierte Fahrfunktionen ist der funktionsorientierte Ansatz verwendet worden. Die beiden Systeme des Adaptive Cruise Control (Längsführung)<sup>57</sup> und Lane Keeping Assist (Querführung)<sup>58</sup> bauen bspw. auf jeweils eigener Datenverarbeitung und Regelung auf, obwohl die Kombination beider Ansätze die Ausnutzung von Synergien ermöglicht<sup>52c</sup>.

---

<sup>52</sup> Peters, Y.: Ein Beitrag zur Entwicklung eines zentralen Fahrwerkreglers (2020), a: S. 29; b: S. 30; c: S. 33.

<sup>53</sup> Rieth, P. E.; Raste, T.: Integrationskonzepte der Zukunft (2015), S. 1086.

<sup>54</sup> Laumanns, N.: Reglerstruktur zur Abstimmung von Fahrdynamiksystemen (2007), a: S. 48; b: S. 46; c: S. 56.

<sup>55</sup> Bandur, V. et al.: Making the Case for Centralized Automotive E/E Architectures (2021), S. 1230.

<sup>56</sup> Mihailescu, A.: Umsetzung von Querdynamik-Zieleigenschaften (2016), S. 55.

<sup>57</sup> Winner, H.; Schopper, M.: Adaptive Cruise Control (2015).

<sup>58</sup> Bartels, A. et al.: Querführungsassistenz (2015).

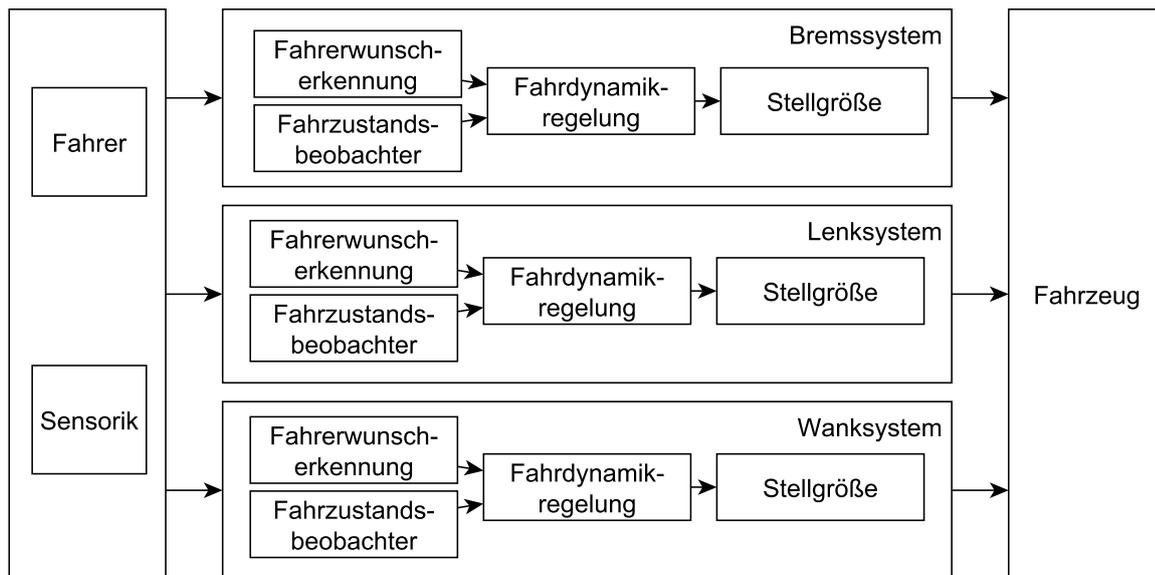


Abbildung 2-7: Koexistenz verschiedener Fahrdynamikregelsysteme. Eigene Darstellung nach Laumanns<sup>54b</sup>.

Die Weiterentwicklungen einzelner Funktionen innerhalb der funktionsorientierten Systemarchitektur finden häufig evolutionär statt, d. h. bestehende Systeme werden als Grundlage für die Entwicklung neuer Funktionen genutzt. Während dies durch die Nutzung bestehender und erprobter Systeme Vorteile hinsichtlich der Entwicklungszeiten und -kosten mit sich bringen kann<sup>54c</sup>, existiert gleichzeitig der Nachteil, dass bestehende Architekturen für neuartige Probleme genutzt werden. Dies kann dazu führen, dass der Lösungsraum für die Entwicklung neuer Funktionen durch frühere Fahrzeug- bzw. Funktionsgenerationen eingeschränkt wird und somit aufgrund der fehlenden gesamtheitlichen Betrachtung das Optimum für die heutige Anwendung verfehlt wird. In Bezug auf die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen wird erwartet, dass eine evolutionäre Entwicklung daher nicht in der Lage ist, die bestehenden Probleme zu lösen<sup>59</sup>.

Das beschriebene Vorgehen hat zu einer signifikanten Erhöhung der Systemkomplexität moderner Kraftfahrzeuge geführt, sowohl bzgl. der eingesetzten Hardware<sup>60</sup> als auch der beteiligten Software. So ist die Anzahl der Steuergeräte<sup>61</sup> und Lines of Code<sup>62</sup> in wenigen Jahren um ein Vielfaches angestiegen. Mit der zunehmenden Verbreitung automatisierter Fahrfunktionen wird erwartet, dass die Systemkomplexität nochmals signifikant ansteigt und der funktionsorientierte Ansatz somit an Grenzen stößt<sup>63,64a</sup>.

<sup>59</sup> Woopen, T. et al.: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures (2018), S. 3.

<sup>60</sup> Gut, G. et al.: Reduction of Electronic Control Units in Electric Vehicles (2012), S. 91.

<sup>61</sup> Amend, J. M.: Delphi: Industry Must Go Digital or Die (2017).

<sup>62</sup> Burkacky, O. et al.: Rethinking Car Software And Electronics Architecture (2018), S. 1.

<sup>63</sup> Reinhardt, D.; Kucera, M.: Domain Controlled Architecture (2013), S. 222.

<sup>64</sup> Bandur, V. et al.: Making the Case for Centralized Automotive E/E Architectures (2021), a: S. 1230; b: S. 1233.

### 2.3.2 Modulare und zentralisierte Systemarchitekturen für (automatisierte) Fahrfunktionen

Als mögliche Lösung der Probleme der funktionsorientierten, integrierten Systemarchitektur von Kraftfahrzeugen wurden und werden modulare Systemarchitekturen entwickelt. Die Zielsetzungen dieser Architekturen umfassen die Zerlegung der Systeme im Fahrzeug in möglichst disjunkte Teilfunktionen (Module), die anschließend zentral für verschiedene Anwendungen genutzt werden können. Durch diese zentralisierte Bereitstellung von (Teil-)Funktionen wie bspw. der Umfelderkennung, Datenverarbeitung oder Bewegungsregelung sollen unnötige Redundanzen in der beteiligten Hard- und Software vermieden werden. Weiterhin verspricht die Nutzung zentralisierter Funktionen eine Komplexitätsreduktion in der Applikation, da keine friedliche Koexistenz der beteiligten Systeme sichergestellt werden muss<sup>65a</sup>.

Die Modularisierung kann sich dabei sowohl auf Hardware als auch auf Software erstrecken. Hardwareseitig zeigt sich ein Trend zu zentralisierten Steuergeräten, die Rechenleistung unabhängig und funktionsübergreifend bereitstellen, um auf diese Weise die Anzahl und Komplexität der Steuergerätearchitektur zu reduzieren<sup>66a,65b</sup>. Konkrete Aufteilungen der Hardware können dabei domänenbasiert, domänenübergreifend oder zonenorientiert erfolgen<sup>64b</sup>. Die Nutzung zentralisierter Steuergeräte geht dabei einher mit einer Abstrahierung der Funktion von der Hardware, auf der sie berechnet wird, wie es bspw. von Middlewares angestrebt wird. Die Nutzung zentralisierter Steuergeräte erleichtert zudem die Anwendung von Safety-Konzepten wie einem redundanten Betrieb innerhalb einer Duplex-Architektur<sup>67</sup>.

Die Modularisierung der beteiligten Software bietet weitergehende Möglichkeiten zur Reduktion der Systemkomplexität. Die Bereitstellung von (Teil-)Funktionen als unabhängige Software-Dienste im Rahmen einer serviceorientierten Architektur steigert die Wiederverwendbarkeit (vgl. Abschnitt 2.1.4) und Updatebarkeit der implementierten Funktionen. Durch eine (dynamische) Rekonfiguration von Diensten können unterschiedliche übergeordnete Funktionen mit denselben unterlagerten Diensten realisiert und auf diese Weise eine Form des Baukastenprinzips in den Fahrzeugen appliziert werden<sup>68</sup>.

Für die Serviceorientierung der Software-Architektur ist die Verwendung einer Softwareplattform inklusive Middleware erforderlich. Zunehmende Verbreitung im Kontext automatisierter Kraftfahrzeuge findet das aus der Robotik stammende Robot Operating System (ROS), das durch kommerzielle Erweiterungen von Version 2 eine Echtzeitfähigkeit als zentrale Voraussetzung für die Anwendung in automatisierten Kraftfahrzeugen erhalten hat<sup>69</sup>. Vorreiter in diesem Bereich ist

---

<sup>65</sup> Peters, Y.: Ein Beitrag zur Entwicklung eines zentralen Fahrwerkreglers (2020), a: S. 33; b: S. 31.

<sup>66</sup> Humig, C.: Flexible und skalierbare Fahrzeugarchitekturen für Upgrades (2020), a: S. 17; b: S. 18.

<sup>67</sup> Niedballa, D.; Reuss, H.-C.: Concepts of functional safety in E/E-architectures (2020), S. 460.

<sup>68</sup> Wagner, M. et al.: SODA (2014), S. 150.

<sup>69</sup> Henle, J. et al.: Architecture platforms for future vehicles (2022), S. 3098.

jedoch das Projekt AUTOSAR (AUTomotive Open System ARchitecture), dessen Ziele u. a. die Übertragbarkeit und Skalierbarkeit von Software sowie die Definition einer offenen Architektur umfassen<sup>70</sup>. Während AUTOSAR zunächst nur statische Konfigurationen unterstützte, wurde mit der Erweiterung AUTOSAR Adaptive die Möglichkeit zur dynamischen Rekonfiguration geschaffen<sup>69,71</sup>. Die im Projekt UNICARagil entwickelte ASOA (Automotive Service Oriented Architecture) greift die dynamische Rekonfiguration als Zielsetzung auf und ermöglicht weiterhin die Verwendung der beteiligten Dienste auf heterogenen Plattformen, von leistungsfähigen Linux-Systemen bis hin zu ressourcenbeschränkter embedded Hardware<sup>72</sup>. Im Rahmen der ASOA wird weiterhin das Konzept eines zentralen Orchestrators eingeführt, der die dynamische Rekonfiguration von Diensten zur Laufzeit koordiniert<sup>73</sup> (vgl. Abbildung 1-1). Ein solcher Orchestrator kann zudem genutzt werden, um Berechnungen basierend auf den derzeit verfügbaren Rechenleistungskapazitäten dynamisch auf verschiedene Steuergeräte zu verteilen<sup>66b</sup>.

### 2.3.3 Architektur der Bewegungsregelung für die automatisierte Fahrzeugführung

Die zuvor beschriebenen Konzepte der modularen und zentralisierten Systemarchitekturen beziehen sich auf die Gesamtheit der an der (automatisierten) Fahrzeugführung beteiligten Funktionen. Nachdem auf diese Weise die Randbedingungen für die Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen aufgezeigt wurde, ist im Kontext dieser Arbeit insbesondere die Architektur der Bewegungsregelung relevant.

Die Bewegungsregelung besteht aus den beiden Teilfunktionen der Bewegungsplanung und Bewegungsausführung. Erstere ist dabei für die Planung einer Soll-Trajektorie verantwortlich, die, basierend auf dem derzeitigen Umfeld und des gewünschten Verhaltens des Fahrzeugs, eine zielführende Bewegung beschreibt. Die Bewegungsausführung generiert auf Basis der geplanten Soll-Trajektorie Stellbefehle für die Aktorik des Fahrzeugs, um die Soll-Trajektorie real umzusetzen. Für eine konkrete technische Umsetzung dieser beiden Teilfunktionen sind verschiedene Architekturen bekannt. Nach Werling existieren die drei Ansätze der Low-, High- und Bi-Level-Stabilisierung, die sich hinsichtlich der Rückführungsstrategie des aktuellen fahrdynamischen Ist-Zustands unterscheiden<sup>74a</sup> (vgl. Abbildung 2-8).

In einer Low-Level-Stabilisierung (LLS) wird der Ist-Zustand ausschließlich in die Teilfunktion der Bewegungsausführung zurückgeführt, die dadurch eine rückgekoppelte Regelung darstellt (vgl. Abschnitt 2.2.4). Wird der Ist-Zustand stattdessen in die Bewegungsplanung zurückgeführt,

---

<sup>70</sup> Fürst, S.; Bunzel, S.: AUTOSAR (2015), S. 108.

<sup>71</sup> Fürst, S.; Bechter, M.: AUTOSAR for Connected and Autonomous Vehicles (2016), S. 216.

<sup>72</sup> Kampmann, A. et al.: A Dynamic Service-Oriented Software Architecture (2019), S. 2102.

<sup>73</sup> Mokhtarian, A. et al.: Dynamic Service-oriented Software Architecture UNICARagil (2020), S. 282.

<sup>74</sup> Werling, M.: Trajektoriengenerierung in Verkehrsszenarien (2011), a: S. 8; b: S. 21; c: S. 6; d: S. 19; e: S. 18.

entsteht eine High-Level-Stabilisierung (HLS). Die Bewegungsausführung kann in diesem Fall als Steuerung ausgelegt werden, da keine Rückkopplung mit dem Ist-Zustand besteht. Die Kombination beider Systeme stellt die Bi-Level-Stabilisierung (BLS) dar, bei der in den meisten Betriebszuständen eine LLS zum Einsatz kommt, die Soll-Trajektorie jedoch beim Überschreiten bestimmter Grenzwerte (i. d. R. bezogen auf die vorhandene Regelabweichung) neu geplant wird<sup>74b</sup>.

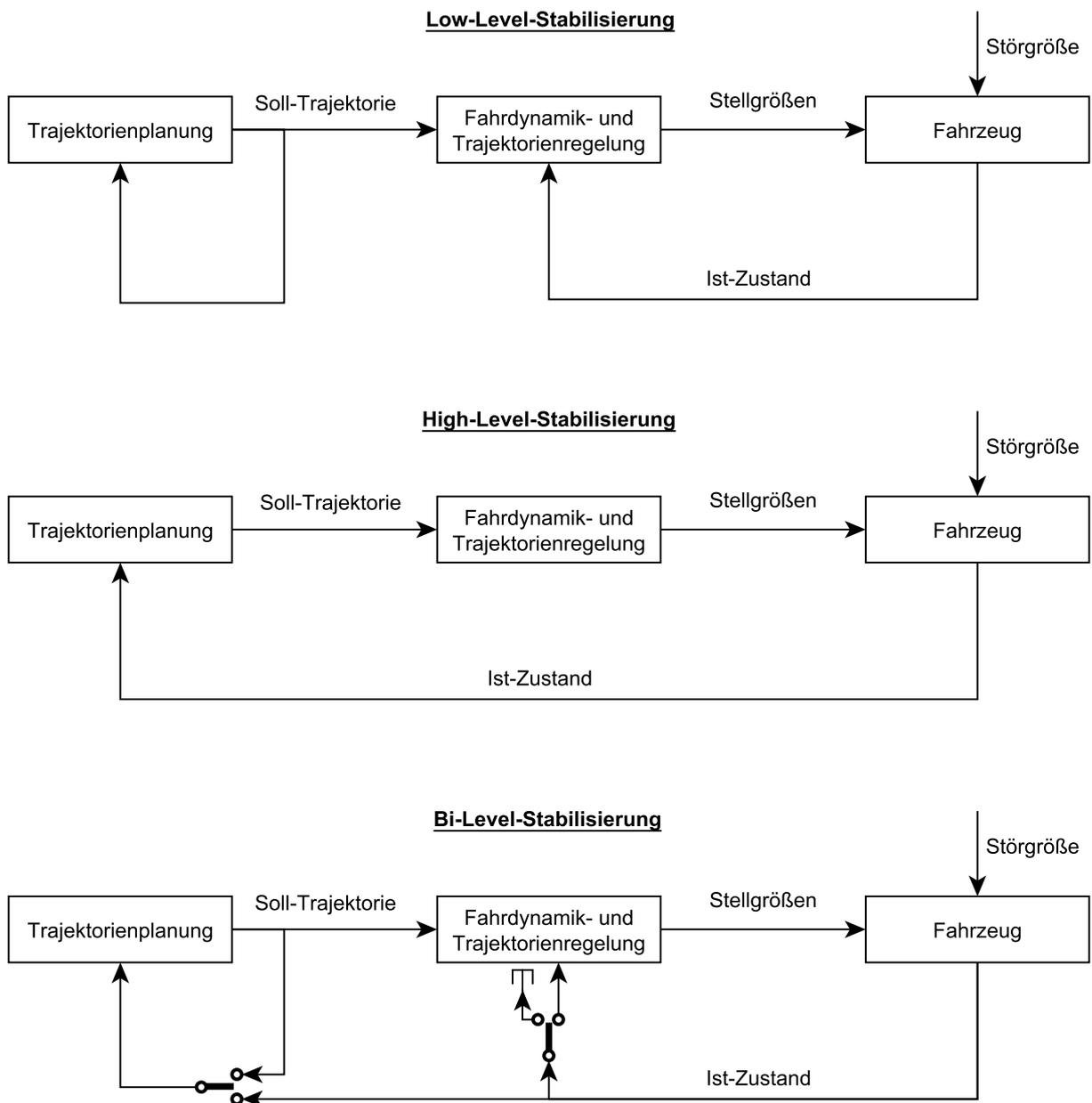


Abbildung 2-8: Rückführungsstrategien des fahrdynamischen Ist-Zustands innerhalb der Bewegungsregelung automatisierter Kraftfahrzeuge. Eigene Darstellung nach Werling<sup>74b</sup>.

Die drei Strategien unterscheiden sich dabei hinsichtlich des Verhaltens des Fahrzeugs auf externe Störungen<sup>74c</sup>. Weiterhin bestimmt die gewählte Rückführungsstrategie das Ausmaß der notwendigen Integration der beiden Teilfunktionen. In einer HLS ist die Bewegungsplanung unmittelbar Teil des rückgekoppelten Regelkreises und benötigt daher bei der Stabilitätsanalyse des Systems besondere Aufmerksamkeit<sup>74d</sup>. In einer LLS hingegen ist die Rückführung auf die im Allgemeinen schneller getaktete Bewegungsausführung beschränkt, was die Sicherstellung der Stabilität des Gesamtsystems erleichtert<sup>74e</sup>. Alle drei Ansätze wurden bereits erfolgreich in realen (Forschungs-)Fahrzeugen angewendet<sup>74a</sup>.

Für die beiden Teilfunktionen der Bewegungsplanung und -ausführung existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Ansätze und Algorithmen, die stets auf die konkrete Anwendung und die vorliegenden Rahmenbedingungen angepasst werden müssen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und der abweichenden Zielsetzung dieser Arbeit<sup>75</sup> wird auf die verschiedenen Ansätze hier nicht genauer eingegangen. Es sei jedoch auf die einschlägige und umfangreiche Literatur zum Thema verwiesen, z. B. <sup>76,77,78,79,80,81,82</sup>.

Im Kontext dieser Arbeit besteht die Zielsetzung, die mit der Bewegungsausführung betraute FTR zu kapseln, d. h. die Abhängigkeiten von benachbarten Modulen (und insbesondere der Bewegungsplanung) zu minimieren. Diese Zielsetzung ist zunächst unabhängig von den beschriebenen Stabilisierungstechniken. Werling hat bspw. mit der Entwicklung der BLS zentrale Grundlagenarbeit für die Architektur von Bewegungsregelungen für automatisierte Kraftfahrzeuge geleistet, und in späteren Kapiteln wird gezeigt, dass die BLS auch die Kapselung der FTR wesentlich erleichtert bzw. unterstützt. Die kapselungsbedingten Herausforderungen (Austauschbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Asynchronität der Teilfunktionen, Wissens- bzw. Informationskapselung) standen bei Werling jedoch nicht im Fokus der Analyse. Auch im übrigen Stand der Technik ist dem Autor keine gezielte Analyse der kapselungsbedingten Herausforderungen der FTR und der daraus resultierenden Anforderungen an die Architektur der Bewegungsregelung bekannt.

---

<sup>75</sup> Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Kapselung der FTR und der Entwicklung von Gegenmaßnahmen zur Vermeidung kapselungsbedingter Defizite. In Kapitel 7 wird gezeigt, dass das konkret verwendete Regelgesetz dabei nur eine untergeordnete Rolle spielt und im Rahmen der modularen Reglerarchitektur ausgetauscht werden kann.

<sup>76</sup> Rupp, A.; Stolz, M.: Survey on Control Schemes for Automated Driving on Highways (2017).

<sup>77</sup> Sorniotti, A. et al.: Path Tracking for Automated Driving (2017).

<sup>78</sup> Gonzalez, D. et al.: A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles (2016).

<sup>79</sup> Stolte, T.: Actuator Fault-Tolerant Vehicle Motion Control (2021).

<sup>80</sup> Cao, H. et al.: Decision Making, Planning, and Control for Intelligent Vehicles (2020).

<sup>81</sup> Ni, J. et al.: A review for design and dynamics control of unmanned ground vehicle (2021).

<sup>82</sup> Werling, M.: Integrated Trajectory Optimization (2016).

### 2.3.4 Systemarchitektur im Projekt UNICARagil

Das Forschungsprojekt UNICARagil verfolgt die Zielsetzung, mit den evolutionären Entwicklungsparadigmen der Automobilindustrie zu brechen und disruptive sowie modulare Systemarchitekturen für automatisierte Fahrzeuge zu entwickeln<sup>83a</sup>. Die fahrerlosen Fahrzeuge sind in Hard- und Software strikt modular aufgebaut, um die Anpassungsfähigkeit für verschiedene urbane Anwendungsfälle zu maximieren. Sie basieren auf einer skalierbaren Plattform, die je nach Einsatzzweck mit verschiedenen Aufbauten ergänzt wird. Die Systemarchitektur der Fahrzeuge besteht aus den an das menschliche Gehirn angelehnten drei Hauptebenen "Großhirn", "Stammhirn" und "Rückenmark", die jeweils unabhängige Hardware- und Softwarekomponenten enthalten (vgl. Abbildung 2-9). Während das "Großhirn" unter anderem Funktionen zur Umgebungswahrnehmung und Verhaltensplanung enthält, ist das "Stammhirn" für die Ausführung der geplanten Soll-Trajektorie zuständig, indem es Stellgrößen für die Aktoren im "Rückenmark" erzeugt.<sup>83c</sup>

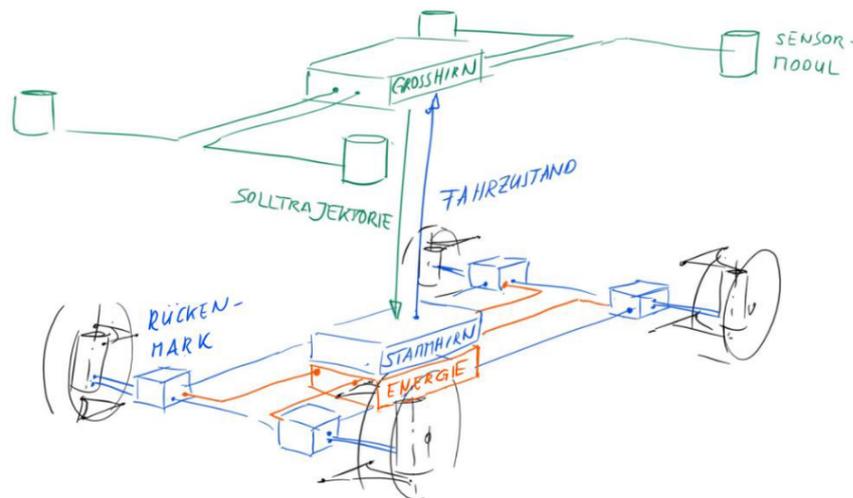


Abbildung 2-9: Prinzipskizze der E/E-Architektur im Projekt UNICARagil, angelehnt an die Struktur des menschlichen Gehirns<sup>83c</sup>.

Die Fahrzeuge verfügen über elektrische Einzelradantriebe, so genannte Dynamikmodule, bestehend aus Radnabenantrieb, Reibbremse und Lenkaktor mit bis zu 90° Radlenkwinkel<sup>84a</sup>. Diese mechatronische Struktur erlaubt unabhängige Lenk- und Antriebsbefehle für jedes Rad und ermöglicht somit die Gierbewegung des Fahrzeugs als völlig unabhängigen Freiheitsgrad, falls keine Lenkwinkelgrenzen erreicht werden. Mit diesem Freiheitsgrad sind unkonventionelle Manöver wie seitliches Einparken oder enges Wenden möglich<sup>84b</sup>. Abbildung 2-10 zeigt ein seitliches Einparkmanöver, das mit einem Radlenkwinkel von 90° an allen Dynamikmodulen durchgeführt wird.

<sup>83</sup> Woopen, T. et al.: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures (2018), a: S. 3; b: -; c: S. 5.

<sup>84</sup> Martens, T. et al.: UNICARagil Dynamics Module (2020), a: S. 6-7; b: S. 8.

<sup>85</sup> Homolla, T.; Winner, H.: Encapsulated trajectory tracking control for autonomous vehicles (2022), S. 297.



Abbildung 2-10: Seitliches Einparken des UNICARagil-Fahrzeugs autoSHUTTLE mit 90° Radlenkwinkel an allen Rädern durch Verwendung der unabhängigen Dynamikmodule<sup>85</sup>.

Zentrales Merkmal der Forschungsfahrzeuge ist die modulare und dienstorientierte Softwarearchitektur, durch die eine dynamische Rekonfiguration der beteiligten Dienste, basierend auf dem derzeitigen Betriebsmodus der Fahrzeuge, ermöglicht wird<sup>86</sup>. Die Betriebsmodi des Fahrzeugs decken die verschiedenen Anwendungsbereiche ab (z. B. autonomes Fahren<sup>87</sup>, Sicheres Anhalten<sup>88a</sup>, oder Teleoperation<sup>89</sup>). Für jeden Modus ist eine andere Verknüpfung von Diensten notwendig, die mit Hilfe des zentralen Orchestrators implementiert wird, der die Dienste dynamisch auf Basis der aktuellen Anforderungen rekonfiguriert. Die Kombination der einzelnen Dienste bildet die komplette Berechnungspipeline für das Fahrzeugverhalten, je nach aktuellem Betriebsmodus. Die Kommunikation zwischen den Diensten erfolgt über die eigens entwickelte Middleware ASOA<sup>90a</sup>. Darüber hinaus wird an einer unabhängigen Testdurchführung und Absicherung von Diensten geforscht<sup>88b</sup>.

Um die Vorteile der modularen Systemarchitektur voll ausschöpfen zu können, sind möglichst unabhängige Dienste für die TP und FTR erforderlich. Die betrachtete Architektur mit starker Entkopplung (unabhängige Lokalisierungen, asynchrone Taktungen und eingeschränkte Informationsverfügbarkeit in der TP) demonstriert somit unmittelbar die Motivation für die Kapselung der FTR, so dass diese ohne Defizite in verschiedenen Betriebsmodi zum Einsatz kommen kann.

---

<sup>86</sup> Mokhtarian, A. et al.: Dynamic Service-oriented Software Architecture UNICARagil (2020), S. 279.

<sup>87</sup> Buchholz, M. et al.: Automation of the UNICARagil vehicles (2020), S. 1534.

<sup>88</sup> Stolte, T. et al.: Towards Safety Concepts for Automated Vehicles (2020), a: S. 1579; b: S. 1584.

<sup>89</sup> Feiler, J. et al.: Concept of a Control Center for an Automated Vehicle Fleet (2020), S. 4-5.

<sup>90</sup> Kampmann, A. et al.: A Dynamic Service-Oriented Software Architecture (2019), a: -; b: S. 278 (© 2019 IEEE).

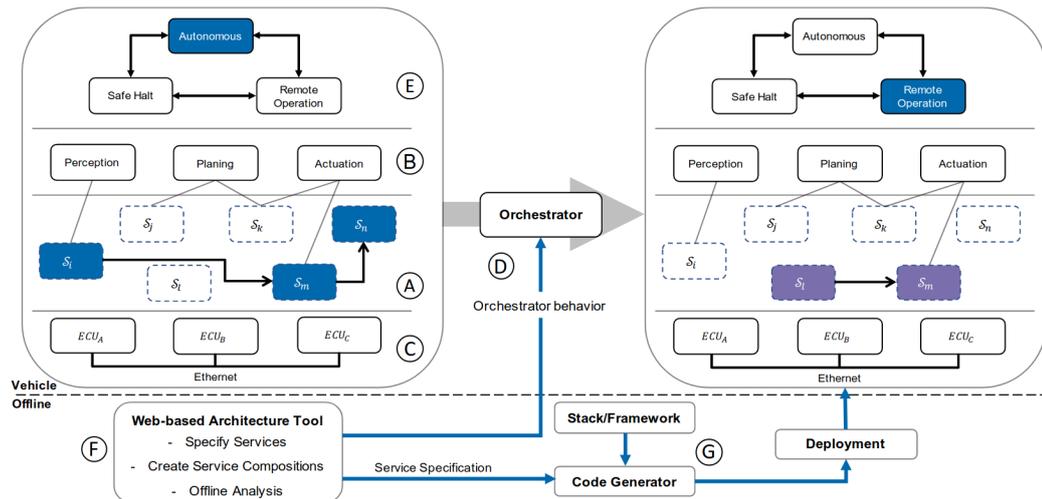


Abbildung 2-11: Prinzipische Skizze der ASOA-Softwarearchitektur im Projekt UNICARagi<sup>90b</sup>. Die Middleware ermöglicht die dynamische Rekonfiguration von Diensten basierend auf dem derzeitigen Fahrzeug-Betriebsmodus.

## 2.4 Stand der Technik für von der Kapselung betroffene Teilfunktionen

In Kapitel 3 wird aufgezeigt, dass für die FTR durch eine konsequente Kapselung innerhalb einer Referenzsystemarchitektur mit starker Entkopplung Herausforderungen entstehen. Für die von der Kapselung betroffenen Teilbereiche der FTR wird innerhalb des nun folgenden Kapitels bereits der Stand der Technik dargestellt. Dies stellt einen Vorgriff auf die Ergebnisse der späteren Analyse dar, ist jedoch erforderlich, um die Grundlage und das Verständnis für selbige zu schaffen. Die Auswahl der betrachteten Teilbereiche wird im nachfolgenden Kapitel ausführlich begründet.

### 2.4.1 Lokalisierungsarchitekturen

Für die automatisierte Fahrzeugführung ist die genaue Kenntnis des aktuellen fahrdynamischen Ist-Zustands und insbesondere der Fahrzeug-Pose (horizontale Position + Ausrichtung) unerlässlich<sup>91</sup>. Der Stand der Technik zur Ermittlung des Ist-Zustands umfasst dabei die Sensordatenfusion von Inertial-, GNSS- und ggf. Odometriesensorik in ein gemeinsames Filter<sup>92,93,94</sup>. Weiterhin können Informationen aus zuvor aufgezeichneten Karten<sup>95</sup> oder Umfeldsensorik<sup>96,97,98</sup> zur Unterstützung der Lokalisierung verwendet werden.

<sup>91</sup> Reid, T. G. et al.: Localization Requirements for Autonomous Vehicles (2019), S. 8-11.

<sup>92</sup> Gottschalg, G.: Data Fusion Architecture for State Estimation (2022), S. 21-24.

<sup>93</sup> Reuper, B.: Multi-Frequency GNSS Sensor Fusion for Automotive Applications (2020), S. 22-24.

<sup>94</sup> Robert-Bosch-GmbH: Safe GNSS/Inertial Positioning by VMPS (2018).

<sup>95</sup> Fouque, C.; Bonnifait, P.: Navigable map-aided differential odometry to enhance GNSS (2009), S. 2.

<sup>96</sup> Wan, G. et al.: Robust and Precise Vehicle Localization Based on Multi-Sensor Fusion (2018), S. 4671.

<sup>97</sup> Huang, C.-M.; Huang, C.: Visual positioning and navigation device and method thereof (2018).

<sup>98</sup> Zaccaria, R. et al.: A method and a device for determining the position of a vehicle (2009).

Während also unterschiedliche und unabhängige Sensoren bzw. Informationsquellen zur Ermittlung des Ist-Zustands zum Einsatz kommen, haben die Ansätze im Stand der Technik gemein, dass innerhalb eines automatisierten Fahrzeugs eine einzelne Lokalisierungsfunktion für die Bereitstellung des Ist-Zustands verantwortlich ist. Dies bedeutet, dass Inkonsistenzen zwischen den verschiedenen Sensoren bereits innerhalb des Filters der Lokalisierung durch eine Gewichtung der verschiedenen Lösungen aufgelöst und auf diese Weise fusioniert werden<sup>99</sup>. Selbiges gilt für Lokalisierungsarchitekturen mit einem integrierten Voting Algorithmus, der aus verschiedenen unabhängigen Lokalisierungen auf Basis definierter Kriterien die Lösung mit der höchsten Qualität auswählt und anschließend ausgibt<sup>100</sup> (vgl. Abbildung 2-12).

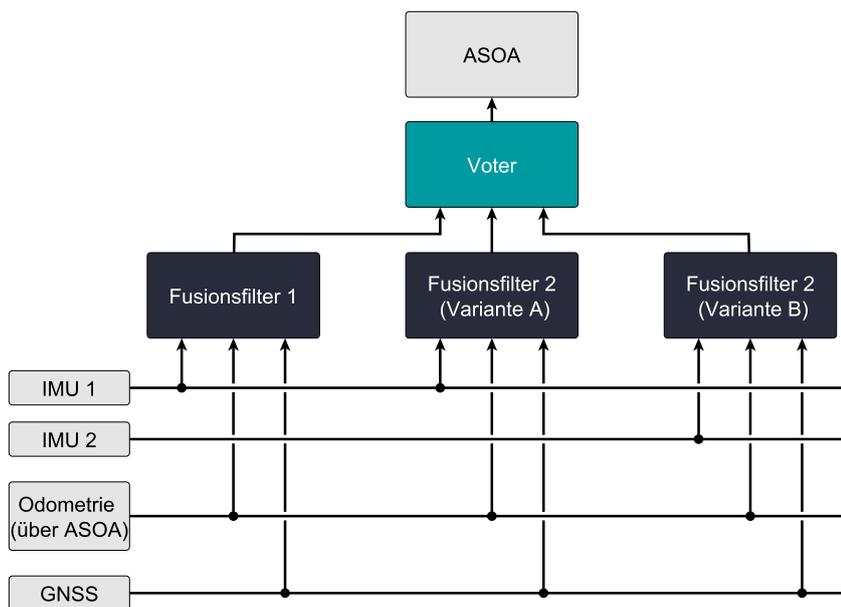


Abbildung 2-12: Prinzipskizze einer Lokalisierungsarchitektur mit unabhängigen Fusionsfiltern und einem nachgelagerten Voter zur Auswahl der besten Lösung (basierend auf zuvor definierten Qualitätskriterien)<sup>101</sup>.

Die zuvor genannten Konzepte sind im Stand der Technik in verschiedenen Ausprägungen und Abwandlungen vielfältig vertreten. Es sind jedoch keine Architekturen bekannt, die zwei unabhängige Lokalisierungsfunktionen im Fahrzeug parallel einsetzen und die jeweiligen Ergebnisse an verschiedene gleichzeitig an der automatisierten Fahrzeugführung beteiligte Funktionen bzw. Dienste verteilen.

### 2.4.2 Prädiktive Vorsteuerungen

Wie bereits in Abschnitt 2.2.4 aufgezeigt wurde, sind Vorsteuerungen innerhalb von Regelkreisen kein neuartiges Konzept und bereits vielfältig erprobt. Dabei können zwei grundsätzliche Kategorien von Vorsteuerungen unterschieden werden, je nachdem ob die Führungsgröße für einen

<sup>99</sup> Gottschalg, G.; Leinen, S.: Evaluation of Integrity Algorithms for Vehicle State Estimation (2021), S. 6.

<sup>100</sup>Hammond, M.; Kentley-Klay, T. D.: Redundant pose generation system (2019).

<sup>101</sup>Buchholz, M. et al.: Automation of the UNICARagil vehicles (2020), S. 1536.

zukünftigen Zeitraum oder nur für den aktuellen Zeitschritt bekannt ist<sup>102a</sup>.

Vorsteuerungen für eine singuläre Führungsgröße kommen in Kraftfahrzeugen bspw. in ACC-<sup>103</sup> oder Lenkungssystemen<sup>104</sup> zum Einsatz. Sind neben dem Wert der Führungsgröße auch die zeitlichen Ableitungen selbiger bekannt, kann das von Lunze präsentierte Verfahren zum inversionsbasierten Vorsteuerungsentwurf angewendet werden, das durch die Inversion der Strecken-Übertragungsfunktion eine Kompensation der Systemdynamik ermöglicht<sup>102a</sup>. Im Rahmen einer HLS Architektur der Bewegungsregelung (vgl. Abschnitt 2.3.3) kann eine Vorsteuerung mit singulärer Führungsgröße innerhalb der Bewegungsausführung eingesetzt werden<sup>105</sup>. In diesem Fall ist es die Aufgabe der TP, die Systemdynamik der verwendeten Aktorik bei der Berechnung der Soll-Trajektorie zu berücksichtigen<sup>106</sup>. Dazu ist jedoch vertieftes Wissen innerhalb der TP über die Eigenschaften des Fahrzeugs erforderlich, was in einer modularen Systemarchitektur im Sinne der Informationskapselung vermieden wird.

Für die Anwendung in der Bewegungsregelung automatisierter Fahrzeuge mit LLS oder BLS Architektur sind insbesondere Verfahren unter Ausnutzung eines zukünftigen Verlaufs der Führungsgröße von Interesse. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass TP-Algorithmen i. d. R. einen gewünschten Verlauf der Fahrzeugbewegung über einen Prädiktionshorizont berechnen und in einer Soll-Trajektorie kodieren. Die Aufgabe der Bewegungsausführung ist dabei, das Fahrzeug selbstständig, d. h. ohne Anpassung der Soll-Trajektorie, auf selbiger zu halten. Mit Hilfe des zukünftigen Verlaufs der Führungsgröße ist es daher möglich, eine prädiktive Vorsteuerung zur Kompensation der Systemdynamik zu entwerfen<sup>107,108</sup>.

Zur Dynamikkompensation kommen dabei häufig Faltungen auf der Grundlage von FIR-Filtern zum Einsatz<sup>109,110</sup>. Bekannte Ansätze aus der Literatur werden in der Produktion von Siliziumwafern<sup>111,112,113,114,115</sup> oder der Regelung von Windturbinen<sup>116</sup> angewendet. Automobile Anwendungen sind aus der Kompensation von prädizierten Störgrößen zur Regelung von

<sup>102</sup>Lunze, J.: Regelungstechnik 1 (2020), a: S. 398; b: S. 399-402; c: S. 401.

<sup>103</sup>He, Y. et al.: Adaptive Cruise Control Strategies Implemented on Vehicles (2019), S. 23.

<sup>104</sup>Fu, D. et al.: Model-based feedforward control for electric power steering system (2022), S. 2310.

<sup>105</sup>Werling, M.: Trajektoriengenerierung in Verkehrsszenarien (2011), S. 7-8.

<sup>106</sup>Urmson, C. et al.: Autonomous driving in urban environments (2008), S. 430.

<sup>107</sup>Hunt, L. et al.: Noncausal inverses for linear systems (1996).

<sup>108</sup>Devasia, S. et al.: Nonlinear inversion-based output tracking (1996).

<sup>109</sup>Marro, G. et al.: Convolution profiles for inversion of non-minimum phase systems (2002).

<sup>110</sup>Strohm, J. N.; Lohmann, B.: Optimal Feedforward Preview Control by FIR Filters (2017).

<sup>111</sup>Ausgangsprodukt zur Herstellung von Mikrochips mit sehr hohen Präzisionsanforderungen an den Produktionsprozess.

<sup>112</sup>Baggen, M. et al.: Data-based feed-forward control in MIMO motion systems (2008).

<sup>113</sup>Heertjes, M. et al.: MIMO feed-forward design in wafer scanners (2010).

<sup>114</sup>Jiang, Y. et al.: A Data-Driven Iterative Decoupling Feedforward Control Strategy (2015).

<sup>115</sup>Li, M. et al.: An Integrated Model-Data-Based Feedforward Control Strategy (2017).

<sup>116</sup>Wang, N. et al.: Feedforward Control for Wind Turbine Load Mitigation (2012).

Schwingungsdämpfern bekannt<sup>117,118,119</sup>. Ansätze aus der modellprädiktiven Regelung (MPC) können ebenfalls zur Kategorie der prädiktiven Vorsteuerungen gezählt werden, da mittels Optimierung eine bestmögliche Abfolge von Stellgrößen zur Minimierung der Regelabweichung ermittelt wird. So nutzen bspw. Schwartz et al. eine MPC Formulierung zur Ermittlung optimaler Aktorstellgrößen unter Berücksichtigung der jeweiligen Systemdynamik<sup>120,121</sup>.

Die zahlreichen Veröffentlichungen zur Thematik der prädiktiven Vorsteuerungen zeigen, dass es sich um kein neuartiges Konzept handelt. Im Stand der Technik ist jedoch keine gezielte Betrachtung der Anwendung prädiktiver Vorsteuerungen im Kontext der Kapselung der FTR innerhalb einer vergleichbaren modularen und serviceorientierten Systemarchitektur bekannt.

### 2.4.3 Physikalische Umsetzbarkeit von Trajektorien

Die Umsetzung geplanter Soll-Trajektorien durch die nachgelagerte Bewegungsausführung ist einer Vielzahl verschiedener physikalischer Einschränkungen unterworfen. Dazu zählen bspw. kinematische Einschränkungen (siehe auch Abschnitt 2.2.2) oder Begrenzungen des Fahrbahnreibwerts und der Aktorleistung. Geplante Soll-Trajektorien müssen daher diese Randbedingungen berücksichtigen, um sicherzustellen, dass keine unerwünschten Regelabweichungen auftreten.

In der Arbeit von Stahl<sup>122a</sup> wurden Beschleunigungslimits auf Basis des derzeit gültigen Reibwerts zwischen Fahrbahn und Reifen<sup>122b</sup> sowie durch die Leistungsgrenzen des Antriebsaktors<sup>122c</sup> als kritisch für die Sicherheit geplanter Soll-Trajektorien identifiziert. Weiterhin wird die Kurvenkrümmung überwacht, um Limitationen durch das Erreichen von Lenkwinkelgrenzen zu vermeiden<sup>122c</sup>. Auch Werling schlägt eine Überprüfung der Kurvenkrümmung und der Beschleunigungsgrenzen auf Basis eines Kamm'schen Kreises vor<sup>123</sup>. Urmson et al. berücksichtigen zudem die Änderungsrate der Kurvenkrümmung, da das Lenkrad nicht beliebig schnell gedreht werden kann<sup>124</sup>. Chu et al. erweitern die aktorspezifischen Randbedingungen um eine Begrenzung der Aktor-Stellrate<sup>125</sup>. Ziegler führt darüber hinaus Randbedingungen für stetige Übergänge zwischen neu geplanten Trajektorien ein, indem ein Übergangsbereich definiert wird, in dem zwei aufeinanderfolgende Soll-Trajektorien identisch sein müssen<sup>126</sup>. Subosits und Gerdes berücksichtigen zudem die

---

<sup>117</sup>Strohm, J. N.; Lohmann, B.: Vorausschauende Störgrößenaufschaltung am Viertelfahrzeug (2017).

<sup>118</sup>Kitching, K. et al.: An Experimental Investigation of Preview Control (1999).

<sup>119</sup>Claus, S.: Vorausschauende Kompensation von Verzugszeiten im Regelkreis (2017).

<sup>120</sup>Schwartz, M. et al.: Model Predictive Control Allocation of an Over-actuated Vehicle (2019).

<sup>121</sup>Schwartz, M. et al.: Predictive and Bounded Reference Generation of the Actuators (2020).

<sup>122</sup>Stahl, T. N.: Safeguarding complex automated driving functions (2022), a: -; b: 49-51; c: S. 52-53.

<sup>123</sup>Werling, M.: Trajektoriengenerierung in Verkehrsszenarien (2011), S. 43.

<sup>124</sup>Urmson, C. et al.: Autonomous driving in urban environments (2008), S. 431.

<sup>125</sup>Chu, W. et al.: Traction fault accommodation system for four wheel driven vehicle (2012), S. 3.

<sup>126</sup>Ziegler, J.: Optimale Bahn- und Trajektorienplanung für Automobile (2015), S. 55.

Fahrbahnsteigung als Einflussfaktor auf die mögliche Fahrzeugbeschleunigung<sup>127</sup>.

Die Berücksichtigung physikalischer Grenzen findet in der Literatur vielfach bereits innerhalb der TP statt<sup>128,129,130,131</sup>. Weiterhin haben Münch et al.<sup>132</sup> einen sog. "Constraint Handler" zur Bereitstellung fahrdynamischer Grenzen an Assistenzsysteme vorgestellt. Aufgrund der Fokussierung auf Assistenzsysteme für konventionelle Fahrzeuge sind die dort durchgeführten Analysen bzw. erhaltenen Ergebnisse jedoch nicht mit den Randbedingungen und Ergebnissen im Rahmen dieser Arbeit vergleichbar. Die Berücksichtigung der Ausführungsgrenzen kann darüber hinaus ebenfalls innerhalb der Bewegungsausführung erfolgen, um umsetzbare Stellgrößen für die Aktorik zu generieren. So werden Randbedingungen für die Stellgrößenberechnung häufig in die Formulierung des Optimierungsproblems für eine MPC im Rahmen der Control Allocation integriert<sup>133,134,135,136,137,138</sup>. Die effektive Control Allocation unter Randbedingungen ist dabei ein eigener Forschungsbereich mit hoher Forschungsaktivität, wie bspw. die Übersichten von Johansen und Fossen<sup>139</sup> bzw. Stolte<sup>140</sup> zeigen.

Zur Berücksichtigung des Reibwerts zwischen Fahrbahn und Reifen in der TP oder der Bewegungsausführung ist eine vorherige Kenntnis der Fahrbahnbedingungen erforderlich. Der Stand der Technik zeigt, dass die korrekte Ermittlung in der Praxis äußerst schwierig ausfällt. Zwar existieren zahlreiche Ansätze<sup>141,142,143,144,145</sup>, durch Unsicherheiten bei der Schätzung und der sich schnell ändernden Fahrbahnbeschaffenheit sind alle bekannten Ansätze jedoch mit einem hohen Unsicherheitsbereich behaftet. Bei der Verwendung geschätzter Reibwerte muss daher stets berücksichtigt werden, dass die realen Bedingungen signifikant abweichen können.

---

<sup>127</sup>Subosits, J.; Gerdes, J. C.: Autonomous vehicle control for emergency maneuvers (2015), S. 1408.

<sup>128</sup>Christ, F. et al.: Time-optimal trajectory planning considering friction coefficients (2021), S. 9.

<sup>129</sup>Heilmeier, A. et al.: Minimum curvature trajectory planning and control (2020), S. 9.

<sup>130</sup>Herrmann, T. et al.: Real-Time Adaptive Velocity Optimization for Autonomous Cars (2021), S. 668-669.

<sup>131</sup>Lim, W. et al.: Hybrid Trajectory Planning for Autonomous Driving (2021), S. 345.

<sup>132</sup>Münch, E. et al.: Vehicle motion control layer (2019), S. 184.

<sup>133</sup>Zou, Y. et al.: An integrated control strategy of path following (2021), S. 1170.

<sup>134</sup>Schwartz, M. et al.: Model Predictive Control Allocation of an Over-actuated Vehicle (2019), S. 164.

<sup>135</sup>Orend, R.: Fahrzeugbewegung mit optimaler Nutzung der Kraftschlusspotentiale (2005), S. 22-23.

<sup>136</sup>Moseberg, J.-E.: Regelung der Horizontalbewegung eines überaktuierten Fahrzeugs (2016), S. 60-65.

<sup>137</sup>Bächle, T. et al.: Model Predictive Control Allocation in Electric Vehicle Drive Trains (2015), S. 338.

<sup>138</sup>Schwartz, M.: Topologie-Optimierung eines radselektiv angesteuerten Fahrzeugs (2022), S. 73-75.

<sup>139</sup>Johansen, T. A.; Fossen, T. I.: Control allocation—A survey (2013).

<sup>140</sup>Stolte, T.: Actuator Fault-Tolerant Vehicle Motion Control (2021).

<sup>141</sup>Chen, Y.; Wang, J.: Vehicle real-time tire-road friction coefficient estimation (2010).

<sup>142</sup>Feng, Y. et al.: Road tire friction coefficient estimation for electric vehicle (2020).

<sup>143</sup>Hermansdorfer, L. et al.: A Concept for Estimation of the Friction Potential (2019).

<sup>144</sup>Hu, J. et al.: Real-time estimation of tire-road friction coefficient (2020).

<sup>145</sup>Zhang, Z. et al.: Coordinated control with friction coefficient identification (2022).

## 2.5 Zwischenfazit

Die präsentierte Analyse des Stands der Technik zeigt auf, dass in den drei wesentlichen Teilbereichen, die von einer Kapselung der FTR betroffen sind, bereits verschiedene isolierte Forschungsarbeiten stattgefunden haben. Jedoch haben alle bekannten Veröffentlichungen gemein, dass ihr Anwendungsbereich auf Fahrzeugarchitekturen abzielt, die eine statische Konfiguration von Teilfunktionen bzw. Software-Komponenten aufweisen. Aus dieser Tatsache leiten sich die folgenden Lücken im Stand der Technik ab:

- Es liegt keine Untersuchung des Einflusses der dauerhaften Nutzung unabhängiger Lokalisierungsfunktionen für verschiedene Teilfunktionen innerhalb derselben Wirkkette der automatisierten Fahrzeugführung vor. Daraus folgt unmittelbar die nicht vorhandene Untersuchung möglicher Gegenmaßnahmen für Defizite, die aus einer vergleichbaren Lokalisierungsarchitektur entstehen.
- Es liegt keine Untersuchung vor, die eine Nutzung prädiktiver Vorsteuerungen zur Beherrschung der kapselungsbedingten Defizite der Bewegungsausführung innerhalb einer vergleichbaren modularen, serviceorientierten Architektur vorsieht.
- Eine vollständige Untersuchung des notwendigen Informationsaustauschs zwischen Bewegungsausführung und Bewegungsplanung innerhalb einer vergleichbaren modularen, serviceorientierten Architektur und unter dem Gesichtspunkt der Informationskapselung liegt nicht vor.
- Auch modulare Fahrzeugarchitekturen sind nicht grundsätzlich neu und wurden bereits in verschiedenen Ausprägungen realisiert. Jedoch ist keine Arbeit bekannt, welche die Implikationen der Kapselung von Bewegungsplanung und -ausführung explizit untersucht und somit die Herausforderungen zur Vermeidung eines Funktionalitäts- bzw. Performanceverlusts aufzeigt sowie Maßnahmen zur Beherrschung der Herausforderungen entwickelt.

Aus den genannten Punkten leitet sich somit die Zielsetzung dieser Arbeit ab.

---

## 3 Systemarchitektur und resultierende Herausforderungen für die Bewegungsregelung<sup>146</sup>

Die in Abbildung 1-2 dargestellte Methodik dieser Arbeit beginnt mit der Funktionsanalyse und -definition einer gekapselten FTR. Innerhalb des nun folgenden Kapitels wird dazu zunächst die relevante Systemarchitektur für die weiteren Analysen dieser Arbeit präsentiert (Abschnitt 3.1) und anschließend die Definition der von der gekapselten FTR zu erfüllenden Funktion vorgenommen (Abschnitt 3.2). Darauf aufbauend werden übergeordnete Anforderungen an die gekapselte FTR abgeleitet und Teilbereiche identifiziert, in denen durch die Kapselung Defizite zu erwarten sind, falls keine geeigneten Gegenmaßnahmen ergriffen werden (Abschnitt 3.3).

Als Ergebnis der zuvor genannten Schritte liegt eine erweiterte Funktionsbeschreibung für eine gekapselte FTR ohne die zuvor genannten Defizite vor (Abschnitt 3.4). Dabei werden die Forschungsfragen 1-3 beantwortet:

**FF 1:** Welche Gesamtfunktion und Teilfunktionen muss eine gekapselte FTR in der betrachteten Systemarchitektur erfüllen?

**FF 2:** Welche Anforderungen an eine FTR entstehen durch die funktionale Trennung von Bewegungsplanung und -ausführung?

**FF 3:** In welchen Teilbereichen der Reglerentwicklung und -auslegung entstehen durch die Kapselung Nachteile? Wie kann diesen Nachteilen begegnet werden, so dass sie kein Defizit darstellen?

### 3.1 Betrachtete Systemarchitektur

In Abschnitt 2.3.4 wurden wesentliche Aspekte der Systemarchitektur im Forschungsprojekt UNICAR*agil* vorgestellt. Um für die weiteren Analysen nicht unbedingt erforderliche Spezialisierungen durch projektspezifische Besonderheiten zu vermeiden, wird zunächst eine generalisierte Systemarchitektur für modulare und serviceorientierte, automatisierte bzw. autonome Kraftfahrzeuge mit Einzelradaktorik abgeleitet. Grundlage dieser Architektur ist die starke Entkopplung der beteiligten Funktionen, um so die Vorteile der Modularisierung und Serviceorientierung bestmöglich auszunutzen.

---

<sup>146</sup>Das Kapitel baut auf einer eigenen Veröffentlichung<sup>147</sup> auf.

<sup>147</sup>Homolla, T.; Winner, H.: Encapsulated trajectory tracking control for autonomous vehicles (2022).

Abbildung 3-1 zeigt eine abstrahierte automatisierte bzw. autonome Fahrzeugführung für ein Fahrzeug nach SAE Level<sup>148</sup> 4+ in IDEF0-Notation<sup>149</sup>. Auf Basis des Fahrzeugumfelds und einer übergeordneten, exogen vorgegebenen Mission wird unter Zuhilfenahme von Rechenleistung und elektrischer bzw. chemischer Energie ein gewünschter Soll-Fahrzeugzustand erzeugt. Die potentiellen Insassen sind dabei von der Fahrzeugführung vollständig entbunden, können jedoch bei Bedarf Einfluss auf die übergeordnete Mission nehmen.

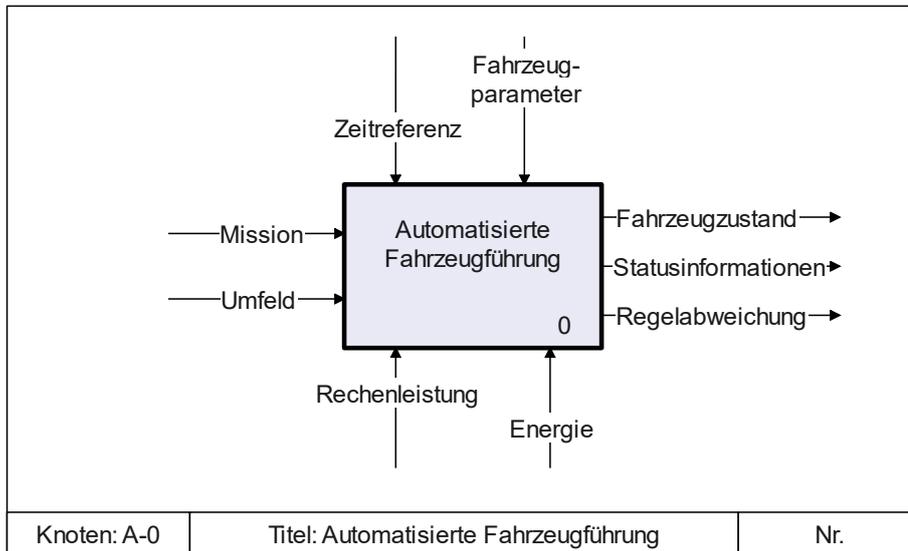


Abbildung 3-1: Funktionale Beschreibung der automatisierten Fahrzeugführung auf oberster Ebene (Knoten A-0) in IDEF0 Darstellung.

Entsprechend des weit verbreiteten Sense-Plan-Act-Paradigma (SPA) besteht die automatisierte Fahrzeugführung makroskopisch aus den drei Teilfunktionen der Wahrnehmung des Umfelds, der Planung des eigenen Verhaltens sowie der Umsetzung des geplanten Verhaltens<sup>150</sup>. Die generische Funktion des Knotens A0 in Abbildung 3-1 wird auf dieser Basis in Abbildung 3-2 konkretisiert. Die Wahrnehmung ("Sense") erfolgt durch die Teilfunktionen der Umfelderkennung und -modellierung (Knoten A5) sowie der Eigenlokalisierung und Zustandsschätzung (Knoten A1). Nach der Planung ("Plan") des gewünschten Verhaltens sowie der Kodierung in einer Abfolge von zeitgestempelten Soll-Zuständen (Soll-Trajektorie) innerhalb der Teilfunktion A2 erfolgt die Umsetzung ("Act") durch die FTR (Knoten A3) sowie durch die vorhandene Aktorik (Knoten A4).

Eine konkrete technische Ausgestaltung dieser Funktionsstruktur unterliegt einer Vielzahl von Freiheitsgraden. Während eine funktionsorientierte, dezentrale Umsetzung der beteiligten Hard- und Softwarekomponenten möglich ist (vgl. Abschnitt 2.3.1), wird für diese Arbeit eine starke funktionale Trennung der planenden und der ausführenden Ebene vorausgesetzt. Diese grundlegende Designentscheidung ist mit den übergeordneten Zielsetzungen einer modularen und

<sup>148</sup> On-Road Automated Driving (ORAD) committee: J3016 - Taxonomy and Definitions (2021), S. 26.

<sup>149</sup> In der weiteren Arbeit werden die Begriffe automatisiert und autonom synonym genutzt und beziehen sich immer auf ein System nach Level 4+ im Ordnungsschema nach der Norm SAE J3016.

<sup>150</sup> Lotz, F. G. O.: Referenzarchitektur für die automatisierte Fahrzeugführung (2017), S. 46.

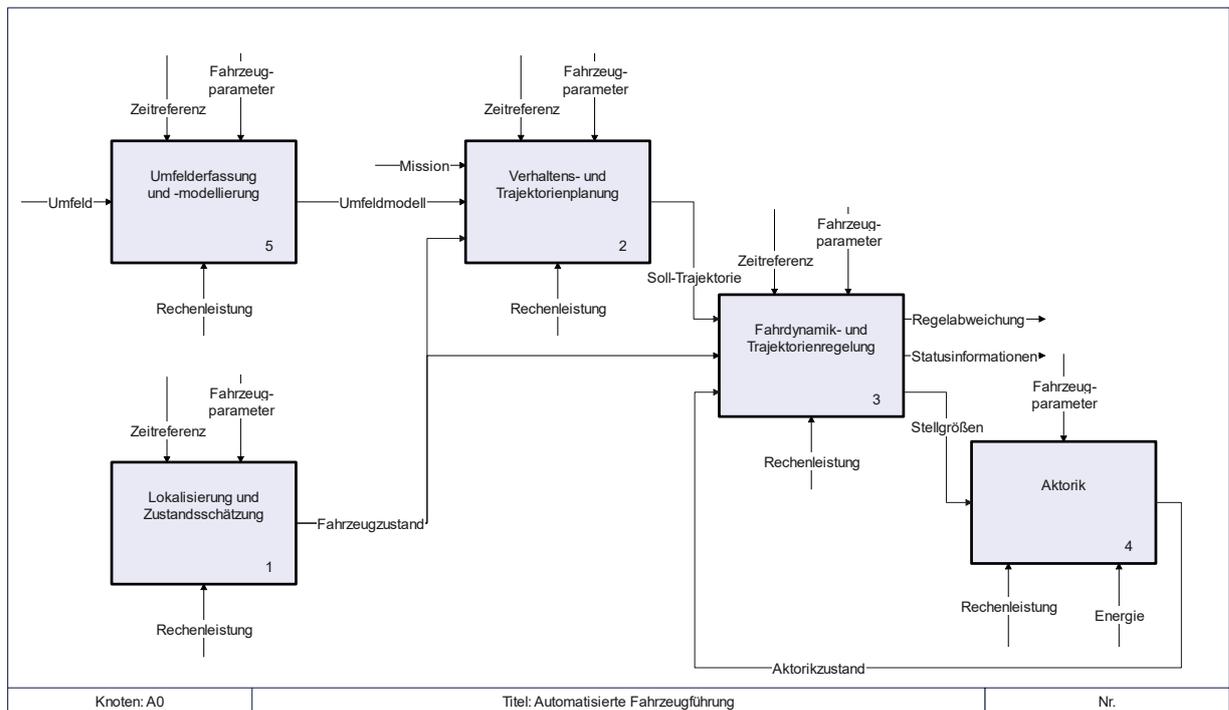


Abbildung 3-2: Funktionsbeschreibung der automatisierten Fahrzeugführung nach dem SPA-Paradigma mit zugehörigen Teilfunktionen in IDEF0 Darstellung (Knoten A0).

serviceorientierten Systemarchitektur begründet. Neben der bereits diskutierten Austauschbarkeit und Wiederverwendbarkeit der Software durch Minimierung von Abhängigkeiten werden auch eine Verbesserung der Updatefähigkeit sowie reduzierte Entwicklungszeiten erwartet.

Die Teilfunktionen A2 und A3 werden daher in getrennten Funktionseinheiten implementiert, die ausschließlich über klar definierte und standardisierte Schnittstellen miteinander kommunizieren. Die funktionale Trennung spiegelt sich in der Softwarearchitektur des betrachteten Fahrzeugs wider. Es wird eine serviceorientierte Softwarearchitektur gewählt, die mittels einer Middleware die erforderlichen Dienste dynamisch rekonfigurieren kann und somit die Skalierbarkeit der Softwarearchitektur sicherstellt. Die durch diese Rahmenbedingungen zwangsläufig resultierende lose Kopplung der TP und FTR erfordert eine gezielte Kapselung der Teilfunktionen, um die mit der Architektur verbundenen Vorteile zu realisieren.

Alle Teilfunktionen können mehrfach instanziiert sein, auch unter Einbeziehung diversitärer Implementierungen. Dieser Umstand sei anhand eines Beispiels verdeutlicht: Abhängig vom derzeitigen Betriebsmodus des Fahrzeugs können unterschiedliche Planungsalgorithmen für die zu fahrende Soll-Trajektorie zum Einsatz kommen, bspw. für eine autonome Fahrfunktion mit Bordmitteln sowie für eine Fahrzeugführung durch ein externes Kontrollzentrum. Dabei erfolgt eine dynamische Rekonfiguration durch den zentralen Orchestrator, ohne dass die beteiligten Dienste selbst Kenntnis über die derzeitige Orchestrierung besitzen (vgl. Abschnitt 2.3.2). Es sei angemerkt, dass Abbildung 3-2 eine möglichst generische Struktur der automatisierten Fahrzeugführung zeigt. Je nach den konkreten Randbedingungen für eine spezifische Applikation können

zusätzliche Schnittstellen oder weitere Teilfunktionen Teil der Fahrzeugführung sein, die jedoch keinen direkten Einfluss auf die weiteren Analysen dieser Arbeit besitzen und daher hier nicht weiter ausgeführt werden.

Um Spezialisierungen hinsichtlich der verwendeten Aktorik der Fahrzeuge (Knoten A4 in Abbildung 3-2) zu vermeiden, wird angenommen, dass die betrachteten Fahrzeuge über Einzelradaktorik verfügen. Durch die individuelle Steuerbarkeit der einzelnen Räder wird der Lösungsraum möglicher Manöver vergrößert (bspw. Wenden auf engem Raum, Variation der Momentanpollagen und Fahren ohne Vorzugsrichtung). Die aus konventionellen, vorderachsgelenkten Fahrzeugen bekannte Kinematik ist dabei als Sonderfall enthalten. Die allgemeine Betrachtung hinsichtlich der Fähigkeiten der Aktorik ermöglicht die spätere Beantwortung von Forschungsfrage 7 (vgl. Abbildung 1-2).

Die Interaktion mit einem menschlichen Fahrer, wie sie bspw. von Werling<sup>151</sup> oder Guo<sup>152</sup> betrachtet werden, ist durch die Einschränkung auf Fahrzeuge nach SAE Level 4+ nicht Teil der durchgeführten Untersuchungen. Insassen des Fahrzeugs können ausschließlich (und zumeist nur mittelbar) über die Missionsschnittstelle Einfluss auf die Fahrzeugführung nehmen.

## 3.2 Aufgaben der Fahrdynamik- und Trajektorienregelung

Die betrachtete FTR (Knoten A3 in Abbildung 3-2) stellt das Bindeglied zwischen der Planungsebene und der Umsetzung des geplanten Verhaltens durch die vorhandene Aktorik dar. Die Gesamtfunktion der FTR wird zunächst in einzelne Aufgaben heruntergebrochen und diese im Folgenden genauer betrachtet. Das Vorgehen orientiert sich damit an der Item-Definition der Norm ISO 26262<sup>153</sup>, um mit der gewünschten Funktion die Basis für weitere Analysen und die nachfolgende technische Umsetzung bzw. Ausgestaltung zu legen.

### 3.2.1 Trajektorienfolgeregelung

Die primäre Aufgabe der FTR ist die Trajektorienfolgeregelung. Das Fahrzeug muss bestmöglich, d. h. mit möglichst geringer Regelabweichung, einer gegebenen Soll-Trajektorie durch Ansteuerung der verfügbaren Aktorik folgen. Dies ist gleichbedeutend mit der Überführung des Fahrzeugs aus einem initialen Ist-Zustand in einen zeitveränderlichen Soll-Zustand. Somit existiert stets ein festgelegtes Zeitbudget zur Erreichung des gewünschten Soll-Zustands. Durch die verwendete Einzelradaktorik verfügt das Fahrzeug über drei unabhängig zu beeinflussende

---

<sup>151</sup> Werling, M. et al.: Different schemes for bumpless manual/automatic transfer (2008).

<sup>152</sup> Guo, C. et al.: Driver-vehicle cooperation (2019).

<sup>153</sup> ISO/TC-22/SC-32: ISO 26262-3:2018: Road vehicles – Functional safety (2018), S. 4.

Freiheitsgrade (Translation in der Fahrbahnebene und Gieren um die Fahrzeughochachse), die Soll-Trajektorie muss daher mindestens Lagevorgaben für diese drei Freiheitsgrade enthalten. Durch einen Vergleich des durch die Soll-Trajektorie definierten Soll-Zustand des Fahrzeugs mit dem geschätzten Ist-Zustand wird die jeweilige Abweichung für die Berechnung der Aktorstellgrößen bestimmt. Der fahrdynamische Ist-Zustand wird dabei aus einem externen Modul (z. B. einer separaten Fahrdynamikzustandsschätzung (FZS), Knoten A1 in Abbildung 3-2) bezogen. Die Ermittlung der für den Soll-Ist-Vergleich benötigten Ist-Größen ist daher nicht Aufgabe der Trajektorienfolgeregelung.

#### 3.2.2 Stabilisierungsregelung

Zusätzlich zum Folgen einer gegebenen Soll-Trajektorie ist es Aufgabe der FTR, die Fahrzeugstabilität unabhängig von externen Störungen und sich ändernden Umweltzuständen sicherzustellen. Im Kontext konventioneller Fahrzeuge sind die etablierten Stabilitätsregelungen als Antiblockiersystem (ABS), Antriebsschlupfregelung (ASR) und Elektronisches Stabilitätsregelung (ESC) bekannt (vgl. Abschnitt 2.2.3). Ihre Aufgaben besteht darin, ein Blockieren (ABS) bzw. Durchdrehen (ASR) der Räder zu verhindern sowie einem übermäßigen Über- bzw. Untersteuern durch gezielte Bremsingriffe vorzubeugen (ESC).<sup>154</sup>

Die Stabilisierungsregelung als Teil der FTR muss alle drei zuvor genannten Systeme bereitstellen. Die Funktionen des ABS und ASR entsprechen einer Begrenzung des Reifenschlupf auf den stabilen Teil der  $\mu$ -Schlupf-Kurve. ESC hingegen manipuliert den Gierfreiheitsgrad des Fahrzeugs, um Unter- bzw. Übersteuern zu verhindern. Durch die mechatronische Struktur der betrachteten Fahrzeuge mit unabhängig lenk-, antreib- und bremsbaren Rädern, liegen, anders als bei konventionellen Fahrzeugen, drei (weitgehend) frei beeinflussbare Freiheitsgrade für die straßengebundene Bewegung vor. Daher ist zu berücksichtigen, dass auch in Bereichen eines hohen Schwimmwinkels stabile Systemzustände vorliegen können. Im Rahmen dieser Aufgabe müssen Aktorausfälle berücksichtigt werden, diese dürfen insbesondere kein instabiles Fahrzeugverhalten verursachen.

#### 3.2.3 Sicherstellung des Insassenkomforts

Die Akzeptanz automatisierter Fahrzeuge wird unter anderem vom Fahrkomfort für die Insassen mitbestimmt<sup>155</sup>. Aufgabe der FTR ist daher, den Insassenkomfort in Bezug auf die wahrnehmbaren fahrdynamischen Zustände (Beschleunigung und Ruck)<sup>156</sup> sicherzustellen. Auf die in der Soll-Trajektorie geplanten Fahrzeugzustände kann dabei nicht direkt Einfluss genommen werden,

---

<sup>154</sup>van Zanten, A.; Kost, F.: Bremsenbasierte Assistenzfunktionen (2015), S. 724.

<sup>155</sup>Hartwich, F. et al.: Driving comfort, enjoyment and acceptance of automated driving (2018).

<sup>156</sup>Bae, I. et al.: Toward a Comfortable Driving Experience for a Self-Driving Shuttle (2019), S. 943.

jedoch dürfen die generierten Stellbefehle zur Kompensation von Regelabweichungen keine Komfortnachteile verursachen. Davon ausgenommen sind Eingriffe, die zur Verhinderung kritischer Situationen (z. B. Kollisionen) unbedingt erforderlich sind, da in diesen Fällen Komfortüberlegungen eine untergeordnete Rolle spielen.

#### 3.2.4 Selbstwahrnehmung und -bewertung

Die FTR muss im Betrieb ihre eigene Funktionsausführung bewerten und Fehlfunktionen innerhalb der Grenzen des Dienstes erkennen sowie durch eine geeignete Schnittstelle an die zentrale Selbstwahrnehmung des Fahrzeugs kommunizieren. Die Aufgabe der Fahrzeug-Selbstwahrnehmung ist die Analyse aller für die Aufgabenerfüllung und Systemintegrität des Fahrzeugs relevanter Ereignisse. Auf Basis dieser Analyse wird bspw. entschieden, welchen Betriebsmodus das Fahrzeug nutzt oder welche Streckenabschnitte befahren werden können<sup>157</sup>.

#### 3.2.5 Randbedingungen für die Funktionserfüllung

Aufgrund der beabsichtigten starken Entkopplung der Teilfunktionen innerhalb der Fahrzeug-Systemarchitektur darf die FTR zur Erfüllung ihrer Funktion nicht auf eine tiefgreifende Integration mit benachbarten Funktionen (insbesondere der TP) angewiesen sein. Diese Kapselung beinhaltet insbesondere die Fähigkeit, ohne zeitliche Synchronisierung des Programmablaufs mit anderen Funktionen funktionsfähig zu sein. Weiterhin sind die Abhängigkeiten über Funktionsgrenzen hinweg zu minimieren. Dies stellt einen gewichtigen Unterschied zu konventionellen funktionsorientierten und dezentralen Fahrzeugarchitekturen dar.

Die FTR unterliegt bei der Erfüllung der zuvor definierten Aufgaben verschiedenen Randbedingungen wie bspw. externen Störungen (Wind und lokale Fahrbahnneigungen) die als zusätzliche Kräfte auf das Fahrzeug wirken und zu kompensieren sind. Weitere Rahmenbedingungen umfassen Stellgrößenbeschränkungen der Aktorik und Limitationen des maximalen Reibwerts zwischen Reifen und Fahrbahn. Des Weiteren müssen Aktorausfälle berücksichtigt werden und die dadurch entstehenden Limitationen bzw. Störeinflüsse bestmöglich kompensiert werden. Eine ausführlichere Definition der relevanten Einflussgrößen auf die Funktionserfüllung der FTR ist in Anhang A.1 enthalten.

#### 3.2.6 Zusammenfassung

Aus den definierten Aufgaben der FTR wird eine grundlegende Funktionsstruktur abgeleitet. Während sich die konkrete Ausgestaltung der Schnittstellen je nach Applikation unterscheiden kann, sind für die Funktionserfüllung der FTR drei Teilfunktionen unerlässlich (vgl. Abbildung 3-3). So muss zunächst der notwendige Kraftbedarf ermittelt werden, um das Fahrzeug aus dem

---

<sup>157</sup>Stolte, T. et al.: Towards Safety Concepts for Automated Vehicles (2020), S. 1574.

aktuellen Ist-Zustand in den geplanten zeitveränderlichen Soll-Zustand zu überführen (Teilfunktion A31). Anschließend erfolgt eine Verteilung der Kräfte auf die einzelnen Aktoren, die sog. Control Allocation (Teilfunktion A32). Schlussendlich wird der Kraftbedarf in Stellgrößen für die nachgelagerten Regelkreise der Aktorik überführt (Teilfunktion A33).

Je nach konkreter Applikation kann die Ausgestaltung der einzelnen Teilfunktionen sehr unterschiedlich ausfallen. So ist eine große Anzahl verschiedener Regelungskonzepte für Teilfunktion A31 bekannt<sup>158</sup> und auch für die Control Allocation existieren zahlreiche Ansätze in der Literatur<sup>159</sup>, die unter anderem auf die vorhandene Aktorik angepasst sind.

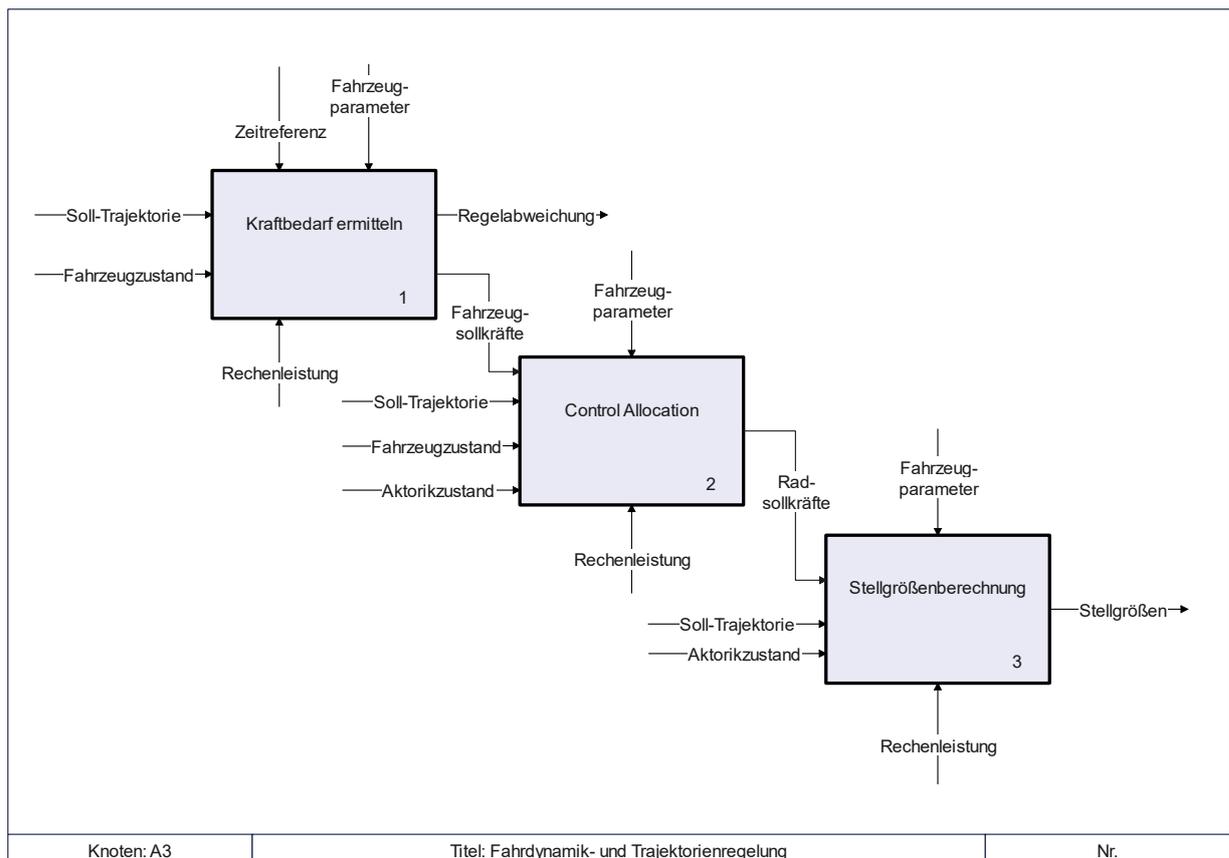


Abbildung 3-3: Grundlegende Funktionsstruktur der gekapselten FTR in IDEF0 Darstellung (Knoten A3).

Abschnitt 3.2 beantwortet somit Forschungsfrage 1, welche Funktion eine FTR in der betrachteten Architektur erfüllen können muss.

### 3.3 Anforderungsanalyse

Aus der Soll-Funktion und den aus der Systemarchitektur resultierenden Randbedingungen werden übergeordnete Anforderungen an die gekapselte FTR abgeleitet. Darauf aufbauend werden die

<sup>158</sup>Rupp, A.; Stolz, M.: Survey on Control Schemes for Automated Driving on Highways (2017).

<sup>159</sup>Johansen, T. A.; Fossen, T. I.: Control allocation—A survey (2013).

kapselungsbedingten Herausforderungen identifiziert. Beide Analysen münden in einer Anforderungsliste für die gekapselte FTR.

#### 3.3.1 Übergeordnete Anforderungen

Einer der Hauptvorteile der verwendeten dienstorientierten Architektur ist die Fähigkeit, verschiedene Dienste dynamisch auf der Grundlage aktueller Anforderungen miteinander zu verknüpfen (dynamische Rekonfiguration<sup>160</sup>). Je nach Betriebsmodus des Fahrzeugs (z. B. Automatisierung, Sicheres Anhalten oder Teleoperation) planen verschiedene Dienste die Soll-Trajektorie auf der Grundlage des beabsichtigten Fahrzeugverhaltens. Daher muss die FTR unabhängig von den vorgeschalteten Planungsalgorithmen sein, was zu einem Regler führt, der in der Lage sein muss, Trajektorien aus allen Quellen innerhalb des Systems zu verarbeiten, ohne selbst den Betriebsmodus des Fahrzeugs kennen bzw. den eigenen Betriebsmodus wechseln zu müssen. Außerdem darf sich die daraus resultierende grundlegende Asynchronität von Planungs- und Regelungsalgorithmen nicht negativ auf die Performance der FTR auswirken und es muss trotz der Entkopplung ein konsistentes Gesamtsystem sichergestellt werden.

Die funktionale Struktur des Fahrzeugs sieht eine Trennung der planenden von der ausführenden Ebene vor. Die Ermittlung der Soll-Trajektorie ist daher nicht Teil des betrachteten Moduls, stattdessen wird die Trajektorie von der TP (bzw. von einem Dienst zum Versenden vorab berechneter Soll-Trajektorien) an die FTR übergeben. Aus der nicht vorhandenen zeitlichen Synchronisierung zwischen TP und FTR resultiert unmittelbar die Anforderung, dass die Soll-Trajektorien unabhängig von einer eventuellen Regelabweichung fest im Raum liegen und bei unverändertem Umfeld durch die TP ausschließlich verlängert werden. Eine Änderung der Soll-Trajektorie findet nur im Fall einer relevanten Änderung des dynamischen Umfelds statt. Dies entspricht einer Low- bzw. Bi-Level-Stabilisierung nach Werling<sup>161</sup>. Die Soll-Trajektorie besteht aus einer definierten Anzahl von Aufpunkten, in denen der jeweilige Soll-Zustand beschrieben ist. Die Trajektorie wird zyklisch von der TP aktualisiert.

Um die allgemeine Modularisierung aufrechtzuerhalten, dürfen Informationen über ein bestimmtes Modul nur dann an andere Module weitergegeben werden, wenn dies zur Vermeidung von Leistungseinbußen unbedingt erforderlich ist. So sollte das Wissen um die spezifischen Eigenschaften des Fahrzeugs nur in der FTR abgelegt sein und die TP darf nicht an nachgelagerte Module wie die Akteurarchitektur angepasst werden. Ist die Weitergabe von Informationen unvermeidlich, sind standardisierte Schnittstellen zu verwenden, die es ermöglichen, Module nach Belieben auszutauschen. Die Modularisierung und Informationskapselung ermöglicht zudem ein unabhängiges Testen der beteiligten Dienste im Rahmen einer modularen Absicherung. Auf diese Weise können

---

<sup>160</sup>Mokhtarian, A. et al.: Dynamic Service-oriented Software Architecture UNICARagil (2020), S. 279.

<sup>161</sup>Werling, M.: Trajektoriengenerierung in Verkehrsszenarien (2011), S. 21.

der Absicherungsaufwand des Gesamtsystems reduziert sowie die Entwicklungszeiträume und -kosten verringert werden<sup>162</sup>.

Um strenge Echtzeitanforderungen für die rechenintensiven Planungsdienste zu vermeiden, dürfen Latenzen und Jitter während der TP die Performance der FTR nicht negativ beeinträchtigen. Dies ermöglicht auch die Verwendung von Netzwerktechnologien ohne Echtzeitgarantien für die Datenübertragung innerhalb des Fahrzeugs (z. B. (Automotive) Ethernet).

Einzelradaktoren führen den Gierwinkel des Fahrzeugs als unabhängigen Freiheitsgrad ein. Die sich daraus ergebenden drei Freiheitsgrade (horizontale Position + Gierwinkel) müssen von der FTR geregelt werden. Alle kinematisch möglichen Positionen für den Momentanpol des Fahrzeugs müssen genutzt werden können, was (entsprechend hohe Lenkwinkelgrenzen der Aktorik vorausgesetzt) auch Manöver wie seitliches Einparken mit 90° Schwimmwinkel des Fahrzeugs (Abbildung 2-10) und Wenden auf engem Raum einschließt.

Die Dynamikmodule bewirken, dass das Fahrzeug zu einem überaktuierten System wird. Die daraus resultierenden Freiheitsgrade für die Radkraftverteilung sind innerhalb einer Control Allocation für sekundäre Zielsetzungen zu verwenden (z. B. Optimierung der Sicherheit oder des Energiebedarfs). Um die Überaktuierung voll auszunutzen und die Unabhängigkeit von der Quelle der geplanten Soll-Trajektorie aufrechtzuerhalten, darf keine vordefinierte Verteilungsstrategie für die Radlenkwinkel verwendet werden, sondern alle notwendigen Informationen müssen aus der aktuell gültigen Soll-Trajektorie abgeleitet werden.

Während die Hauptfunktion der Trajektorienfolgeregelung gewährleistet wird, muss die Stabilität des Fahrzeugs bei externen Störungen und wechselnden Straßenbedingungen sichergestellt werden. Dies ist gleichbedeutend mit der Begrenzung des Reifenschlupfes eines jeden Rades auf den stabilen Teil seiner  $\mu$ -Schlupf-Kurve<sup>163</sup>. Die innerhalb dieser Arbeit betrachteten Fahrzeuge sind für den Einsatz in einem innerstädtischen Umfeld vorgesehen (z. B. für Taxi- oder Shuttle-Dienste). Ein Betrieb in der Nähe der dynamischen Grenzen des Fahrzeugs ist daher nicht beabsichtigt, in unerwarteten Situationen oder in Notfällen sind jedoch auch hochdynamische Fahrmanöver Teil der Operational Design Domain (ODD).

Gängige modellprädiktive Regelungsansätze sind rechenintensiv, da eine Abfolge von Stelleingriffen modellbasiert optimiert wird, was zu hohen Anforderungen an die verwendete Hardware und Aufwänden für Kühlung sowie Stromversorgung führt. Da die Gierbewegung bei der Verwendung von Einzelradaktoren ein unabhängiger Freiheitsgrad ist, transformiert sich das Fahrzeug in ein holonomes System, so dass keine Abfolge von Stelleingriffen optimiert werden muss, um einen beabsichtigten Fahrzeugzustand zu erreichen. Die FTR sollte daher auf eine mehrstufige Optimierung verzichten und somit den Rechenaufwand reduzieren, so dass eine Anwendung

---

<sup>162</sup>Klamann, B.; Winner, H.: Comparing Technical Systems for a Modular Safety Approval (2021), S. 1-2.

<sup>163</sup>Durch die radstabilisierende Funktion der Reifenschlupfbegrenzung wird die Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs erhalten und die Trajektorienfolgeregelung somit in die Lage versetzt, das Gesamtfahrzeug durch entsprechende Stellgrößen zu stabilisieren.

auf einer Mikrocontroller-Architektur ermöglicht wird. Dieser Sachverhalt korrespondiert mit Forschungsfrage 7.

Da die Erde im Querschnitt eine elliptische Form aufweist (vgl. Abschnitt 2.1.2), führt die Verwendung eines einzelnen kartesischen Koordinatensystems innerhalb der automatisierten Fahrzeugführung mit steigender zurückgelegter Fahrtstrecke zu Positionsfehlern. Während diese Fehler für kurze Fahrtstrecken ggf. noch vernachlässigt werden können, kann die Erdkrümmung bei längeren gefahrenen Distanzen zu inakzeptablen Abweichungen führen. Um die Anwendbarkeit der entwickelten Bewegungsregelung unabhängig von der gefahrenen Strecke sicherzustellen, müssen daher die Auswirkungen der Erdkrümmung innerhalb der FTR kompensiert werden.

### **3.3.2 Kapselungsbedingte Herausforderungen für die Bewegungsregelung**

Die in Abschnitt 3.1 beschriebene Systemarchitektur bringt spezifische kapselungsbedingte Herausforderungen für die FTR autonomer Fahrzeuge mit sich.

#### **Lokalisierungsangleichung**

Sowohl die planende (TP) als auch die ausführende Ebene (FTR) benötigen für ihre Funktionserfüllung akkurate und präzise Lokalisierungsinformationen aus einem separaten Lokalisierungsdienst (Knoten A1 in Abbildung 3-2). In der modularen Systemarchitektur ist es möglich, dass TP und FTR jeweils einen eigenen, unabhängigen Lokalisierungsdienst nutzen (entspricht einer mehrfachen Instanziierung der Teilfunktion A1 in Abbildung 3-2). Die Motivation für die Nutzung unabhängiger Lokalisierungen kann bspw. aus dem übergeordneten Safety Konzept und damit verbundener Einschränkungen hinsichtlich der nutzbaren Soft- und Hardware resultieren. Weiterhin werden so unabhängige und verteilte Entwicklungen der einzelnen Komponenten ermöglicht.

Unabhängige Lokalisierungsdienste werden aufgrund spezifischer Sensorfehler und unterschiedlichem Postprocessing im Allgemeinen abweichende Posen ermitteln. Die ausführende FTR wird in einem solchen Fall die Differenz zwischen beiden geschätzten Posen ausgleichen, was zu einer unerwünschten Fahrzeugbewegung führt. In Abbildung 3-4 wird diese Problemstellung anhand eines lateralen Positonsfehlers visualisiert. Das Fahrzeug befindet sich zunächst in der in Abschnitt 1. dargestellten Position, die von der für die TP genutzten Lokalisierung "A" korrekt ermittelt und zur Berechnung einer Soll-Trajektorie genutzt wird.

Die zweite, für die FTR genutzte, Lokalisierung "B" ermittelt aufgrund eines Sensorfehlers eine abweichende Ist-Pose des Fahrzeugs, dargestellt in Abschnitt 2. Im Soll-Ist-Vergleich der Regelung entsteht nun durch die abweichenden Ist-Positionen eine fiktive Regelabweichung. Da die Minimierung der Regelabweichung zu den vorrangigen Aufgaben der FTR zählt, wird die entstandene Abweichung durch entsprechende Stelleingriffe kompensiert, was in der Realität

zu einem Querversatz des Fahrzeugs in die entgegengesetzte Richtung führt (Abschnitt 3. in Abbildung 3-4).

In einer ausführlichen Analyse des Lösungsraums zur Vermeidung der zuvor genannten Effekte wurde gezeigt, dass die FTR einen Mechanismus in Form einer Lokalisierungsangleichung enthalten muss, der den Offset zwischen beiden Lokalisierungen überwacht und garantiert, dass daraus keine Stelleingriffe abgeleitet werden<sup>164</sup>. Dieser Sachverhalt korrespondiert mit Forschungsfrage 5.

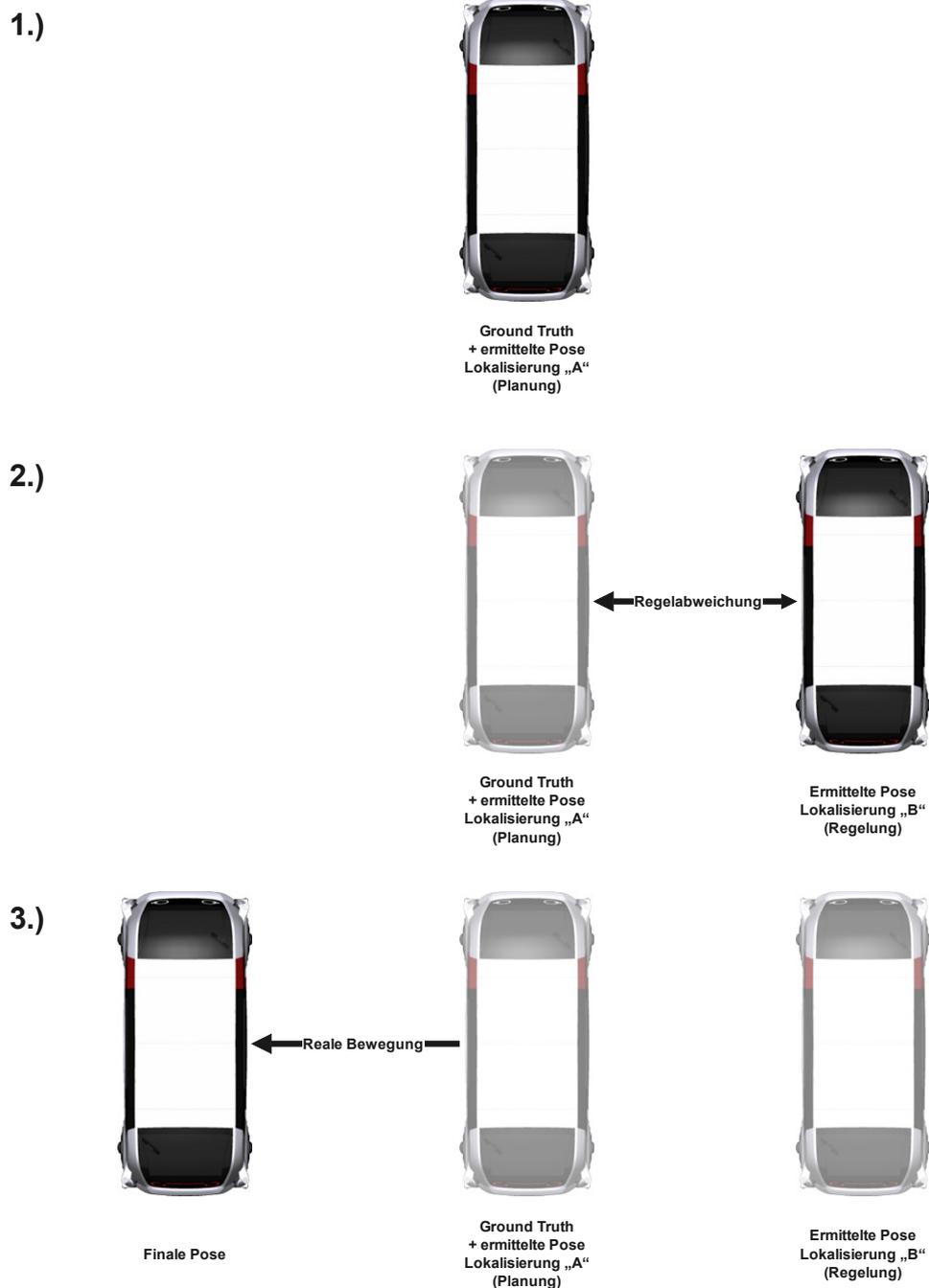


Abbildung 3-4: Entstehung eines lateralen Regelfehlers durch unabhängige und inkonsistente Lokalisierungsinformationen für die planende und ausführende Ebene der autonomen Fahrzeugführung.

<sup>164</sup>Homolla, T. et al.: Verfahren zur Korrektur von inkonsistenten Lokalisierungsdaten (2020), S. 8.

#### **Umsetzung des transienten Fahrzeugverhaltens**

Die aus der Systemarchitektur resultierende lose Kopplung von TP und FTR führt zu einer grundlegenden Asynchronität der beiden Funktionen, die sich in beobachtbaren Eigenschaften wie abweichenden Berechnungsfrequenzen und nicht vorhandenen Echtzeitgarantien für die TP manifestiert. Weiterhin erfolgt die Umsetzung geplanter Trajektorien von der FTR durch die Berechnung von Stellgrößen für die Aktoren des Fahrzeugs, die jeweils eine charakteristische Systemdynamik besitzen, was zu einer zeitverzögerten Umsetzung der Stellgrößen führt. Um das Auftreten von unerwünschten Regelabweichungen zu minimieren, müssen daher die aus der Aktor-Systemdynamik resultierenden Verzugszeiten innerhalb der Wirkkette der automatisierten Fahrzeugführung berücksichtigt werden. Während dies in funktionsorientierten, dezentralen Architekturen durch eine auf die Systemdynamik der Aktorik optimierte Sollwertberechnung der TP umgesetzt werden kann, ist dies aufgrund der zuvor beschriebenen Asynchronität und der geforderten Informationskapselung in der betrachteten Systemarchitektur nicht möglich. Die Verzugszeiten müssen daher bei der Stellgrößenberechnung innerhalb der FTR berücksichtigt werden, um bei der Umsetzung des transienten Fahrzeugverhaltens die Regelabweichung zu minimieren. Dazu ist die Nutzung geplanter zukünftiger Systemzustände durch eine prädiktive Vorsteuerung erforderlich, die es ermöglicht, das transiente Fahrzeugverhalten im offenen Regelkreis auszuführen und somit die oben genannten Herausforderungen zu überwinden. Dieser Sachverhalt korrespondiert mit Forschungsfrage 6.

#### **Physikalische Umsetzbarkeit geplanter Trajektorien**

Die Umsetzung geplanter Soll-Trajektorien unterliegt verschiedenen physikalischen Beschränkungen wie bspw. Aktor-, Reibwert- oder kinematischer Grenzen. Die Planungsebene autonomer Fahrzeuge muss diese Randbedingungen bei der Planung von Soll-Trajektorien berücksichtigen, da die ausführende Ebene andernfalls das Soll-Verhalten nicht umsetzen kann und unerwünschte Regelabweichungen entstehen. In funktionsorientierten, dezentralen Systemarchitekturen können die Planungsalgorithmen explizit an die Fähigkeiten der nachgelagerten Module wie der Aktorik angepasst werden. Diese Möglichkeit entfällt in der betrachteten Architektur aus Abschnitt 3.1, da fahrzeugspezifisches Wissen ausschließlich in der FTR hinterlegt ist und sonst Anforderungen wie die Austausch- und Wiederverwendbarkeit der Planungsmodule verletzt würden.

Es ist daher die Aufgabe der FTR, über eine standardisierte Schnittstelle die Konsequenzen des fahrzeugspezifischen Wissens zu kommunizieren und so sicherzustellen, dass in der unabhängigen Planungsebene nur Trajektorien berechnet werden, die physikalisch umsetzbar sind. Diese Schnittstelle stellt eine Einschränkung der funktionalen Trennung von TP und FTR dar, ist jedoch zur Vermeidung negativer Effekte zwingend erforderlich. Durch den standardisierten Entwurf der Schnittstelle kann sichergestellt werden, dass keine Anpassung der Planungsalgorithmen während der Entwicklung erforderlich sind und so die Austausch- und Wiederverwendbarkeit der TP-Dienste erhalten bleibt. Weiterhin beugt die Schnittstelle Wissensinkonsistenzen innerhalb des Fahrzeugs vor, so dass trotz eingeschränkter Trennung der Ebenen der kapselungsbedingte

Vorteil zentral abgelegter Informationen erhalten bleibt. Da die Ermittlung der physikalischen Grenzen in der Praxis mit signifikanten Unsicherheiten behaftet ist, muss außerdem gewährleistet sein, dass die FTR weder destabilisiert wird noch ein anderweitig unerwartetes Verhalten zeigt, falls die physikalischen Grenzen falsch geschätzt wurden und eine nicht umsetzbare Trajektorie geplant wurde. Dieser Sachverhalt korrespondiert mit Forschungsfrage 4.

### 3.3.3 Anforderungsliste

Als Ergebnis der durchgeführten Analyse liegt die in Tabelle 3-1 dargestellte Anforderungsliste mit übergeordneten Anforderungen für eine gekapselte FTR innerhalb der betrachteten Systemarchitektur vor. Die Anforderungsliste beantwortet somit Forschungsfrage 2.

Tabelle 3-1: Abgeleitete Anforderungen für gekapselte FTR innerhalb der definierten Systemarchitektur.

Anforderung	Beschreibung
A1.1	Die FTR darf nicht auf Kenntnis des Ursprungs der empfangenen Trajektorie bzw. auf eine Synchronisierung mit dem Planungsdienst angewiesen sein (Unabhängigkeit von der Planungsebene).
A1.2	Eine dynamische Rekonfiguration mit verschiedenen Planungsdiensten muss ohne Moduswechsel innerhalb der FTR möglich sein.
A1.3	Zwischen den einzelnen Modulen dürfen nur Informationen über standardisierte Schnittstellen ausgetauscht werden, deren Wegfall andernfalls zu Leistungseinbußen führt. Durch diese Schnittstellen muss weiterhin eine redundante Ablage und Pflege fahrzeugspezifischen Wissens vermieden werden.
A1.4	Latenzen und Jitter der Planungsebene dürfen die Performance und Stabilität der FTR nicht negativ beeinflussen.
A1.5	Alle drei horizontalen Freiheitsgrade müssen unabhängig voneinander beeinflusst werden können.
A1.6	Die FTR muss die Stabilität des Fahrzeugs gewährleisten, indem der Radschlupf auf den stabilen Teil der $\mu$ -Schlupf-Kurve begrenzt wird und die Control Allocation eine Minimierung der Reibwertausnutzung beinhaltet.
A1.7	Die FTR darf nicht auf vordefinierte Verteilungsstrategien für die Radlenkwinkel angewiesen sein, stattdessen müssen alle erforderlichen Informationen aus der empfangenen Soll-Trajektorie abgeleitet werden.
A1.8	Die FTR muss sicherstellen, dass die Planungsebene nur physikalisch umsetzbare Trajektorien bereitstellt und muss des Weiteren einen Eskalationsmechanismus für den Fall von Fehlern bei der Schätzung der physikalischen Ausführungsgrenzen enthalten.
A1.9	Es darf keine Berücksichtigung vergangener Systemzustände innerhalb der FTR erfolgen (holonomes System).
A1.10	Ein modulares, unabhängiges Testen der Planungs- und Ausführungsebene muss möglich sein.
A1.11	Unerwünschte Stelleingriffe durch inkonsistente Lokalisierungsinformationen müssen vermieden werden.
A1.12	Durch die Erdkrümmung verursachte Regelfehler sind zu vermeiden.

### 3.4 Erweiterte Funktionsbeschreibung

Die Analyse der Anforderungen an eine gekapselte FTR sowie der dadurch entstehenden Herausforderungen im vorangegangenen Abschnitt hat gezeigt, dass ohne geeignete Gegenmaßnahmen Leistungseinbußen und ein Verlust an Funktionalität zu erwarten sind. Die in Abbildung 3-3 dargestellte Funktionsstruktur der FTR muss daher angepasst bzw. erweitert werden, um die identifizierten Herausforderungen zu beherrschen.

Die Beherrschung der identifizierten Herausforderungen erfordert drei grundlegende Anpassung der ursprünglichen Funktionsstruktur (vgl. Abbildung 3-5). Für die Sicherstellung physikalisch umsetzbarer Trajektorien ist eine neue und unabhängige Teilfunktion innerhalb der FTR erforderlich, die kinematische und dynamische Ausführungsgrenzen des Fahrzeugs schätzt sowie über eine standardisierte Schnittstelle für alle Planungsdienste bereitstellt (Knoten A35).

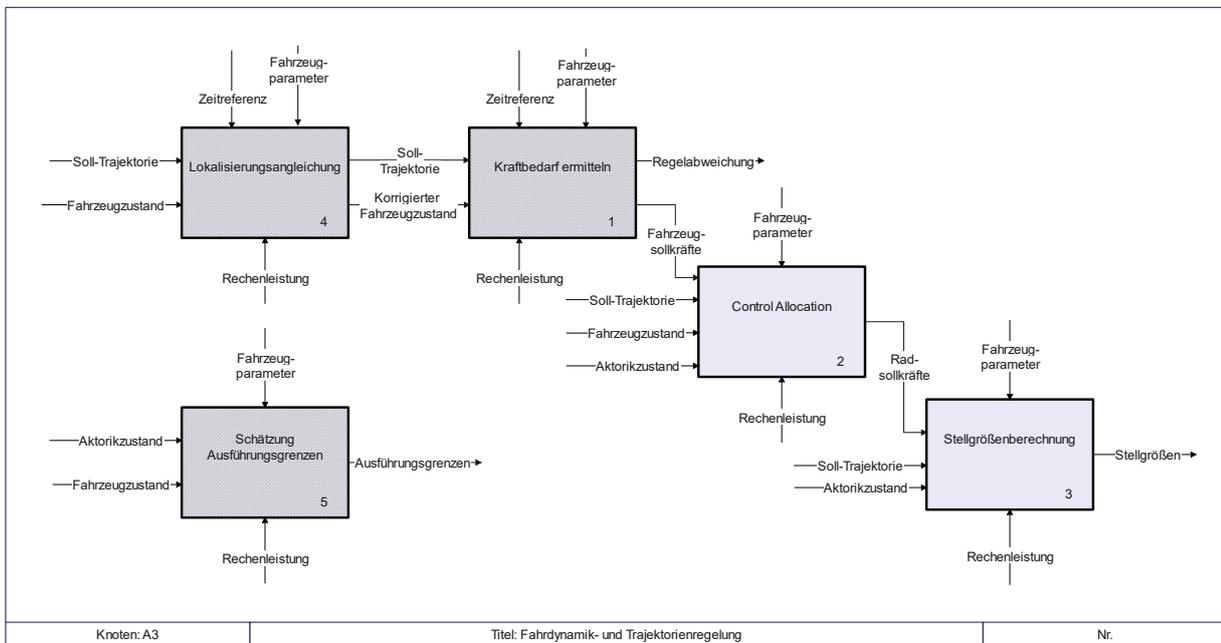


Abbildung 3-5: Erweiterte Funktionsstruktur der FTR in IDEF0 Darstellung mit grau schraffierten notwendigen Erweiterungen als Gegenmaßnahmen für kapselungsbedingte Herausforderungen der FTR.

Des Weiteren wird eine neue, den übrigen Berechnungen vorgeschaltete Teilfunktion der Lokalisierungsangleichung eingeführt (Knoten A34), durch die der Einfluss des Offsets zwischen den von der TP und der FTR genutzten Lokalisierungen minimiert wird. Diese Teilfunktion besteht ihrerseits aus den beiden Schritten der Offsetberechnung und der Offsetkorrektur (vgl. Abbildung 3-6), was sich aus den unterschiedlichen Taktfrequenzen und der vorhandenen Asynchronität von TP und FTR ergibt.

Als dritte Maßnahme ist eine Konkretisierung des Knotens A31 erforderlich. Aus der zuvor beschriebenen Anforderung, das transiente Fahrzeugverhalten durch eine prädiktive Vorsteuerung im offenen Regelkreis umzusetzen, ergibt sich die Notwendigkeit einer Zwei-Freiheitsgrade-Struktur

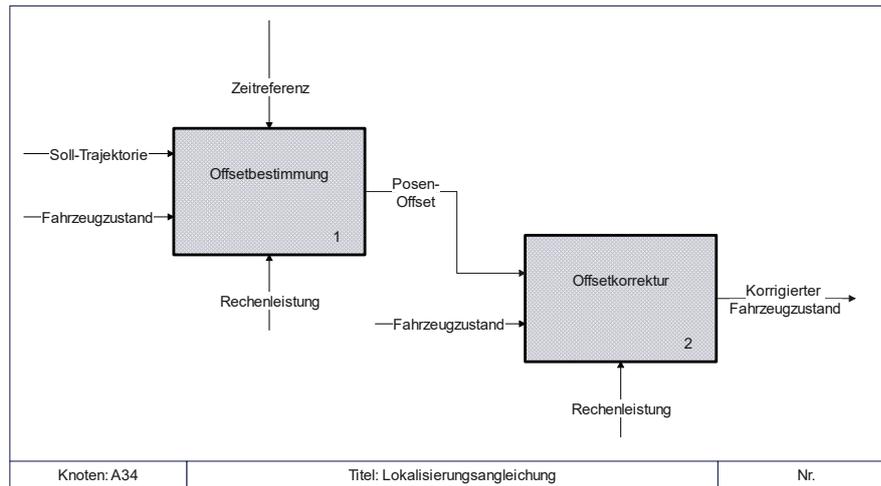


Abbildung 3-6: Komponenten der Teilfunktion Lokalisierungsangleichung in IDEF0 Darstellung mit grau schraffierten Erweiterungen zur Vermeidung eines Funktionalitäts- bzw. Performanceverlusts durch die Kapselung der FTR.

zur Ermittlung des Kraftbedarfs, bei der eine unabhängige, prädiktive Vorsteuerung zum Einsatz kommt (Knoten A311 in Abbildung 3-7). Die Zustandsrückführung (Knoten A312) hingegen ist auch ohne Kapselung der FTR erforderlich, um stets vorhandene Modellgenauigkeiten und externe Störungen im Rahmen einer realen Anwendung zu kompensieren.

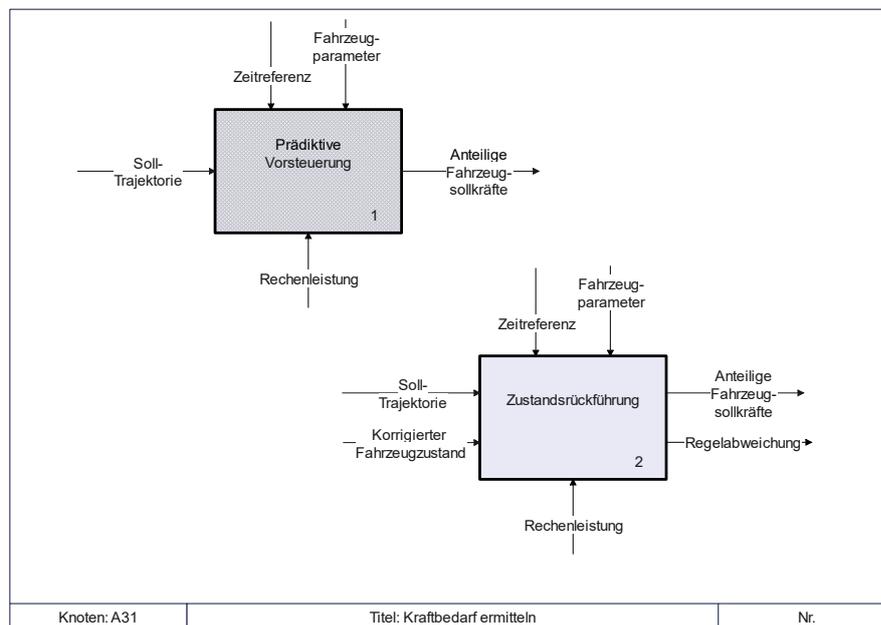


Abbildung 3-7: Komponenten der FTR-Teilfunktion Kraftbedarfsbestimmung in IDEF0 Darstellung mit grau schraffierten Erweiterungen zur Vermeidung eines Funktionalitäts- bzw. Performanceverlusts durch die durchgeführte Kapselung.

## **3.5 Zusammenfassung und Zwischenfazit**

Im aktuellen Kapitel wurde die Funktion einer gekapselten FTR innerhalb einer modularen, serviceorientierten Systemarchitektur sowie die zur Funktionserfüllung ohne Defizite und Leistungseinbußen zu berücksichtigenden Anforderungen definiert. Die durchgeführte Analyse hat gezeigt, dass aus der Kapselung Herausforderungen für den Entwurf einer FTR resultieren, die Anpassungen und Erweiterungen gegenüber etablierten, funktionsorientierten und dezentralen Ansätzen erforderlich machen. Aufgrund der Tatsache, dass aus dem Stand der Technik keine gezielte Untersuchung der Auswirkungen einer Kapselung der FTR bekannt ist, stellt die Identifikation dieser Herausforderungen bereits einen Erkenntnisgewinn dar, der den ersten Teil von Forschungsfrage 3 beantwortet. Weiterhin wurden die notwendigen Adaptionen auf einer funktionalen Ebene beschrieben und so die Grundlage für die Entwicklung konkreter technischer Gegenmaßnahmen in den folgenden Kapiteln dieser Arbeit geschaffen. Forschungsfrage 3 ist somit vollständig beantwortet.

---

## 4 Sicherstellung konsistenter Lokalisierungsinformationen<sup>165</sup>

Im Abschnitt 3.3.2 wurde aufgezeigt, dass inkonsistente Lokalisierungsinformationen in modularen Systemarchitekturen zu systematischen Fehlern bei der automatisierten Fahrzeugführung führen. Um diese Fehler zu verhindern und dennoch Freiheiten bei der Ausgestaltung der modularen Systemarchitektur nutzen zu können, ist die zusätzliche Teilfunktion der Lokalisierungsangleichung erforderlich (Knoten A34 in Abbildung 3-5). Innerhalb des nun folgenden Kapitels wird diese Angleichung technisch ausgestaltet.

Durch eine Untersuchung des Lösungsraums für die Lokalisierungs- und Regelungsarchitektur wurde in einer früheren Veröffentlichung gezeigt, dass unter den in Kapitel 3 definierten Rahmenbedingungen nur eine Low- bzw. Bi-Level-Stabilisierung mit einer zusätzlichen Posen-Offsetkorrektur die Anforderungen zur Sicherstellung konsistenter Lokalisierungsinformationen erfüllt<sup>166b</sup>. Diese Architektur wird daher für die folgenden Schritte vorausgesetzt und zunächst in Abschnitt 4.1 teilfunktionsspezifische Anforderungen abgeleitet. Auf Basis dieser Anforderungen wird anschließend ein Gesamtkonzept entwickelt, das die Konsistenz der genutzten Lokalisierungsinformationen sicherstellt. Das Kapitel beantwortet somit Forschungsfrage 5:

**FF 5:** Wie kann ein negativer Einfluss inkonsistenter Lokalisierungsinformationen vermieden werden?

### 4.1 Anforderungsanalyse

In Abbildung 4-1 ist die grundlegende Lokalisierungs- und Regelungsarchitektur dargestellt, die sich aus der übergeordneten modularen Fahrzeug-Systemarchitektur aus Abschnitt 3.1 ergibt. Die TP berechnet mit der Frequenz  $f_{TP}$  Soll-Trajektorien für das Fahrzeug auf Basis der von einer Lokalisierungsfunktion mit der Frequenz  $f_{Lok}$  geschätzten Ist-Pose. Die nachgelagerte FTR setzt diese Trajektorien durch Generierung von Stellgrößen für die Aktorik um und nutzt dazu die mit Frequenz  $f_{FZS}$  bereitgestellten Lokalisierungsinformationen aus einer unabhängigen FZS. Innerhalb der FTR findet mit der Frequenz  $f_{FTR}$  ein Soll-Ist-Vergleich zwischen der Soll-Trajektorie und der Ist-Pose aus der FZS statt. Es ist daher zwingend erforderlich, dass beide Ist-Posen in ein konsistentes, gemeinsames Bezugssystem überführt werden, um Stelleingriffe

---

<sup>165</sup>Das Kapitel baut auf einer eigenen Veröffentlichung<sup>166a</sup> und einer eigenen Patentanmeldung<sup>167</sup> auf.

<sup>166</sup>Homolla, T. et al.: Verfahren zur Korrektur von inkonsistenten Lokalisierungsdaten (2020), a: -; b: S. 8; c: S. 4.

<sup>167</sup>Winner, H. et al.: Vorrichtung zur Korrektur von Lokalisierungsinformationen (2021).

aufgrund fiktiver Regelabweichungen zu verhindern (vgl. Abschnitt 3.3.2). Im Folgenden wird der Lokalisierungs-Dienst der TP stets mit "Lokalisierung" bezeichnet, für die FTR wird entsprechend der Begriff "Fahr-dynamikzustandsschätzung (FZS)" verwendet.

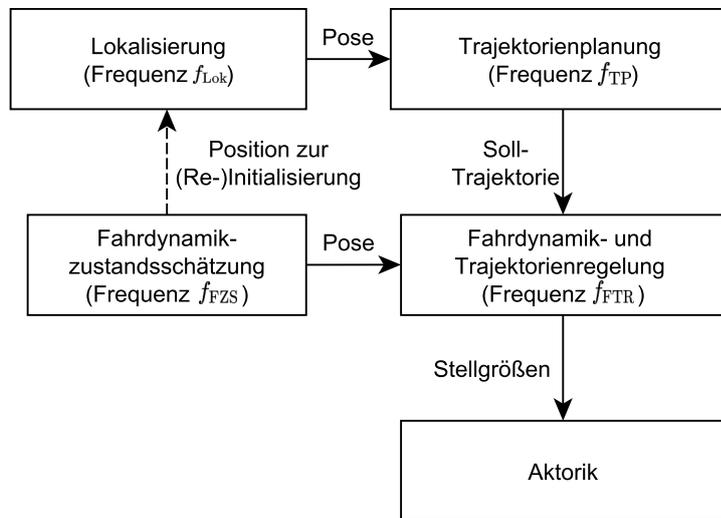


Abbildung 4-1: Grundlegende modulare Lokalisierungs- und Regelungsarchitektur als Ausgangssituation für die Entwicklung der Lokalisierungsangleichung.

Die TP in Abbildung 4-1 kann in Form mehrerer unabhängiger Dienste mehrfach instanziiert sein, bspw. für verschiedene Betriebsmodi des Fahrzeugs. Die Konfiguration der Dienste wird stets durch den zentralen Orchestrator vorgenommen. Um die modulare Architektur nicht einzuschränken, darf die FTR keine Kenntnis über den übergeordneten Betriebsmodus besitzen. Da die verschiedenen TP-Instanzen nicht synchronisiert sind und daher potentiell auf Ist-Posen der Lokalisierung zu unterschiedlichen Zeitpunkten zurückgreifen, kann der relevante Offset zwischen Lokalisierung der TP und der FZS je nach Quelle der von der FTR empfangenen Soll-Trajektorie ebenfalls unterschiedlich ausfallen. Auch ist es möglich, dass ein bestimmter TP-Dienst anstelle auf die unabhängige Lokalisierung auf die Ist-Pose der FZS zurückgreift und daher kein Offset vorliegt bzw. korrigiert werden muss. Eine Lokalisierungsangleichung zur Nutzung innerhalb der beschriebenen Systemarchitektur muss daher alle notwendigen Informationen zur Auflösung dieser Unterschiede aus der Soll-Trajektorie ableiten, da andernfalls die Kenntnis der Quelle der Trajektorie bzw. des Fahrzeug-Betriebsmodus erforderlich wäre.

Aus den unterschiedlichen Taktraten der einzelnen Module ergibt sich die Anforderung, dass die für die FTR benötigten Lokalisierungsinformationen mindestens mit der Taktrate der FTR zur Verfügung stehen ( $f_{FZS} \geq f_{FTR}$ ) und die Lokalisierungsangleichung synchron mit der FTR arbeitet. Da die Latenz zwischen FZS und FTR als Totzeit signifikanten Einfluss auf die Stabilität des gesamten Regelkreises besitzt, besteht weiterhin die Anforderung, dass die Lokalisierungsangleichung keine zusätzlichen Latenzen in das System einführt.

Eine Änderung des relevanten Offsets zwischen den beiden Lokalisierungsfunktionen tritt nur zu diskreten Zeitpunkten auf. Die Neuplanung einer Trajektorie führt zu einem veränderten

Offset, falls die neue Trajektorie auf Basis der Ist-Pose aus der Lokalisierung und nicht auf Basis der vorherigen Trajektorie geplant wird<sup>168</sup>. In Zyklen der FTR, in denen keine neue Soll-Trajektorie mit neuer Planungspose empfangen wurde, ändert sich der relevante Offset nicht. Die Korrektur des aktuellen Ist-Zustands aus der FZS muss in solchen Fällen mit dem zuletzt berechneten und weiterhin gültigen Offset erfolgen. Die Lokalisierungsangleichung muss daher eigenständig Situationen identifizieren können, die eine Neuberechnung des Offsets zwischen den Lokalisierungsfunktionen erforderlich machen.

Weitere Anforderungen ergeben sich aus dem Ausfallverhalten der Module. Die FTR und FZS sind durch geeignete Maßnahmen, wie bspw. einer redundanten Instanziierung in einem Hot-Stand-By-Betrieb, ausfallsicher zu entwerfen, da sie zur Überführung des Fahrzeugs in einen risikominimalen Zustand zwingend benötigt werden<sup>169</sup>. Die vorgeschaltete TP und Lokalisierung hingegen müssen keine harten Anforderungen an ihre Ausfallsicherheit erfüllen, da im Fehlerfall die zuvor genannte Rückfallebene existiert. Die Lokalisierungs- und Regelungsarchitektur muss daher sicherstellen, dass im Falle eines Ausfalls der TP und der zugehörigen Lokalisierung die Funktionsfähigkeit von FTR und FZS nicht beeinflusst werden.

Obwohl bei den durchgeführten Analysen die Poseninformationen im Fokus der Betrachtung stehen, muss die Lokalisierungsangleichung auch Inkonsistenzen in den Geschwindigkeits- und Beschleunigungsinformationen verhindern. Diese treten im Falle eines Offsets im geschätzten Gierwinkel des Fahrzeugs auf, da die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsinformationen in der Soll-Trajektorie und dem Ist-Zustand von der Sensorik zwar im Fahrzeugkoordinatensystem geschätzt, jedoch anschließend in einem erdfesten Navigationskoordinatensystem bereitgestellt werden, um die Modularität der beteiligten Dienste nicht zu kompromittieren. Ein Offset zwischen den geschätzten Gierwinkeln führt daher zu Transformationsfehlern, die sich negativ auf die Umsetzung des geplanten Soll-Verhaltens auswirken.

Bei der Konzeption der Lokalisierungsangleichungen müssen Schleifenbildungen in der Informationsverarbeitung verhindert werden. Je nach konkreter technischer Ausgestaltung, bspw. im Fall einer landmarkenbasierten Lokalisierung, benötigt die Lokalisierungsfunktion der TP eine absolute Position für (Re-)Initialisierungen, die durch die FZS zur Verfügung gestellt wird. Würde die Pose der Lokalisierung anschließend in das Filter der FZS aufgenommen, könnte es zu einer positiven Kopplung und einer damit verbundenen Instabilität des Systems kommen<sup>166c</sup>.

<sup>168</sup>Trajektorienplanungsalgorithmen können beide Modi aufweisen, die zur Laufzeit auf Basis vorab definierter Kriterien (z. B. vorhandener Regelabweichung im Falle einer BLS) umgeschaltet werden können. Wird eine Soll-Trajektorie auf Basis der vorherigen Trajektorie geplant, wird die Planungspose aus dieser übernommen, so dass sich der relevante Posen-Offset für die Lokalisierungsangleichung nicht ändert.

<sup>169</sup>Eine solche Rückfallebene kann bspw. das "Sichere Anhalten" im Projekt UNICARagil sein<sup>170</sup>. Durch das "Sichere Anhalten" kann das Fahrzeug im Fehlerfall eine vorab definierte Notbahn abfahren und so das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand überführen. Die FTR und FZS sind dazu weiter erforderlich.

<sup>170</sup>Ackermann, S. M.; Winner, H.: Systemarchitektur zum sicheren Anhalten autom. Fahrzeuge (2020).

Zusammengefasst ergeben sich die in Tabelle 4-1 dargestellten teilfunktionsspezifischen Anforderungen an die Lokalisierungsangleichung.

Tabelle 4-1: Teilfunktionsspezifische Anforderungen für die Lokalisierungsangleichung.

Anforderung	Beschreibung
A2.1	Die Lokalisierungsangleichung muss Regeleingriffe durch Inkonsistenzen zwischen den Lokalisierungsfunktionen in der Pose, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung des Fahrzeugs kompensieren.
A2.2	Die Lokalisierungsangleichung darf nicht auf Kenntnis der Quelle der verwendeten Soll-Trajektorie angewiesen sein und es darf keine Modusumschaltung innerhalb der Teilfunktion aufgrund einer dynamischen Rekonfiguration der TP-Dienste durch den Orchestrator erfolgen.
A2.3	Die benötigten korrigierten Ist-Größen des Fahrdynamikzustands aus der FZS müssen mindestens mit der Rate der FTR zur Verfügung stehen ( $f_{FZS} \geq f_{FTR}$ ) und die Angleichung der Lokalisierungsinformation muss synchron zum Zyklus der FTR erfolgen.
A2.4	Die Lokalisierungsangleichung muss Situationen eigenständig identifizieren, die eine Neuberechnung des Offsets zwischen den beteiligten Lokalisierungsfunktionen erforderlich machen.
A2.5	Die Funktion der Lokalisierungsangleichung muss auch bei einem vollständigen Ausfall der Lokalisierung und TP sichergestellt sein, um das Fahrzeug in einen risikominimalen Zustand überführen zu können.
A2.6	Schleifenbildung in der Informationsverarbeitung muss verhindert werden.
A2.7	Die Lokalisierungsangleichung darf keine zusätzlichen Latenzen auf dem Signalpfad zwischen FZS und FTR einführen.

## 4.2 Konzeptentwicklung

Die Lokalisierungsangleichung wird als Teilfunktion der FTR den übrigen Berechnungen vorgeschaltet. Um die Anforderungen A2.3 und A2.7 zu erfüllen, wird die Angleichung nicht als separater Dienst ausgeführt, sondern in den bestehenden Dienst der FTR integriert. Auf diese Weise kann eine perfekte Synchronisierung über den Zyklus der FTR sichergestellt werden und zusätzliche Latenzen aufgrund des Kommunikations-Stacks der Middleware für den Informationsaustausch zwischen Diensten werden vermieden.

Die Soll-Trajektorien werden in der TP auf Basis der Ist-Pose aus der Lokalisierung geplant. Um Anforderung A2.2 zu erfüllen, werden die für die Lokalisierungsangleichung notwendigen Informationen über die Planungspose direkt in die Soll-Trajektorie integriert. Somit entfällt die Notwendigkeit für einen zusätzlichen Informationskanal an die FTR, um einer empfangenen Soll-Trajektorie die jeweilige Planungspose zuzuordnen, und es muss kein Ringspeicher für die Planungsposen vorhanden sein.

Die  $j$ -te Soll-Trajektorie  ${}_N\mathcal{T}_j$  enthält eine Abfolge von  $n_{\text{traj}}$  Soll-Posen  ${}_N\mathcal{P}_{j,i}$  mit den Zeitstempeln  $t_{j,i}$  und den ersten beiden zeitlichen Ableitungen der Posen  ${}_N\dot{\mathcal{P}}_{j,i}$  sowie  ${}_N\ddot{\mathcal{P}}_{j,i}$ . Diese Folge wird um die Planungspose der Trajektorie  ${}_G\mathcal{P}_{\text{Lok},j}$  erweitert, die von der Lokalisierung für die TP geschätzt wurde. Die Soll-Posen in der Trajektorie sind dabei in einem Navigationskoordinatensystem mit Ursprung in der Planungspose angegeben. Der Zeitstempel  $t_{\text{Lok},j}$  beschreibt, zu welchem Zeitpunkt die Planungspose gültig war. Die Planungspose ändert sich dabei nur, wenn die Soll-Trajektorie auf Basis des Ist-Zustands des Fahrzeugs geplant wurde und nicht, wenn eine Planung auf Basis einer vorherigen Soll-Trajektorie erfolgte.

Weiterhin sind zwei Flags  $\xi_{\text{FZS}}$  und  $\xi_{\text{NP}}$  enthalten, die beschreiben, ob die Trajektorie auf Basis der FZS oder einer unabhängigen Lokalisierung geplant wurde ( $\xi_{\text{FZS}}$ ) sowie ob die Planung auf Grundlage des aktuellen Ist-Zustands oder der vorherigen Soll-Trajektorie erfolgte ( $\xi_{\text{NP}}$ ). Auf diese Weise kann die Lokisierungsangleichung ohne Kenntnis des Fahrzeug-Betriebsmodus nur anhand der derzeitigen Soll-Trajektorie entscheiden, ob eine Lokisierungsangleichung erforderlich ist und ob ein neuer Offset bestimmt werden muss. Die vollständige Soll-Trajektorie in Navigationskoordinaten lautet:

$${}_N\mathcal{T}_j = \{(t_{\text{Lok},j}, {}_G\mathcal{P}_{\text{Lok},j}); (\xi_{\text{FZS}}, \xi_{\text{NP}}); (t_{j,i}, {}_N\mathcal{P}_{j,i}, {}_N\dot{\mathcal{P}}_{j,i}, {}_N\ddot{\mathcal{P}}_{j,i})_{i=1\dots n_{\text{traj}}}\} \quad (4-1)$$

Die  $k$ -te Ist-Pose der FZS  ${}_G\mathcal{P}_{\text{FZS},k}$  mitsamt Gültigkeitszeitpunkt  $t_{\text{FZS},k}$  erreicht die FTR aufgrund der modularen Architektur asynchron. Um vergangene Werte für die Offsetberechnung verfügbar zu machen, werden die empfangenen Posen in einem Ringspeicher vorgehalten. Die Größe des Ringspeichers orientiert sich dabei an den worst-case Latenzen der Soll-Trajektorie<sup>171</sup>.

Durch die Ausgestaltung der Soll-Trajektorie und den Ringspeicher für die Posen aus der FZS wurden die Voraussetzungen für die Lokisierungsangleichung geschaffen. Wie in Abbildung 3-6 dargestellt, besteht die Lokisierungsangleichung selbst aus den beiden Teilfunktionen der Offsetberechnung und -korrektur, die nachfolgend ausgestaltet werden.

### 4.2.1 Offsetberechnung

Die Aufgabe der Offsetberechnung ist die Bestimmung und Überwachung des im jeweiligen FTR-Zyklus relevanten Posen-Offsets. In Abschnitt 4.1 wurde dargelegt, dass sich der Offset nur bei Vorliegen bestimmter Voraussetzungen ändert. Daher wird in jedem Zyklus der FTR zunächst überprüft, ob eine neue Soll-Trajektorie vorliegt, die zudem von einer TP geplant wurde, die auf eine unabhängige Lokalisierung zurückgreift ( $\xi_{\text{FZS}} = 1$ ) sowie ob die Trajektorie auf Basis der Ist-Pose aus der Lokalisierung geplant wurde ( $\xi_{\text{NP}} = 1$ ).

<sup>171</sup> Die Ist-Pose der Lokalisierung ist die Basis für die Planung einer Trajektorie in der TP. Um zeitlich korrespondierende Werte der verschiedenen Ist-Posen im Zyklus der FTR zu identifizieren, müssen daher die Posen der FZS mindestens für den Zeitverzug durch die TP und die Kommunikationslatenz vorgehalten werden.

Die Neuberechnung des Offsets findet daher zumeist alle  $n_{\text{off}} = \frac{f_{\text{FTR}}}{f_{\text{TP}}}$  Zyklen der FTR statt, durch Asynchronitäten oder Latenzen bzw. Jitter der TP sind jedoch Abweichungen möglich. Sind die Bedingungen für eine Neuberechnung des Offsets erfüllt, werden die entsprechenden Berechnungen im Zyklus der FTR getriggert. Andernfalls wird der Offset aus dem letzten Zyklus der FTR weiterverwendet.

Die Berechnung des Offsets besteht aus mehreren sequentiellen Schritten. Zur Isolation der Sensorfehler muss ein Vergleich der zu einem identischen Zeitpunkt gültigen Posen durchgeführt werden. Daher wird zunächst  ${}_G\mathcal{P}_{\text{Lok},j}$  aus der derzeit verwendeten Soll-Trajektorie ausgelesen und auf Basis von  $t_{\text{Lok},j}$  eine korrespondierende Ist-Pose der FZS  ${}_G\mathcal{P}_{\text{FZS}}(t_{\text{Lok},j})$  aus dem Ringspeicher bestimmt. Da die Posen der FZS nur zu diskreten Zeitpunkten (Frequenz  $f_{\text{FZS}}$ ) vorliegen, stellt das Vorliegen einer FZS Pose exakt zum Zeitpunkt  $t_{\text{Lok},j}$  einen Sonderfall dar. Ist dies nicht der Fall, wird zwischen den beiden zeitlich benachbarten Posen linear interpoliert.

Nach einer Koordinatentransformation in das Navigationskoordinatensystem mit dem Ursprung in der Planungspose der Soll-Trajektorie wird die systematische Abweichung zwischen den beiden Posen ("Offset") bestimmt:

$${}_N\Delta_{\text{off},j} = {}_N\mathcal{P}_{\text{FZS}}(t_{\text{Lok},j}) - {}_N\mathcal{P}_{\text{Lok},j} \quad (4-2)$$

Der Offset zwischen den beiden Posen  ${}_N\Delta_{\text{off},j}$  ist dabei eine dreidimensionale Größe, bestehend aus der Abweichung der Translation in der East-North-Ebene und der Gierabweichung:

$${}_N\Delta_{\text{off},j} = \begin{bmatrix} \Delta_{\text{off},ea,j} \\ \Delta_{\text{off},no,j} \\ \Delta_{\text{off},\psi,j} \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

Im Anschluss wird  ${}_N\Delta_{\text{off},j}$  an die Teilfunktion der Offsetkorrektur weitergegeben. Zusätzlich wird der berechnete Offset auch an die Selbstwahrnehmung des Fahrzeugs kommuniziert, da ein hoher Offset ein Indikator für eine degradierte Performance mindestens einer der beiden Lokalisierungen sein kann und daher die Aufmerksamkeit der Selbstwahrnehmung erfordert. Für das vorgestellte Verfahren stellt ein großer Offset zunächst kein Problem dar. Einzig die Effekte der Erdkrümmung führen bei sehr großen Offsets zu Fehlern, da die zuvor präsentierten Berechnungen im kartesischen Navigationskoordinatensystem durchgeführt werden.

## 4.2.2 Offsetkorrektur

Nach der Bestimmung des Posenoffsets ist die Aufgabe der Offsetkorrektur, die Soll-Trajektorie aus der TP und die Ist-Pose aus der FZS in ein gemeinsames Bezugssystem zu überführen. Dazu wird die Teilfunktion in jedem Zyklus der FTR vor den übrigen Berechnungen des Reglers ausgeführt. Zunächst wird analysiert, ob eine Korrektur überhaupt erforderlich ist ( $\xi_{\text{FZS}} = 1$ ).

Anschließend wird der in der Offsetberechnung zuletzt ermittelte Offset sowie die aktuelle Ist-Pose der FZS  ${}_N\mathcal{P}_{\text{FZS},k}$  ausgelesen.  ${}_N\mathcal{P}_{\text{FZS},k}$  unterscheidet sich dabei zumeist von der zur Berechnung des Offsets verwendeten Pose, da letztere zum Zeitpunkt der Planungspose gültig war und damit um die Latenz der TP in der Vergangenheit liegt.

Im Anschluss wird die Ist-Pose der FZS um den Offset korrigiert:

$${}_N\mathcal{P}_{\text{FZS,korr},k} = {}_N\mathcal{P}_{\text{FZS},k} - {}_N\Delta_{\text{off},j} \quad (4-4)$$

Des Weiteren wird eine Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_{\text{off}}$  auf Basis des Gieroffsets ermittelt

$$\mathbf{R}_{\text{off},j} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta_{\text{off},\psi,j}) & -\sin(\Delta_{\text{off},\psi,j}) \\ \sin(\Delta_{\text{off},\psi,j}) & \cos(\Delta_{\text{off},\psi,j}) \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

und zur Korrektur der Ist-Geschwindigkeit  ${}_N\dot{\mathcal{P}}_{\text{FZS},k}$  bzw. Ist-Beschleunigung  ${}_N\ddot{\mathcal{P}}_{\text{FZS},k}$  aus der FZS verwendet:

$${}_N\dot{\mathcal{P}}_{\text{FZS,korr},k} = \mathbf{R}_{\text{off},j} \cdot {}_N\dot{\mathcal{P}}_{\text{FZS},k} \quad (4-6)$$

$${}_N\ddot{\mathcal{P}}_{\text{FZS,korr},k} = \mathbf{R}_{\text{off},j} \cdot {}_N\ddot{\mathcal{P}}_{\text{FZS},k} \quad (4-7)$$

Der korrigierte Ist-Zustand des Fahrzeugs ( ${}_N\mathcal{P}_{\text{FZS,korr},k}$ ,  ${}_N\dot{\mathcal{P}}_{\text{FZS,korr},k}$ ,  ${}_N\ddot{\mathcal{P}}_{\text{FZS,korr},k}$ ) wird anschließend an die weiteren Teilfunktionen der FTR aus Abbildung 3-5 weitergegeben und stellt damit die Basis für den Soll-Ist-Vergleich in der Regelung und die Berechnung der Stellgrößen für die Aktorik des Fahrzeugs dar.

### 4.2.3 Programmablauf

Der Ablauf der gesamten Lokalisierungsangleichung ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Der dargestellte Algorithmus ist in den Berechnungszyklus der FTR integriert und wird daher in jedem Zyklus vor den übrigen Berechnungen der FTR mit der Frequenz  $f_{\text{FTR}}$  ausgeführt. Die Offsetberechnung wird in jedem Zyklus geprüft, aber nur ausgeführt, wenn die zuvor definierten Bedingungen vorliegen, wohingegen die Offsetkorrektur immer vor einem Berechnungsschritt der FTR ausgeführt wird.

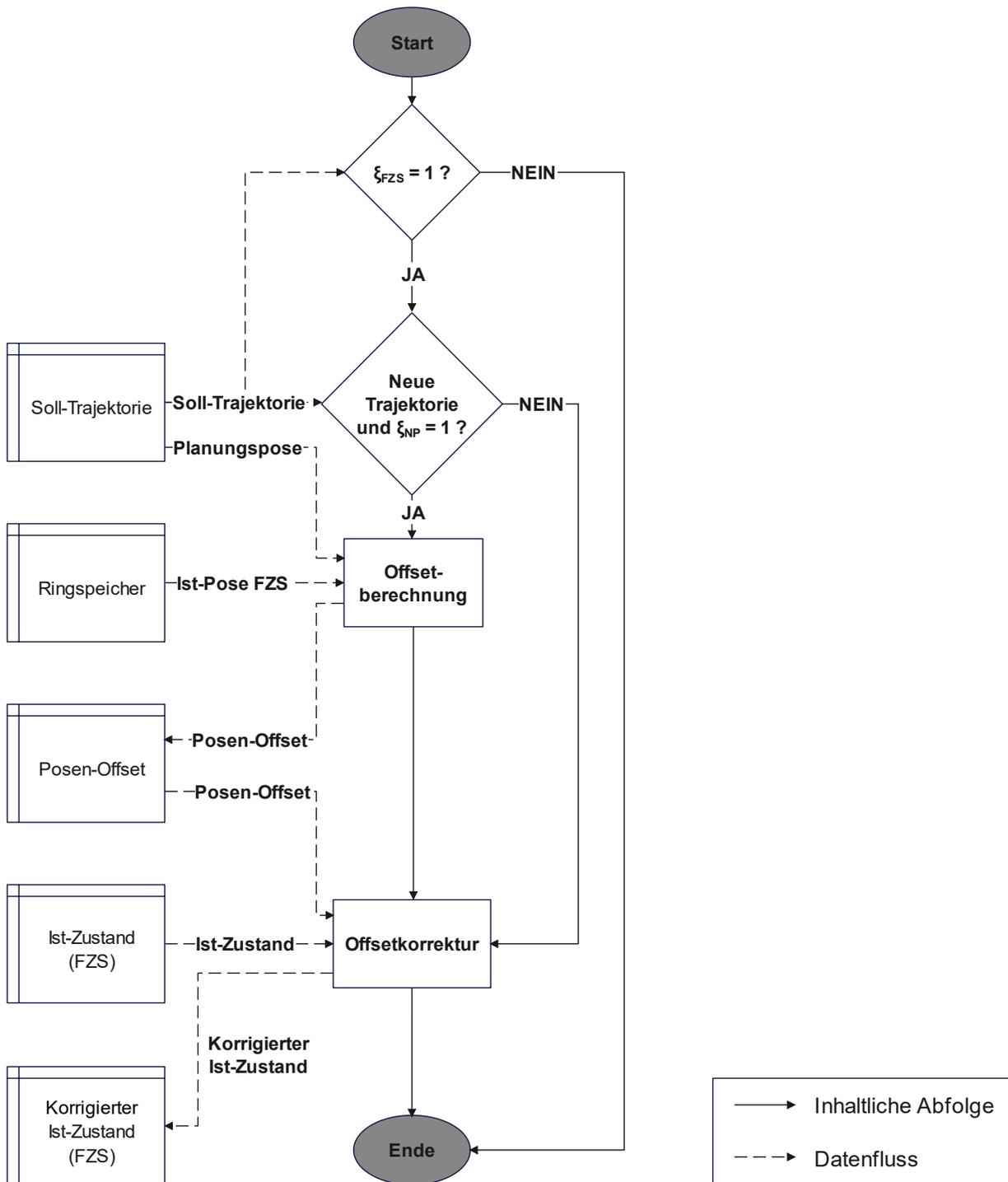


Abbildung 4-2: Programmablauf der Lokalisierungsangleichung. Der dargestellte Algorithmus wird mit der Frequenz der FTR ( $f_{FTR}$ ) innerhalb des Zyklus der FTR ausgeführt und ist den übrigen Berechnung vorangestellt.

## 4.3 Zusammenfassung und Zwischenfazit

Die in diesem Kapitel entwickelte Lokalisierungsangleichung bietet mehrere relevante Vorteile für die automatisierte Fahrzeugführung mit modularen Systemarchitekturen und stellt die technische Ausgestaltung der Teilfunktion A34 in Abbildung 3-5 dar. Durch die mehrstufige Angleichung werden harte Anforderungen an die Konsistenz der von verschiedenen Modulen verwendeten Lokalisierungsinformationen vermieden. Dies erlaubt weitreichende Freiheiten bei der Ausnutzung der modularen Systemarchitektur der Fahrzeuge.

Die gewonnene Flexibilität erlaubt die Nutzung unterschiedlicher Lokalisierungen, was aufgrund von Unterschieden hinsichtlich der Performance verschiedener Sensorik und des damit verbundenen Ausfallverhaltens wünschenswert sein kann. So ist es bspw. möglich, für die von der TP verwendete Lokalisierung auf landmarkenbasierte Ansätze mittels maschinellem Sehen zurückzugreifen, die aufgrund ihres hohen Rechenbedarfs nur schwer auf ausfallsicherer embedded-Hardware betrieben werden können. Anforderungen an die Ausfallsicherheit werden im vorliegenden Verfahren nur an die FZS und die FTR gestellt. Weiterhin ist keine Betriebsmoduskenntnis der FTR erforderlich, wodurch die übergeordneten Ziele der Austauschbarkeit und Wiederverwendbarkeit unterstützt werden. Mit dem vorgeschlagenen Verfahren ist es zusätzlich möglich, die Selbstwahrnehmung des Systems zu unterstützen.

Das Verfahren trifft bewusst keine Aussage über die Qualität der empfangenen Lokalisierungsinformationen und stellt auch keine Sensordatenfusion zur Verbesserung der Lokalisierungsgüte dar. Die Anwendung des präsentierten Verfahrens ist dabei nicht auf automatisierte Kraftfahrzeuge beschränkt, sondern kann immer dort erfolgen, wo ein mobiles System mit getrennter planerischer und ausführender Ebene sowie mit mehr als einer Lokalisierungsfunktion zum Einsatz kommt.

Forschungsfrage 5 ist somit beantwortet. Ein Nachweis der Defizitvermeidung durch die entwickelte Lokalisierungsangleichung wird in Kapitel 8 vorgenommen.

## 5 Prädiktive Vorsteuerungsarchitektur<sup>172</sup>

In Kapitel 3 wurde aufgezeigt, dass die im Zuge der Kapselung der FTR entstehende lose Kopplung der beiden Teilfunktionen zu zusätzlichen Herausforderungen wie einer grundlegenden Asynchronität zwischen TP und FTR führt, die sich in fehlenden Echtzeitgarantien der Planung und abweichenden Berechnungsfrequenzen widerspiegelt. Um bei der Ausführung geplanter Trajektorien Performanceeinbußen in Bezug auf die Umsetzung des darin enthaltenen transienten Fahrzeugverhaltens zu vermeiden, sind zusätzliche Gegenmaßnahmen in Form einer prädiktiven Vorsteuerung erforderlich. Dabei wird das Wissen um geplante zukünftige Systemzustände ausgenutzt, um den negativen Einfluss der Aktor-Systemdynamik zu minimieren.

Innerhalb des nun folgenden Kapitels werden zunächst auf Grundlage der in Kapitel 3 dargestellten Architektur teilfunktionsspezifische Anforderungen an die Vorsteuerung innerhalb der FTR abgeleitet. Anhand der ermittelten Anforderungen wird aufgezeigt, weshalb klassische Regelungsarchitekturen, mit auf die Umsetzung durch die nachgelagerte Regelung und Aktorik abgestimmter Sollwertberechnung durch die TP, nicht anwendbar sind. Basierend auf den Anforderungen und dem Lösungsraum möglicher Vorsteuerungsarchitekturen wird ein vollständiges Konzept auf Basis von FIR-Filtern entwickelt, das alle Anforderungen erfüllt und so verhindert, dass durch die Kapselung der FTR Defizite entstehen. Das präsentierte Verfahren ermöglicht, das transiente Soll-Fahrzeugverhalten im offenen Regelkreis umzusetzen und so die zuvor genannten Herausforderungen zu bewältigen. Der Nachweis der Defizitvermeidung durch die entwickelte Vorsteuerung erfolgt in Kapitel 8.

Das Kapitel beantwortet somit Forschungsfrage 6:

**FF 6:** Wie kann das von der Planungsebene bereitgestellte Wissen über die zukünftigen Systemzustände zur Funktionserfüllung der FTR genutzt werden?

### 5.1 Teilfunktionsspezifische Anforderungen

Die Umsetzung geplanter Soll-Trajektorien erfolgt innerhalb der FTR durch die Berechnung von Stellgrößen für die verschiedenen Aktoren des Fahrzeugs, die jeweils eine charakteristische Systemdynamik besitzen, welche zu einer zeitverzögerten Umsetzung der Stellgrößen führt. Um das Auftreten von unerwünschten Regelabweichungen während transients Manöver zu vermeiden,

---

<sup>172</sup>Das Kapitel baut auf einer eigenen Veröffentlichung<sup>173</sup> auf.

<sup>173</sup>Homolla, T.; Winner, H.: Predictive feedforward control architecture for motion control (2022).

müssen daher die aus der Systemdynamik resultierenden Verzugszeiten bei der Vorgabe von Stellgrößen für die Aktorik berücksichtigt werden.

Durch die lose Kopplung der TP und der FTR ist eine auf die Kompensation der Verzugszeiten optimierte Trajektorienberechnung nicht ohne Weiteres möglich<sup>174</sup>. Stattdessen ist erforderlich, dass die FTR eigenständig die erwarteten Verzugszeiten durch eine dafür geeignete prädiktive Vorsteuerung kompensiert und somit das transiente Soll-Fahrzeugverhalten im offenen Regelkreis umsetzt. Eine Umsetzung im geschlossenen Regelkreis ist hingegen nicht zielführend, da mit einer geschlossenen Regelschleife keine zufriedenstellende Dynamik des transienten Fahrzeugverhaltens erreicht werden kann<sup>175</sup> und ein solcher Ansatz zudem aufgrund der zu erwartenden erhöhten Regelabweichungen eine weniger steife Reglerparametrisierung als erwünscht erforderlich macht<sup>176</sup>.

Grundlage für die weiteren Betrachtungen bildet die in Kapitel 3 dargestellte Systemarchitektur. Basierend auf dem jeweiligen Fahrzeug-Betriebsmodus (z. B. Automation, Sicheres Anhalten oder Leitwartenbetrieb) verarbeitet die FTR Soll-Trajektorien aus verschiedenen Diensten, ohne dabei selbst Kenntnis über die Quelle der empfangenen Trajektorie zu besitzen. Durch diese lose Kopplung ohne zeitliche Synchronisierung mit der TP zeigen sich die in Kapitel 3 genannten Eigenschaften. Die FTR basiert dabei auf einer BLS, d. h. die Soll-Trajektorien werden nur bei einer Änderung des dynamischen Umfelds, nicht jedoch bei Vorliegen einer limitierten Regelabweichung, angepasst<sup>177,178</sup>. Durch unerwartete Hindernisse bzw. Änderungen im dynamischen Umfeld des Fahrzeugs können jedoch sprunghafte Änderungen der Soll-Trajektorie erforderlich werden, da die zuvor geplante Trajektorie noch nicht an das neue dynamische Umfeld angepasst wurde. Als Ergebnis der FTR liegen Stellgrößen für die Einzelradaktorik der Fahrzeuge vor.

Für die bestmögliche Umsetzung des transienten Verhaltens (d. h. mit geringstmöglicher Regelabweichung) sind neben der Umsetzung im offenen Regelkreis eine Reihe von weiteren Randbedingungen zu beachten. Ein Aktor, dessen Systemdynamik ein lineares, zeitinvariantes (LTI) Verhalten zeigt und somit eine unendlich hohe theoretische Stellrate aufweist, wäre durch eine prädiktive Kompensation in der Lage, die Einflüsse der Systemdynamik durch Anforderung einer entsprechend hohen Stellamplitude weitestgehend auszugleichen<sup>179</sup>. Da jedoch alle real

---

<sup>174</sup>Die TP verfügt über kein Wissen der nachgelagerten Module wie der Aktorik. Weiterhin wäre für eine angepasste Soll-Trajektorienberechnung eine zeitliche Synchronisierung mit der nachgelagerten FTR erforderlich.

<sup>175</sup>Für die Umsetzung im geschlossenen Regelkreis müssen zunächst Regelabweichungen entstehen, bevor eine Gegenreaktion durch die FTR stattfinden kann. Dies verlangsamt die Reaktion gegenüber einer Umsetzung im offenen Regelkreis basierend auf dem in der Soll-Trajektorie enthaltenen geplanten Fahrzeugverhalten.

<sup>176</sup>Rathgeber, C.: Trajektorienplanung und -folgeregung (2016), S. 22.

<sup>177</sup>Die Architektur beinhaltet die implizite Annahme, dass die FTR stets in der Lage ist, der Soll-Trajektorie mit ausreichend geringer Regelabweichung zu folgen, so dass keine Umplanung aufgrund einer abweichenden Ist-Pose erforderlich ist. In Kapitel 6 wird ein Eskalationsmechanismus diskutiert, um Umplanungen aufgrund physikalisch nicht umsetzbarer Soll-Trajektorien zu ermöglichen.

<sup>178</sup>Werling, M.: Trajektoriengenerierung in Verkehrsszenarien (2011), S. 20.

<sup>179</sup>Lunze, J.: Regelungstechnik 1 (2020), S. 187.

existierenden Aktoren physikalisch bedingte Stellratengrenzen besitzen und eine einfache Erhöhung der angeforderten Stellamplitude somit nicht zielführend ist, ist die Berücksichtigung dieser Grenzen innerhalb der Vorsteuerung notwendig. Dies bedeutet darüber hinaus, dass eine aus der Systemdynamik resultierende Regelabweichung nicht vollständig kompensiert werden kann. Durch eine geeignete Vorsteuerung wird jedoch eine Verringerung erwartet.

Die für die Kompensation von Verzugszeiten notwendige Vorausschau geplanter zukünftiger Systemzustände führt zu einem unerwünschten Fehler, falls sich die Trajektorie im Bereich der Vorausschau sprunghaft ändert. Dies kann bspw. im Falle unvorhergesehener dynamischer Objekte (z. B. Fußgänger) im Umfeld oder bei einer dynamischen Rekonfiguration von Diensten innerhalb der servicorientierten Architektur erfolgen. Die FTR selbst verfügt über kein Gedächtnis in Form von Speichern wie bspw. Integralgliedern, jedoch stellt die Trägheit der Aktorik einen Speicher vorheriger Stellgrößen dar. Daher steigt der resultierende Fehler bei Umschaltvorgängen mit der Länge der Vorausschau auf der Soll-Trajektorie durch die zeitliche Verschmierung der Impulsantwort an.

Die Vorsteuerung sollte eine möglichst symmetrische Stellgrößenanforderung erzeugen, was einer gespiegelten Impulsantwort der Aktorik innerhalb der FTR entspricht, so dass sich positive und negative Regelabweichungen in Summe aufheben<sup>180</sup>. Für den betrachteten Anwendungsfall des innerstädtischen Verkehrs existieren hohe Anforderungen an die Positionierungsgenauigkeit, die bei einer hohen zeitlichen Verschmierung durch die frühzeitige Reaktion auf Anregungen innerhalb der Soll-Trajektorie ggf. nur durch starke Gegenreaktionen der Zustandsrückführung eingehalten werden können, was den Effekt der prädiktiven Vorsteuerung schmälert. Da gleichzeitig jedoch auch die Abbildungstreue mit steigender Vorausschau ansteigt, muss bei der Konzeption der Vorsteuerung eine entsprechende Abwägung beider Ziele erfolgen.

Aus der Signalverarbeitung ist das Abtasttheorem von Nyquist-Shannon bekannt<sup>181a</sup>. Da die Soll-Trajektorie aus einer Folge diskreter Aufpunkte mit fester Abtastfrequenz  $f_{\text{traj}}$  besteht, können aus diesen nur Frequenzanteile bis zu einer theoretischen Grenzfrequenz  $f_{\text{grenz}} = \frac{f_{\text{traj}}}{2}$  rekonstruiert werden. In einer praktischen Anwendung treten bei Annäherung an die theoretische Grenzfrequenz jedoch bereits signifikante Dämpfungseffekte auf, so dass der näherungsweise unverzerrt rekonstruierbare Frequenzanteil der Soll-Trajektorie unterhalb von  $f_{\text{grenz}}$  liegt<sup>181b</sup>. Es muss daher bereits von der TP sichergestellt werden, dass die geplanten Soll-Trajektorien nur relevante Frequenzanteile besitzen, die aus der abgetasteten Trajektorie noch rekonstruiert werden können. Ist dies aufgrund der gewünschten Dynamik der Soll-Trajektorie nicht möglich, muss  $f_{\text{traj}}$  entsprechend erhöht werden (auf Kosten der übertragenen Datenmengen und dem gestiegenen Rechenaufwand für die FTR).

Um den modularen Gedanken der betrachteten Fahrzeuge nicht zu kompromittieren, ist eine Anpassung der Vorsteuerung auf verschiedene Systemdynamiken unerlässlich. Je nach eingesetztem

---

<sup>180</sup>Die Systemreaktion mit gespiegelter Impulsantwort ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

<sup>181</sup>Meyer, M.: Signalverarbeitung (2021), a: S. 159; b: S. 163.

Aktor kann sich die relevante Systemdynamik für die Kompensation durch die FTR signifikant unterscheiden, so dass die Struktur und Parametrisierung der Vorsteuerung anpassbar sein muss. Insbesondere Stellratengrenzen stellen relevante Nichtlinearitäten auch bei Systemen dar, die unterhalb der Stellratengrenzen ein LTI Verhalten zeigen. Des Weiteren entsteht durch die Kommunikationslatenz zwischen der FTR und der nachgelagerten Aktorik eine Totzeit, die sich als Allpass mit konstanter Gruppenlaufzeit im System auswirkt.

Es wird weiterhin gefordert, dass die Vorsteuerung garantiert stabil ist. In der praktischen Anwendung ist die Systemdynamik der Aktorik nicht immer mit hoher Genauigkeit bekannt, weiterhin kann sich diese während des Betriebs bspw. durch eine Arbeitspunktabhängigkeit und Alterungseffekte ändern. Eine interne Rückkopplung innerhalb der Vorsteuerungsarchitektur birgt somit die Gefahr, dass bei der Umsetzung des transienten Fahrzeugverhaltens Stabilitätsprobleme auftreten, was zu verhindern ist.

Zusammenfassend ergeben sich die in Tabelle 5-1 dargestellten Anforderungen an die prädiktive Vorsteuerung innerhalb der FTR.

Tabelle 5-1: Teilfunktionsspezifische Anforderungen für die prädiktive Vorsteuerungsarchitektur der FTR in einer gekapselten Systemarchitektur.

<b>Anforderung</b>	<b>Beschreibung</b>
A3.1	Die FTR muss den negativen Einfluss der losen Kopplung mit der TP auf die Reglerperformance unterbinden (abweichende Berechnungsfrequenzen, Latenzen, Jitter und Asynchronität).
A3.2	Die FTR darf nur geringe Echtzeitanforderungen an die TP stellen <sup>182</sup> und keine zeitliche Synchronisierung mit der TP erfordern.
A3.3	Die Umsetzung des transienten Fahrzeugverhaltens muss im offenen Regelkreis der FTR (Vorsteuerung) erfolgen.
A3.4	Die FTR muss die aus der Systemdynamik der Aktorik resultierende Regelabweichung minimieren.
A3.5	Die FTR muss an die Systemdynamik unterschiedlicher Aktoren (z. B. Antriebs- oder Lenkatorik) angepasst werden können.
A3.6	Der Algorithmus der FTR muss für lineare und ausgewählte nichtlineare Systemdynamiken geeignet sein.
A3.7	Die Vorsteuerung muss garantiert stabil sein.
A3.8	Die FTR muss Stellratenbegrenzungen der Aktorik berücksichtigen.
A3.9	Sprünge in der Soll-Trajektorie dürfen nicht zu inakzeptablen Regelabweichungen durch eine zeitliche Verschmierung der Systemantwort führen.
A3.10	Die FTR muss das Abtasttheorem nach Nyquist-Shannon bei der Rekonstruktion von Informationen aus der diskreten Soll-Trajektorie berücksichtigen.

<sup>182</sup>Ein Überschreiten der zeitlichen Länge der innerhalb der FTR verfügbaren Soll-Trajektorie stellt gemäß Anhang A.1 eine funktionale Systemgrenze dar. Die Länge der Soll-Trajektorie muss daher so gewählt werden, dass eine Überschreitung bereits aus Gründen der Gebrauchssicherheit (Safety) ausgeschlossen werden kann (z. B. durch einen Wechsel des Fahrzeug-Betriebsmodus).

## 5.2 Konzeptentwicklung

Die abgeleiteten Anforderungen definieren die Ziele und den Lösungsraum für die Vorsteuerungsarchitektur. Aus Anforderung A3.3 resultiert unmittelbar die Notwendigkeit, dass die FTR das transiente Soll-Fahrzeugverhalten mit Hilfe einer Vorsteuerung im offenen Regelkreis umsetzt. Die Kombination einer unabhängigen Vorsteuerung mit einer separaten Zustandsrückführung ist in der Literatur als Zwei-Freiheitsgrade-Struktur bekannt und bereits vielfältig erprobt<sup>183</sup>. In einer solchen Architektur berechnet die Vorsteuerung die Stellgrößen für die verschiedenen Aktoren ausschließlich auf der Grundlage der Sollgrößen innerhalb der Soll-Trajektorie (ohne interne Rückkopplung). Durch die lose Kopplung von TP und FTR (Anforderung A3.1) und die gering ausgeprägte Echtzeitfähigkeit der TP (Anforderung A3.2) kann jedoch keine auf die Kompensation der Systemdynamik optimierte Sollwertberechnung durch die TP erfolgen, d. h. die Kompensation der Verzugszeiten muss ausschließlich durch die ausführende Ebene (FTR) erfolgen.

Grundlage für diese Kompensation ist die Planung einer Trajektorie mit signifikant größerer zeitlicher Länge als die Zykluszeit der TP. Des Weiteren ist die Zeitstempelung mit einer absoluten Zeitreferenz erforderlich. Beide Maßnahmen ermöglichen die Entkopplung der in der Trajektorie enthaltenen Sollgrößen (und damit der FTR) von Latenzen und Jitter der TP und innerhalb des Netzwerks. Die resultierende  $j$ -te Soll-Trajektorie  ${}_N\mathcal{T}_j$ , bestehend aus  $n_{\text{traj}}$  zeitgestempelten Sollwerten (Index  $i$ ) für die Pose  ${}_N\mathcal{P}_{j,i}$  des Fahrzeugs (horizontale Position + Gierwinkel) und deren ersten beiden zeitlichen Ableitungen, wurde bereits in Gleichung 4-1 definiert.

Gesucht ist nun im  $k$ -ten Zyklus der FTR die Abbildung  $T_k$ :

$$T_k: (\mathcal{P}_{j,i}, \dot{\mathcal{P}}_{j,i}, \ddot{\mathcal{P}}_{j,i})_{i=1..n_{\text{traj}}} \rightarrow \mathcal{P}_{\text{ff},k}, \dot{\mathcal{P}}_{\text{ff},k}, \ddot{\mathcal{P}}_{\text{ff},k} \quad (5-1)$$

mit  $\mathcal{P}_{j,i}, \dot{\mathcal{P}}_{j,i}, \ddot{\mathcal{P}}_{j,i}, \mathcal{P}_{\text{ff},k}, \dot{\mathcal{P}}_{\text{ff},k}, \ddot{\mathcal{P}}_{\text{ff},k} \in \mathbb{R}^3$

mit dem Ziel der Minimierung der Abweichung zwischen Soll- und Ist-Beschleunigungen des Fahrzeugs. Der Ausgang der Vorsteuerung  $\mathcal{P}_{\text{ff},k}, \dot{\mathcal{P}}_{\text{ff},k}$  und  $\ddot{\mathcal{P}}_{\text{ff},k}$  beschreibt die um die Systemdynamik adaptierten Soll-Posen, Soll-Geschwindigkeiten und Soll-Beschleunigungen für alle drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs und dient als Grundlage der Berechnung der Aktor-Stellgrößen.

In Abbildung 5-1 ist der Prozess beispielhaft visualisiert. Der rot markierte Abschnitt der Soll-Trajektorie stellt die bei der Berechnung von  $\mathcal{P}_{\text{ff},k}, \dot{\mathcal{P}}_{\text{ff},k}$  und  $\ddot{\mathcal{P}}_{\text{ff},k}$  verwendeten Anteile der Soll-Pose  $\mathcal{P}_{j,i}$ , Soll-Geschwindigkeit  $\dot{\mathcal{P}}_{j,i}$  bzw. der Soll-Beschleunigung  $\ddot{\mathcal{P}}_{j,i}$  dar. Dabei ist sowohl eine Interpolation zwischen den Aufpunkten der Trajektorie als auch eine Gewichtung der verschiedenen Anteile möglich.

<sup>183</sup>Rathgeber, C.: Trajektorienplanung und -folgeregelung (2016), S. 21.

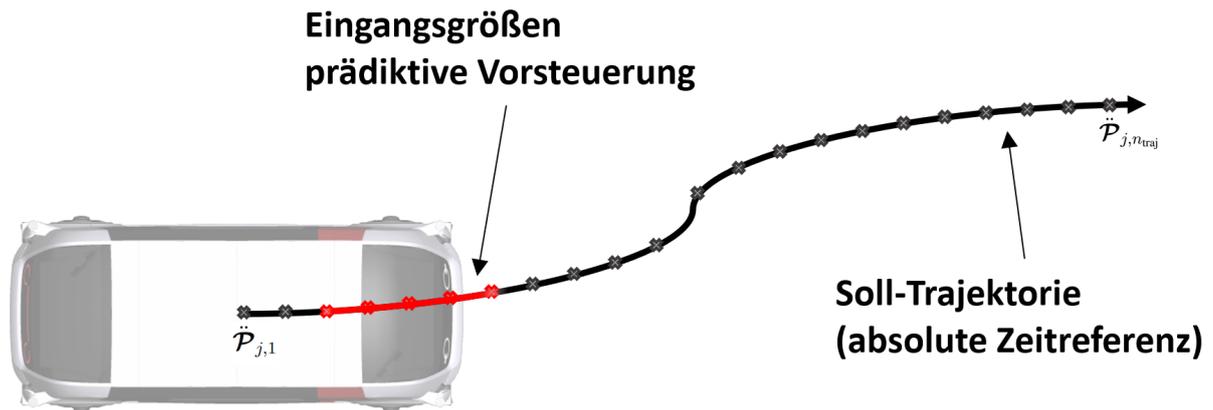


Abbildung 5-1: Soll-Trajektorie mit beispielhaften, für die prädiktive Vorsteuerung genutzten, zukünftigen Systemzuständen.

### 5.2.1 Vorverarbeitung

Bevor die Vorsteuerung technisch ausgestaltet und ausgelegt werden kann, sind mehrere Schritte im Rahmen einer Vorverarbeitung der Soll-Trajektorie erforderlich.

#### Rekonstruktion der Soll-Trajektorie

Die Soll-Trajektorie wird der FTR in diskretisierter Form übergeben, indem die berechnete kontinuierliche Trajektorie vor dem Versenden in der TP mit der Frequenz  $f_{\text{traj}} = (t_{j,i+1} - t_{j,i})^{-1}$  abgetastet wird. Um die notwendigen Eingangsgößen für die FTR zu erzeugen, ist eine Rekonstruktion der Soll-Trajektorie aus den abgetasteten Werten erforderlich. Aufgrund des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems können nur Frequenzkomponenten bis zu  $f_{\text{grenz}} = \frac{f_{\text{traj}}}{2}$  rekonstruiert werden (Anforderung A3.10). Es ist daher erforderlich, dass die TP Trajektorien plant, die nur Frequenzkomponenten bis zu dieser Grenze enthalten, andernfalls muss die Trajektorie mit einer höheren Frequenz abgetastet und bereitgestellt werden. Die eigentliche Rekonstruktion erfolgt durch eine Interpolation der Werte zwischen den diskreten Aufpunkten. In der Literatur sind verschiedene Verfahren zur Interpolation mit jeweils spezifischen Stärken und Schwächen bekannt. Im Rahmen dieser Arbeit werden für die Rekonstruktion der Soll-Trajektorie sog. Akima Splines verwendet. Diese bieten den Vorteil, unerwünschte Schwingungen zwischen den Aufpunkten zu unterbinden<sup>184</sup> und weisen außerhalb der Randbereiche<sup>185</sup> einen Interpolationsfehler der Ordnung  $\mathcal{O}(b^2)$  (Schrittweite  $b$ ) auf<sup>186</sup>. Die Trajektorienrekonstruktion ist jedoch eine eigenständige Teilfunktion und kann daher applikationsspezifisch angepasst werden.

<sup>184</sup>Fried, J.; Zietz, S.: Curve fitting by spline and akima methods (1973), S. 552.

<sup>185</sup>Zur Vermeidung unerwünschter Interpolationsfehler aufgrund nicht vorhandener Ableitungen in den Randpunkten der Trajektorie kann die Soll-Trajektorie, falls verfügbar, um 2 Elemente der vorherigen Trajektorie erweitert werden. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass der Akima Spline am Anfang der Trajektorie stets außerhalb des Randbereichs mit erhöhtem Interpolationsfehler ausgewertet wird.

<sup>186</sup>ALGLIB: Spline interpolation and fitting - Akima spline (2022).

## Trennung der Trajektorienanteile

Anforderung A3.5 fordert die Anpassbarkeit der Vorsteuerung an unterschiedliche Aktor-Systemdynamiken. Dies ist nicht nur bei der Applikation auf verschiedene Fahrzeuge erforderlich, sondern resultiert bereits aus der Tatsache, dass innerhalb eines Fahrzeugs für gewöhnlich verschiedene Aktortypen zum Einsatz kommen. Um die Vorsteuerung auf die verschiedenen Aktoren anpassen zu können, ist es erforderlich, dass die Soll-Trajektorie in disjunkte Anteile für die einzelnen Aktoren (z. B. Lenkung, Antrieb und Bremse) dekomponiert wird. Um diese Treiber für die jeweilige Aktoraktivität zu identifizieren, ist eine Kenntnis der nachgelagerten Stellgrößenberechnung erforderlich, da diese bestimmt, welcher Aktor durch einen bestimmten Anteil der Soll-Trajektorie stimuliert wird. Die hier verfolgte Trennung erfolgt durch eine Transformation der Trajektorieninhalte in ein Frenet-Koordinatensystem, basierend auf dem geplanten Soll-Kurswinkel (vgl. Abbildung 2-4).

Das Frenet-System ermöglicht eine Trennung von Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs, unabhängig vom derzeitigen Schwimmwinkel<sup>187</sup>. Die Längsbeschleunigung wird bei kinematischer Betrachtung von den elektrischen Antriebs- und Reibbremsaktoren erzeugt, die Quereschleunigung, der Kurswinkel und die Gierrate ergeben sich aus der Aktivität der Lenkaktoren. Somit ist die Grundlage für die folgende Anwendung einer prädiktiven Vorsteuerung und die Erfüllung von Anforderung A3.5 gelegt. Die Parametrisierung der Vorausschau für alle 3 Freiheitsgrade kann unabhängig erfolgen, so dass sie auf die entsprechende Aktorik bzw. Systemdynamik angepasst werden kann.

Betz et al. haben für die Anwendung eines mobilen, reifengebundenen Fahrsimulators gezeigt, dass der Reibwertbedarf für die Gieraktivität während einer innerstädtischen Fahrt etwa eine Größenordnung unterhalb des Bedarfs für die translatorische Bewegung liegt<sup>188</sup>. Da der Reibwertbedarf unmittelbar mit der Aktoraktivität korrespondiert, wird auf Grundlage dieser Abschätzung für die prädiktive Vorsteuerung auf eine separate Betrachtung der Gierbeschleunigung innerhalb der Soll-Trajektorie verzichtet und nur die translatorische Beschleunigung aus der Soll-Trajektorie isoliert.

Weiterhin wird für die prädiktive Vorsteuerung vereinfachend angenommen, dass die Längsbeschleunigung auch im Falle einer Verzögerung ausschließlich durch Rekuperation von der elektrischen Antriebsaktorik und nicht durch die Reibbremse aufgebracht wird. Diese Annahme ist mit dem möglichen Betriebsbereich moderner elektrischer Radnabenantriebe begründet. Durch einen kurzzeitigen Überlastbetrieb können hohe Momente pro Rad erzeugt werden<sup>189</sup>, die den

---

<sup>187</sup>Während bei konventionellen, vorderachsgelenkten Fahrzeugen außerhalb von fahrdynamischen Grenzsituationen i. d. R. nur kleine Schwimmwinkel auftreten, können bei der Verwendung von Einzelradaktorik stabile Fahrten mit konstant hohen Schwimmwinkeln durchgeführt werden.

<sup>188</sup>Betz, A. et al.: Motion analysis of a wheeled mobile driving simulator (2012), S. 129.

<sup>189</sup>Kraus, M. et al.: A solution for future urban mobility (2020), S. 52.

Betriebsbereich autonomer Fahrzeuge im innerstädtischen Bereich zu großen Teilen abdecken<sup>190</sup>. Eine höhere Verzögerung ist in der betrachteten Fahrzeugklasse nur in Notsituationen zu erwarten. Aufgrund der niedrigeren Verzugszeiten moderner Reibbremssysteme<sup>191</sup> im Vergleich zu elektrischen Antrieben wird in einem solchen Fall schneller ein Bremsmoment aufgebaut, als von der auf Basis der elektrischen Maschine parametrisierten prädiktiven Vorsteuerung erwartet wird. Dies führt zu einem früheren Verzögern, was jedoch in Notsituationen mit hohen Verzögerungsanforderungen zur Kollisionsvermeidung als unkritisch zu bewerten ist. Aus der vereinfachten Betrachtung ohne Berücksichtigung der Reibbremse wird somit kein negativer Einfluss erwartet<sup>192</sup>.

Zusammengefasst müssen die in Tabelle 5-2 dargestellten Größen aus der Soll-Trajektorie extrahiert werden, um die prädiktive Vorsteuerung aktorspezifisch auszulegen.  $\psi_{c,set}$ ,  $\dot{\psi}_{set}$  und  $a_{set,n}$  führen zu einer Aktivität der Lenkatorik, somit wird die Vorausschau mit der Systemdynamik der Lenkung parametrisiert<sup>193</sup>. Die Längsbeschleunigung  $a_{set,s}$  wird vom Antriebsaktor erzeugt und die Vorausschau entsprechend dieser Systemdynamik ausgelegt. Es sei angemerkt, dass das hier präsentierte Vorgehen auf der Annahme identischer Aktorik an den einzelnen Rädern aufbaut. Sollte ein Fahrzeugkonzept signifikante Unterschiede hinsichtlich der Aktorik der Räder aufweisen, ist zunächst eine Zerlegung der Soll-Trajektorie auf radspezifische Sollgrößen erforderlich, bevor die isolierten Größen innerhalb der Vorsteuerung verwendet werden können. Ein solches Vorgehen ist ebenfalls erforderlich, falls ein *Wenden auf der Stelle* durchgeführt werden soll, da die dazu notwendige Aktivität der Antriebsaktorik nicht aus der Längsbeschleunigung des Fahrzeugmittelpunkts extrahiert werden kann. Dieser Sonderfall wird an dieser Stelle jedoch nicht weiter betrachtet.

Tabelle 5-2: Relevante Größen aus der Soll-Trajektorie zur Berechnung der Aktoraktivität.

Betrachtete Größe	Resultierende Aktoraktivität	Erklärung
$\psi_{c,set}$	Lenkatorik	Bestandteil der Radaufstandspunktgeschwindigkeit als Grundlage des Soll-Lenk winkels
$\dot{\psi}_{set}$		
$a_{set,n}$		Additiver Bestandteil des Soll-Lenk winkels
$a_{set,s}$	Antriebsaktorik	Grundlage des Soll-Radmoments

<sup>190</sup>Die realisierbare Verzögerung hängt von der Gesamtmasse des Fahrzeugs und der konkreten Aktorik ab. Bei dem stellvertretend angeführten Schaeffler Mover ist außerhalb des Feldschwächebereichs eine Verzögerung von über  $4 \frac{m}{s^2}$  möglich<sup>189</sup>.

<sup>191</sup>Feigel, H.-J.: MK C1 - Eine neue Generation integrierter Bremssysteme (2012), S. 83.

<sup>192</sup>Falls das hier präsentierte Konzept für ein Fahrzeug mit langsamerem Bremssystem im Vergleich zur Antriebsaktorik angewendet werden soll, ist eine separate Betrachtung der Systemdynamik der Bremsaktorik zur Vermeidung negativer Effekte hingegen angeraten.

<sup>193</sup>Der Soll-Kurswinkel  $\psi_{c,set}$  wird durch eine Polartransformation der kartesischen Soll-Geschwindigkeiten in  $\dot{P}_{j,i}$  aus Gleichung 5-1 berechnet.

## 5.2.2 Konzeptauswahl

Nachdem die Soll-Trajektorie rekonstruiert und die Treiber für die spezifische Aktoraktivität isoliert wurden, muss zum Erhalt einer vollständigen Vorsteuerung die Abbildung  $T_k$  entwickelt werden. In Abschnitt 2 wurden die Grundlagen digitaler Filter und speziell der beiden Kategorien der FIR und IIR Filter vorgestellt. Digitale Filter bieten eine Möglichkeit, Eingangssignale zu manipulieren und eine (nicht-)kausale Systemdynamik einzuführen. Auf Basis dieser Konzepte können verschiedene Lösungsvarianten für die prädiktive Vorsteuerung generiert werden. Grundlage für alle betrachteten Konzepte sind die Berechnungsvorschriften aus Gleichung 5-2 und 5-3. Durch die Verwendung der interpolierten Elemente der Soll-Trajektorie  $\dot{\mathcal{P}}_{j,o}$  bzw.  $\ddot{\mathcal{P}}_{j,o}$  als Eingangssignal können die Soll-Geschwindigkeiten und -Beschleunigungen für die Berechnung der Stellgrößen durch eine Faltung mit den noch nicht weiter definierten Filterkoeffizienten  $\theta_{v,o}$  und  $\theta_{a,o}$  bestimmt werden:

$$\dot{\mathcal{P}}_{\text{ff},k} = \sum_{o=n_{\text{ff},\text{min}}}^{n_{\text{ff},\text{max}}} \theta_{v,o} \cdot \dot{\mathcal{P}}_{j,o} \quad (5-2)$$

$$\ddot{\mathcal{P}}_{\text{ff},k} = \sum_{o=n_{\text{ff},\text{min}}}^{n_{\text{ff},\text{max}}} \theta_{a,o} \cdot \ddot{\mathcal{P}}_{j,o} \quad (5-3)$$

Dabei ist  $k$  der Zyklus der FTR,  $j$  die aktuell gültige Soll-Trajektorie und  $o$  die Laufvariable für die Faltung der interpolierten Trajektorienelemente mit der Frequenz  $f_{\text{FIR}}$ .  $\theta_{v,o}$  und  $\theta_{a,o}$  sind dabei 3x3 Diagonalmatrizen mit den Filterkoeffizienten für die jeweilige Sollgröße aus Tabelle 5-2 auf der Hauptdiagonalen. Durch die Wahl der in den Gleichungen 5-2 und 5-3 enthaltenen Parameter  $n_{\text{ff},\text{min}}$ ,  $n_{\text{ff},\text{max}}$ ,  $\theta_{v,o}$  und  $\theta_{a,o}$  lassen sich verschiedene Konzepte für die prädiktive Vorsteuerung ableiten.

Wird die obere Schranke ( $n_{\text{ff},\text{max}}$ ) auf unendlich gesetzt, beschreiben die Gleichungen 5-2 und 5-3 ein IIR-Filter<sup>194</sup>. Endet die Summe bei einer endlichen Zahl, erhält man ein FIR-Filter. Als Sonderfall eines FIR-Filters kann sowohl eine Vorsteuerung ohne Vorausschau als auch die Vorausschau eines einzelnen Wertes auf der Soll-Trajektorie realisiert werden. In beiden Fällen gilt  $n_{\text{ff},\text{min}} = n_{\text{ff},\text{max}} = 1$ . Die Eingangsgrößen  $\dot{\mathcal{P}}_{j,1}$  bzw.  $\ddot{\mathcal{P}}_{j,1}$  beschreiben dann wahlweise den Sollwert für den aktuellen bzw. einen einzelnen zukünftigen Zeitpunkt.

Gemäß Anforderung A3.4 ist die Regelabweichung bei der Umsetzung des transienten Verhaltens innerhalb der Soll-Trajektorie zu minimieren. Vor diesem Hintergrund ist die Verwendung eines einzelnen Elements der Soll-Trajektorie nicht zielführend. Werden nur Sollgrößen für den aktuellen Zeitpunkt verwendet, findet keine Vorausschau und somit auch keinerlei Kompensation von Systemdynamiken und Totzeiten statt. Durch die Verwendung eines einzelnen zukünftigen Elements der Soll-Trajektorie können Totzeiten (entsprechende Kenntnis vorausgesetzt) vollständig

<sup>194</sup>Für die Nutzung rekursiver IIR-Filter wäre somit eine unendlich lange Soll-Trajektorie erforderlich.

kompensiert werden, jedoch findet keine optimale Kompensation der spezifischen Systemdynamik der Aktoren statt. Dies sei am Beispiel der Reaktion eines PT1-Systems mit der Zeitkonstante  $\tau_{PT1} = 0,2 \text{ s}$  auf einen Einheitssprung innerhalb der Soll-Trajektorie verdeutlicht. Durch eine Vorausschau von  $t_{ff} = \tau_{PT1}$  auf der Soll-Trajektorie wird die bestmögliche Kompensation für eine Vorausschau eines einzelnen Elements erzielt (siehe Abbildung 5-2). Das Integral zwischen Soll-Beschleunigung und Systemreaktion mit Vorausschau verschwindet ( $\int_{-\infty}^{\infty} \ddot{\mathbf{P}}_{j,set} - \ddot{\mathbf{P}}_{act} dt = 0$ ), da sich positive und negative Regelabweichungen aufheben. Dies ist gleichbedeutend mit einem Erreichen der korrekten Soll-Geschwindigkeit durch die Vorsteuerung basierend auf der Soll-Beschleunigung.

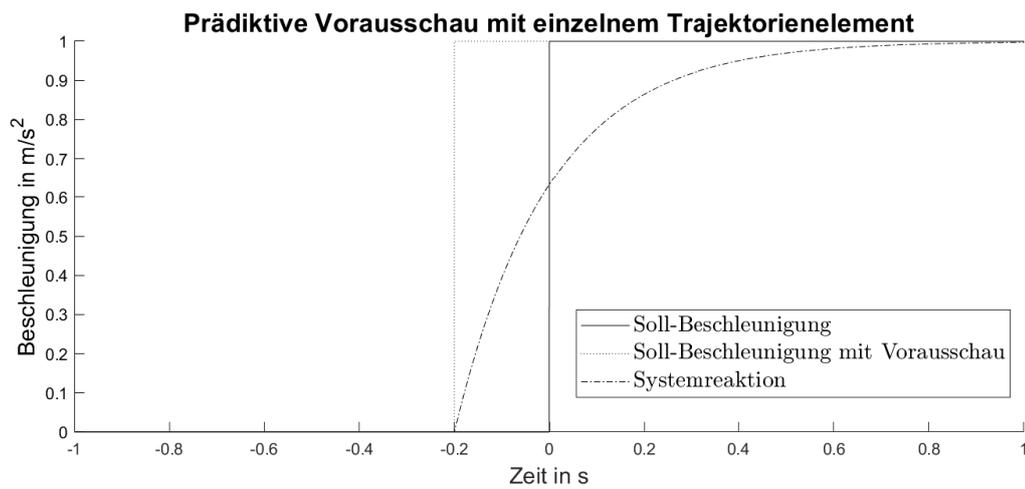


Abbildung 5-2: Prädiktive Vorsteuerung auf Basis eines einzelnen zukünftigen Sollwerts für die Soll-Beschleunigung des Fahrzeugs in der Soll-Trajektorie. Durch eine frühzeitige Anforderung der Soll-Beschleunigung (gepunktete Linie) wird eine Systemreaktion ohne Geschwindigkeitsfehler nach Erreichen des stationären Zustands erzielt. Der Aktor ist als lineares PT1-Glied mit der Zeitkonstante  $\tau_{PT1} = 0,2 \text{ s}$  modelliert.

Während die prädiktive Vorsteuerung mit einem einzelnen Element also aufgrund des verschwindenden Fehlerintegrals im stationären Zustand bereits eine Verbesserung gegenüber einer Vorsteuerung ohne Vorausschau darstellt, ist sie dennoch keine optimale Lösung. Einerseits ist die Systemreaktion auf den Sollwertsprung asymmetrisch, was zu unterschiedlichen Zeiträumen für eine Kompensation der positiven und negativen Regelabweichung durch die parallele Zustandsrückführung führt. Weiterhin führt die Unstetigkeit zum Zeitpunkt  $t = -0,2 \text{ s}$  zu einer hohen erforderlichen Stellrate (siehe Abbildung 5-3), was die Einhaltung von Anforderung A3.8 signifikant erschwert. Bekannte Totzeiten  $t_{T1}$  können durch eine Erhöhung der Vorausschau um diese Totzeit ( $t_{ff} = \tau_{PT1} + t_{T1}$ ) hingegen vollständig kompensiert werden.

Zur weiteren Optimierung der prädiktiven Vorsteuerung im Sinne einer Reduktion der notwendigen Stellrate sowie einer möglichst symmetrischen Systemreaktion verbleiben somit die beiden Konzepte der IIR-Filter und der FIR-Filter mit mehreren Elementen als mögliche Lösungen. IIR-Filter können als rekursive Filter nicht für eine Prädiktion mit zukünftigen Systemzuständen verwendet werden und bieten prinzipbedingt keine garantierte Stabilität, da sie über interne Rückkopplungen und somit über Polstellen außerhalb des Ursprungs der z-Ebene verfügen. Dies stellt

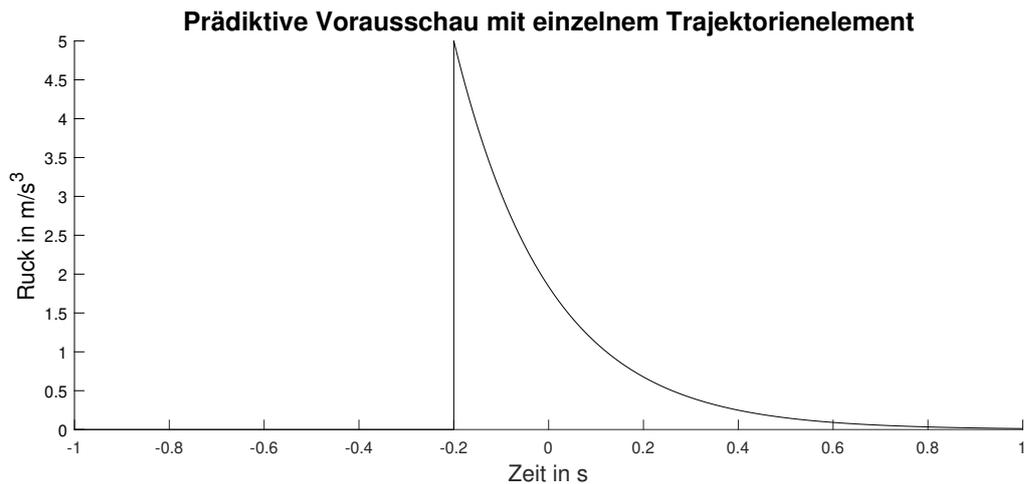


Abbildung 5-3: Erforderlicher Ruck bzw. Stellrate für die in Abbildung 5-2 dargestellte Systemreaktion. Die Unstetigkeit zum Zeitpunkt  $t = -0,2$  s erzeugt eine Überhöhung der Stellrate, was eine in praktischer Anwendung nicht aufzulösende Herausforderung für den beteiligten Aktor darstellt.

einen Verstoß gegen Anforderung A3.7 dar, weshalb IIR-Filter als mögliche Lösung verworfen werden.

FIR-Filter sind garantiert stabil, da sie ausschließlich über Pole im Ursprung der z-Ebene verfügen und somit keine internen Rückkopplungen bzw. Speicher im System aufweisen. Sie stellen daher das einzige Konzept für eine prädiktive Vorsteuerungsarchitektur dar, das gegen keine der Anforderungen aus Tabelle 5-1 verstößt und zudem Potential für eine Verbesserung gegenüber der in Abbildung 5-2 dargestellten Vorsteuerung mit nur einem einzelnen Vorausschaelement verspricht<sup>195</sup>.

### 5.2.3 Filterentwurf und -auslegung

Nach der Entscheidung für eine FIR-Filterarchitektur als Kern der prädiktiven Vorsteuerung ist es erforderlich, die Filter entsprechend der verfolgten Ziele auszulegen und zu parametrisieren. In der Literatur existieren verschiedene Ansätze zur Ermittlung der FIR-Filterkoeffizienten  $\theta_{v,o}$  bzw.  $\theta_{a,o}$ .

#### Parametrisierung

Baggen et al. nutzen einen datenbasierten Ansatz zur Parametrisierung der FIR-Filter einer prädiktiven Vorsteuerung<sup>196</sup>. Für den Anwendungsfall dieser Arbeit ist dabei die Trennung verschiedener Einflussgrößen als problematisch zu bewerten. Mit der prädiktiven Vorsteuerung für die gekapselte FTR soll vornehmlich der Einfluss der Aktorträgheit kompensiert werden. In aus Realfahrten

<sup>195</sup>Die Vorausschau eines einzelnen Elements der Soll-Trajektorie stellt gemäß den Definitionen aus Gleichung 5-2 und 5-3 bereits den einfachsten möglichen FIR-Filter mit nur einem Element ( $n_{ff,min} = n_{ff,max} = 1$ ) und dem Koeffizienten  $\theta_{v|a,1} = \text{diag}(1, 1, 1)$  dar.

<sup>196</sup>Baggen, M. et al.: Data-based feed-forward control in MIMO motion systems (2008).

erhaltenen Messdaten der Beschleunigung ist dabei von einer Vielzahl verschiedener Einflussgrößen auszugehen, was zu einer Fehlparametrisierung der Filter führen kann. Der datenbasierte Ansatz über eine Optimierung wird daher nicht weiter verfolgt. Ebenfalls ausgeschlossen werden Ansätze, die auf eine angenommene Übertragungsfunktion der Aktorik angewiesen sind, da die Ermittlung einer solchen Modellgleichung in der Praxis mit signifikanten Unsicherheiten behaftet ist.

Falls der reale Verlauf der Aktor-Stellgröße (Moment bzw. Lenkwinkel) bekannt ist, können FIR-Filter über die abgetastete Impulsantwort der Aktorik parametrisiert werden. Dieser Ansatz ist in der Literatur als Fenstermethode bekannt<sup>197</sup> und bietet die Möglichkeit, ohne Annahmen über die zugrundeliegende Systemdynamik und ohne komplexe Optimierungen ein auf die jeweilige Aktorträgheit angepasstes FIR-Filter zu erhalten. Wird das so erhaltene FIR-Filter gespiegelt und zeitlich verschoben, kann das in Abbildung 5-4 dargestellte nichtkausale Verhalten als Reaktion auf einen Anregungsimpuls zum Zeitpunkt  $t = 0$  realisiert werden.

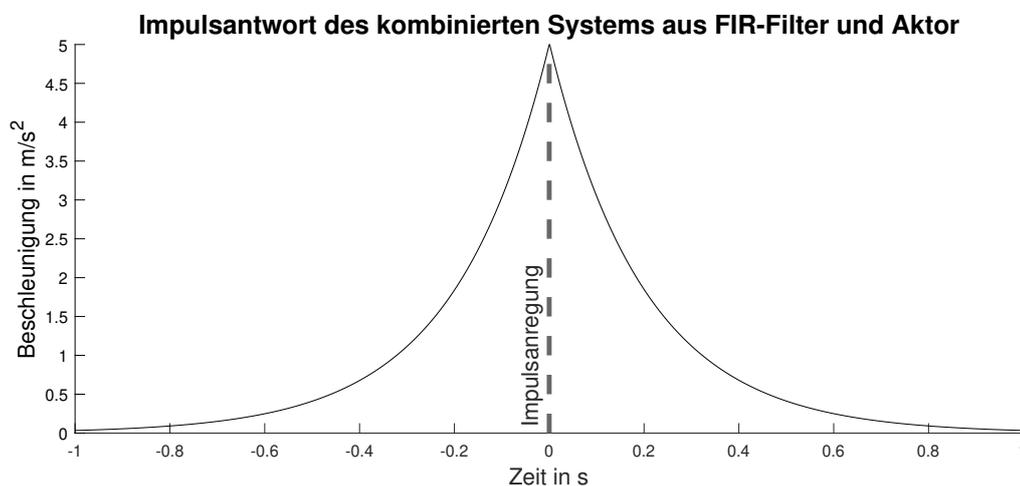


Abbildung 5-4: Beispielhafte Impulsantwort des kombinierten Systems aus dem PT1 Aktor in Abbildung 5-2 und einer prädiktiven Vorsteuerung auf Basis der gespiegelten Aktor-Systemdynamik.

Die Verwendung der gespiegelten Aktor-Impulsantwort als Grundlage für die Parametrisierung der FIR-Filter minimiert die erforderliche Aktor-Stellrate und die resultierende Regelabweichung durch die Aktor-Systemdynamik. Durch die Reihenschaltung von FIR-Filter und Aktor kommt es zu einer symmetrischen kombinierten Systemreaktion. Abbildung 5-5 veranschaulicht diesen Sachverhalt: Der bereits bekannte Einheitssprung der Soll-Beschleunigung innerhalb der Soll-Trajektorie führt zu der gestrichelten Aktorreaktion (modelliert als lineares PT1-System mit zusätzlicher Stellratenbegrenzung), wenn keine Vorausschau verwendet wird. Durch die Verwendung der gespiegelten Systemdynamik zur Parametrisierung von  $\theta_{a,o}$  in Gleichung 5-3 wird die dargestellte symmetrische Reaktion erreicht, die durch die durchgezogene Linie dargestellt ist. Zwar treten auch in diesem Fall Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Beschleunigung auf, die aufgrund der bereits diskutierten charakteristischen Nichtlinearitäten durch die Stellratenbe-

<sup>197</sup>Meyer, M.: Signalverarbeitung (2021), S. 293.

grenzung der Aktorik nicht durch eine Anhebung der Sollwertamplitude mittels entsprechend hoher Werte der Filterkoeffizienten  $\theta_{v,o}$  bzw.  $\theta_{a,o}$  unterdrückt werden können (Anforderung A3.8)<sup>198</sup>. Jedoch heben sich die integrierten positiven und negativen Abweichungen gegenseitig auf ( $\int_{-\infty}^{\infty} \ddot{\mathcal{P}}_{j,set} - \ddot{\mathcal{P}}_{act} dt = 0$ ) und die kombinierte Reaktion hat keine effektive Gruppenlaufzeit. Diesen Vorteilen steht jedoch eine zeitliche Verschmierung der Systemreaktion gegenüber, da sich die Gesamtreaktionszeit im Vergleich zu einem System ohne Vorausschau verdoppelt. Die notwendige Stellrate ist bei Verwendung der prädiktiven Vorsteuerung mit gespiegelter Impulsantwort nur halb so hoch wie bei einem Verzicht auf die Vorausschau.

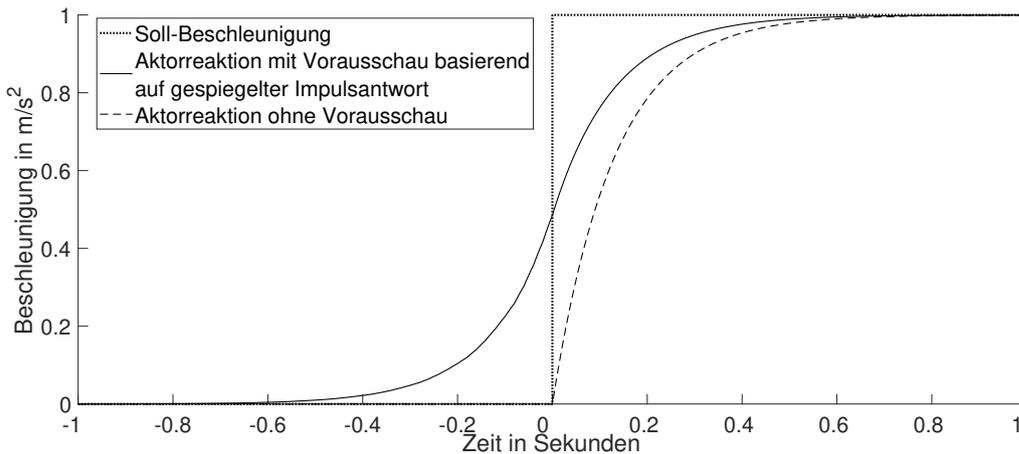


Abbildung 5-5: Beispielhafte Reaktion des Stellantriebs auf einen Einheitssprung (gepunktete Linie) der Soll-Beschleunigung mit (durchgezogene Linie) und ohne (gestrichelte Linie) prädiktive Vorsteuerung auf Basis der gespiegelten Aktor-Systemdynamik.

Um das in Abbildung 5-5 gezeigte Verhalten für verschiedene Aktordynamiken zu erreichen, wird die Impulsantwort der Aktoren für ihre jeweilige Stellgröße gemessen und mit der Frequenz  $f_{FIR}$  abgetastet, wobei erneut das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem zu berücksichtigen ist. Die Abtastwerte werden dann normiert und in umgekehrter Reihenfolge als Filterkoeffizienten verwendet.

Um die zeitliche Verschmierung der Impulsantwort in Abbildung 5-4 zu reduzieren, ist als Erweiterung der vorgestellten Fenstermethode eine gezielte Modifikation der kombinierten Systemreaktion aus Filter und Aktor durch eine zusätzliche Fensterfunktion zur Vergrößerung der Steilheit möglich. Die Ermittlung dieser Funktion basiert auf der Annahme, dass das kombinierte System als ideale Impulsantwort einen Delta-Peak und somit eine effektive Gruppenlaufzeit von null für alle Anregungsfrequenzen zeigen sollte<sup>200</sup>. Durch die Multiplikation mit einer Fensterfunktion

<sup>198</sup>Dies entspricht der erhaltenen Lösung bei der Verwendung des optimierungsbasierten Ansatzes von Strohm und Lehman<sup>199</sup>, wenn keine Nebenbedingungen zur Stellratenbegrenzung eingeführt werden. Die optimierte Lösung geht dabei bei einer hohen Gewichtung der Stellratenbegrenzungen in die gespiegelte Impulsantwort der Fenstermethode über.

<sup>199</sup>Strohm, J. N.; Lohmann, B.: Vorausschauende Störgrößenaufschaltung am Viertelfahrzeug (2017), S. 598.

<sup>200</sup>Dies entspricht dem idealen Verhalten der gesamten FTR innerhalb der in dieser Arbeit betrachteten Systemarchitektur.

zur Anhebung hoher Frequenzanteile kann die Breite der kombinierten Impulsantwort reduziert und somit das Verhalten einem idealen Delta-Peak angenähert werden. Die reduzierte Breite der Impulsantwort reduziert zudem die erforderliche Vorausschauweite und die Sensitivität gegenüber Modellfehlern. Jedoch erhöht die Fensterfunktion den Stellratenbedarf, da die Bandbreite des Systems vergrößert wird, und kann unerwünschte Oszillationen erzeugen.

Die Optimierung der Impulsantwort verbessert somit das Systemverhalten gegenüber der originalen Impulsantwort unter der Annahme, dass keine Stellgrößenbegrenzungen der Aktorik erreicht werden. Da die Verwendung der gespiegelten Impulsantwort ohne zusätzliche Optimierung jedoch bereits eine effektive Gruppenlaufzeit von null besitzt, machen sich Unterschiede nur bei höheren Frequenzen aufgrund der absinkenden Amplitude bemerkbar. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit auf eine zusätzliche Optimierung verzichtet und für die weiteren Betrachtungen auf die gespiegelte Impulsantwort der Aktorik als Grundlage für die Parametrisierung der FIR-Filter innerhalb der prädiktiven Vorsteuerung zurückgegriffen.

### Approximation der IIR als FIR-Filter

Die Impulsantwort eines stabilen dynamischen Systems klingt über der Zeit asymptotisch ab<sup>201</sup>. Die Beiträge zeitlich weiter entfernter Bestandteile zur gesamten Impulsantwort werden somit zunehmend kleiner, was jedoch nicht mit einem vollständigen Verschwinden gleichzusetzen ist. Zur vollständigen Beschreibung des Systems wird somit ein IIR-Filter benötigt. Da aufgrund der bereits diskutierten fehlenden Stabilitätsgarantie IIR-Filter jedoch gegen Anforderung A3.7 verstoßen und des Weiteren zur Umsetzung eines solchen Filters für die prädiktive Vorsteuerung eine unendlich lange Soll-Trajektorie erforderlich wäre, ist eine Umwandlung der abgetasteten IIR in ein FIR-Filter erforderlich. Digitale FIR-Filter besitzen keinen rückgekoppelten Speicher, was zu einem einzigen Pol im Ursprung der z-Ebene führt und sind daher garantiert stabil. Zu diesem Zweck muss die diskrete IIR auf eine endliche Anzahl von Elementen beschränkt werden, ohne dass durch diese Vereinfachung inakzeptable Fehler entstehen. Um dies zu gewährleisten, müssen zwei wesentliche Erhaltungseigenschaften sichergestellt werden:

- Die resultierende Gesamtverstärkung des FIR-Filters (Summe aller Filterkoeffizienten) muss näherungsweise 1 betragen (entspricht  $\sum_{o=n_{ff,min}}^{n_{ff,max}} \theta_{v,o} \approx \theta_{a,o} \approx \text{diag}(1,1,1)$ ). Dies ist erforderlich für ein neutrales Verhalten des Filters und somit für eine stationäre Genauigkeit in Bezug auf die Umsetzung des Soll-Verhaltens aus der Soll-Trajektorie.
- Der Schwerpunkt der FIR-Filterelemente ("Flächenschwerpunkt") muss näherungsweise identisch mit dem ursprünglichen IIR-Filter sein. Dies ist gleichbedeutend mit einer näherungsweise identischen effektiven Gruppenlaufzeit der IIR und des approximierten FIR-Filters.

<sup>201</sup>Lunze, J.: Regelungstechnik 1 (2020), S. 430.

Bei der Approximation des FIR-Filters aus der IIR der Aktorik ergibt sich ein Auslegungskonflikt. Eine größere zeitliche Vorausschau (gleichbedeutend mit höheren Werten von  $n_{ff,max}$ ) führt zu einer höheren Abbildungstreue des FIR-Filters. Gleichzeitig nimmt jedoch die zeitliche Verschmierung der kombinierten Impulsantwort des Systems ebenfalls zu (vgl. Abbildung 5-4). Dies ist problematisch, wenn sich die Soll-Trajektorie aufgrund unerwarteter Änderungen der dynamischen Umgebung sprunghaft ändert, da in einem solchen Fall den Aktoren noch vor der eigentlichen Anregung bereits Stellgrößen übergeben wurden, die zum tatsächlich geplanten Zeitpunkt nicht mehr gültig sind (Anforderung A3.9). Die Speicher innerhalb der Aktorik (bedingt aus der vorhandenen Massenträgheit) wurden mit jetzt nicht mehr gültigen Werten befüllt und dieser Fehler muss anschließend mit einem erhöhten Stellaufwand korrigiert werden. Daher muss ein Kompromiss zwischen der Abbildungstreue und dem Fehler der Vorsteuerung bei dynamischer Umplanung durch die zeitliche Verschmierung des kombinierten FIR-Filters und Aktors gefunden werden.

Abbildung 5-6 visualisiert diesen Sachverhalt: Durch ein neues, zuvor nicht erkanntes, Hindernis muss die Soll-Trajektorie stark umgeplant werden. Je nach Länge der zeitlichen Vorausschau können sich die Sollgrößen der ursprünglich und der neu geplanten Trajektorie bis zum Ende des Vorausschauhorizonts deutlich unterscheiden (dargestellt als Doppelpfeil). Der Einfluss einer solchen Umschaltung kann jedoch durch die Definition eines Übergangsbereichs zwischen Soll-Trajektorien, in dem eine neue Trajektorie mit der zuvor gültigen Trajektorie übereinstimmen muss, verringert werden (roter Bereich in Abbildung 5-6). Da zeitlich naheliegende Elemente der Soll-Trajektorie von der gespiegelten Impulsantwort stärker gewichtet werden (vgl. Abbildung 5-4) kann ein solcher Übergangsbereich je nach Auslegung einen signifikanten Anteil der Filterverstärkung neutralisieren<sup>202</sup>.

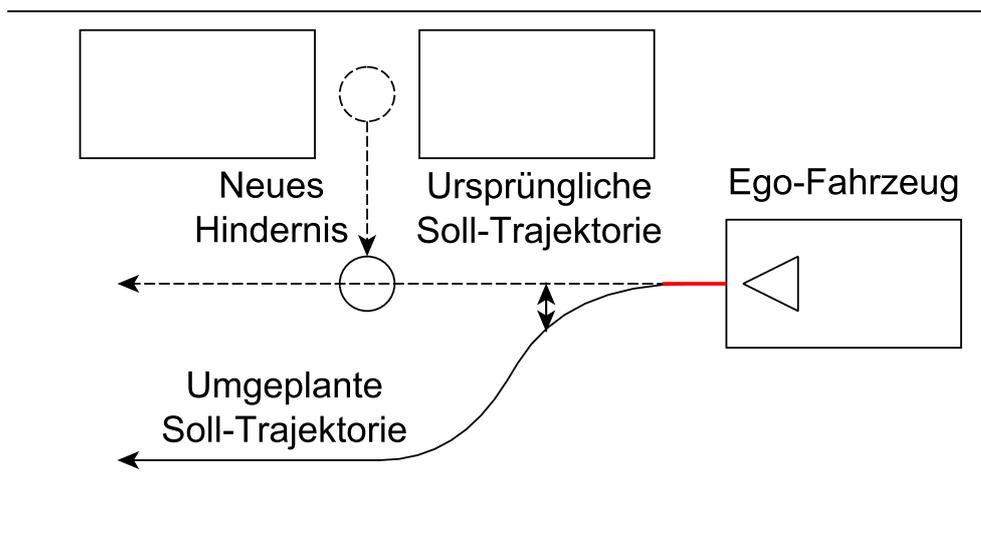


Abbildung 5-6: Sprunghafte Umplanung der Soll-Trajektorie aufgrund eines zuvor unerkannten Objekts.

<sup>202</sup>Die Auslegung einer Schnittstelle zur Rückmeldung des Übergangsbereichs an die TP findet in Kapitel 6 statt.

Das Verfahren zur Bestimmung der FIR-Filterkoeffizienten ist in Abbildung 5-7 für einen beispielhaften Lenkaktor mit PT1-Systemverhalten und der Zeitkonstante  $\tau_{PT1} = 0,13$  s dargestellt, da dieser im Vergleich zum elektrischen Antriebsaktor deutlich größere Verzugszeiten aufweist, was den potentiellen Nutzen der prädiktiven Vorsteuerung erhöht. Das beschriebene Konzept kann jedoch in gleicher Weise auf den Antriebsaktor angewendet werden. Die Kreise stellen die diskreten Koeffizienten der IIR dar, die mit  $f_{FIR} = 50$  Hz abgetastet wurde. Die Folge wird bei  $n_{ff,max} = 25$  Elementen abgeschnitten, um sie in eine FIR zu transformieren.  $n_{ff,max}$  wird auf der Grundlage des zuvor erörterten Kompromisses zwischen Abbildungsgüte und begrenzter zeitlicher Verschmierung gewählt. Bei der zugrundeliegenden Frequenz  $f_{FIR}$  entspricht der gewählte Wert von  $n_{ff,max}$  einer zeitlichen Vorausschau von einer halben Sekunde.

Um eine identische Verstärkung von IIR und FIR zu gewährleisten, werden die rohen FIR-Elemente anschließend angepasst, indem Elemente näher an der aktuellen Zeit durch Normierung der Koeffizienten auf die Koeffizientensumme angehoben werden, was zu den endgültigen FIR-Koeffizienten führt, die in Abbildung 5-7 dargestellt sind. Der Schwerpunkt von IIR und FIR unterscheidet sich in diesem Beispiel um etwa 2,2 %, was im Hinblick auf die Minimierung des Unterschieds bei der effektiven Gruppenlaufzeit als akzeptabel angesehen wird. Wenn der Schwerpunktsunterschied zwischen IIR und FIR für den gewählten Wert von  $n_{ff,max}$  zu groß ist, können die FIR-Koeffizienten zeitlich gedehnt werden, um die effektive Gruppenlaufzeit beider Filter anzugleichen.

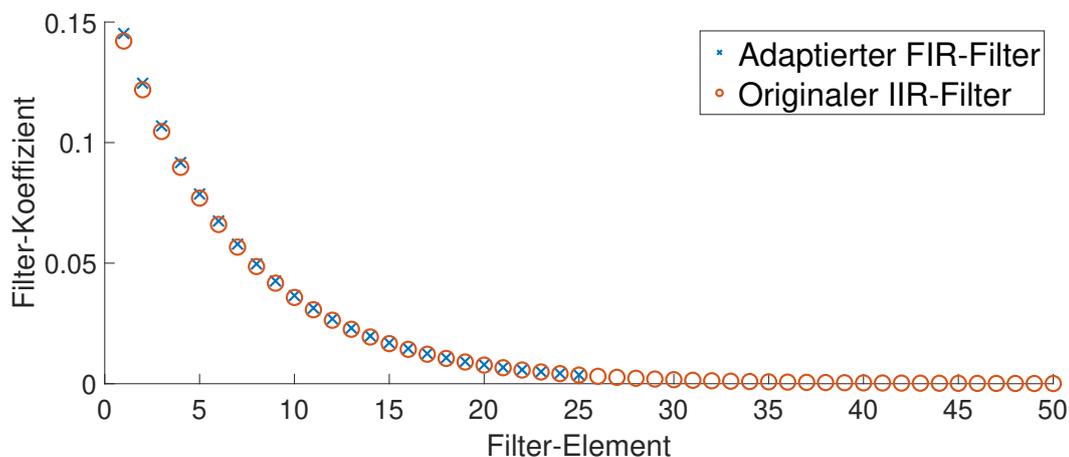


Abbildung 5-7: Filterkoeffizienten des ursprünglichen IIR-Filters (nur die ersten 50 Elemente sind dargestellt) und des angepassten FIR-Filters.

Durch das Abschneiden der IIR des Aktors enthält das angepasste FIR-Filter eine scharfe Kante bei  $n_{ff,max}$ . Diese Kante führt bei Frequenzanregungen oberhalb des Durchlassbereichs zu Überschwingern, die unter dem Begriff Gibb'sches Phänomen bekannt sind und nicht durch eine Erhöhung der Filterordnung verhindert werden können<sup>203a</sup>. Bei einer Anregung des FIR-Filters mit Frequenzen oberhalb der aus der Abtastfrequenz resultierenden Grenzfrequenz kann es durch

<sup>203</sup>Meyer, M.: Signalverarbeitung (2021), a: S. 296; b: S. 161; c: S. 297.

Aliasing-Effekte zu Spiegelungen der Überschwinger in den Basisbereich kommen<sup>203b</sup>.

Um die Überschwinger zu reduzieren, kann die scharfe Kante durch eine Multiplikation des FIR-Filters mit einer Fensterfunktion geglättet werden<sup>203c</sup>. Ob dies erforderlich ist, hängt vom Verhältnis der Systemdynamik der Aktorik und der in der Soll-Trajektorie enthaltenen Frequenzanteile ab. Die Trajektorie enthält per Definition keine Frequenzen über  $f_{\text{grenz}} = \frac{f_{\text{traj}}}{2}$ , wobei die Grenzfrequenz für eine näherungsweise verlustfreie Rekonstruktion in einer realen Anwendung deutlich darunter liegt. Kann aufgrund der Frequenzanteile der Soll-Trajektorie eine Stimulation der Überschwinger des hart beschnittenen FIR-Filters ausgeschlossen werden, kann auf eine Glättung der scharfen Kante zur Reduzierung der enthaltenen Frequenzanteile verzichtet werden. Andernfalls ist eine entsprechende Glättung angeraten, bspw. durch Hanning- oder Kaiser-Bessel-Fensterfunktionen<sup>203c</sup>.

### **Interaktionseffekte zwischen prädiktiver Vorsteuerung und Zustandsrückführung**

Die Verwendung der prädiktiven Vorsteuerung erzeugt innerhalb der Zwei-Freiheitsgrade-Struktur der FTR ein Spannungsfeld gegensätzlicher Zielsetzungen für die beiden unabhängigen Pfade der Vorsteuerung und Zustandsrückführung. Durch die zeitliche Vorausschau auf der Soll-Trajektorie wird durch die Vorsteuerung bereits eine Systemreaktion vor der eigentlichen Anregung stimuliert (vgl. Abbildungen 5-4 und 5-5). Dies erzeugt ein Folgeproblem für die Zustandsrückführung, da durch die frühzeitige Anregung der Vorsteuerung eine Regelabweichung entsteht. Da die Aufgabe der Zustandsrückführung darin besteht, die Regelabweichung zu minimieren, führt dies zu gegensätzlichen Stelleingriffen, wodurch in der Folge die Wirkung der Vorsteuerung reduziert wird.

Dieser Zielkonflikt kann durch verschiedene Ansätze reduziert bzw. aufgelöst werden. Zunächst ist zu beachten, dass sich die Länge der zeitlichen Vorausschau durch die FIR-Filter sowie die Steifigkeit der Zustandsrückführung auf die Höhe der kompensatorischen Regeleingriffe auswirken. Durch eine Begrenzung der Vorausschau und Reduzierung der Reglersteifigkeit kann daher eine übermäßige Kompensation durch die Zustandsrückführung verhindert werden. Diese Maßnahmen reduzieren jedoch gleichzeitig die Abbildungstreue der FIR-Filter und die Regelgüte bei externen Störungen bzw. Modellungenauigkeiten.

Als zusätzliche Gegenmaßnahme kann für die Ermittlung der Soll-Größen der Zustandsrückführung auf eine erweiterte Filterung der Soll-Trajektorie zurückgegriffen werden. In Tabelle 5-2 wurden die Treiber der Aktoraktivität identifiziert und darauf aufbauend die Eingangsgrößen der Vorsteuerung durch Filterung der Soll-Trajektorie mit den ermittelten FIR-Filterkoeffizienten ermittelt. Auf ähnliche Weise können die Eingangsgrößen der Zustandsrückführung durch Filterung der Soll-Trajektorie ermittelt werden, wobei zu beachten ist, dass für Posen- und Geschwindigkeitsvorgaben die (doppelt) zeitlich integrierte Impulsantwort der Aktorik zu verwenden ist.

Durch eine solche Adaption werden zur Vorsteuerung gegensätzliche Stelleingriffe vermieden. Gleichzeitig wird auf diese Weise jedoch die Soll-Trajektorie und somit auch die Posenabfolge

des Fahrzeugs auf der Straße modifiziert. Da dies unmittelbaren Einfluss auf das Verhalten des Fahrzeugs im dynamischem Verkehrsumfeld hat, ist eine solche Anpassung nur im Rahmen einer holistischen Betrachtung gemeinsam mit der TP zulässig<sup>204</sup>.

Die diskutierten Maßnahmen verdeutlichen, dass die Abstimmung der prädiktiven Vorsteuerung mit der Zustandsrückführung und der TP ein mehrdimensionales Optimierungsproblem mit einer Vielzahl von Einflussfaktoren darstellt. Die konkrete Parametrisierung muss daher stets vor dem Hintergrund und unter Beachtung der Rahmenbedingungen einer spezifischen Applikation getroffen werden<sup>205</sup>.

## 5.3 Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel entwickelte prädiktive Vorsteuerungsarchitektur verhindert kapselungsbedingte Defizite bei der Umsetzung des geplanten transienten Fahrzeugverhaltens. Auf Basis abgeleiteter Anforderungen wurde aufgezeigt, weshalb klassische Regelungsarchitekturen, mit auf die Umsetzung durch die nachgelagerte Regelung und Aktorik abgestimmter Sollwertberechnung durch die TP, nicht anwendbar sind. Der vorgestellte Ansatz auf Basis von FIR-Filtern ermöglicht die Ausführung des transienten Fahrzeugverhaltens im offenen Regelkreis unter Minimierung von Stellratenanforderungen sowie der resultierenden Regelabweichungen und erlaubt somit die beiden Teilfunktionen der Bewegungsplanung und -umsetzung innerhalb eines automatisierten Fahrzeugs ohne Performanceverlust zu kapseln.

Der Gesamtprozess der prädiktiven Vorsteuerung ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Er gliedert sich in vorbereitende Schritte und die eigentliche Vorsteuerung. Die vorbereitenden Schritte werden im Vorfeld offline durchgeführt und umfassen die Messung der IIR des betreffenden Aktors und die diskutierte Ableitung eines angepassten FIR-Filters. Die FIR-Filterelemente werden anschließend in einem Speicher abgelegt. Die online-Komponente der Vorsteuerung gliedert sich wiederum in eine Vorverarbeitung der Soll-Trajektorie (Rekonstruktion von Elementen zwischen den diskreten Aufpunkten sowie Koordinatentransformation) und in die eigentliche faltungsbasierte Filterung der Sollgrößen. Der letzte Schritt der Pipeline ist die Berechnung der anteiligen Fahrzeug-Sollkräfte als Grundlage der nachgelagerten Stellgrößenberechnung für die verwendeten Aktoren.

Das in Abbildung 5-8 dargestellte Verfahren kann an unterschiedliche System- und Reglerarchitekturen angepasst werden. Enthalten die Soll-Trajektorien innerhalb einer bestimmten Systemarchitektur beispielsweise andere Sollgrößen als die zuvor diskutierten Komponenten, kann der Input

---

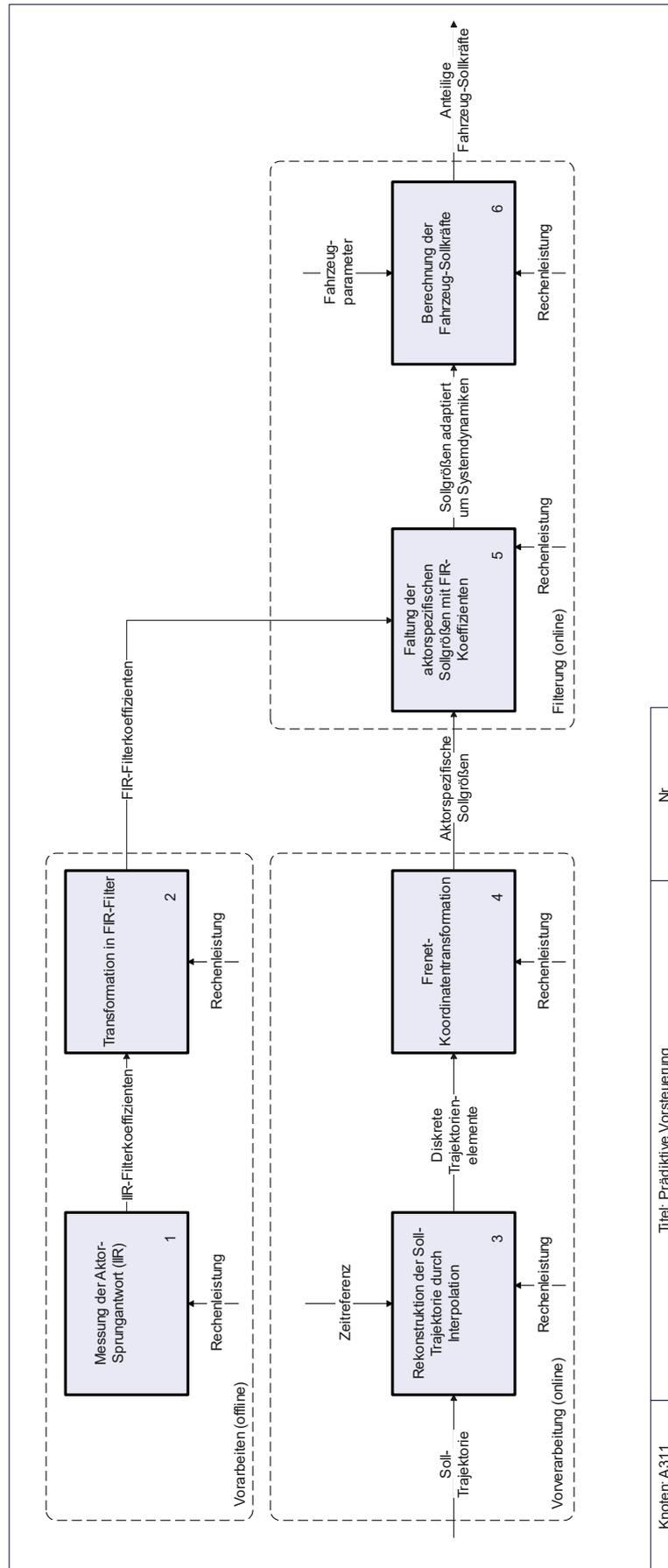
<sup>204</sup>Die Anpassung der Soll-Trajektorie kann auch direkt in der TP erfolgen, falls dieser die Informationen über die relevante Aktor-Systemdynamik über eine standardisierte Schnittstelle zur Verfügung gestellt wird.

<sup>205</sup>Da die Applikation für eine spezifische Anwendung nicht den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt, wird für die Abwägung der Zielsetzungen und Parametrisierung auf den Ausblick in Abschnitt 9.2 verwiesen.

für die FIR-Filter entsprechend angepasst werden. Es ist jedoch von großer Bedeutung, dass die Haupttreiber einer spezifischen Aktoraktivität erfolgreich identifiziert und isoliert werden, um eine aktorspezifische Filterparametrisierung zu ermöglichen. Die Architektur ist zu keinem Zeitpunkt vom (gemessenen oder geschätzten) Ist-Zustand des Fahrzeugs abhängig, so dass die Stabilität des Systems aufgrund der vermiedenen internen Rückkopplung gewährleistet ist (Anforderung A3.7).

In der dienstorientierten Systemarchitektur der Fahrzeuge (vgl. Abschnitt 3.1) werden die Aktorgrenzen, wie z. B. die maximale Lenkwinkelgeschwindigkeit, dynamisch von den Aktordiensten bereitgestellt. Daher können die Filter dynamisch parametrisiert werden, um z. B. Degradationen oder Alterungseffekte zu berücksichtigen. Darüber hinaus kann der Filterentwurf um einen adaptiven Mechanismus für unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten erweitert werden, da die Systemdynamik im Allgemeinen geschwindigkeitsabhängig ist (z. B. aufgrund unterschiedlicher Bohrmomente um die  $z$ -Achse des Rades). Bei streng nichtlinearer Aktordynamik kann eine zyklische Neuparametrisierung der FIR-Filterkoeffizienten auf der Grundlage eines Levenberg-Marquardt-Algorithmus zur Parameterschätzung verwendet werden, der die Berücksichtigung der Amplitudenabhängigkeit innerhalb der prädiktiven Vorsteuerung ermöglicht.

Forschungsfrage 6 ist somit beantwortet. Im Kapitel 8 werden die verwendeten Testfälle und die erzielten Ergebnisse vorgestellt und analysiert.



Knoten: A311	Titel: Prädiktive Vorsteuerung		Nr.
--------------	--------------------------------	--	-----

Abbildung 5-8: Übersicht der entwickelten prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur auf Basis von FIR-Filtern in IDEF0 Darstellung (Knoten A311).

## 6 Sicherstellung physikalisch umsetzbarer Soll-Trajektorien

In Abschnitt 3.3.2 wurde aufgezeigt, dass bei einer Kapselung der Bewegungsplanung und -ausführung physikalisch nicht umsetzbare Soll-Trajektorien einen negativen Einfluss auf die Performance der automatisierten Fahrzeugführung haben, da mit inakzeptablen Regelabweichungen und daraus resultierenden kritischen Situationen gerechnet werden muss. Da in der modularen Systemarchitektur eine Austauschbarkeit der eingesetzten Dienste erreicht werden soll, darf das Wissen um die Eigenschaften des Fahrzeugs nur in der FTR abgelegt sein. Daher ist eine spezifische Anpassung der eingesetzten TP an die Fähigkeiten der nachgelagerten Aktorik nicht zielführend.

Bei einer vollständigen Trennung sind negative Auswirkungen auf die Performance der Bewegungsregelung zu erwarten, da die Umsetzbarkeit geplanter Soll-Trajektorien nicht garantiert werden kann. Innerhalb dieses Kapitels wird daher die notwendige Integration der beiden Teilfunktionen der Bewegungsregelung definiert, um einen negativen Einfluss auf die Gesamtperformance zu vermeiden. Dazu wird die neue Teilfunktion der Schätzung der Ausführungsgrenzen des Fahrzeugs (Knoten A35 in Abbildung 3-5) technisch ausgestaltet und so aufgezeigt, dass die TP keine Adaptionen an fahrzeugspezifische Charakteristika während der Entwicklung erfordert, so lange bestimmte Randbedingungen bei der Planung der Soll-Trajektorie berücksichtigt werden. Analog zum Vorgehen der zwei vorherigen Kapitel werden zunächst teilfunktionsspezifische Anforderungen abgeleitet (Abschnitt 6.1) und anschließend ein konkretes Konzept entwickelt (Abschnitt 6.2). Die entwickelte Teilfunktion beantwortet somit Forschungsfrage 4:

**FF 4:** Wie kann sichergestellt werden, dass die Planungsebene nur erfüllbare Aufgaben an die ausführende Ebene stellt? Welcher Informationsaustausch zwischen den Ebenen ist dazu erforderlich?

### 6.1 Teilfunktionsspezifische Anforderungen

Von der TP wird verlangt, dass keine spezifischen Kenntnisse über nachgelagerte Module wie den Antriebsstrang des Fahrzeugs erforderlich sind, um Anpassungen an ein spezifisches Fahrzeug während der Entwicklung zu vermeiden und die Wiederverwendbarkeit der entwickelten Algorithmen für verschiedene Applikationen zu verbessern (Anforderung A1.3). Da ohne Berücksichtigung physikalischer Grenzen der Fahrzeugbewegung innerhalb der TP jedoch ein Verlust an Performance bzw. Funktionalität droht, ist die in Anforderung A1.3 definierte Bedingung für einen Informationsaustausch zwischen Diensten bzw. Modulen erfüllt. Somit besteht die

Anforderung an die Bewegungsregelung, dass eine standardisierte Schnittstelle zwischen FTR und TP existiert, über die Konsequenzen der fahrzeugspezifischen Eigenschaften kommuniziert werden und aus der die TP somit alle notwendigen Informationen zur Sicherstellung physikalisch umsetzbarer Trajektorien ableiten kann. Unter der Annahme, dass die physikalischen Grenzen korrekt geschätzt werden, kann die physikalische Umsetzbarkeit auf diese Weise garantiert werden. Da die Korrektheit der Schätzung der relevanten Grenzen in einer realen Anwendung jedoch nicht garantiert werden kann (vgl. Abschnitt 2.4.3), ist ein zusätzlicher Eskalationsmechanismus erforderlich, der ein sicherheitskritisches Verhalten des Fahrzeugs verhindert, wenn bei der Schätzung der relevanten Ausführungsgrenzen Fehler gemacht werden.

Die geplanten Soll-Trajektorien bestehen aus einer Reihe von zeitgestempelten Soll-Posen (horizontale Position und Gierwinkel) und deren ersten beiden zeitlichen Ableitungen (vgl. Gleichung 4-1). Für die automatisierte Fahrzeugführung ist entscheidend, dass diese Soll-Zustände durch die Umsetzung der von der FTR berechneten Aktor-Stellgrößen erreicht werden können. Andernfalls kann der Versuch, der Trajektorie zu folgen, die Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs gefährden<sup>206</sup>. Daher muss die TP Trajektorien berechnen, die im Hinblick auf die physikalischen Grenzen der Fahrdynamik, der Aktorik und der kinematischen Grenzen realisierbar sind.

### 6.1.1 Kinematische Grenzen

Kraftfahrzeuge werden durch eine Rotation der Räder um ihre Hochachse gelenkt<sup>207</sup>. Aus Gründen des Kabelmanagements und des Bauraums kann auch bei der Nutzung von Einzelradaktorik nicht davon ausgegangen werden, dass die Lenkaktoren einen Radlenkwinkelbereich von 360° zulassen<sup>209</sup>. Dies schränkt den Bereich der möglichen Momentanpollagen<sup>210</sup> und daraus abgeleitet die möglichen Schwimmwinkel des Fahrzeugs ein. Abbildung 6-1 veranschaulicht diese Beschränkung. Der blau gefärbte Bereich stellt das Fahrzeug aus der Vogelperspektive dar, wobei die Ecken mit den Radaufstandspunkten korrespondieren. Jedes Rad hat eine obere und untere Grenze für den Lenkwinkel ( $\delta_{i,max}$  und  $\delta_{i,min}$ ), wobei die neutrale Position ( $\delta_i = 0$ ) in der Abbildung 6-1 horizontal nach rechts entlang der x-Achse des Fahrzeugkoordinatensystems zeigt. Positive Winkel werden im entgegengesetzten Uhrzeigersinn angenommen. Die Normalenrichtungen der Räder an den Lenkwinkelgrenzen sind durch die gestrichelten Linien visualisiert. Der Momentanpol des Fahrzeugs ist durch den Schnittpunkt der Normalenvektoren aller Räder definiert. Daher kann der

<sup>206</sup>Horiuchi, S.: Evaluation of chassis control method through controllability region (2012), S. 20-21.

<sup>207</sup>Je nach kinematischer Ausgestaltung der Radaufhängung kann sich die tatsächliche Lenkachse von der Rad-Hochachse unterscheiden. Der Radaufstandspunkt variiert in einem solchen Fall mit dem Lenkwinkel und ggf. der Einfederung. Da die resultierende Änderung des Radstands bzw. der Spurweite jedoch zumeist im Bereich weniger Millimeter liegt<sup>208</sup>, wird dieser Einfluss im Folgenden vernachlässigt und ausschließlich der Radlenkwinkel als Verdrehwinkel um die Rad-Hochachse betrachtet.

<sup>208</sup>Ersoy, M. et al.: Einleitung und Grundlagen (2017), S. 30-31.

<sup>209</sup>Struth, M. et al.: Poster: Dynamikmodul Antrieb, Fahrwerk und Lenkung (2020).

<sup>210</sup>Marzbani, H. et al.: Autonomous Vehicles (2019), S. 3202.

Momentanpol nur innerhalb des Bereichs liegen, der durch die orthogonalen Vektoren der Räder an den Lenkwinkelgrenzen  $\delta_{i,\max}$  und  $\delta_{i,\min}$  begrenzt wird, was dem grauen Bereich in Abbildung 6-1 entspricht<sup>211</sup>.

Aus diesem Bereich lassen sich Maximalwerte für den Schwimmwinkel des Fahrzeugs ableiten, die innerhalb der TP berücksichtigt werden müssen, um ein Windup des Reglers zu vermeiden, weil die Lenkaktoren nicht die erforderlichen Winkel stellen können. Der Grenzwert für den Schwimmwinkel des Fahrzeugs ist abhängig von der Lage des Momentanpols. Positionen nahe am Fahrzeug (gleichbedeutend mit dem Fahren einer hohen Kurvenkrümmung) führen zu kleineren Maximalwerten für den Schwimmwinkel des Fahrzeugs. Bei Degradationen der Aktorik (z. B. bei blockierter Lenkung) können die Maximalwerte weiter eingeschränkt werden.

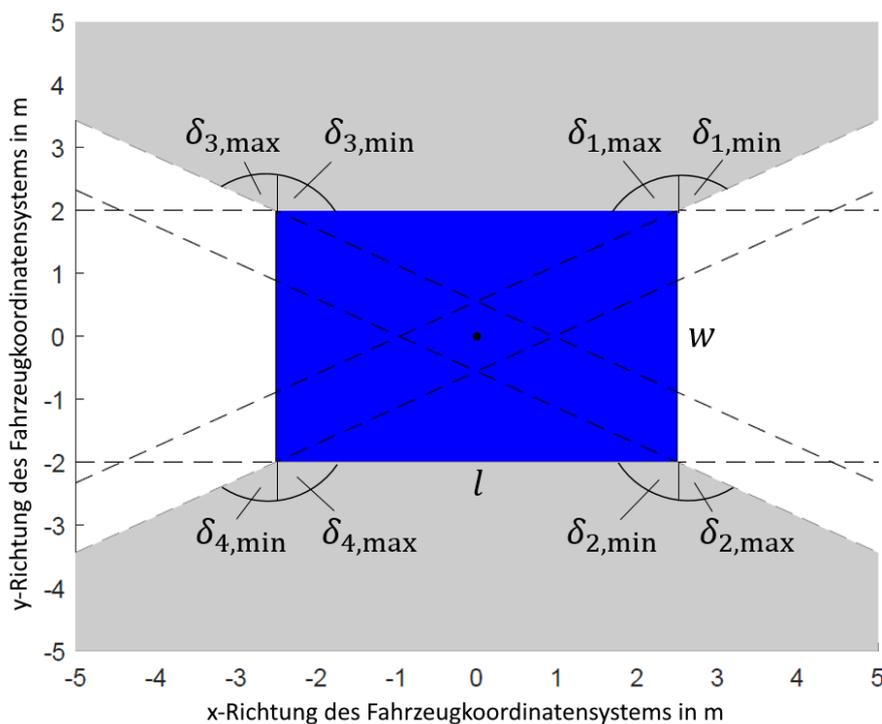


Abbildung 6-1: Zulässige Positionen für den Momentanpol des Fahrzeugs (graue Fläche) bei Annahme der Radlenkwinkelgrenzen des UNICARagil-Projekts ( $\delta_{1|4,\max} = 90^\circ$  und  $\delta_{1|4,\min} = -60^\circ$  am linken Vorder- und rechten Hinterrad sowie  $\delta_{2|3,\max} = 60^\circ$  und  $\delta_{2|3,\min} = -90^\circ$  am rechten Vorder- und linken Hinterrad). Die gestrichelten Linien stellen die orthogonalen Vektoren an den Grenzen der Radlenkwinkel dar, die den zulässigen Bereich für den Momentanpol des Fahrzeugs begrenzen. Die Spurweite  $w$  und der Radstand  $l$  des Fahrzeugs korrespondieren mit den Verbindungslinien der Radaufstandspunkte.

Durch die Rückmeldung der Ausführungsgrenzen an die TP muss daher sichergestellt werden, dass nur Soll-Trajektorien geplant werden, die Momentanpollagen innerhalb des zulässigen Bereichs enthalten. Dieser Bereich ist dabei durch die Lenkwinkelgrenzen aller Räder sowie dem Radstand und der Spurweite des Fahrzeugs eindeutig definiert.

<sup>211</sup> Im Falle einer konventionellen Vorderachslenkung reduziert sich der graue Bereich möglicher Momentanpollagen auf eine Gerade in Verlängerung der Hinterachse, da an der Hinterachse keine Lenkwinkel ungleich null gestellt werden können.

## 6.1.2 Dynamische Grenzen

Aus den dynamischen Grenzen des Fahrzeugs, die sich sowohl aus den Grenzen der Aktorik als auch aus den Grenzen des Reibwerts zwischen Reifen und Fahrbahn ergeben, resultieren weitere Anforderungen an die Inhalte der geplanten Soll-Trajektorien.

### Beschleunigungsgrenzen

Für die automatisierte Fahrzeugführung muss das Fahrzeug in allen drei unabhängigen Freiheitsgraden (Translation längs und quer sowie Rotation um die Fahrzeug-Hochachse) beschleunigt werden. Die Grenzen der Beschleunigung sind dabei abhängig vom maximalen Drehmoment der Aktorik (Antriebs-, Brems- und Lenkaktor) sowie von den Reibwertgrenzen zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche<sup>212</sup>. Während letztere für alle drei Freiheitsgrade als identisch angesehen wird, kann die erste Grenze aufgrund der unterschiedlichen Aktoren, die für die Erzeugung einer Beschleunigung in einem der drei Freiheitsgrade eingesetzt werden, erheblich variieren. Daraus ergeben sich je nach verwendetem Aktor unterschiedliche Beschleunigungsgrenzwerte.

Die geplanten Soll-Trajektorien dürfen daher keine Beschleunigungen enthalten, die das Limit für den jeweiligen Freiheitsgrad überschreiten.

### Ruckgrenzen

Wie bereits in Kapitel 5 ausführlich diskutiert wurde, verfügt jeder Aktor über eine charakteristische Systemdynamik und einer daraus resultierenden Stellratengrenze. Ein Soll-Drehmoment kann daher nicht ohne Zeitverzug bereitgestellt werden. Für den Ruck des Fahrzeugs ergibt sich daher ein Grenzwert aus der Aktor-Systemdynamik, der bei der Planung von Soll-Trajektorien innerhalb der TP zu berücksichtigen ist.

### Lenkwinkelgeschwindigkeitsgrenzen

Infolge des begrenzten Lenkmoments, das von den Lenkaktoren bereitgestellt werden kann, ist die Änderungsrate der Radlenkwinkel begrenzt. Auf Fahrzeugebene bedeutet dies eine Obergrenze für die Krümmungsänderungsrate innerhalb der Soll-Trajektorie, wenn mit einer Geschwindigkeit ungleich Null gefahren wird. Im Stillstand ist zu berücksichtigen, dass die Räder konsistent verdreht werden müssen, bevor das Fahrzeug in eine bestimmte Richtung zu fahren beginnen kann.

### Übergang zwischen Soll-Trajektorien

Der Planer berechnet zyklisch mit einer bestimmten Frequenz neue Soll-Trajektorien für das Fahrzeug. Aufgrund des dynamischen Umfelds des Fahrzeugs können sich mit jeder neu geplanten Soll-Trajektorie die darin enthaltenen Sollgrößen ändern. Dabei muss sichergestellt werden,

---

<sup>212</sup>Velenis, E.: Analysis and control of high-speed wheeled vehicles (2006), S. 19.

dass alle Elemente der geplanten Soll-Trajektorien durch in der FTR berechnete Stellgrößen erreicht werden können. Um Regelabweichungen, Instabilitäten und eine Beeinträchtigung des Fahrgastkomforts zu vermeiden, muss daher ein kontinuierlicher Übergang zwischen der aktuellen Trajektorie  $\mathcal{T}_j$  und der jeweils nächsten Trajektorie  $\mathcal{T}_{j+1}$  sichergestellt werden. Dies korrespondiert mit einem Zeitintervall, in dem beide Trajektorien identisch sind, bevor  $\mathcal{T}_{j+1}$  abweichende Sollgrößen enthalten darf.

### Eskalationsmechanismus

Für die Anwendung in Realfahrzeugen kann die korrekte Schätzung der zuvor definierten Randbedingungen nicht garantiert werden. Insbesondere die Schätzung des Reibwerts zwischen Reifen und Fahrbahn unterliegt verschiedenen Unsicherheiten wie bspw. der Fahrbahnbeschaffenheit, Radlast oder Witterung und kann für zukünftige Straßenabschnitte nur ungenau abgeschätzt werden. Es muss daher ein Eskalationsmechanismus für den Fall vorgesehen werden, dass die mit der Umsetzung einer Soll-Trajektorie beauftragte FTR trotz der diskutierten Maßnahmen physikalisch nicht umsetzbare Soll-Trajektorien erhält. Andernfalls könnte eine potentiell nicht umsetzbare Trajektorie zu einem Windup innerhalb der FTR führen<sup>213</sup>.

### 6.1.3 Zusammenfassung der Anforderungen

Zusammengefasst müssen die in Tabelle 6-1 genannten teilfunktionsspezifischen Anforderungen erfüllt sein, um eine modulare Trennung zwischen TP und FTR zu ermöglichen.

## 6.2 Konzeptentwicklung

Die im vorangegangenen Abschnitt abgeleiteten teilfunktionsspezifischen Anforderungen müssen von der Rückmeldung der physikalischen Ausführungsgrenzen von der FTR an die TP erfüllt sein, damit keine Defizite durch die Kapselung der FTR auftreten. Da die einzelnen Anforderungen unterschiedliche Maßnahmen erfordern, werden in diesem Kapitel jeweils die möglichen Lösungen in Form verschiedener Architekturoptionen untersucht und anschließend ein konsistentes Gesamtkonzept definiert.

### 6.2.1 Kinematische Grenzen

Die kinematischen Grenzen ergeben sich aus der Beschränkung der möglichen Radlenkwinkel. Über die Rückmeldungsschnittstelle können dem Planer dazu prinzipiell verschiedene Informationen zur Verfügung gestellt werden.

---

<sup>213</sup>Werling, M.: Trajektoriengenerierung in Verkehrsszenarien (2011), S. 12.

Tabelle 6-1: Teilfunktionsspezifische Anforderungen für die Sicherstellung physikalisch umsetzbarer Soll-Trajektorien.

Anforderung	Beschreibung
A4.1	Zwischen FTR und TP muss eine standardisierte Schnittstelle vorhanden sein, die der TP ermöglicht, die physikalische Umsetzbarkeit der von ihr geplanten Soll-Trajektorien zu bewerten. Alle dazu notwendigen Informationen müssen aus dieser Schnittstelle ableitbar sein, so dass keine Anpassung der TP an ein spezifisches Fahrzeug während der Entwicklung erforderlich ist.
A4.2	Längs-, Quer- und Gierbeschleunigungen innerhalb der geplanten Soll-Trajektorien müssen unter den physikalischen Grenzen der Fahrbahnreibung und der Aktorik liegen.
A4.3	Der Schwimmwinkel des Fahrzeugs innerhalb der Soll-Trajektorien muss innerhalb der kinematischen Grenzen liegen, die durch die Winkelgrenzen der Lenkaktorik vorgegeben sind.
A4.4	Der Längs-, Quer- und Gierruck innerhalb der geplanten Soll-Trajektorien muss innerhalb der physikalischen Grenzen liegen, die sich aus der Aktorik des Fahrzeugs ergeben.
A4.5	Die Krümmungsänderungsrate innerhalb der geplanten Soll-Trajektorien muss innerhalb der von der Lenkaktorik vorgegebenen Höchstwerte, basierend auf der maximalen Lenkwinkelrate, liegen.
A4.6	Eine Soll-Trajektorie, die aus dem Stillstand startet, muss vor der Beschleunigung des Fahrzeugs ausreichend Zeit für das erforderliche Drehen der Räder lassen.
A4.7	Jede neue Soll-Trajektorie $\mathcal{T}_{j+1}$ muss für eine bestimmte Zeit, die auf der Systemdynamik der Aktorik beruht, mit der vorherigen Soll-Trajektorie $\mathcal{T}_j$ identisch sein, um stetige Übergänge zwischen den Trajektorien zu gewährleisten.
A4.8	Die FTR muss einen Eskalationsmechanismus enthalten, um ein Windup des Reglers zu verhindern, falls eine fehlerhafte Schätzung der Ausführungsgrenzen vorgenommen wird.

Gemäß Anforderung A4.3 führen die begrenzten Radlenkwinkel zu einer Begrenzung des maximalen bzw. minimalen Schwimmwinkels des Fahrzeugs. Für die vollständige Einhaltung dieser kinematischen Grenzen reicht eine Rückmeldung des maximalen Schwimmwinkels jedoch nicht aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der maximale Schwimmwinkel des Fahrzeugs abnimmt, wenn der Momentanpol näher an das Fahrzeug heranrückt. Daher könnten die Grenzwerte für den Schwimmwinkel nur dann korrekt berechnet werden, wenn alle Momentanpole innerhalb der Soll-Trajektorie vorab bekannt sind, was eine Information ist, die der FTR nicht im Voraus zur Verfügung steht. Die Festlegung einer Untergrenze für den maximalen Schwimmwinkel auf der Grundlage des nächstgelegenen Momentanpols ist nicht zweckmäßig, da sie den Schwimmwinkel des Fahrzeugs unnötig einschränkt, wenn mit einer betragsmäßig geringeren Kurvenkrümmung (entspricht einem weiter entfernten Momentanpol) gefahren wird.

Die TP muss für die Planung umsetzbarer Soll-Trajektorien den zulässigen Bereich für den Momentanpol des Fahrzeugs kennen (grauer Bereich in Abbildung 6-1). Um diesen Bereich zu rekonstruie-

ren, werden die Lenkwinkelgrenzen für jedes Rad ( $\delta_{i,\max}$  und  $\delta_{i,\min}$ ) sowie die Fahrzeugspurweite ( $w$ ) und der Radstand ( $l$ ) benötigt. Mit diesen Werten lassen sich für jedes Rad lineare Gleichungen für die obere und untere Grenze des Momentanpols ableiten. Die TP muss anschließend sicherstellen, dass alle Momentanpole einer Soll-Trajektorie die abgeleiteten Grenzen nicht verletzen, was der Lösung eines linearen Optimierungsproblems mit 8 Nebenbedingungen entspricht<sup>214</sup>.

Die resultierende Rückmeldung erfüllt die Anforderung A4.3 und kann zusätzlich im Falle von Aktordegradationen genutzt werden. Wenn ein Lenkaktor aufgrund einer Fehlfunktion blockiert ist, schränkt dies die möglichen Momentanpole ein und erzwingt somit eine Neuplanung der Soll-Trajektorie. Wenn die TP diese zusätzliche Einschränkung durch Aktualisierung der zugehörigen Nebenbedingungen berücksichtigt, werden die zulässigen Momentanpollagen auf die Normale des blockierten Rades begrenzt und das Fahrzeug kann ggf. mit einem von der 0°-Neutralstellung abweichenden Schwimmwinkel weiterfahren. Das Konzept deckt ebenfalls konventionelle Vorderradlenkungen ab. Im Falle einer reinen Vorderachslenkung betragen die Grenzwerte für die hinteren Radlenkwinkel stets null ( $\delta_{3,\max} = \delta_{3,\min} = \delta_{4,\max} = \delta_{4,\min} = 0$ ), so dass alle erlaubten Momentanpollagen in Verlängerung der Hinterachse liegen. Da sich dieser Fall ausschließlich in einer Änderung der Nebenbedingungen äußert, ist keine Anpassung der durchgeführten Optimierung innerhalb der TP erforderlich.

### 6.2.2 Dynamische Grenzen

Den dynamischen Randbedingungen liegen unterschiedliche Ursachen zugrunde. Um die in Tabelle 6-1 definierten Anforderungen A4.2 und A4.4-A4.7 zu erfüllen, müssen von der FTR mehrere Informationen zurückgemeldet werden.

#### Beschleunigungsgrenzen

Für Anforderung A4.2 müssen die aktuellen Beschleunigungsgrenzwerte des Fahrzeugs geschätzt und bereitgestellt werden. Diese Grenzen sind primär von den Fähigkeiten der zugehörigen Aktorik sowie dem Reibwertpotential zwischen Reifen und Fahrbahn abhängig.

Der einfachste mögliche Ansatz besteht darin, eine einzige Beschleunigungsgrenze zu schätzen, die für alle Freiheitsgrade des Fahrzeugs (translatorische Beschleunigung und Gierbeschleunigung) gültig ist. Dieser Grenzwert müsste daher das Minimum des Beschleunigungsgrenzwerts sein, der sich aus dem Reibwertpotential zwischen Reifen und Fahrbahn sowie den Grenzwerten der Aktorik ergibt. Mit Ausnahme von Sportwagen kann, abgesehen von sehr glatten Fahrbahnbedingungen (z. B. nasses Kopfsteinpflaster oder Eis), davon ausgegangen werden, dass der für die Beschleunigung verwendete Antrieb der begrenzende Faktor ist. Dieser einfache Ansatz hat daher den Nachteil, dass die mögliche Längsverzögerung bzw. Querbeschleunigung unnötig

---

<sup>214</sup>Zu diesem Zweck kann bspw. der Simplex-Algorithmus<sup>215</sup> genutzt werden.

<sup>215</sup>Zwiener, J.: Robuste Zustandsschätzung (2019), S. 109.

stark begrenzt wird, auch wenn die Reibwertverhältnisse sowie die Brems- und Lenkaktorik eine dynamischere Bewegung ermöglichen würden. Weiterhin wird die Gierbeschleunigungsgrenze zudem von den kinematischen Parametern Radstand und Spurweite sowie der Massenverteilung beeinflusst. Diese Angabe einer gemeinsamen Beschleunigungsgrenze für alle Freiheitsgrade wird daher verworfen.

Das Defizit kann durch die Festlegung separater Grenzen für die maximale Beschleunigung der jeweiligen Freiheitsgrade des Fahrzeugs überwunden werden. Die FTR muss die aktuellen Reibwertverhältnisse der Straße mit einer oder mehreren Methoden abschätzen, die nicht Teil dieser Arbeit sind<sup>216</sup> (vgl. Abschnitt 2.4.3).

Es wird davon ausgegangen, dass die Brems- und Lenkaktoren immer in der Lage sind, das Fahrzeug bis zur Grenze des Reifen-Fahrbahn-Reibwerts zu beschleunigen und daher keine begrenzenden Faktoren darstellen. Diese Annahme beruht auf den Fähigkeiten moderner Brems- bzw. Lenksysteme und vereinfacht die Schätzung. Aus den Annahmen ergeben sich zwei Grenzwerte für die Beschleunigung des Fahrzeugs, die beide berücksichtigt werden müssen. Erstens eine Grenze für die Querbearbeitung im Frenet-Koordinatensystem  $a_{n,\max}$  sowie zweitens die Längsverzögerung im Frenet-System  $D_{\max}$ , die allein auf den Reibwertgrenzen  $\mu_{\max} \cdot g$  beruht. Diese Grenze ist äquivalent zum weithin bekannten Kamm'schen Kreis.

Zusätzlich wird eine obere Grenze für die Längsbeschleunigung  $a_{s,\max}$  definiert, die durch das Minimum der Reibwert- und Antriebsaktorgrenze gegeben ist. Dieser Grenzwert basiert auf den Grenzen des Aktors und ist im Allgemeinen von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig, da das von einem Antriebsaktor bereitgestellte maximale Drehmoment von seiner Drehzahl abhängt. Es ist daher nicht ausreichend, einen skalaren Wert für die Beschleunigung anzugeben, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die Fahrzeuggeschwindigkeit über die gesamte Länge der geplanten Soll-Trajektorie konstant bleibt. Um diesen Konflikt zu lösen, wird (unter der Annahme einer konstanten Maximalleistung) die spezifische Leistung des Fahrzeugs  $P_{\text{sp}} = \frac{P_{\text{tr,max}}}{m}$  als Nebenbedingung eingeführt, wobei  $P_{\text{tr,max}}$  die Leistungsgrenzen der Antriebsaktorik und  $m$  die aktuelle Fahrzeugmasse sind. Mit Hilfe dieses Verhältnisses kann die TP eine maximale Längsbeschleunigung des Fahrzeugs für jede Soll-Geschwindigkeit  $v_{\text{set},s}$  berechnen:

$$a_{s,\max} = \min\left(\mu_{\max} \cdot g, \frac{P_{\text{tr,max}}}{m \cdot v_{\text{set},s}}\right) \quad (6-1)$$

Die Längsverzögerung und Querbearbeitung sind nur durch die Reibwertbedingungen begrenzt und daher als skalarer Wert  $\mu_{\max} \cdot g$  kodiert. Abbildung 6-2 zeigt die resultierenden Grenzen als modifizierten Kamm'schen Reibungskreis.

<sup>216</sup>Einzelradaktorik kann sich hierbei als vorteilhaft für die Schätzung erweisen, da die Reibwertausnutzung durch ein gezieltes Verspannen des Antriebsstrangs mittels Aufbringung von Differenzmomenten zwischen den einzelnen Rädern erhöht werden kann<sup>217</sup>

<sup>217</sup>Chen, Y.; Wang, J.: Vehicle real-time tire-road friction coefficient estimation (2010).

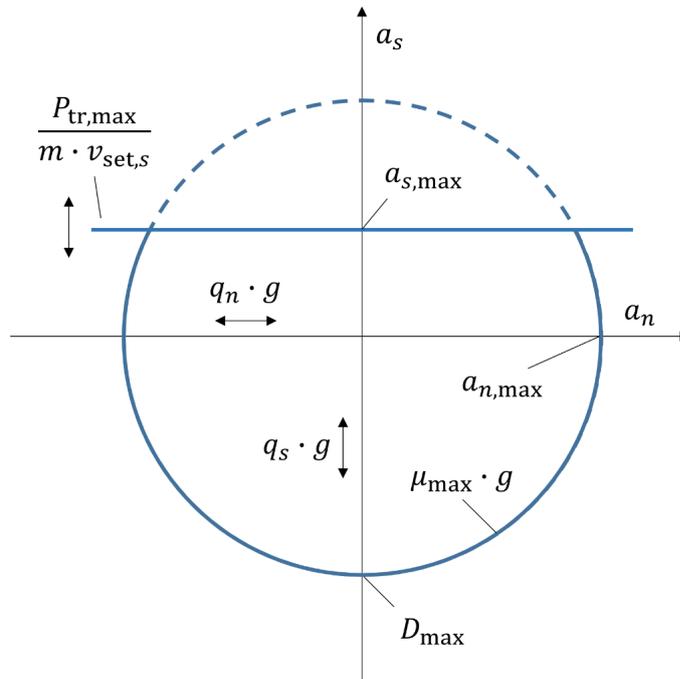


Abbildung 6-2: Beschleunigungsgrenzen des Fahrzeugs, dargestellt als modifizierter Kamm'scher Reibungskreis. Die Längsbeschleunigung im Frenet-Koordinatensystem wird durch die spezifische Antriebsleistung und die aktuelle Geschwindigkeit begrenzt. Die Längsverzögerung und die Querbeschleunigung werden nur durch die Reibwertverhältnisse zwischen Reifen und Fahrbahn begrenzt. Die Achsen werden in Abhängigkeit von der Straßenneigung  $q_s$  und  $q_n$  verschoben.

Der zuvor beschriebene Ansatz kann um einen zusätzlichen Rückkopplungsterm für die maximale Gierbeschleunigung des Fahrzeugs erweitert werden. Während dies eine akkuratere Beschreibung der dynamischen Grenzen darstellt, hat Betz für die Anwendung eines mobilen Fahrsimulators gezeigt, dass der zusätzliche Reibwertbedarf für die Gierbeschleunigung bei normalen Fahrmanövern als gering angesehen werden kann<sup>218</sup>. Daher wird der zusätzliche Bedarf vernachlässigt und kein eigener Rückkopplungsterm eingeführt<sup>219</sup>.

Der Grenzwert für die Beschleunigung des Antriebsaktors hängt stark von der Steigung der Fahrbahn ab. Das Fahren bergauf kann das Beschleunigungspotential des Fahrzeugs erheblich verringern. Die FTR kann die zukünftige Steigung der Fahrbahn nicht vorhersehen und daher diesen Einfluss nicht berücksichtigen. Es ist jedoch möglich, dass der Planer Informationen über die Steigung besitzt (z. B. aus einer digitalen Karte) und daher die von der FTR empfangenen Beschleunigungsgrenzwerte auf der Grundlage der anteiligen Erdbeschleunigung ( $q_s \cdot g$  für eine Längssteigung und  $q_n \cdot g$  für eine Quersteigung) entsprechend anpassen kann. Für den vorgeschlagenen modifizierten Kamm'schen Reibungskreis in Abbildung 6-2 entspricht dies einer linearen Verschiebung der Achsen in Richtung der Steigung.

<sup>218</sup>Betz, A. et al.: Motion analysis of a wheeled mobile driving simulator (2012), S. 129.

<sup>219</sup>Der Reibwertbedarf ist vom Verhältnis aus Massenträgheitsmoment für den Gierfreiheitsgrad und Fahrzeugmasse abhängig. Für den von Betz betrachteten Fahrsimulator ist dieses Verhältnis geringer als für die Realfahrzeuge des Projekts UNICAR*agil*. Da für den hier betrachteten Anwendungsfall jedoch gleichzeitig geringere Gierbeschleunigungen erforderlich sind, wird auf eine Rückkopplung der maximalen Gierbeschleunigung verzichtet.

Ähnlich wie bei den Überlegungen zu den kinematischen Grenzen werden sich Degradationen der Aktorik (z. B. ein kompletter Ausfall oder eine reduzierte Leistung) auf die Beschleunigungsgrenzen auswirken. Die Schnittstelle muss für solche Situationen jedoch nicht geändert werden, da die FTR die geschätzte Leistungsgrenze  $P_{tr,max}$  an die aufgetretenen Degradation anpassen kann.

Bei der Integration der Beschleunigungsgrenzen in eine numerische Optimierung innerhalb der TP kann die erhöhte Komplexität durch die nichtlineare Kreisgleichung problematisch sein. In solchen Fällen ist es möglich, den Kamm'schen Kreis aus Abbildung 6-2 zu einem Polygon zu vereinfachen und so zu linearisieren<sup>220</sup>.

## Verzugszeiten

Die im Antriebsstrang des Fahrzeugs eingesetzten Aktoren, Räder und Reifen unterliegen Verzugszeiten, da Stellgrößen nur mit einem charakteristischen dynamischen Verhalten realisiert werden. Ein Soll-Zustand innerhalb einer neuen Soll-Trajektorie kann daher nicht sofort erreicht werden. Wie in Kapitel 5 bereits diskutiert wurde, stellt eine plötzliche Änderung der Soll-Trajektorie aufgrund einer Veränderung des dynamischen Umfelds zudem eine Herausforderung für die prädiktive Vorsteuerung dar, da in einem solchen Fall bereits gegensätzliche Stellgrößen versandt wurden und somit die Aktorik inkorrekt vorgesteuert wurde. Um diesem Problem zu begegnen, muss jede neue Trajektorie daher für eine Dauer  $\tau_{traj}$  mit der vorherigen Soll-Trajektorie identisch sein, wobei  $\tau_{traj}$  von der Systemdynamik der Aktorik sowie der Parametrisierung der FIR-Filter im Rahmen der prädiktiven Vorsteuerung abhängt<sup>221</sup> und somit Teil der Rückkopplungsschnittstelle von der FTR zur TP ist. Dies entspricht den folgenden Bedingungen:

$$t_{diff} = t_{act} + \tau_{traj} + \frac{1}{f_{TP}} \quad (6-2)$$

$$\mathcal{P}_{j+1} = \begin{cases} \mathcal{P}_j, & \text{wenn } t_{j+1} \leq t_{diff} \\ \text{frei wählbar,} & \text{wenn } t_{j+1} > t_{diff} \end{cases} \quad (6-3)$$

$$\dot{\mathcal{P}}_{j+1} = \begin{cases} \dot{\mathcal{P}}_j, & \text{wenn } t_{j+1} \leq t_{diff} \\ \text{frei wählbar,} & \text{wenn } t_{j+1} > t_{diff} \end{cases} \quad (6-4)$$

$$\ddot{\mathcal{P}}_{j+1} = \begin{cases} \ddot{\mathcal{P}}_j, & \text{wenn } t_{j+1} \leq t_{diff} \\ \text{frei wählbar,} & \text{wenn } t_{j+1} > t_{diff} \end{cases} \quad (6-5)$$

<sup>220</sup>Song, P. et al.: A novel integrated chassis controller for full drive-by-wire vehicles (2015), S. 10.

<sup>221</sup>Durch eine Abstimmung von  $\tau_{traj}$  auf die zeitliche Vorausschau der Vorsteuerung können wesentliche Anteile der Filterverstärkung im Hinblick auf eine fehlerhafte Vorsteuerung bei Umschaltungen neutralisiert werden.

wobei  $\mathcal{P}_{j+1}$ ,  $\dot{\mathcal{P}}_{j+1}$  und  $\ddot{\mathcal{P}}_{j+1}$  die kontinuierliche Fahrzeugbewegung der nächsten Trajektorie  $\mathcal{T}_{j+1}$  beschreibt.  $t_{\text{act}}$  ist der aktuelle Zeitpunkt,  $\mathcal{P}_j$ ,  $\dot{\mathcal{P}}_j$ ,  $\ddot{\mathcal{P}}_j$  die kontinuierliche aktuelle Soll-Trajektorie und  $t_{j+1}$  die kontinuierliche Zeit der nächsten Trajektorie. Das Vorgehen orientiert sich somit am von Ziegler vorgeschlagenen Verfahren für kontinuierliche Übergänge zwischen Trajektorien<sup>222</sup>. Die Anforderungen A4.7 ist damit erfüllt.

### Ruckgrenzen

Ein weiterer Aspekt der dynamischen Grenzen ist der maximale Ruck des Fahrzeugs, der durch die Aktoren realisiert werden kann (Anforderung A4.4). Diese Grenzen werden durch die charakteristische Systemdynamik verursacht, die den Drehmomentenaufbau der Aktorik begrenzt. Wie bereits in Kapitel 5 ausführlich diskutiert, führt ein Ruck innerhalb der Soll-Trajektorie, der größer ist als von den Aktoren ausgeführt werden kann, daher zu unerwünschten Regelabweichungen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass im normalen Fahrbetrieb der für den Fahrgastkomfort akzeptable Ruck deutlich unter den von den Aktoren gesetzten Grenzen liegt. Der einzige Grund, die Komfortgrenzen zu überschreiten, sind Notfallmanöver wie eine Notbremsung oder ein plötzliches Ausweichen. Der höchstmögliche Ruck tritt auf, wenn die Sollbeschleunigung innerhalb eines Trajektorienzeitschritts von der maximalen positiven Beschleunigung auf die negative Beschleunigungsgrenze des Fahrzeugs  $D_{\text{max}}$  gesetzt wird. Da dieses unkomfortable Verhalten nur im Falle eines Notmanövers von der TP geplant wird, sollte in diesen Situationen keine zusätzliche Begrenzung stattfinden. Zwar ist mit Regelabweichungen durch die Stellratenbegrenzung zu rechnen, in einer solchen Situationen ist es zur Minimierung des Bremswegs jedoch zielführend, die Möglichkeiten der Aktorik soweit möglich auszuschöpfen und diese nicht durch eine unsicherheitsbehaftete Schätzung zu limitieren. Weiterhin unterstützt die in Kapitel 5 entwickelte prädiktive Vorsteuerung die Umsetzung des transienten Fahrzeugverhaltens und reduziert den Bedarf für eine hohe Stellrate.

### Lenkwinkelgeschwindigkeitsgrenzen

Eine zusätzliche Einschränkung ergibt sich aus der begrenzten Dynamik der Lenkaktorik. Die ausführbare Querbeschleunigung hängt nicht primär vom möglichen Drehmoment des Lenkaktors ab (das Rückstellmoment des Rades wird im Vergleich zu den Aktorgrenzen als klein angenommen), sondern von der Fahrzeuggeschwindigkeit in Relation zur gefahrenen Kurvenkrümmung. Die Änderungsgeschwindigkeit der Radlenkwinkel  $\dot{\delta}_i$  ist jedoch grundsätzlich begrenzt. Diese Tatsache wird in erster Linie durch das Bohrmoment um die  $z$ -Achse des Rades verursacht und begrenzt daher die Änderungsrate des Kurswinkels an der Vorder- und Hinterachse des Fahrzeugs  $\dot{\psi}_{c,f}$  und  $\dot{\psi}_{c,r}$  auf  $\dot{\delta}_i$ . Diese Werte stehen in direktem Zusammenhang mit der Änderungsrate der Krümmung ( $\dot{\kappa}$ ), die durch den auf die Fahrzeug-Längsrichtung bezogenen Abstand zwischen der betrachteten Achse und der Position des Momentanpols des Fahrzeugs  $l_x$  bestimmt wird:

---

<sup>222</sup>Ziegler, J.: Optimale Bahn- und Trajektorienplanung für Automobile (2015), S. 55.

$$\dot{\kappa} = \frac{\dot{\psi}_c}{l_x} \quad (6-6)$$

Um verschiedene mögliche Positionen für den Momentanpol innerhalb einer geplanten Trajektorie zu berücksichtigen, muss eine untere Schranke für  $\dot{\kappa}_{\max}$  abgeschätzt werden. Die höchste Anforderung an eine Kurswinkeländerung an einer Achse tritt auf, wenn  $l_x = l$  ist, was einem Momentanpol des Fahrzeugs in Verlängerung der gegenüberliegenden Achse entspricht. Dies ist der Fall, wenn mit reiner Vorder- oder Hinterradlenkung gefahren wird. Die TP muss daher die Änderungsrate der Krümmung innerhalb der Trajektorie begrenzen:

$$\dot{\kappa}_{\max}(v) = \frac{\dot{\psi}_{c,\max}(v)}{l} \quad (6-7)$$

$\dot{\psi}_{c,\max}$  und folglich  $\dot{\kappa}_{\max}$  sind geschwindigkeitsabhängig, da das Bohrmoment aufgrund der Drehung um die  $z$ -Achse des Rades mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit deutlich abnimmt.  $\dot{\psi}_{c,\max}(v)$  muss entweder modellbasiert oder durch Experimente geschätzt werden, woraus die Lenkdynamik bei verschiedenen Geschwindigkeiten abgeleitet werden kann. Die Rückführung von  $\dot{\kappa}_{\max}(v)$  erfüllt somit die Anforderungen A4.5 und A4.6.

### Eskalationsmechanismus

Wie in Abschnitt 2.4.3 aufgezeigt wurde, ist die Schätzung der dynamischen Ausführungsgrenzen des Fahrzeugs mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet, die es unmöglich machen, sich vollständig auf die geschätzten Werte zu verlassen. Insbesondere die Schätzung des Reibwerts ist ungenau und eine belastbare Methode zur Bestimmung des Reibwerts von Straßenabschnitten vor dem Fahrzeug ist dem Autor nicht bekannt. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass die geschätzten Werte mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind.

Die Auswirkungen einer falschen Schätzung sind dabei je nach Art des Fehlers unterschiedlich. Ein geschätzter Reibwert, der unter dem tatsächlichen Wert liegt, führt dazu, dass die Soll-Trajektorie weniger dynamisch ist, als die realen Bedingungen zulassen. Aufgrund der vorhandenen Reibwertreserve führt dieser Fehler daher nicht zu einem instabilen Verhalten des Fahrzeugs, reduziert jedoch das Potential für Notmanöver innerhalb der TP. Da eine solche Einschränkung zu einem Unfall führen kann, der durch einen zu hoch geschätzten Reibwert zu vermeiden wäre, besteht die Anforderung, dass das angewandte Schätzverfahren eine Überschätzung der Reibwertverhältnisse gegenüber einer Unterschätzung bevorzugen muss. Dies bedeutet, dass das Schätzverfahren stets den höchsten anzunehmenden Reibwert ausgeben muss und alternative Schätzgrößen wie der Mindest- oder der wahrscheinlichste Reibwert verworfen werden.

Ist der geschätzte Reibwert jedoch zu hoch, ist die geplante Trajektorie nicht realisierbar. Die FTR ist dann nicht in der Lage, die gewünschten fahrdynamischen Zustände umzusetzen und die Regelabweichung nimmt so lange zu, wie die Soll-Trajektorie nicht eingehalten werden kann.

Dies kann in einem dynamischen Verkehrsumfeld zu einem sicherheitskritischen Verhalten des Fahrzeugs führen und muss daher durch einen Eskalationsmechanismus vermieden werden. Zu diesem Zweck muss die TP einen Mechanismus zur Neuplanung einer Soll-Trajektorie vorsehen, sobald ein bestimmtes Kriterium erfüllt ist (Anforderung A4.8). Als Kriterium wird analog zur etablierten BLS die Positions- und Gierwinkelabweichung des Fahrzeugs vorgeschlagen<sup>223</sup>, da diese Fehler die Ursache für sicherheitskritische Situationen wie eine Kollision sind. Um eine maximale Flexibilität der Gesamtarchitektur zu erreichen, wird eine Rückmeldung des maximalen Positionsfehlers von der FTR an die TP für alle drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs eingeführt:

$$\Delta_{\text{pos,max}} = \begin{pmatrix} \Delta_{s,\text{max}} \\ \Delta_{n,\text{max}} \\ \Delta_{\psi,\text{max}} \end{pmatrix} \quad (6-8)$$

Die TP muss die Soll-Trajektorie ausgehend von der aktuellen Pose neu planen und auch die verwendeten Beschleunigungsgrenzen reduzieren, wenn  $\Delta_{\text{pos,max}}$  den definierten Grenzwert überschreitet. Durch die Festlegung der zulässigen Grenze kann die FTR das Gesamtverhalten der Bewegungsregelung bestimmen. Wenn  $\Delta_{\text{pos,max}}$  auf null gesetzt wird, wird die Soll-Trajektorie in jedem Zyklus des Planers neu geplant, was zu einer HLS führt. Wird  $\Delta_{\text{pos,max}}$  auf unendlich gesetzt (oder auf Werte, die im Vergleich zu den auftretenden Regelabweichungen deutlich größer sind), werden die Soll-Trajektorien nie neu geplant und es wird eine LLS erreicht. Werte dazwischen entsprechen dem von Werling<sup>224a</sup> vorgeschlagenen BLS-Ansatz.

### 6.2.3 Gesamtschnittstelle

Aus den individuellen Überlegungen der vorherigen Abschnitte wird die in Gleichung 6-9 dargestellte standardisierte Schnittstelle für die Rückmeldung der Ausführungsgrenzen  $\mathbf{E}$  von der FTR an die TP abgeleitet. Die Berücksichtigung dieser Ausführungsgrenzen innerhalb der TP führt zur Generierung von physikalisch umsetzbaren Trajektorien unter der Voraussetzung, dass die Schätzung korrekt war. In Kombination mit dem vorgeschlagenen Eskalationsmechanismus werden somit die in Tabelle 6-1 definierten Anforderungen A4.1 bis A4.8 erfüllt.

---

<sup>223</sup>Um die Reaktionszeit der TP auf fahrdynamisch nicht umsetzbare Soll-Trajektorien zu minimieren, kann die Posenabweichung zudem um ihre zeitlichen Gradienten in Form von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsabweichungen ergänzt werden. Dies ist insbesondere für Fahrzeuge ratsam, die für einen (hoch-)dynamischen Einsatz vorgesehen sind, da die fehlende Umsetzbarkeit von Soll-Trajektorien bei ausschließlicher Betrachtung der Posenfehler erst mit zeitlicher Verzögerung erkannt wird<sup>224b</sup>.

<sup>224</sup>Werling, M.: Trajektoriengenerierung in Verkehrsszenarien (2011), a: S. 21; b: S. 20.

$$E = \begin{pmatrix} \delta_{i,\max} \\ \delta_{i,\min} \\ l \\ w \\ \frac{P_{tr,\max}}{m} \\ \mu_{\max} \cdot g \\ \dot{\kappa}_{\max}(v) \\ \Delta_{\text{pos},\max} \\ \tau_{\text{traj}} \end{pmatrix} \quad (6-9)$$

### 6.3 Zusammenfassung und Zwischenfazit

Für die in Abschnitt 3.3 identifizierte Herausforderung physikalisch nicht umsetzbarer Soll-Trajektorien innerhalb einer modular getrennten Bewegungsregelungsarchitektur für autonome Fahrzeuge wurde innerhalb dieses Kapitels eine technische Lösung präsentiert, die ein kapselungsbedingtes Defizit hinsichtlich der übergeordneten Performance verhindert. Dazu wurde auf Basis abgeleiteter teilfunktionsspezifischer Anforderungen eine standardisierte Rückmeldung kinematischer und dynamischer Ausführungsgrenzen von der FTR zur TP definiert. Der Ansatz ermöglicht die Verwendung verschiedener TP-Dienste innerhalb eines Fahrzeugs ohne dass bereits bei der Entwicklung selbiger fahrzeugspezifisches Wissen über nachgelagerte Module wie die FTR und die eingesetzte Aktorik benötigt wird. Die Ermittlung der physikalischen Grenzen wurde damit gezielt so verschoben, dass ein Planer universell angewendet werden kann, indem auf die standardisierte Schnittstelle zurückgegriffen wird, über die Konsequenzen aus den fahrzeugspezifischen Eigenschaften in Bezug auf die Fahrzeugführung bereitgestellt werden.

Der hier vorgestellte Ansatz ermöglicht eine stärkere Trennung von Planungs- und Ausführungsebene sowie die Verwendung verschiedener TP-Dienste mit einer gemeinsamen FTR innerhalb einer serviceorientierten Systemarchitektur. Dadurch kann die Wiederverwendbarkeit der entwickelten Funktionen erhöht und die notwendige Anpassung der Algorithmen an eine bestimmte Fahrzeugarchitektur reduziert werden.

Forschungsfrage 4 ist somit beantwortet. Die Testfalldefinition und Testdurchführung für das entwickelte Konzept erfolgt in Kapitel 8.

## 7 Synthese einer Referenzarchitektur für die gekapselte FTR<sup>225</sup>

In den vorangegangenen Kapiteln wurden schrittweise Maßnahmen für eine gekapselte FTR ohne signifikanten Performanceverlust ggü. dezentralen, funktionsorientierten Architekturen entwickelt. Während die Rückmeldung der Ausführungsgrenzen aus Kapitel 6 ein eigenständiges Modul darstellt, sind die Lokalisierungsangleichung (Kapitel 4) und die prädiktive Vorsteuerung (Kapitel 5) nur integriert in eine FTR funktionsfähig. Um die Wirksamkeit dieser Maßnahmen in einem konsistenten Gesamtsystem nachzuweisen und so einen Erkenntnisgewinn in Hinblick auf die zugrundeliegenden Forschungsfragen zu generieren, ist daher eine vollständig synthetisierte FTR erforderlich. Zu diesem Zweck wird im nun folgenden Kapitel eine Referenzarchitektur für die gekapselte FTR in einer modularen, serviceorientierten Systemarchitektur abgeleitet. Dabei existieren Auslegungsbereiche mit Wahlfreiheiten für eine konkrete Applikation, wie bspw. das verwendete Regelgesetz, und Bereiche, die zur Vermeidung von Defiziten hinsichtlich ihrer technischen Ausgestaltung Einschränkungen unterliegen. Zwischen diesen Bereichen wird konsequent unterschieden, so dass die entwickelte Referenzarchitektur als Grundlage für eine spätere Applikation in realen Anwendungen verwendet werden kann und den Gestaltungsspielraum der Entwickler nur eingrenzt, wenn dies zur Defizitvermeidung erforderlich ist. Es ist nicht die Zielsetzung dieses Kapitels, ein optimales Regelgesetz basierend auf definierten Metriken zu entwickeln oder den vollständigen Lösungsraum in Bereichen mit Wahlfreiheit aufzuzeigen. Es wird jedoch eine funktionsfähige Reglerarchitektur präsentiert, die in der Lage ist, die zuvor definierten Anforderungen zu erfüllen, was für sich bereits eine Neuerung darstellt.

Das Kapitel beantwortet somit die Forschungsfragen 7 und 8:

**FF 7:** Wie können bei der Architekturentwicklung unnötige Spezialisierungen in Bezug auf die verwendete Aktorik verhindert werden?

**FF 8:** Welche Folgen hat die Funktionstrennung, insbesondere auf die Architektur der Bewegungsregelung?

### 7.1 Teilfunktionen

Grundlage für die Referenzarchitektur ist erneut die erweiterte funktionale Spezifikation aus Abbildung 3-5. Die Knoten A311, A34 und A35 wurden in den vorherigen Kapiteln bereits

---

<sup>225</sup>Das Kapitel baut auf einer eigenen Veröffentlichung<sup>226</sup> auf.

<sup>226</sup>Homolla, T.; Winner, H.: Encapsulated trajectory tracking control for autonomous vehicles (2022).

technisch ausgestaltet. Bereiche, die zuvor bereits detailliert diskutiert wurden, werden daher nicht erneut ausführlich behandelt und es wird auf die jeweils relevanten Abschnitte in den Kapiteln 4 bis 6 verwiesen.

### 7.1.1 Schnittstellenbeschreibung

Alle Dienste, die eine Soll-Trajektorie für die automatisierte Fahrzeugführung planen, müssen eine identische Trajektorendefinition verwenden, um die Austauschbarkeit und dynamische Rekonfiguration der Dienste zu ermöglichen (Anforderungen A1.1 und A1.2). Die  $j$ -te Soll-Trajektorie  ${}_G\mathcal{T}_j$  besteht somit aus  $n_{\text{traj}}$  zeitgestempelten Sollwerten für die Pose  ${}_G\mathcal{P}_{j,i}$  des Fahrzeugs (horizontale Position + Gierwinkel) sowie deren ersten beiden zeitlichen Ableitungen:

$${}_G\mathcal{T}_j = \{(t_{\text{Lok},j}, {}_G\mathcal{P}_{\text{Lok},j}); (\xi_{\text{FZS}}, \xi_{\text{NP}}); (t_{j,i}, {}_G\mathcal{P}_{j,i}, {}_N\dot{\mathcal{P}}_{j,i}, {}_N\ddot{\mathcal{P}}_{j,i})_{i=1\dots n_{\text{traj}}}\} \quad (7-1)$$

Die Positionen sind im geodätischen ETRS89-Koordinatensystem angegeben, um die Erdkrümmung zu berücksichtigen (vgl. Abschnitt 2.1.2). Für die Übergänge zwischen der aktuellen Soll-Trajektorie  ${}_G\mathcal{T}_j$  und der nächsten Trajektorie  ${}_G\mathcal{T}_{j+1}$  gelten die in Abschnitt 6.2 aufgezeigten Bedingungen.

Neue Soll-Trajektorien werden von den Planungsdiensten zyklisch an die FTR gesendet. Durch die Bereitstellung einer Soll-Trajektorie mit deutlich höherer zeitlicher Länge als die Zykluszeit der TP wird sichergestellt, dass der FTR bei Latenzen und Jitter der TP nicht die Sollgrößen ausgehen. In Kombination mit einer absoluten Zeitreferenz für die enthaltenen Soll-Zustände wird somit Anforderung A1.4 erfüllt.

Um eine unabhängige Entwicklung von Planungs- und Regelungsalgorithmen zu ermöglichen, werden die geplanten Trajektorien aufgrund von Regelungsabweichungen grundsätzlich nicht verändert (LLS). Wie in Kapitel 6 hergeleitet, werden jedoch als Rückfallebene für falsch angenommene Beschleunigungsgrenzen des Fahrzeugs Grenzwerte für die größte akzeptable Regelabweichung definiert, bei deren Überschreitung die Neuplanung der Soll-Trajektorie ausgelöst wird (entspricht einer BLS).

Für die Referenzimplementierung der gekapselten FTR sind die grundlegenden Konzeptentscheidungen der Trajektorienschnittstelle (BLS, zeitliche Länge, absolute Zeitreferenzierung und Positionsangaben in ellipsoidischen Koordinaten) zwingend erforderlich. Bei der Kodierung der Inhalte (Abtastfrequenz und genutzter Rekonstruktionsmechanismus) bestehen jedoch Freiheitsgrade für eine konkrete Applikation.

Weiterhin wird für die entwickelte Lokalisierungsangleichung der fahrdynamische Ist-Zustand aus der FZS benötigt. Dieser umfasst mindestens die Ist-Pose, Ist-Geschwindigkeit und Ist-Beschleunigung des Fahrzeugs.

Eine vollständige Beschreibung aller relevanten Schnittstellen befindet sich im Anhang in Abschnitt A.8.

### 7.1.2 Vorverarbeitung

Die Soll-Positionen des Fahrzeugs innerhalb der Soll-Trajektorie  ${}_G\mathcal{T}_j$  werden im geodätischen Koordinatensystem ETRS89 bereitgestellt. Um für die Berechnung von kartesischen Regelabweichungen innerhalb der FTR verwendet werden zu können, werden die Positionen in jeder neuen Soll-Trajektorie in einem zusätzlichen Hilfsdienst ("Trajektorienvorverarbeitung")<sup>227</sup> in ein lokales, kartesisches Navigationskoordinatensystem transformiert ( ${}_N\mathcal{T}_j$ ). Der Ursprung dieses Koordinatensystems liegt in der Planungspose der jeweiligen Soll-Trajektorie und die geschätzte Ist-Fahrzeugposition aus der FZS wird in eben dieses Koordinatensystem transformiert, um eine Konsistenz zwischen den unabhängig ermittelten Größen herzustellen. Durch die zyklische Koordinatentransformation wird mit jeder neuen Planungspose innerhalb der Soll-Trajektorie eine neue tangentielle ENU-Ebene an das Erdellipsoid als Basis für den Soll-Ist-Vergleich erzeugt. Fehler durch die Erdkrümmung werden daher mit jeder neuen Planungspose zurückgesetzt, wodurch sichergestellt wird, dass die Erdkrümmung keine relevanten Auswirkungen auf die Regelgüte hat. Somit wird Anforderung A1.12 erfüllt.

Weiterhin wird die empfangene Soll-Trajektorie aus den mit Frequenz  $f_{\text{traj}}$  abgetasteten Werten rekonstruiert. Dabei wird auf die in Abschnitt 5.2.1 vorgestellte Interpolation zurückgegriffen. Die Wahl des Rekonstruktionsmechanismus kann dabei jedoch an die jeweiligen Randbedingungen einer konkreten Applikation angepasst werden.

Zur Sicherstellung konsistenter Lokalisierungsinformationen wird der in Kapitel 4 vorgestellte Mechanismus der Lokalisierungsangleichung verwendet, um die von der FZS erhaltenen Ist-Posen in ein gemeinsames Bezugssystem mit den Soll-Posen in der empfangenen Trajektorie umzurechnen.

### 7.1.3 Bestimmung des Kraftbedarfs

Die Bestimmung des Kraftbedarfs (Knoten A31) besteht aus den beiden Teilfunktionen der prädiktiven Vorsteuerung und der Zustandsrückführung. Die FTR besteht daher aus einer Zwei-Freiheitsgrade-Struktur, die sich aus einem Vorsteuerungs-Term und einer Zustandsrückführung (Abbildung 7-1) für jeden unabhängigen Freiheitsgrad des Fahrzeugs zusammensetzt. Die Einzelbeträge werden dann zum Gesamtkraftbedarf  $F_d$  summiert. Die prädiktive Vorsteuerung auf Basis von FIR Filtern wurde in Kapitel 5 bereits ausführlich diskutiert und technisch ausgestaltet. Sie ist zwingend erforderlich, um kapselungsbedingte Defizite zu verhindern.

---

<sup>227</sup>Eine zugehörige Dissertation von Stefan Ackermann mit dem Titel "Safe Halt as Fail-safe Concept for Automated Driving Systems" ist in Vorbereitung.

Die zweite Teilfunktion der Zustandsrückführung ist für die Kompensation von Modellungenauigkeiten und externen Störungen notwendig. Da Störungen in einer praktischen Anwendung immer (in variierenden Ausprägungen) auftreten, ist auch die Zustandsrückführung zwingend erforderlich. Für die konkrete technische Ausgestaltung liegen dabei jedoch Freiheitsgrade vor, da das verwendete Regelgesetz keine unmittelbare Wechselwirkung mit der Kapselung der FTR aufweist. Je nach konkreter Applikation und der damit verbundenen ODD (z. B. innerstädtischer Verkehr oder fahrdynamischer Grenzbereich) können daher verschiedene Regelgesetze und Auslegungsprinzipien zum Einsatz kommen.

Auf Basis der ODD der Fahrzeuge im Projekt UNICARagil wird für die weitere Reglersynthese eine Zustandsrückführung ausgestaltet. Gemäß Anforderung A1.7 muss die FTR die radindividuellen Sollwerte für die Einzelradaktorik allein auf der Grundlage der empfangenen Soll-Trajektorie und des aktuellen Ist-Zustands der Fahrzeugdynamik berechnen, um den maximalen Anwendungsbereich für verschiedene TP-Dienste zu gewährleisten. Da die Einzelradaktoren das Fahrzeug in ein holonomes System verwandeln, ist keine Berücksichtigung vergangener Fahrzeugzustände erforderlich, was eine direkte und unabhängige Korrektur aller drei Freiheitsgrade ermöglicht. Diese Tatsache wird ausgenutzt, um ein Regelgesetz abzuleiten, das im Vergleich zu modellprädiktiven Regelungsansätzen eine deutlich geringere Komplexität und einen geringeren Berechnungsaufwand aufweist. Dabei kommen lineare Regelgesetze zum Einsatz, da erwartet wird, dass die Nichtlinearitäten der Aktorik von den unterlagerten Regelkreisen der Dynamikmodule kompensiert werden. Durch die Verwendung unterschiedlicher Zeitkonstanten für die Rückkopplungsterme innerhalb der Zustandsrückführung kann die Dynamik der einzelnen Zustände manipuliert werden.

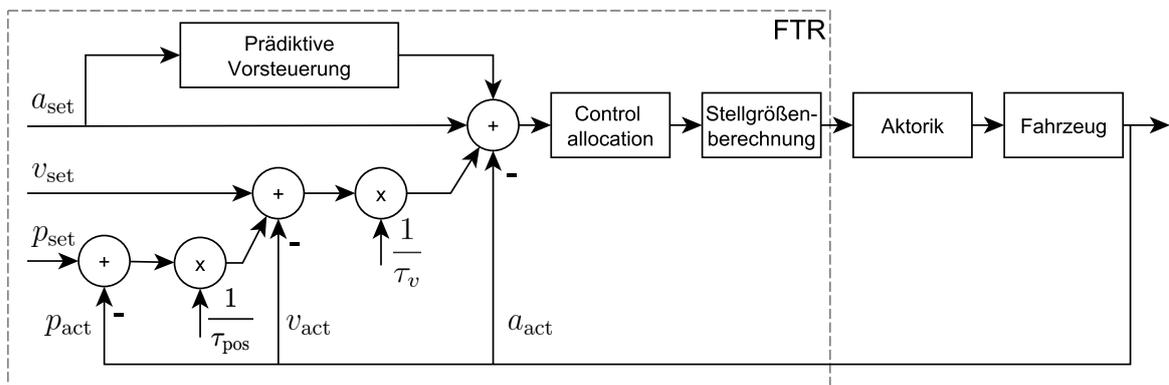


Abbildung 7-1: Entwickelte Reglerarchitektur, bestehend aus einer unabhängigen prädiktiven Vorsteuerung und einer linearen Zustandsrückführung<sup>228</sup>. Die Vorsteuerung und Zustandsrückführung wird für jeden der drei unabhängigen Freiheitsgrade des Fahrzeugs unabhängig implementiert und die Kraftbedarfe anschließend summiert.

Der Vorteil der Architektur in Abbildung 7-1 ist die Fortführung des modularen Ansatzes. Vorsteuerung, Zustandsrückführung, Control Allocation und Stellgrößenberechnung können jeweils

<sup>228</sup>Homolla, T.; Winner, H.: Encapsulated trajectory tracking control for autonomous vehicles (2022), S. 300.

unabhängig voneinander entwickelt und bei Bedarf ausgetauscht werden, ohne dass andere Teile der FTR ebenfalls geändert werden müssen<sup>229</sup>.

Das betrachtete Fahrzeug ist durch die Einzelradaktoren überaktuiert. Diese Eigenschaft stellt eine Herausforderung bei der Verteilung des Gesamtkraftbedarfs auf die einzelnen Aktoren dar (Control Allocation). Um dieses Problem zu lösen, werden die Sollwerte für Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung in ein Frenet-Koordinatensystem transformiert, das durch den Kurswinkel entlang des Pfades der geplanten Trajektorie  $\psi_{c,set}$  definiert ist (vgl. Abbildung 2-4). Diese Transformation ermöglicht, Teilmengen des Gesamtkraftbedarfs zu identifizieren, die von einem bestimmten Aktor (z. B. Lenk- oder Antriebsaktor) aufgebracht werden und so die Freiheitsgrade der 8-zu-3 Überaktuierung zu reduzieren. Der Längskraftbedarf in Frenet-Koordinaten wird von den Antriebs- oder Bremsaktoren bereitgestellt, während der Querkraftbedarf ausschließlich von den Lenkaktoren erzeugt wird. Der translatorische Kraftbedarf  ${}_F\mathbf{F}_{d,t}$  ist definiert durch:

$$\begin{aligned} {}_F\mathbf{F}_{d,t} &= \begin{bmatrix} F_{d,s,t} \\ F_{d,n,t} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \left( \frac{p_{set,s} - p_{act,s}}{\tau_{pos}} + v_{set,s} - v_{act,s} \right) \frac{1}{\tau_v} + a_{set,s} - a_{act,s} \cdot m + a_{set,ff,s} \cdot m \\ \left( \frac{p_{set,n} - p_{act,n}}{\tau_{pos}} + v_{set,n} - v_{act,n} \right) \frac{1}{\tau_v} + a_{set,n} - a_{act,n} \cdot m + a_{set,ff,n} \cdot m \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7-2)$$

wobei set für die aus der Soll-Trajektorie extrahierten Sollwerte steht und  $s$  bzw.  $n$  die Frenet-Koordinatenachsen sind. Es ist wichtig zu beachten, dass  $a_{set,n}$  nicht durch  $\dot{v}_{set,n}$  definiert ist, sondern unabhängig innerhalb der TP berechnet wird, da sonst keine Zentripetalbeschleunigung berücksichtigt werden würde.

Für die Transformation von Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen vom kartesischen Navigationskoordinatensystem in das Frenet-Koordinatensystem wird eine Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_F$  definiert:

$$\mathbf{R}_F = \begin{bmatrix} \cos(\psi_{c,set}) & -\sin(\psi_{c,set}) \\ \sin(\psi_{c,set}) & \cos(\psi_{c,set}) \end{bmatrix} \quad (7-3)$$

Unter Verwendung von  $\mathbf{R}_F$  sind die notwendigen Transformationen vom Navigations- zum Frenet-Koordinatensystem gegeben durch:

$$\begin{bmatrix} p_{act,s} \\ p_{act,n} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_F \begin{bmatrix} p_{act,ea} - p_{set,ea} \\ p_{act,no} - p_{set,no} \end{bmatrix} \quad (7-4)$$

<sup>229</sup>Die Gesamtstabilität des geschlossen Regelkreises muss dabei stets erhalten bleiben.

$$\begin{bmatrix} v_{\text{act},s} \\ v_{\text{act},n} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_F \begin{bmatrix} v_{\text{act},ea} \\ v_{\text{act},no} \end{bmatrix} \quad (7-5)$$

$$\begin{bmatrix} a_{\text{act},s} \\ a_{\text{act},n} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_F \begin{bmatrix} a_{\text{act},ea} \\ a_{\text{act},no} \end{bmatrix} \quad (7-6)$$

$$\begin{bmatrix} p_{\text{set},s} \\ p_{\text{set},n} \end{bmatrix} = 0 \quad (7-7)$$

$$\begin{bmatrix} v_{\text{set},s} \\ v_{\text{set},n} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_F \begin{bmatrix} v_{\text{set},ea} \\ v_{\text{set},no} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi_{c,\text{set}}) \cdot v_{\text{set},ea} - \sin(\psi_{c,\text{set}}) \cdot v_{\text{set},no} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7-8)$$

$$\begin{bmatrix} a_{\text{set},s} \\ a_{\text{set},n} \end{bmatrix} = \mathbf{R}_F \begin{bmatrix} a_{\text{set},ea} \\ a_{\text{set},no} \end{bmatrix} \quad (7-9)$$

Die Ist-Positionen in Navigationskoordinaten  $p_{\text{act},ea}$  bzw.  $p_{\text{act},no}$  werden über eine Koordinatentransformation aus der Ist-Pose in geodätischen Koordinaten  ${}_G\mathcal{P}_{\text{FZS}}$  berechnet. Zusätzlich zur translatorischen Fahrzeugbewegung wird die Gierbewegung durch einen dritten unabhängigen Regelkreis kontrolliert. Der Giermomentbedarf  $M_{d,\psi}$  ist definiert durch:

$$M_{d,\psi} = \left( \frac{\psi_{\text{set}} - \psi_{\text{act}}}{\tau_{\text{pos}}} + \dot{\psi}_{\text{set}} - \dot{\psi}_{\text{act}} \right) \frac{1}{\tau_v} + \ddot{\psi}_{\text{set}} - \ddot{\psi}_{\text{act}} \cdot \Theta_\psi + \ddot{\psi}_{\text{set,ff}} \cdot \Theta_\psi \quad (7-10)$$

#### 7.1.4 Control Allocation

Auf der Grundlage des ermittelten Kraft- und Giermomentenbedarfs des Fahrzeugs erfordert die überaktuierte Fahrzeugstruktur eine Auflösungsstrategie, bei der für jedes Rad ein individueller Kraftbedarf abgeleitet wird, die sog. Control Allocation. Dabei können verschiedene sekundäre Zielsetzungen verfolgt werden, z. B. die Minimierung der Reibwertausnutzung oder des Energiebedarfs (vgl. Abschnitt 2.2.2), woraus der translatorische Kraftbedarf  ${}_F\mathbf{F}_{d,t,i}$  für jedes Rad  $i \in \{1, 2, 3, 4\}$  resultiert. Die eingesetzte Strategie kann erneut anwendungsspezifisch angepasst werden und besitzt keine unmittelbaren Auswirkung auf die Kapselung der FTR.

Das Ergebnis aus 7-10 wird in einen zusätzlichen Kraftbedarf für jedes Rad  ${}_F\mathbf{F}_{d,\psi,i}$  umgewandelt, indem  $M_{d,\psi}$  in Kraftkomponenten mit maximalem Hebelarm zum Fahrzeugmittelpunkt zerlegt wird (siehe Abbildung 7-2).

Der Gesamtkraftbedarf für jedes Rad in Längs- und Querrichtung ist dann gegeben durch:

$${}^F\mathbf{F}_{d,i} = \begin{bmatrix} F_{d,s,i} \\ F_{d,n,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{d,s,t,i} + F_{d,s,\psi,i} \\ F_{d,n,t,i} + F_{d,n,\psi,i} \end{bmatrix} \quad (7-11)$$

mit

$$\begin{bmatrix} F_{d,s,\psi,1} \\ F_{d,n,\psi,1} \\ F_{d,s,\psi,2} \\ F_{d,n,\psi,2} \\ F_{d,s,\psi,3} \\ F_{d,n,\psi,3} \\ F_{d,s,\psi,4} \\ F_{d,n,\psi,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\arctan(\frac{l}{w}) + \psi_{c,set}) \\ \sin(\arctan(\frac{l}{w}) + \psi_{c,set}) \\ \sin(\arctan(\frac{w}{l}) + \psi_{c,set}) \\ \cos(\arctan(\frac{w}{l}) + \psi_{c,set}) \\ -\sin(\arctan(\frac{w}{l}) + \psi_{c,set}) \\ -\cos(\arctan(\frac{w}{l}) + \psi_{c,set}) \\ \cos(\arctan(\frac{l}{w}) + \psi_{c,set}) \\ -\sin(\arctan(\frac{l}{w}) + \psi_{c,set}) \end{bmatrix} \cdot \frac{M_{d,\psi}}{4 \cdot l_\psi} \quad (7-12)$$

wobei  $l$  der Radstand,  $w$  die Spurweite und  $l_\psi$  der Abstand zwischen Fahrzeugmitte und Radaufstandspunkt ist. Die Räder sind in der Reihenfolge vorne-links, vorne-rechts, hinten-links, hinten-rechts nummeriert. Die kinematischen Beziehungen sind in der Abbildung 7-2 dargestellt.

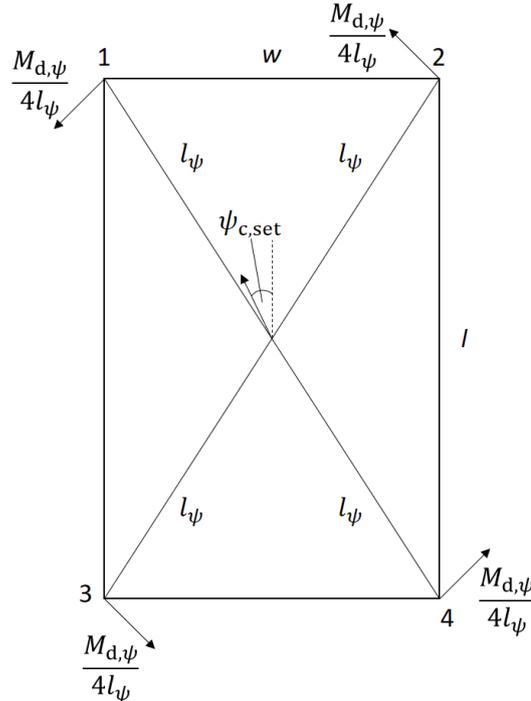


Abbildung 7-2: Kinematische Beziehungen zur Berechnung der für die Gierbewegung benötigten Kräfte<sup>230</sup>. Die Zerlegung von  $M_{d,\psi}$  maximiert den Hebelarm  $l_\psi$  zur Fahrzeugmitte, so dass das Giermoment mit den geringsten möglichen Kräften an den Radaufstandspunkten erzeugt wird.

<sup>230</sup>Homolla, T.; Winner, H.: Encapsulated trajectory tracking control for autonomous vehicles (2022), S. 302.

Gleichung 7-12 beschreibt eine gleichmäßige Verteilung der Kräfte auf alle Räder, um das gewünschte Giermoment zu erzeugen. Es sind auch ungleiche Verteilungen möglich, so lange eine identische Summe von Längs- und Querkräften über alle Radaufstandspunkte sowie ein identisches Giermoment sichergestellt wird. Diese Tatsache kann zur Kompensation von Aktordegradationen oder zur Gewährleistung der Fahrzeugstabilität bei Fahrten nahe an der Reibwertgrenze genutzt werden.

### 7.1.5 Stellgrößenberechnung

Nachdem ein Kraftbedarf für jedes Rad bestimmt wurde, besteht der letzte Schritt der FTR aus der Berechnung von Stellgrößen für die unterlagerten Regelkreise der Aktorik (Knoten A33 in Abbildung 3-5). Dieser Schritt kann sich je nach gewählter Schnittstelle zur Aktorik unterscheiden. Für den weiteren Verlauf dieser Arbeit wird angenommen, dass die Lenkaktorik Soll-Lenkwinkel und die Antriebs- bzw. Bremsaktorik Soll-Drehmomente entgegennimmt.

Zunächst wird die Soll-Geschwindigkeitsrichtung der Radaufstandspunkte  $\psi_{c,set,i}$  aus dem gewünschten Kurswinkel und der Gierrate der Soll-Trajektorie bestimmt:

$$\begin{bmatrix} v\psi_{c,set,1} \\ v\psi_{c,set,2} \\ v\psi_{c,set,3} \\ v\psi_{c,set,4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan\left(\frac{v_{set,ff,x} - \dot{\psi}_{set,ff} \cdot \frac{w}{2}}{v_{set,ff,y} + \dot{\psi}_{set,ff} \cdot \frac{l}{2}}\right) \\ \arctan\left(\frac{v_{set,ff,x} + \dot{\psi}_{set,ff} \cdot \frac{w}{2}}{v_{set,ff,y} + \dot{\psi}_{set,ff} \cdot \frac{l}{2}}\right) \\ \arctan\left(\frac{v_{set,ff,x} - \dot{\psi}_{set,ff} \cdot \frac{w}{2}}{v_{set,ff,y} - \dot{\psi}_{set,ff} \cdot \frac{l}{2}}\right) \\ \arctan\left(\frac{v_{set,ff,x} + \dot{\psi}_{set,ff} \cdot \frac{w}{2}}{v_{set,ff,y} - \dot{\psi}_{set,ff} \cdot \frac{l}{2}}\right) \end{bmatrix} \quad (7-13)$$

wobei  $v_{set,ff,x}$  und  $v_{set,ff,y}$  die Soll-Geschwindigkeit im Fahrzeugkoordinatensystem darstellen. Da die Soll-Geschwindigkeitsrichtungen der Räder maßgeblich für die berechneten Soll-Lenkwinkel verantwortlich sind, wird für die Berechnung auf die Werte des Soll-Kurswinkels und der Soll-Gierrate der prädiktiven Vorsteuerung zurückgegriffen. Um eine schnelle Korrektur von lateralen Regelabweichungen bzw. Gierwinkelabweichungen zu gewährleisten, ist zudem eine kinematische Korrektur von lateralen Positionsabweichungen bzw. Gierwinkelabweichungen erforderlich. Dazu wird die laterale Soll-Geschwindigkeit aus der Trajektorie  $v_{set,ff,n,traj}$  im Frenet-Koordinatensystem mit einem Korrekturterm auf Basis der Querabweichung überlagert:

$$v_{set,ff,n} = v_{set,ff,n,traj} + \frac{\Delta_{pos,n}}{\tau_{pos}} \quad (7-14)$$

$v_{set,ff,n}$  wird anschließend mit einer Rotation analog zu Gleichung 7-8 in das Fahrzeug-Koordinatensystem transformiert.

Für die Gierwinkelabweichung ergibt sich die kinematische Korrektur durch:

$$\dot{\psi}_{\text{set,ff}} = \dot{\psi}_{\text{set,ff,traj}} + \frac{\Delta\psi}{\tau_{\text{pos}}} \quad (7-15)$$

Die resultierenden Größen  $v_{\text{set,ff},x}$ ,  $v_{\text{set,ff},y}$  und  $\dot{\psi}_{\text{set,ff}}$  werden in Gleichung 7-13 verwendet.

Mithilfe der Soll-Geschwindigkeitsrichtungen der Radaufstandspunkte und der Soll-Radkräfte werden anschließend die Stellgrößen für die Aktorik (Soll-Radlenkwinkel  $\delta_{d,i}$  und Soll-Radmoment  $M_{d,i}$ ) berechnet. Dazu werden die Soll-Radkräfte zunächst im Frenet-Koordinatensystem der Radaufstandspunkte (basierend auf  ${}_V\psi_{c,\text{set},i}$ ) zerlegt (Index w) und anschließend die Stellgrößen berechnet:

$$\mathbf{u}_i = \begin{bmatrix} M_{d,i} \\ \delta_{d,i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{d,w,s,i} \cdot r_{\text{dyn}} \\ \frac{F_{d,w,n,i}}{c_\alpha} + {}_V\psi_{c,\text{set},i} \end{bmatrix} \quad (7-16)$$

wobei  $c_\alpha$  eine geschätzte Schräglaufsteifigkeit des Reifens ist. Da die exakte Schräglaufsteifigkeit des Reifens i. d. R. nicht bekannt und zudem im Betrieb durch Radlastschwankungen variabel ist, kann nur ein Näherungswert zur Berechnung der Stellgrößen verwendet werden. Dabei ist es erstrebenswert, die Schräglaufsteifigkeit konservativ abzuschätzen, d. h. eher einen zu hohen Wert anzunehmen. Eine zu hoch angenommene Steifigkeit verringert die Regelgüte, da zunächst zu geringe Lenkwinkel gestellt werden und die daraus resultierende Abweichung in der Folge korrigiert werden muss. Dies ist jedoch ggü. einer Unterschätzung zu bevorzugen, da in diesem Fall ein negativer Einfluss auf die Stabilität des lateralen Regelkreises besteht<sup>231</sup>.

Die Soll-Radlenkwinkel ergeben sich daher ausschließlich aus den in der Trajektorie enthaltenen Größen  ${}_V\psi_{c,\text{set},i}$ ,  $\psi_{\text{set}}$  und  $\dot{\psi}_{\text{set}}$  sowie der kinematischen Korrektur im Falle von Regelabweichungen. Dies führt dazu, dass die Lenkstrategie des Fahrzeugs (z. B. Vorder- oder Allradlenkung) allein aus der Soll-Trajektorie abgeleitet wird, ohne dass die FTR vorab Festlegungen treffen muss. Diese Eigenschaft erfüllt Anforderung A1.7.

Die Verteilung von  $M_{d,i}$  auf die Antriebs- und Bremsaktoren erfolgt in Abhängigkeit von der aktuellen Fahrtrichtung und davon, ob bestimmte Manöver (z. B. seitliches Einparken) beabsichtigt sind. Um einen Lenküberschlag bei Fahrten entgegen der Vorzugsrichtung zu vermeiden, werden die Soll-Geschwindigkeitsrichtungen der Radaufstandspunkte in diesem Fall in den entgegengesetzten Quadranten gespiegelt (entspricht einer Verschiebung um 180°). Für ein seitliches Einparken existiert weiterhin eine gesonderte Aufteilung der Lenkwinkel. Die Sollwerte  $\mathbf{u}_i$  werden von Low-Level-Reglern in jedem einzelnen Radaktor umgesetzt. Die dabei zum Einsatz kommenden Regelverfahren sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.

---

<sup>231</sup> Im Falle einer Unterschätzung werden zu hohe Lenkwinkel angefordert, die in der Folge durch eine erneut zu hohe Gegenreaktion kompensiert werden. Dies kann zu einem Aufschwingen des Regelkreises führen.

## 7.2 Zusammenfassung

Das Ergebnis der entwickelten Referenzarchitektur für die FTR ist in Abbildung 7-3 dargestellt und stellt die technische Ausgestaltung der erweiterten funktionalen Spezifikation in Abbildung 3-5 dar.

Die drei Dienste Trajektorienvorverarbeitung, FTR und Ausführungsgrenzenbestimmung sind unabhängig voneinander und werden asynchron ausgeführt. Der Programmablauf der Trajektorienvorverarbeitung wird von einer neuen Soll-Trajektorie am Eingang des Dienstes getriggert und enthält die Koordinatentransformation der Soll-Positionen vom geodätischen in das Navigationskoordinatensystem. Die FTR hingegen wird mit der festen Frequenz  $f_{\text{FTR}}$  zyklisch ausgeführt, unabhängig von der Verfügbarkeit neuer Eingangsdaten. Die Ausführungsgrenzenbestimmung ist ebenfalls ein unabhängiger Dienst, der asynchron ausgeführt wird. Dargestellt ist jeweils ein Zyklus jedes Dienstes, der Programmablauf wird somit zyklisch wiederholt.

Die grün markierten Schritte in Abbildung 7-3 sind zwingend erforderlich, um kapselungsbedingte Defizite zu vermeiden und unterliegen den in den vorangegangenen Kapiteln hergeleiteten Einschränkungen hinsichtlich ihrer technischen Ausgestaltung. Die übrigen Schritte sind für eine vollständige FTR ebenfalls erforderlich, können jedoch je nach konkreter Applikation unterschiedlich ausgestaltet und angepasst werden. Forschungsfrage 7 und 8 sind somit beantwortet.

## 7 Synthese einer Referenzarchitektur für die gekapselte FTR

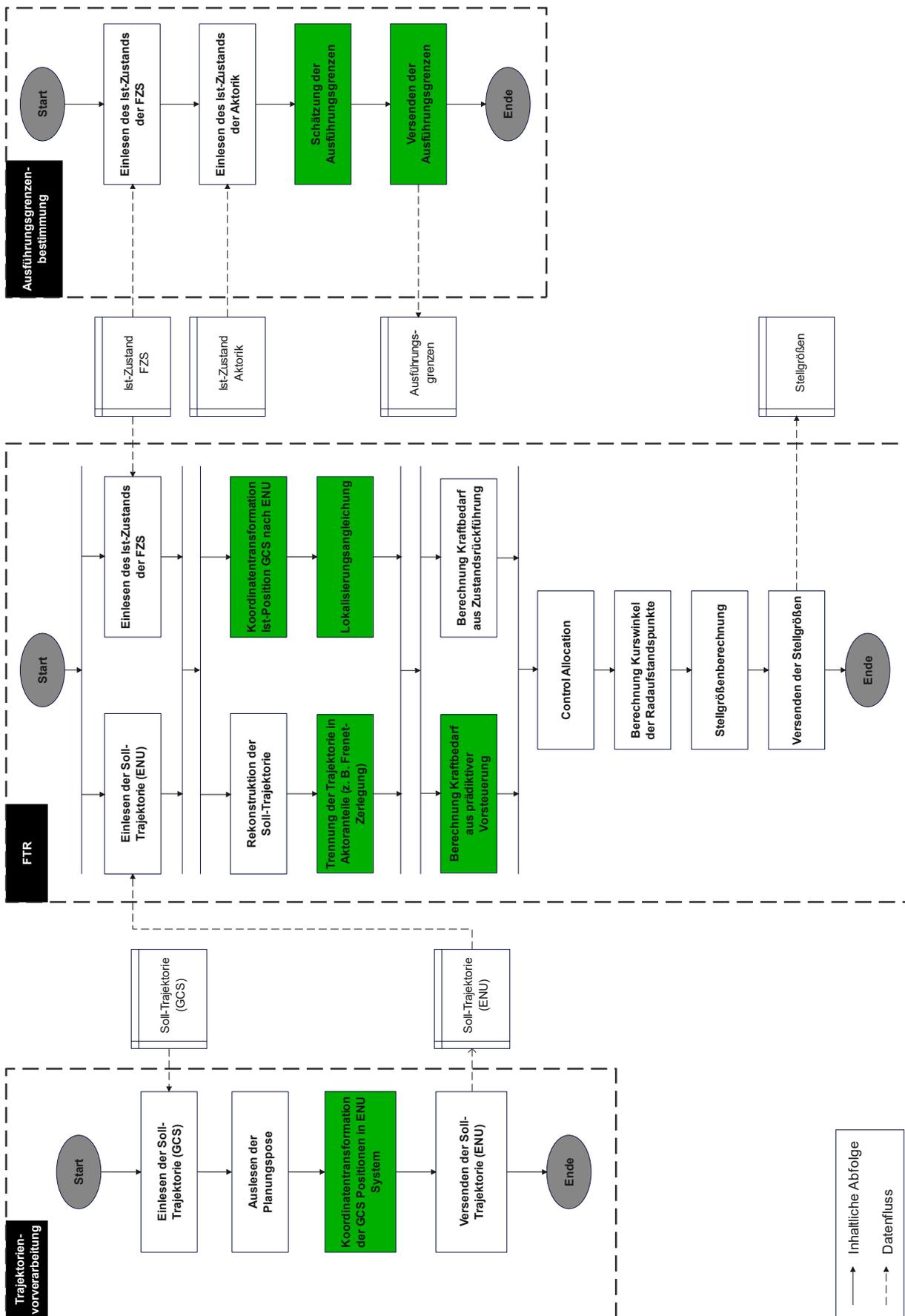


Abbildung 7-3: Programmablauf der FTR und der unterstützenden Dienste der Trajektorienvorverarbeitung und Ausführungsgrenzenbestimmung. Grün markierte Schritte sind zur Vermeidung kapselungsbedingter Defizite zwingend erforderlich. Dargestellt ist jeweils ein Zyklus der Dienste.

---

## 8 Implementierung und Verifikation der Anforderungen an die gekapselte FTR

Die Arbeiten der vorherigen Kapitel bauen auf einer theoretischen Analyse auf. Um die Erfüllung der abgeleiteten Anforderungen zu verifizieren und die Vermeidung von Defiziten durch die entwickelten Gegenmaßnahmen nachzuweisen, wird innerhalb des nun folgenden Kapitels das entwickelte Konzept getestet. Dazu wird die im vorangegangenen Kapitel abgeleitete Referenzarchitektur für die FTR als Dienst in der ASOA Middleware implementiert und es werden verschiedene Testumgebungen präsentiert. Anschließend werden Testfälle für die einzelnen Anforderungen bzw. Herausforderungen abgeleitet, die Gegenmaßnahmen im Rahmen der Tests angewendet und die Ergebnisse ausgewertet.

Das Kapitel beantwortet somit die finale Forschungsfrage 9:

**FF 9:** Können die identifizierten Herausforderungen im Rahmen einer Applikation auf ein reales Fahrzeug beherrscht werden?

### 8.1 Implementierung als ASOA Dienst

Die in Kapitel 7 dargestellte Referenzarchitektur für die FTR wird als ASOA-Dienst implementiert. Dazu wird die Funktion der FTR zunächst in mehrere Tasks aufgeteilt. Die zyklischen Berechnungen der FTR finden innerhalb eines sog. Periodic Tasks mit der festen Frequenz  $f_{\text{FTR}} = 50 \text{ Hz}$  statt. Der Dienst verfügt des Weiteren über je einen sog. Conditional Task für jede Eingangsschnittstelle des Dienstes. Conditional Tasks verfügen über keine festgelegte Frequenz, sondern werden automatisiert getriggert, sobald neue Eingangsdaten vorliegen. Innerhalb der Conditional Tasks werden die empfangenen Eingangsdaten über globale Variablen dem Periodic Task zur Verfügung gestellt. Um dabei Race Conditions zu vermeiden, kommen wechselseitige Ausschlüsse über das Mutex-Verfahren zum Einsatz<sup>232</sup>. Die gesamte Struktur ist in Abbildung 8-1 dargestellt.

Um zu verhindern, dass die FTR aus ungültigen Eingangsdaten Stellgrößen für die Aktorik der Fahrzeuge berechnet, beinhaltet der Periodic Task vorgeschaltete Überprüfungen der Eingangsdaten auf Gültigkeit. Nur wenn diese Überprüfungen bestanden werden, werden nachfolgend die Berechnungen der FTR durchgeführt und Stellgrößen versendet.

Die Kommunikation der ASOA findet über Ethernet sowie dem Data-Distribution-Service (DDS) und dem Real-Time-Publish-Subscribe (RTPS) Protokoll statt<sup>233</sup>. Der implementierte Dienst kann

---

<sup>232</sup>Tanenbaum, A. S.; Bos, H.: Moderne Betriebssysteme (2016), S. 179-180.

<sup>233</sup>Kampmann, A. et al.: Implementation of the Real-Time Publish-Subscribe Protocol (2019).

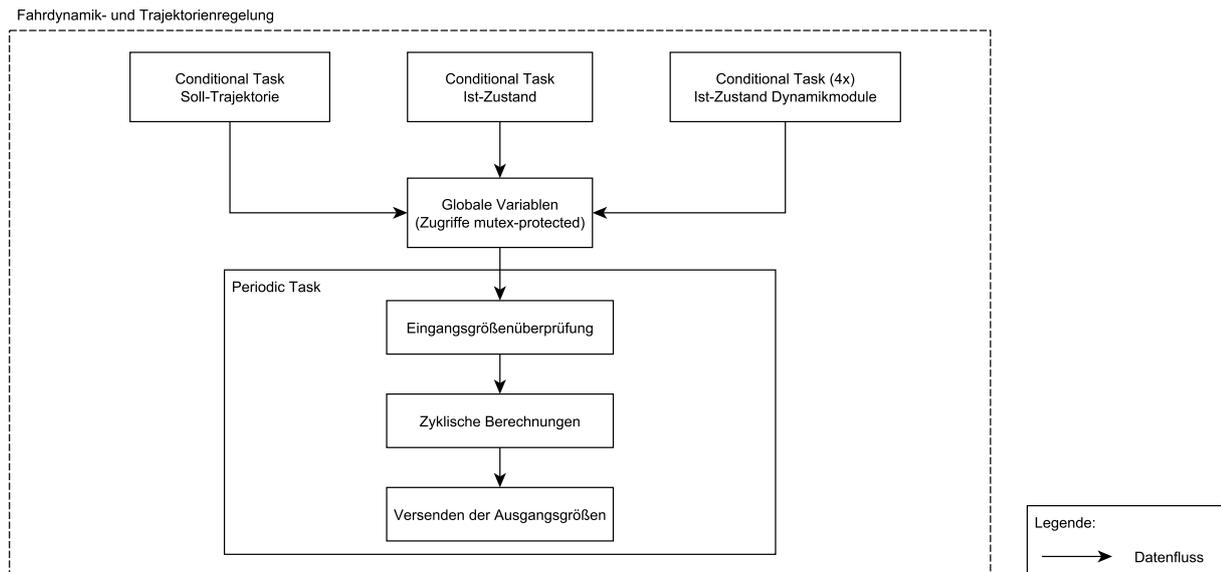


Abbildung 8-1: Softwarearchitektur des ASOA-Dienstes der FTR.

dabei sowohl auf Linux Systemen als auch auf echtzeitfähiger embedded Hardware mit FreeRTOS Betriebssystem zum Einsatz kommen. In letzterem Fall wird die Einhaltung der Ausführung des Periodic Task mit der Frequenz  $f_{FTR}$  garantiert (sofern die verfügbare Rechenleistung dies erlaubt).

Um die Entkopplung der Dienste innerhalb der Wirkkette des automatisierten Fahrens zu ermöglichen, sind konsistente Zeitinformationen für alle Dienste erforderlich. Alle verwendeten Steuergeräte werden daher über das Precision Time Protocol (PTP)<sup>234</sup> mit einer zentralen Uhr auf Basis des empfangenen GNSS Signals synchronisiert. Dem Dienst der FTR stehen daher an beliebiger Stelle des Programmablaufs aktuelle und konsistente Zeitinformationen über eine Schnittstelle zum Betriebssystem zur Verfügung.

## 8.2 Testumgebungen

Für die Testdurchführung im Rahmen der Verifikation der Anforderungen kommen verschiedene Testumgebungen zum Einsatz. Neben einem Simulationsmodell der Fahrzeuge in der Simulationsumgebung IPG CarMaker<sup>235</sup> steht eine Software-in-the-Loop (SiL) und Hardware-in-the-Loop (HiL) Testumgebung zur Verfügung. Des Weiteren werden Versuche mit den Realfahrzeugen des Projekts UNICARagil durchgeführt.

<sup>234</sup>Watt, S. T. et al.: Understanding and applying precision time protocol (2015).

<sup>235</sup>IPG-Automotive: CarMaker (2022).

### 8.2.1 CarMaker Simulationsmodell

Die FTR stellt ein rückgekoppeltes System dar und ist für ihre Funktionserfüllung daher auf die Rückmeldung des fahrdynamischen Ist-Zustands angewiesen. Um das Verhalten der Aktorik innerhalb der Dynamikmodule und die Fahrdynamik abzubilden, wurde von Elster<sup>236</sup> und Klauer<sup>237</sup> ein Simulationsmodell der Dynamikmodule erstellt und in die Simulationsumgebung IPG CarMaker integriert.

Das Gesamtsystem der Dynamikmodule besteht dabei aus domänenspezifischen Teilmodellen für die Lenk-, Antriebs- und Bremsaktorik sowie den Reifen und die Kinematik der Radaufhängung. Für die Dynamik des restlichen Fahrzeugs wird auf interne CarMaker Modelle zurückgegriffen, die mit den Werten des autoSHUTTLE parametrisiert werden (Abmessungen, Massen und Massenverteilung). Das Gesamtmodell ermöglicht somit die Simulation des Gesamtfahrzeugs unter Nutzung der elektrischen Einzelradaktorik. Für die FTR stehen auf diese Weise alle Schnittstellen äquivalent zum Realfahrzeug zur Verfügung. Die Parametrisierung der Aktor-Systemdynamik wurde dabei von Elster und Klauer auf Basis verfügbarer Messdaten und Literaturwerten vorgenommen. Eine exakte Übereinstimmung aller relevanten Dynamiken mit dem Realfahrzeug kann durch die modellbedingt stets vorhandenen Vereinfachungen daher nicht garantiert werden. Dieser Umstand wird bei der Analyse der unter Zuhilfenahme des Simulationsmodells erhaltenen Ergebnisse berücksichtigt.

Eine Übersicht über die Gesamtstruktur des Simulationsmodells ist in Abbildung A-2 in Anhang A.2 dargestellt.

### 8.2.2 Software-in-the-Loop

Die erste verwendete Testumgebung stellt einen SiL-Aufbau dar. Dabei werden die Funktionen der FTR direkt in den Zyklus der CarMaker Simulation<sup>238</sup> integriert und so eine perfekte Synchronisierung der FTR mit den übrigen beteiligten Komponenten sichergestellt (vgl. Abbildung 8-2). Die ASOA-Middleware kommt in der SiL-Testumgebung nicht zum Einsatz.

Die SiL-Umgebung ist damit insb. geeignet, um Funktionstests ohne den Einfluss einer fehlenden Synchronisierung zu untersuchen, da durch den gemeinsamen Programmzyklus alle Berechnungen deterministisch und perfekt synchronisiert durchgeführt werden. Weiterhin sind beschleunigte Simulationen mit einer vielfach erhöhten Simulationsgeschwindigkeit ggü. der Echtzeit möglich. Auch der Zugriff auf anderweitig nicht verfügbare Zwischengrößen ist im SiL problemlos möglich.

Für Simulationen mit dynamisch berechneten Soll-Trajektorien wird an die SiL-Testumgebung die TP aus den UNICAR*agil* Fahrzeugen über eine Schnittstelle zum Robot-Operating-System (ROS)

<sup>236</sup>Elster, L.: Entwicklung eines Simulationsmodells für elektrische Radnabenantriebe (2022).

<sup>237</sup>Klauer, V.: Systemidentifikation elektrischer Einzelradaktorik (2022).

<sup>238</sup>IPG-Automotive: CarMaker 9.1 Programmer's Guide (2020), S. 41.

angebunden. Auf diese Weise werden Informationen über das Umfeld aus der CarMaker Simulation der TP bereitgestellt und die geplante Soll-Trajektorie zurückgesandt. Diese Erweiterung wird im Folgenden ausgenutzt, um die Interaktion mit der realen TP außerhalb der Fahrzeuge zu untersuchen.

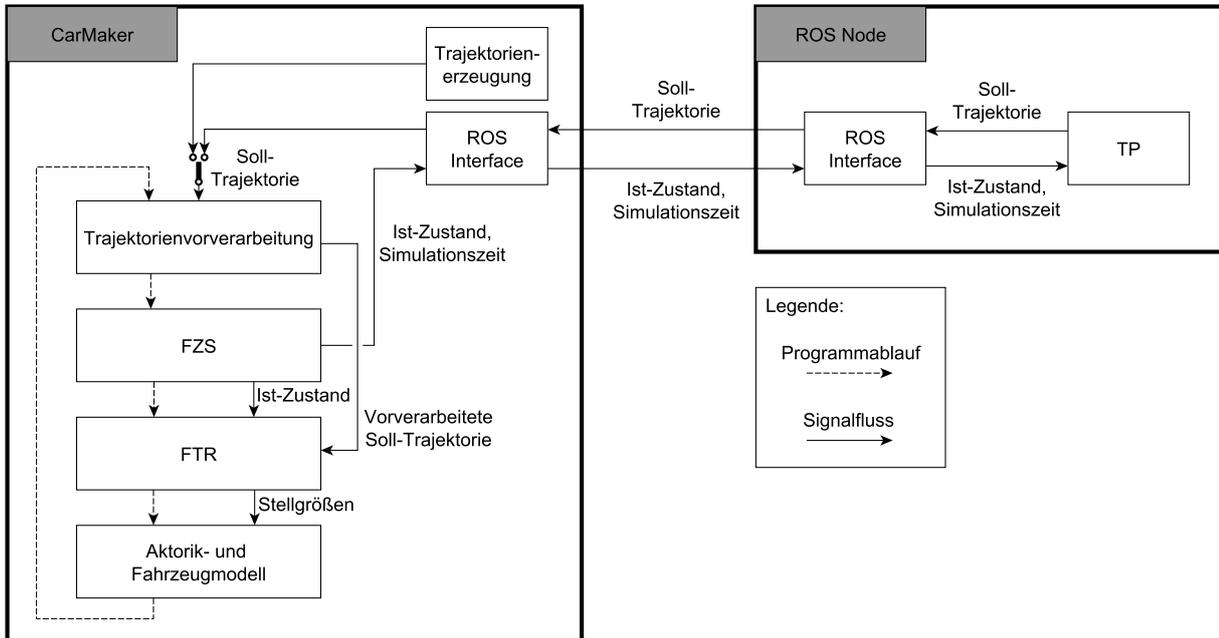


Abbildung 8-2: Gesamtarchitektur der verwendeten SiL-Testumgebung mit dem synchronisierten CarMaker Programmzyklus und der über ROS angebundenen online-TP. Die Wahl zwischen on- und offline-TP erfolgt durch Umschaltung vor der Trajektorienvorverarbeitung.

### 8.2.3 Hardware-in-the-Loop

Die nächste Ausbaustufe stellt die HiL-Testumgebung dar. Dabei werden die Funktionen der FTR auf der realen Echtzeithardware des sog. "Stammhirns" der UNICAR<sup>agil</sup> Fahrzeuge ausgeführt (Xilinx Zynq UltraScale+ MPSoC mit ARM-Cortex R5 Rechenkern)<sup>239</sup>. Die FTR ist daher als ASOA Dienst für das Echtzeit-Betriebssystem FreeRTOS implementiert.

Die CarMaker Simulationsumgebung kommt weiterhin zum Einsatz, wird für die HiL-Tests jedoch um ein ASOA Interface und um eine Zeitsynchronisierung mittels PTP erweitert. Ersteres ermöglicht der CarMaker-Simulation die Kommunikation über die ASOA Middleware. Auf diese Weise verfügt die CarMaker-Simulation über identische Schnittstellen im Vergleich zu den Dynamikmodulen und der FZS in den Realfahrzeugen, so dass für die FTR kein Unterschied zwischen der Applikation in der Simulation und in den Fahrzeugen ersichtlich ist. Weiterhin ermöglicht der in CarMaker integrierte PTP Master Node die Zeitsynchronisierung aller Steuergeräte auf die in der Simulation hinterlegte GNSS Zeit<sup>240</sup>. Dies geschieht analog zum Vorgehen in den Realfahrzeugen.

<sup>239</sup>Niedballa, D.; Reuss, H.-C.: Concepts of functional safety in E/E-architectures (2020), S. 464.

<sup>240</sup>Über die verwendete Intel i350 Netzwerkkarte wird dabei ein Hardware-Timestamping ermöglicht.

Zusätzlich zum Cortex-R5-Echtzeitkern ist als weiterer Teil des "Stammhirns" ein Steuergerät mit Cortex-A53-Kern und Petalinux-Betriebssystem enthalten, auf dem analog zum Realfahrzeug die Trajektorienvorverarbeitung ausgeführt wird. Die Kommunikation zwischen den Geräten findet über einen Ethernet-Switch statt.

Die HiL-Testumgebung ermöglicht im Vergleich zum SiL eine realitätsnähere Simulation der gekapselten FTR durch die Hinzunahme der realen, asynchronen Kommunikationskette über die ASOA-Middleware und Ethernet-Switches. Weiterhin kann das Laufzeitverhalten der entwickelten Algorithmen auf der realen Hardware analysiert werden, da keine Synchronisierung über einen gemeinsamen Programmzyklus stattfindet. Die idealisierte Modellierung der Aktorik und der Fahrndynamik des Gesamtfahrzeugs stellt hingegen weiterhin eine Einschränkung ggü. Versuchen mit den Realfahrzeugen dar.

Die Architektur der HiL-Testumgebung ist in Abbildung 8-3 dargestellt.

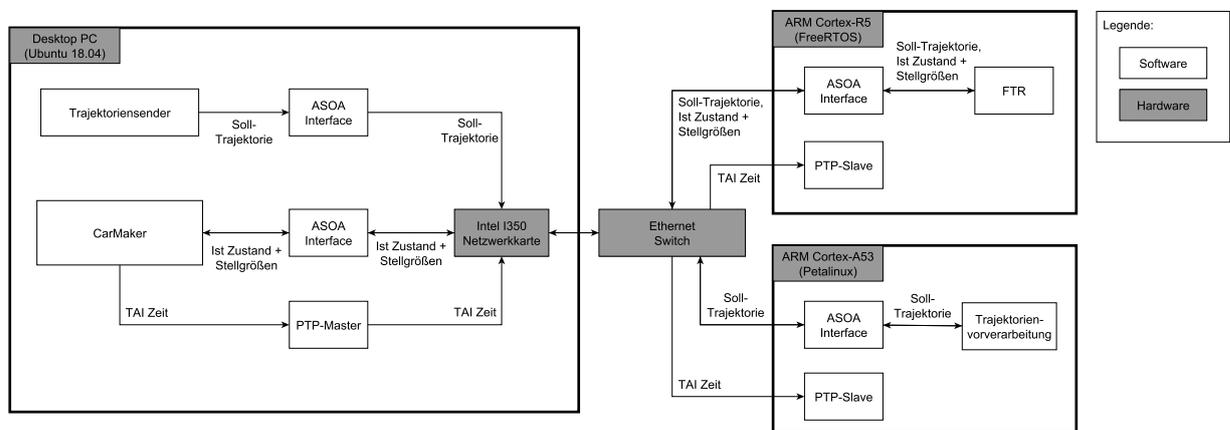


Abbildung 8-3: Grundlegende Struktur der verwendeten HiL-Testumgebung.

## 8.2.4 Realfahrzeuge

Die dritte und letzte Testumgebung stellt die Applikation der FTR in den Realfahrzeugen des Projekts UNICARagil dar. Dabei wird vollständig auf die Nutzung der CarMaker-Simulationsumgebung verzichtet und die von der FTR berechneten Stellgrößen werden an die realen Dynamikmodule zur Umsetzung übergeben.

Abbildung 8-4 zeigt die Architektur der verschiedenen ASOA-Dienste für die autonome Fahrzeugführung. Basierend auf dem Fahrzeug-Betriebsmodus wird die geplante Soll-Trajektorie aus der jeweils korrespondierenden Quelle (Automation, Leitwarte oder Sicheres Anhalten) über den Zwischenschritt der Trajektorienvorverarbeitung an die FTR übergeben. Gemeinsam mit dem Ist-Zustand aus der FZS berechnet die FTR Stellgrößen für die Dynamikmodule und versendet diese über die ASOA.

<sup>241</sup> Homolla, T.; Winner, H.: Encapsulated trajectory tracking control for autonomous vehicles (2022), S. 300.

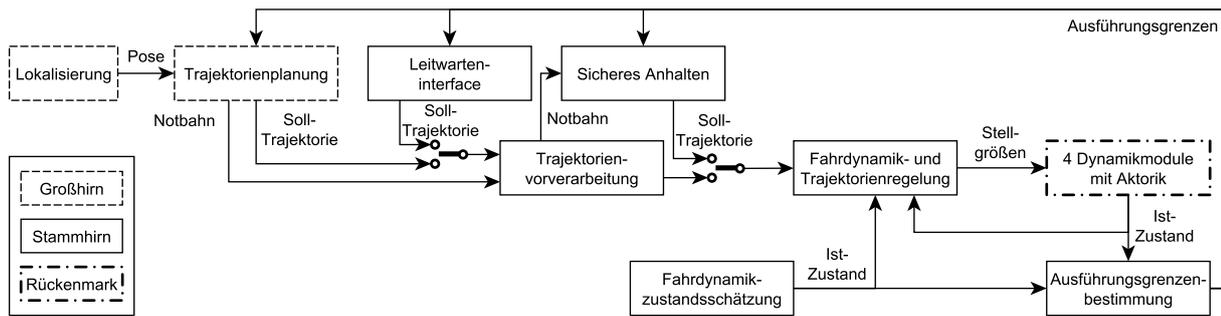


Abbildung 8-4: Dienstarchitektur innerhalb der Realfahrzeuge im Projekt UNICARagil<sup>241</sup>.

Die automatisierte Fahrt mit den Fahrzeugen stellt eine reale Applikation der entwickelten FTR dar und kommt daher gänzlich ohne Modellvereinfachung aus. Während dies zum Nachweis der Funktionsfähigkeit der FTR relevante Erkenntnisse ermöglicht, existiert gleichzeitig die Einschränkung, dass für Fahrten mit den Realfahrzeugen keine fehlerfreie Referenz für den fahrdynamischen Ist-Zustand vorhanden ist. Dies bedeutet, dass Messwerte für die Pose, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Fahrzeugs mit Unsicherheiten in Höhe der Schätzgenauigkeit der FZS behaftet sind und daher u. U. keine statistisch signifikanten Aussagen hinsichtlich des Einflusses bestimmter Maßnahmen möglich sind. Diesem Umstand wird Rechnung getragen, indem zunächst die Lokalisierungsgenauigkeit der FZS in Abschnitt 8.3.1 untersucht und anschließend für die nachfolgenden Nachweisversuche jeweils eine Testumgebung ausgewählt wird, die eine bestmögliche Beurteilung der für den Nachweis relevanten Aspekte ermöglicht.

## 8.2.5 Planungsdienste

Für die weiteren Tests im Rahmen dieser Arbeit kommen zwei unterschiedliche Planungsdienste zum Einsatz.

### Offline-Trajektorienplaner

Für Tests, die nicht auf eine Anpassung der Soll-Trajektorie auf Basis des dynamischen Umfelds angewiesen sind, wird eine offline-TP verwendet. Diese basiert auf dem von Blödel entwickelten Vorgehen zur Erzeugung konsistenter Soll-Trajektorien<sup>242</sup>. Das Vorgehen ermöglicht, vor den eigentlichen Versuchen Soll-Trajektorien zu erzeugen, die eine Vielzahl verschiedener Manöver abdecken und dabei die drei Fahrzeugfreiheitsgrade (horizontale Translation + Gieren) unabhängig voneinander vorzugeben. Auf diese Weise kann der volle Raum möglicher Trajektorien dargestellt und so auch unkonventionelle Manöver umgesetzt werden.

Da die initiale Pose des Fahrzeugs bei Durchführung eines Versuchs auf dem Prüfgelände variiert, wird die offline geplante Trajektorie vor dem Versenden auf die aktuelle Ist-Pose des Fahrzeugs aus der FZS angepasst.

<sup>242</sup>Blödel, A. P.: Entwicklung eines Verfahrens zur Generierung von Trajektorien (2022).

## Online-Trajektorienplaner

Die finale Ausbaustufe für die durchgeführten Tests stellt die Verwendung einer online-TP dar. Diese basiert auf den Arbeiten von Ziegler<sup>243</sup> und wurde bereits für die automatisierte Fahrt des "Bertha"-Forschungsfahrzeugs eingesetzt<sup>244</sup>. Die online-TP basiert auf einer digitalen Karte in Form von Lanelets<sup>245</sup> und plant zyklisch Soll-Trajektorien zur Ausführung durch die FTR.

### 8.2.6 Parametrisierung der FTR

Für die Anwendung der FTR in den Testumgebungen ist eine Parametrisierung der Zustandsrückführung in Form der beiden Zeitkonstanten  $\tau_{\text{pos}}$  und  $\tau_v$  erforderlich. Für die in Abbildung 7-1 dargestellte Struktur der Zustandsrückführung kann gezeigt werden, dass zur Vermeidung eines schwingungsfähigen Systems die Bedingung  $\tau_{\text{pos}} \geq 4\tau_v$  erfüllt sein muss<sup>246</sup>.

Zur Festlegung der absoluten Höhe der Zeitkonstanten wird das Verhalten bei Vorliegen einer Positionsabweichung genauer betrachtet. Niedrigere Werte für  $\tau_{\text{pos}}$  und  $\tau_v$  führen zu einer härteren Reaktion auf Regelabweichungen und sind somit aus Gründen der Regelgüte wünschenswert. Da es jedoch ebenfalls zu den Aufgaben der FTR gehört, den Insassenkomfort durch die eigene Reaktion auf Regelabweichungen nicht zu kompromittieren (vgl. Abschnitt 3.2.3), dürfen die Zeitkonstanten nicht zu niedrig gewählt werden, so dass eine Abwägung erforderlich ist. Zur Orientierung werden dabei die Normen ISO 15622<sup>247</sup> und ISO 11270<sup>248</sup> herangezogen, nach denen ein Full-Speed-Range ACC System eine maximale Längsbeschleunigung von  $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  und ein LKAS System eine maximale Querschleunigung von  $3 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  erzeugen darf.

Als Grundlage für die Parametrisierung wird daher angenommen, dass bei einer Positionsabweichung von 1 m eine zusätzliche Beschleunigung von  $1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  angefordert werden soll. Dieser Wert orientiert sich dabei an den erwarteten Abweichungen und der Tatsache, dass einzig die Zustandsrückführung betrachtet wird. Durch ein in der Soll-Trajektorie enthaltenes transientes Verhalten wird über den unabhängigen Vorsteuerungspfad eine zusätzliche Beschleunigung erzeugt. Für Formel 7-2 ergeben sich somit die Werte  $\tau_{\text{pos}} = 2 \text{ s}$  und  $\tau_v = 0,5 \text{ s}$ . Da in der realen Anwendung zumeist gleichzeitig Geschwindigkeits- und Beschleunigungsabweichungen auftreten, fällt die real angeforderte Beschleunigung u. U. höher aus. Versuche mit den Realfahrzeugen haben jedoch gezeigt, dass die gewählte Parametrisierung einen gangbaren Kompromiss zwischen Regelgüte und Insassenkomfort darstellt und weiterhin die Stabilität des Regelkreises nicht gefährdet.

<sup>243</sup>Ziegler, J.: Optimale Bahn- und Trajektorienplanung für Automobile (2015).

<sup>244</sup>Ziegler, J. et al.: Making Bertha Drive—An Autonomous Journey on a Historic Route (2014).

<sup>245</sup>Bender, P. et al.: Lanelets: Efficient map representation for autonomous driving (2014).

<sup>246</sup>Die Herleitung dieser Beziehung ist in Anhang A.3 dargestellt.

<sup>247</sup>ISO/TC-204: ISO 15622:2018: Adaptive cruise control systems (2018), S. 11.

<sup>248</sup>ISO/TC-204: ISO 11270:2014: Lane keeping assistance systems (LKAS) (2014), S. 5.

## 8.3 Verifikationstests

Zur Verifikation der Anforderungen und dem damit verbundenen Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten Gegenmaßnahmen gegen die identifizierten Defizite werden innerhalb dieses Abschnitts Verifikationstests abgeleitet und durchgeführt. Dazu wird auf die in den vorherigen Abschnitten vorgestellte Implementierung der FTR sowie die verschiedenen Testumgebungen zurückgegriffen.

### 8.3.1 Validierung der Lokalisierung

Die FTR ist zur Erfüllung ihrer Funktion neben der Soll-Trajektorie insbesondere auf die Verfügbarkeit des genauen und aktuellen fahrdynamischen Ist-Zustands angewiesen. Im Fahrzeug wird dieser von der unabhängigen FZS bereitgestellt. Da die weiteren Tests mit den Realfahrzeugen den von der FZS bereitgestellten Ist-Zustand als Referenzlösung verwenden und die erhaltenen Ergebnisse daher einer Unsicherheit hinsichtlich der Lokalisierungsgenauigkeit unterliegen, wird zunächst die Qualität der FZS Daten überprüft. Zu diesem Zweck wird eine von Holder et al. entwickelte Methodik genutzt, die es ermöglicht, die Lokalisierung automatisierter Fahrzeuge durch Generierung einer sog. "Super-Referenz" hinsichtlich statischer und dynamischer Genauigkeit zu überprüfen<sup>249a</sup>.

#### Versuchsbeschreibung

Das Ziel des Versuchs ist die Schaffung eines grundlegenden Verständnisses der Qualität der bereitgestellten Lokalisierungsinformationen und der Ableitung eines Unsicherheitsbereichs als Basis für die Bewertung der Ergebnisse der weiteren Tests innerhalb dieses Kapitels. Zu diesem Zweck wird durch Szenarien in unterschiedlichen Betriebspunkten des Fahrzeugs die absolute Lokalisierungsgenauigkeit ermittelt. Eine vollständige Validierung der eingesetzten Lokalisierungslösung in allen relevanten Zuständen ist hingegen explizit nicht Teil des Testziels. Eine solche Validierung der FZS erfolgt in der Dissertation von Gottschalg<sup>250</sup>.

#### Dynamische Genauigkeit

Zur Bestimmung der Positionsgenauigkeit der FZS während der Fahrt wird der in Abbildung 8-5 dargestellte Versuchsaufbau genutzt. In einem geraden Fahrstreifen werden nacheinander drei Lichtschranken positioniert, die über ein zentrales, über GNSS zeitsynchronisiertes Steuergerät ausgelesen werden. Vor den Lichtschranken werden mittels Rasierschaum gerade Linien auf dem Asphalt aufgebracht. Der Abstand zwischen Lichtschranke und vorgelagertem Rasierschaum entspricht dabei dem Abstand zwischen der Stoßstange des Fahrzeugs und dem Radaufstandspunkt der Vorderachse.

---

<sup>249</sup>Holder, M. et al.: Digitalize the Twin (2022), a: -; b: S. 8; c: S. 9; d: S.10.

<sup>250</sup>Gottschalg, G.: Data Fusion Architecture for State Estimation (2022), S. 93.

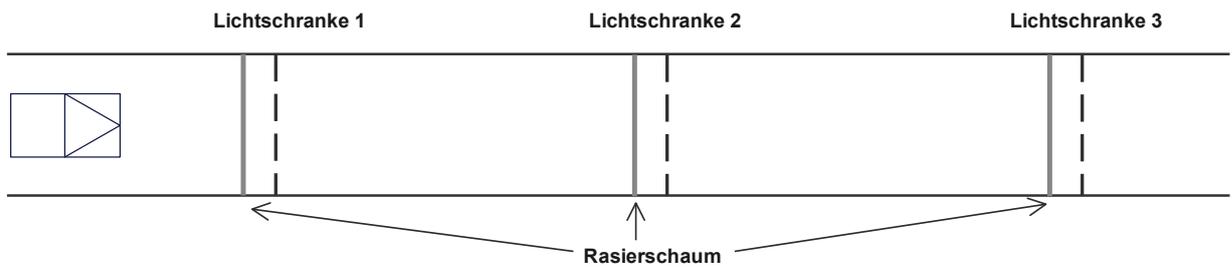


Abbildung 8-5: Versuchsaufbau zur Überprüfung der Genauigkeit der FZS während der Fahrt. Eigene Darstellung in Anlehnung an Holder et al.<sup>249b</sup>.

Die Position der Lichtschranken in GCS-Koordinaten ist aus Vorabmessungen mit Hilfe eines RTK-basierten GNSS-Sensors bekannt<sup>249c</sup>. Durch die Zeitstempelung der Lichtschranken mit der globalen GNSS-Zeit können die Auslösezeitpunkte den Messungen der FZS im Fahrzeug zugeordnet werden.

Der longitudinale Positionsfehler der FZS ergibt sich daher aus der gemessenen Position der FZS zum Auslösezeitpunkt der Lichtschranken, korrigiert um den Abstand zwischen dem Schnittpunkt der Radaufstandspunkte<sup>251</sup> und der Stoßstange des Fahrzeugs, da diese die Lichtschranke auslöst. Für die Schätzung des lateralen Regelfehlers wird der Rasierschaum verwendet. Bei der Fahrt durch den Versuchsaufbau hinterlassen die Reifen einen Abdruck im Rasierschaum, die den beiden Spuren des Fahrzeugs zum Zeitpunkt der Durchfahrt entsprechen (siehe Abbildung 8-6). Durch Messung des Abstands zwischen den Kanten beider Spurmarkierungen im Rasierschaum mit einem Gliedermaßstab und anschließender Referenzierung auf die bekannten GCS-Positionen der Lichtschrankenauslösung ermittelt werden. Dieser Wert wird anschließend mit dem Schätzwert der FZS verglichen, um die Positionierungsgenauigkeit zu ermitteln.



Abbildung 8-6: Hinterlassene Spurmarkierung im Rasierschaum nach Fahrt durch den Versuchsaufbau.

<sup>251</sup>Die FZS transformiert alle gemessenen und geschätzten Größen auf den Schnittpunkt der Radaufstandspunkte als gemeinsamen Referenzpunkt.

Der Versuch wird mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 5 km/h und 15 km/h durchgeführt, um eine mögliche Geschwindigkeitsabhängigkeit der Lokalisierungsgüte identifizieren zu können. Um den Einfluss zufälliger Fehler zu reduzieren und belastbarere Ergebnisse zu erzielen, wird der Versuch für jede Geschwindigkeit drei Mal wiederholt.

### Statische Genauigkeit

Zur Messung der statischen Positionsgenauigkeit der FZS wird erneut auf die bekannten GCS-Positionen der Lichtschranken zurückgegriffen. Das Fahrzeug wird mit der Vorderachse auf der Verbindungslinie zwischen den beiden Messpunkten einer einzelnen Lichtschranke positioniert, wobei die Außenkante eines Reifens mit einem der Messpunkte übereinstimmt (vgl. Abbildung 8-7). In diesem Zustand wird die von der FZS geschätzte Position aufgezeichnet. Aus den bekannten Abständen zwischen der Vorderachse und dem Schnittpunkt der Radaufstandspunkte (entspricht dem Referenzpunkt der FZS) kann anschließend die statische Positionsgenauigkeit ermittelt werden.



Abbildung 8-7: Positionierung des Fahrzeugs relativ zu den bekannten, GCS-referenzierten Messpunkten unter Zuhilfenahme eines Kreuzlinienlasers. Die Außenkante des dargestellten Reifens stimmt mit der Position des bekannten Messpunkts überein.

### Versuchsauswertung

Zur Beurteilung der Lokalisierungsgenauigkeit wird für die durchgeführten Versuche die Abweichung zwischen der externen Referenz und der FZS bestimmt:

$${}^V\Delta_{\text{pos,err}} = {}^V\mathbf{p}_{\text{ref}} - {}^V\mathbf{p}_{\text{FZS}} \quad (8-1)$$

Die Position der externen Referenz unterliegt dabei ebenfalls Unsicherheiten. Insbesondere die zeitliche Auflösung der Lichtschranken führt zu einer geschwindigkeitsabhängigen Unsicherheit. Holder et al. haben gezeigt, dass eine Gesamtunsicherheit durch die verwendete Messkette im Bereich weniger Zentimeter zu erwarten ist<sup>249d</sup>.

### Dynamische Genauigkeit

Die Positionsabweichungen der insg. 18 Messpunkte ist in Abbildung 8-8 dargestellt.

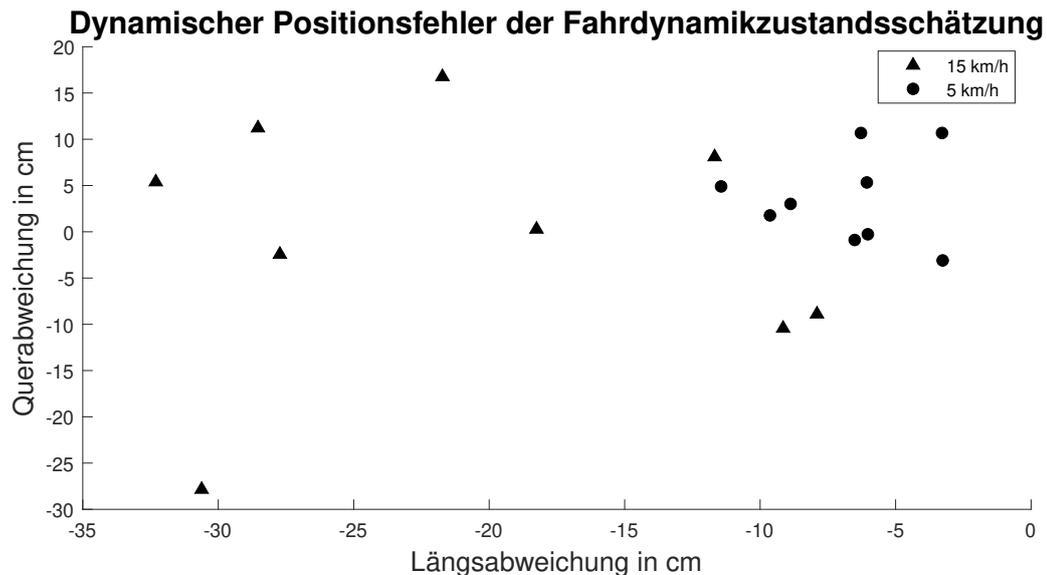


Abbildung 8-8: Dynamischer Positionsfehler der FZS bei Fahrten mit 5 km/h und 15 km/h.

Der maximale Längsfehler beträgt -32,2 cm, in Querrichtung beträgt die maximale Abweichung -27,9 cm. Aus Abbildung 8-8 ist ersichtlich, dass die Längsabweichung bei der höheren gefahrenen Geschwindigkeit von 15 km/h höher ausfällt. Diese Zunahme kann nicht vollständig mit der zeitlichen Auflösung der Lichtschranken erklärt werden<sup>249d</sup>.

### Statische Genauigkeit

Die berechnete Positionsabweichung zwischen der externen Referenz und der FZS während der insg. 6-minütigen Messung im Stillstand ist in Abbildung 8-9 dargestellt. Die FZS Position unterliegt Schwankungen, die Abweichung zwischen beiden Verfahren beträgt dabei maximal -6,3 cm in Längsrichtung und -4,7 cm in Querrichtung.

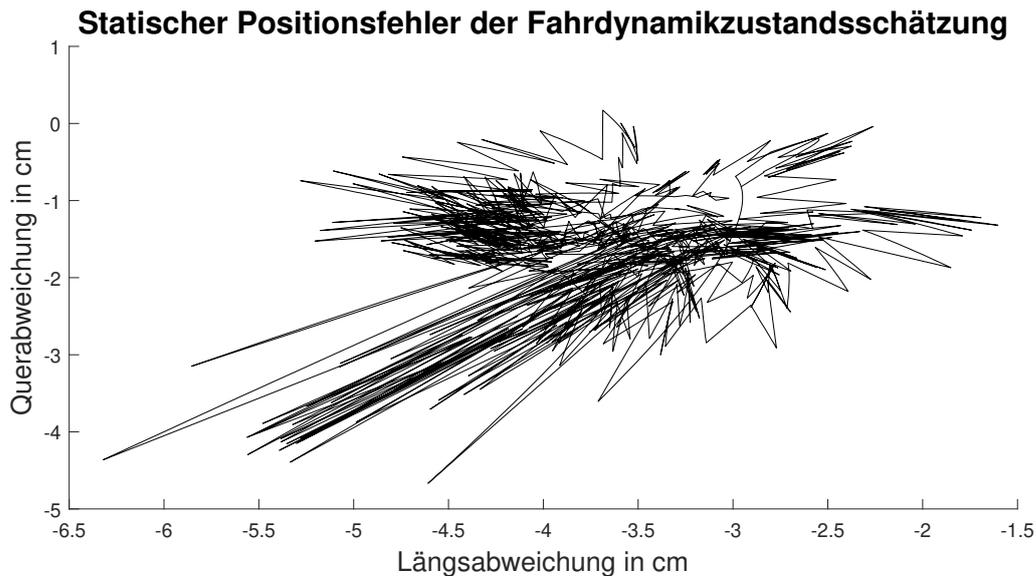


Abbildung 8-9: Statischer Positionsfehler der FZS während der 6-minütigen Messung im Stillstand.

## Zwischenfazit

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass mit dem aktuellen Integrationsstand der FZS auch unter guten Empfangsbedingungen (ohne Abschattungen) auf der Runway des "August-Euler-Flugplatzes" in Griesheim mit absoluten Positionsabweichungen von bis zu 41 cm gerechnet werden muss<sup>252</sup>.

Teile der nachfolgenden Versuche zur Verifikation der Anforderungen an die gekapselte FTR und zum Nachweis der entwickelten Gegenmaßnahmen sind auf die genaue Kenntnis der Ist-Position des Fahrzeugs angewiesen. Aufgrund der identifizierten Fehler der eingesetzten Lokalisierung im Fahrzeug sind in den Realfahrzeugen erhaltene Ergebnisse daher mit einer erhöhten Unsicherheit behaftet. Daher werden Nachweisversuche, deren Bewertung von den Ist-Positionen während des Versuchs abhängig ist, vorrangig in den SiL- und HiL-Testumgebungen durchgeführt, da statistisch signifikante Aussagen in den Realfahrzeugen erst bei hohen Unterschieden in den Ist-Positionen und einer erhöhten Anzahl von Versuchen möglich werden. In der SiL- und HiL-Testumgebung stehen hingegen Ground-Truth-Lokalisierungsinformationen ohne Unsicherheiten aus Sensorfehlern zur Verfügung. Der Einfluss der vorhandenen Modellvereinfachungen (insbesondere der Systemdynamik der Aktorik) wird dabei jeweils individuell diskutiert. Um Forschungsfrage 9 vollständig zu beantworten, wird die entwickelte FTR dennoch in die Realfahrzeuge integriert und für Versuche genutzt, deren Bewertung nicht primär von Lokalisierungsinformationen abhängig ist. Auf diese Weise wird zudem die Funktionsfähigkeit der gekapselten FTR in den Realfahrzeugen demonstriert.

<sup>252</sup>Dieser Wert entspricht der maximalen beobachteten absoluten Abweichung während einer der dynamischen Versuche mit 15 km/h und stellt somit eine untere Schranke des maximalen Fehlers dar. Für die Ableitung eines statistisch signifikanten Unsicherheitsintervalls wäre ein erhöhter Stichprobenumfang erforderlich.

### 8.3.2 Konsistente Lokalisierungsinformationen

In Kapitel 4 wurde eine Lokalisierungsangleichung entwickelt, durch die eine Nutzung inkonsistenter Lokalisierungsinformationen für TP und FTR ermöglicht wird. Für den Nachweis der Defizitvermeidung durch die Lokalisierungsangleichung wird ein Versuch entwickelt, durchgeführt und ausgewertet. Dabei besteht die Zielsetzung nachzuweisen, dass inkonsistente Lokalisierungsinformationen für TP und FTR keinen signifikanten negativen Einfluss auf die automatisierte Fahrzeugführung haben. Ein solcher Einfluss zeigt sich insbesondere an der resultierenden Posen-Regelgüte.

#### Versuchsbeschreibung

Zum Test der Lokalisierungsangleichung wird die Fahrt durch einen Tunnel simuliert. Im Tunnel besteht durch die Abschattung des Fahrzeugs kein GNSS Empfang, weshalb im Filter der FZS keine GNSS-Messupdates möglich sind. Im Rahmen eines Dead-Reackoning werden in solchen Situationen die von der Inertialsensorik gemessenen Beschleunigungswerte zeitlich integriert und die letzte bekannte Pose unter Zuhilfenahme von zusätzlicher Odometriesensorik so fortgeschrieben. Da die Inertialsensorik und Odometrie jedoch keine absolute Pose auf der Erdoberfläche messen können, entsteht durch die stets vorhandenen Messfehler der Beschleunigung eine Posendrift, die mit der Länge des GNSS-Ausfalls zunimmt. Im Rahmen des hier durchgeführten Tests wird davon ausgegangen, dass die von der TP genutzte Lokalisierung keine vergleichbare Posendrift aufweist, da landmarkenbasierte visuelle Verfahren zum Einsatz kommen, die nicht auf durchgehenden GNSS-Empfang angewiesen sind. Im Tunnel wird daher ein Unterschied zwischen den ermittelten Posen der beiden Lokalisierungsfunktionen erwartet, wodurch die in Abbildung 3-4 eingeführte Problematik einer systematischen Regelabweichung in Erscheinung tritt. Der anwachsende Posenfehler der FZS im Tunnel stellt keine reale Bewegung des Fahrzeugs dar und darf daher keinen signifikanten Einfluss auf die FTR haben, was durch den Test nachgewiesen wird.

Für den Test wird auf die HiL-Testumgebung zurückgegriffen, da die TP in den Realfahrzeugen zum Zeitpunkt der Testdurchführung noch nicht auf eine unabhängige zweite Lokalisierung zurückgreift und daher die Voraussetzungen für die Anwendung der Lokalisierungsangleichung noch nicht vorliegen. Des Weiteren ist für die Beurteilung der Funktion der Lokalisierungsangleichung eine genaue Kenntnis der Ist-Positionen des Fahrzeugs erforderlich, was in der Simulation durch Kenntnis des Ground-Truth-Ist-Zustands ermöglicht wird. Dies ist in den Realfahrzeugen nicht gleichwertig gegeben (vgl. Abschnitt 8.3.1). Der Nachweis wird dabei nicht durch die in der Simulation vorhandenen Modellvereinfachungen beeinflusst, da der entwickelte Algorithmus für seine Funktion nicht auf Informationen der Aktorikmodelle bzw. auf Interaktionseffekte mit der Aktor-Systemdynamik angewiesen ist.

Gottschalg und Leinen haben im Rahmen einer Veröffentlichung eine Messfahrt durch den Darmstädter "Citytunnel" durchgeführt und dabei die in den UNICARagil-Fahrzeugen verwendete

FZS mit einer kommerziellen Referenzlösung mit hoher Robustheit gegenüber Abschattungen verglichen<sup>253</sup> (vgl. Abbildung 8-10). Diese Messung dient als Grundlage für den Test der Lokalisierungsangleichung.



Abbildung 8-10: Testszenario für die Lokalisierungsangleichung. Die rote Linie zeigt den translatorischen Pfad der von Gottschalg und Leinen real gefahrenen Trajektorie durch den Darmstädter "Citytunnel".

Aus dem in der Veröffentlichung verwendeten Datensatz wird die Abweichung zwischen der Referenzlösung (Index "ref") und der selbst implementierten FZS (Index "FZS,real") während der Tunneldurchfahrt isoliert:

$${}_N \mathcal{P}_{\text{drift},i} = {}_N \mathcal{P}_{\text{ref},i} - {}_N \mathcal{P}_{\text{FZS,real},i} \quad (8-2)$$

Die Laufvariable  $i$  entspricht dabei dem Zyklus der FTR. Die gemäß Gleichung 8-2 ermittelte Posendrift dient für den Test der Lokalisierungsangleichung in der HiL-Simulation als angenommene Drift der FZS im Tunnel. Der Verlauf der Drift für die Translation des Fahrzeugs in east- und north-Richtung sowie für den Gierwinkel ist in Abbildung 8-11 dargestellt.

Mit dem gewählten Ansatz der Fehlerbetrachtung auf Basis einer exogen vorgegebenen Posendrift wird implizit eine Rückwirkungsfreiheit der Fahrzeugbewegung innerhalb der Simulation auf die Drift der FZS angenommen (die Drift in Gleichung 8-2 resultiert aus einer unabhängigen Messung und wird in der Simulation nicht auf Basis des Ist-Zustands angepasst). In den Realfahrzeugen kann eine Rückkopplung hingegen nicht ausgeschlossen werden. Da der Betrag der Drift für die Funktion der Lokalisierungsangleichung jedoch nur von untergeordneter Bedeutung ist<sup>254</sup>, ist diese Vereinfachung zulässig.

<sup>253</sup>Gottschalg, G.; Leinen, S.: Evaluation of Integrity Algorithms for Vehicle State Estimation (2021).

<sup>254</sup>Eine Analyse des Einfluss des Driftverlaufs auf die Qualität der Funktionserfüllung wird im Rahmen der nachfolgenden Versuchsauswertung durchgeführt.

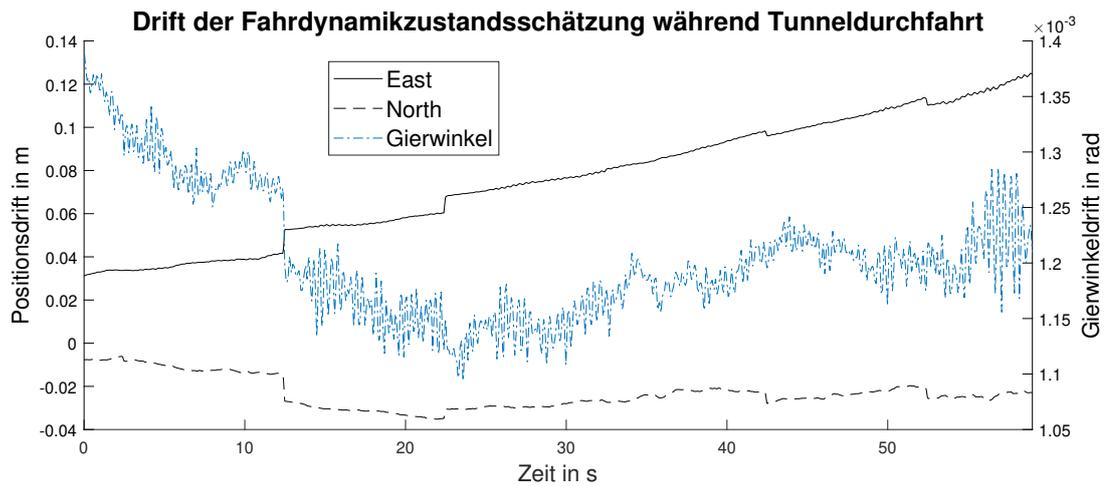


Abbildung 8-11: Aus der Messung von Gottschalg und Leinen extrahierte Posendrift der FZS bei Fahrt durch den Darmstädter "Citytunnel".

Der "Citytunnel" wird in der CarMaker Simulationsumgebung nachmodelliert (vgl. Abbildung 8-12) und eine Soll-Trajektorie entlang des rechten Fahrstreifens für die FTR erzeugt, deren Geschwindigkeitsverlauf der Messung von Gottschalg und Leinen entspricht. Die Planungspose innerhalb der Soll-Trajektorie unterliegt dabei keiner Posendrift, was mit der o. g. Annahme einer landmarkenbasierten Lokalisierung mit hoher Robustheit ggü. einer GNSS-Abschattung begründet ist.

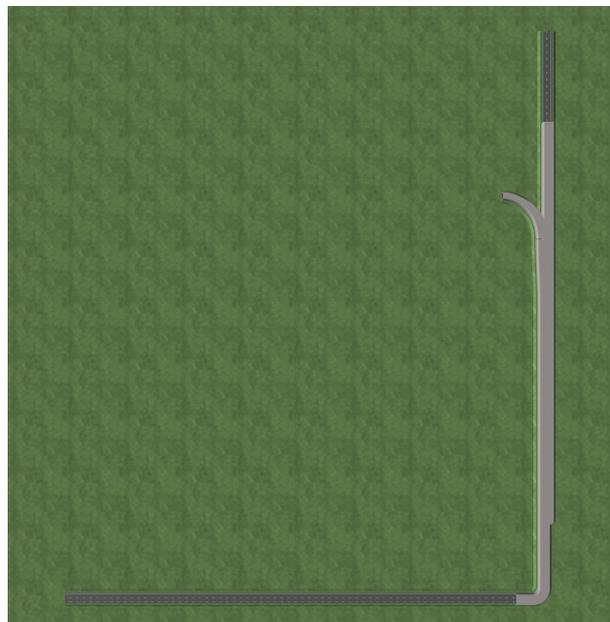


Abbildung 8-12: Modellierter "Citytunnel" innerhalb der CarMaker-Simulation.

Innerhalb der HiL-Testumgebung versendet der ASOA-Dienst der FZS zyklisch den fahrdynamischen Ist-Zustand  ${}_G\mathcal{P}_{FZS,i}$  über eine Ethernet-Verbindung an den FTR-Dienst. Die in Gleichung 8-2 ermittelte Posendrift wird vor dem Versenden in der FZS auf die Ist-Pose  $\mathcal{P}_{act,i}$  aus der CarMaker Simulation addiert:

$${}_N \mathcal{P}_{\text{FZS},i} = {}_N \mathcal{P}_{\text{act},i} + {}_N \mathcal{P}_{\text{drift},i} \quad (8-3)$$

Der Tunnel wird in getrennten Simulationen zweifach durchfahren. Zunächst erfolgt eine Fahrt ohne aktivierte Lokalisierungsangleichung. Diese Fahrt demonstriert den Einfluss der Drift, falls keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden und zeigt so das kapselungsbedingte Defizit aufgrund inkonsistenter Lokalisierungsinformationen auf. Nachfolgend wird die Fahrt durch den Tunnel mit aktivierter Lokalisierungsangleichung wiederholt. Dies ermöglicht die Beurteilung der Funktionserfüllung der entwickelten Gegenmaßnahmen. In beiden Simulationen werden zwei unterschiedliche Regelabweichungen ermittelt. Die von der FTR auf Basis der in der Soll-Trajektorie enthaltenen Soll-Pose  ${}_N \mathcal{P}_{\text{set},i}$  ermittelte Regelabweichung  ${}_N \Delta_{\text{pos},i}$  ist definiert als:

$${}_N \Delta_{\text{pos},i} = {}_N \mathcal{P}_{\text{set},i} - {}_N \mathcal{P}_{\text{FZS},i} \quad (8-4)$$

Weiterhin wird als Vergleich die Ground-Truth Regelabweichung  ${}_N \Delta_{\text{pos,GT},i}$  auf Basis der tatsächlichen Fahrzeugpose ohne Posendrift ( ${}_N \mathcal{P}_{\text{act},i}$ ) ermittelt:

$${}_N \Delta_{\text{pos,GT},i} = {}_N \mathcal{P}_{\text{set},i} - {}_N \mathcal{P}_{\text{act},i} \quad (8-5)$$

## Versuchsauswertung

Abbildung 8-13 zeigt die absolute translatorische Regelabweichung (Betrag aus Längs- und Querabweichung) sowie Gierabweichung für die Simulation ohne Lokalisierungsangleichung. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die FTR ihre Aufgabe erfüllt, indem die Regelabweichung  ${}_N \Delta_{\text{pos},i}$  minimiert wird. Sowohl die translatorische Abweichung als auch die Gierabweichung wird unterhalb von 5 cm bzw.  $0,5^\circ$  gehalten, nur in der  $90^\circ$  Kurve des Tunnels steigt die Abweichung kurzzeitig auf ca. 15 cm bzw.  $0,8^\circ$  an.

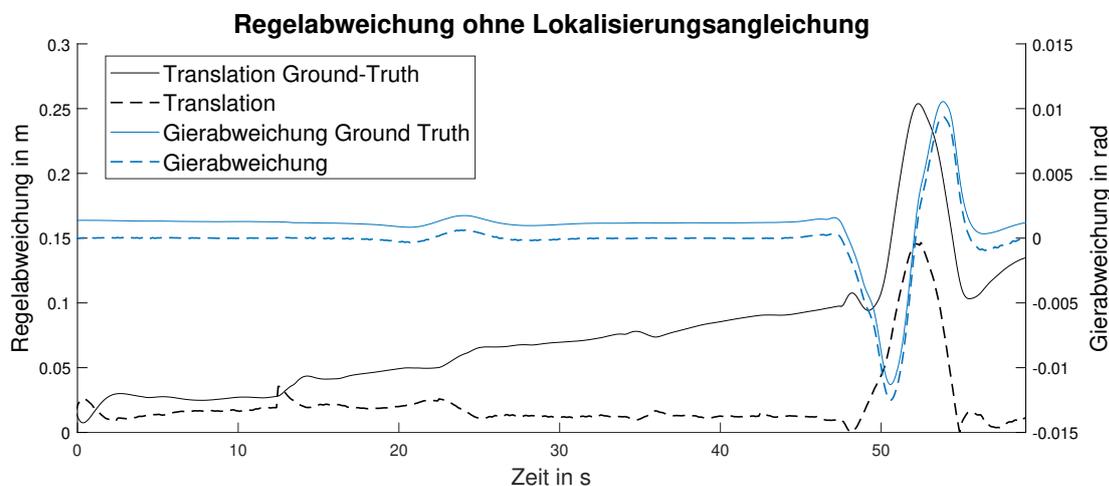


Abbildung 8-13: Posenabweichung des Fahrzeugs bei Tunneldurchfahrt mit deaktivierter Lokalisierungsangleichung.

Aus der parallel dargestellten Ground-Truth Regelabweichung  ${}_N\Delta_{\text{pos,GT},i}$  ist jedoch ersichtlich, dass das Fahrzeug dem Verlauf der Soll-Trajektorie um die Drift  ${}_N\mathcal{P}_{\text{drift},i}$  verschoben folgt. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten ohne Lokalisierungsangleichung und kann, abhängig von der Höhe der Drift, zu unerwünschten bzw. gefährlichen Situationen führen. Obwohl die FTR die für sie sichtbare Regelabweichung minimiert, ist die Funktion der Trajektorienfolgeregelung (vgl. Abschnitt 3.2) daher im Rahmen der gekapselten FTR mit inkonsistenten Lokalisierungsinformationen ohne entsprechende Gegenmaßnahmen nicht erfüllt.

Abbildung 8-14 zeigt die bereits bekannten Abweichungen für die Fahrt mit aktivierter Lokalisierungsangleichung. Im Gegensatz zu den zuvor diskutierten Unterschieden zwischen  ${}_N\Delta_{\text{pos},i}$  und  ${}_N\Delta_{\text{pos,GT},i}$  in Höhe der eingestreuten Posendrift führt die Lokalisierungsangleichung dazu, dass beide Abweichungen näherungsweise identisch sind und daher die tatsächliche Regelgüte der FTR beschreiben. Die FTR ist somit in der Lage, mit Hilfe der Lokalisierungsangleichung den Einfluss inkonsistenter Lokalisierungsinformationen zu minimieren und die Teilfunktion der Trajektorienfolgeregelung zu erfüllen.

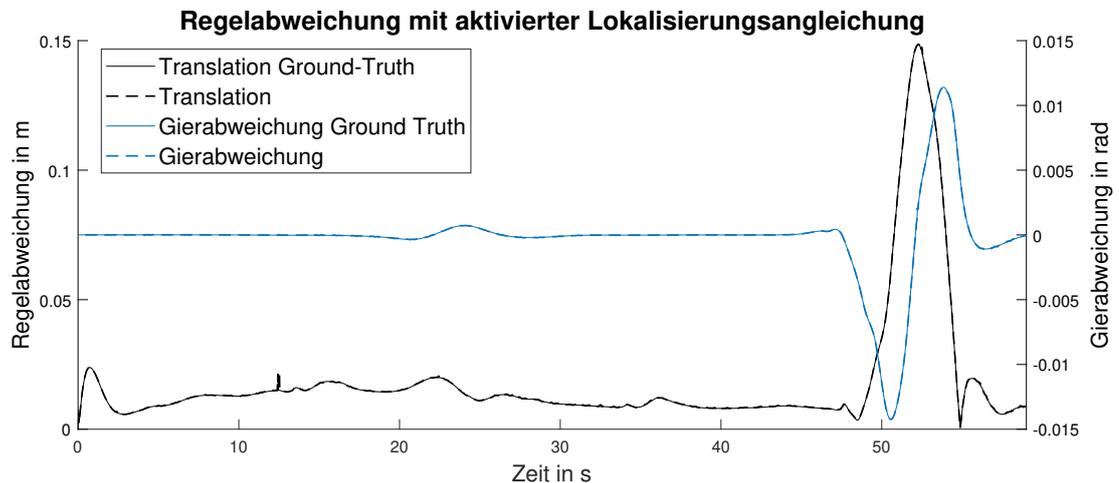


Abbildung 8-14: Posenabweichung des Fahrzeugs bei Tunneldurchfahrt mit aktivierter Lokalisierungsangleichung.

Die entwickelte Lokalisierungsangleichung unterliegt mehreren Limitationen. Für die Berechnung des Posenoffsets zwischen den Lokalisierungsinformationen der TP und FTR ist eine Trennung von Sensorfehlern und Veränderungen aufgrund der realen Fahrzeugbewegung erforderlich. Dies resultiert in den in Abschnitt 4.2 beschriebenen diskreten Zeitpunkten, zu denen ein neuer Offset berechnet werden kann. Eine Veränderung des Posenoffsets zwischen zwei Berechnungszeitpunkten des Offsets kann daher nicht kompensiert werden. Dieser Umstand zeigt sich in der durchgeführten Simulation anhand einer im Vergleich zur restlichen Drift starken Veränderung nach ca. 12,4 s (siehe Abbildung 8-15). Durch den hohen Gradienten der Drift entsteht eine Abweichung zwischen den Regelabweichungen  ${}_N\Delta_{\text{pos},i}$  und  ${}_N\Delta_{\text{pos,GT},i}$ , die erst mit einer Neuberechnung des Posen-Offsets nach Erhalt einer neuen Soll-Trajektorie kompensiert wird.

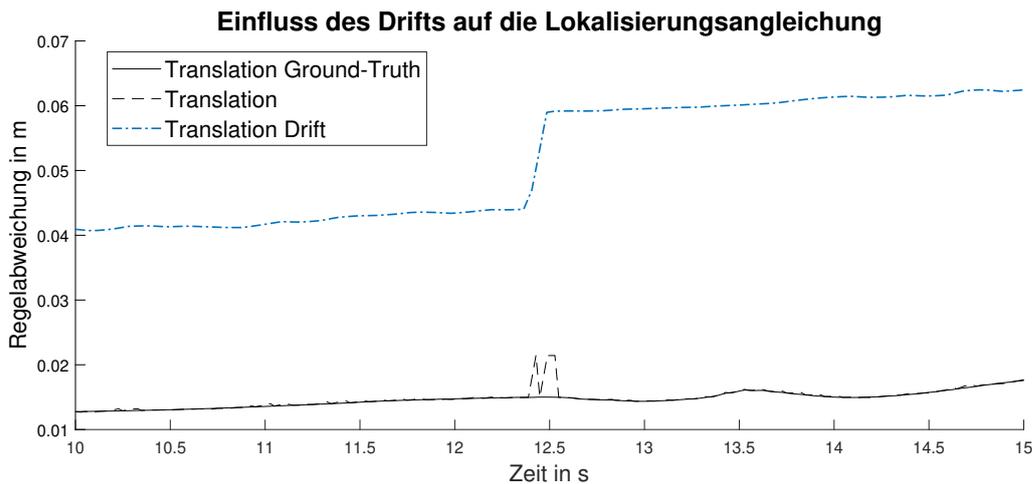


Abbildung 8-15: Einfluss eines hohen Gradienten des Posen-Offsets auf die Lokalisierungsangleichung.

In Situationen, in denen die Soll-Trajektorie mit einer entsprechend hohen Frequenz aktualisiert wird (bspw. 10 Hz im Projekt UNICAR*agil*), ist der Einfluss dieser Limitation auf die Regelgüte gering. Es kann jedoch zu Situationen kommen, in denen ein längerer Zeitraum ohne aktualisierte Planungspose bzw. Soll-Trajektorie überbrückt werden muss. Dies ist bspw. der Fall, wenn die TP ausfällt und daher die letzte verfügbare Soll-Trajektorie zur Überführung des Fahrzeugs in einen risikominimalen Zustand abgefahren wird. In diesem Fall beschränkt die erwartete Drift der FZS die maximale Länge der dazu verwendeten Notbahn (vgl. Sicheres Anhalten im Projekt UNICAR*agil*). Weiterhin existieren Planungsalgorithmen, die nicht in jedem Zeitschritt eine neue Soll-Trajektorie auf Basis des aktuellen Ist-Zustands planen. In solchen Fällen können Drifts der FZS ebenfalls nur dann kompensiert werden, wenn eine neue Planungspose verwendet wird.

Im Filter der FZS kann es zu Sprüngen der ermittelten Pose kommen. Bei der Ausfahrt aus einem Tunnel wird bspw. der GNSS-Empfang wiederhergestellt, was zu einer schlagartigen Korrektur der zuvor gedrifteten Ist-Pose innerhalb der FZS führt. Dieser Sprung tritt auf, wenn durch das GNSS-Messupdate die im Tunnel angewachsenen Fehler in der geschätzten Pose der FZS korrigiert werden. Ein solcher Sprung führt aufgrund der in Abbildung 8-15 dargestellten Problematik in der vorgestellten Version der Lokalisierungsangleichung ebenfalls zu einem Regeleingriff, bis ein neuer Posen-Offset berechnet wird. Da Sprünge in der Ist-Pose der FZS nur bei definierten Schritten im Verarbeitungsablauf, wie bspw. beim Messupdate im Kalman-Filter oder einer Re-Initialisierung des Filters, auftreten und bei diesen Schritten auch die Standardabweichung der geschätzten Pose angepasst wird, können die Sprünge am Verlauf der Ist-Pose und der zugehörigen Standardabweichung erkannt werden. Die Lokalisierungsangleichung kann somit adaptiert werden, indem die Höhe des Sprungs auf den zuvor ermittelten Posen-Offset addiert wird.

Trotz der genannten Limitationen kann der Einfluss inkonsistenter Lokalisierungsinformationen für TP und FTR auf die automatisierte Fahrzeugführung durch die Lokalisierungsangleichung minimiert werden. Die Wirksamkeit der Maßnahme wurde durch den präsentierten Versuch einer Tunneldurchfahrt nachgewiesen, so dass Anforderung A1.11 erfüllt ist.

### 8.3.3 Sicherstellung physikalisch umsetzbarer Trajektorien

Die in Kapitel 6 hergeleiteten Maßnahmen sollen sicherstellen, dass die TP nur physikalisch umsetzbare Aufgaben für die FTR plant. Zum Nachweis der Defizitvermeidung werden zwei darauf ausgerichtete Szenarien in der SiL-Testumgebung simuliert. Dabei besteht die Zielsetzung nachzuweisen, dass die identifizierten Kriterien maßgeblich für die physikalische Umsetzbarkeit von Soll-Trajektorien sind. Die Umsetzbarkeit zeigt sich dabei unmittelbar an den resultierenden Regelabweichungen, da die FTR diese nur bei Vorhandensein physikalischer Reserven minimieren kann.

Die Wahl der Testumgebung ist damit begründet, dass für den Nachweis der Sicherstellung physikalischer Umsetzbarkeit gezielt fahrdynamische Zustände nahe der physikalischen Grenzen erzeugt werden müssen. Dies stellt bei Nutzung der experimentellen Realfahrzeuge ein nicht zu vernachlässigendes Sicherheitsrisiko dar. Weiterhin ist für die Berücksichtigung der Ausführungsgrenzen die Nutzung eines angepassten online-Trajektorienplaners erforderlich, der ausschließlich in der SiL-Umgebung zur Verfügung steht.

#### Versuchsbeschreibung

Die Rückmeldung der physikalischen Ausführungsgrenzen aus Gleichung 6-9 enthält Anteile für kinematische und dynamische Grenzen. Die Relevanz der kinematischen Grenzen ist unmittelbar aus der Herleitung auf Basis der Lenkwinkelgrenzen der Fahrzeuge ersichtlich. Die kinematische Umsetzbarkeit geplanter Soll-Trajektorien wird dabei mit Hilfe des in der technischen Mechanik etablierten Konzepts des Momentanpols bzw. dessen möglicher Lagen hergeleitet. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit (im Einklang mit der o. g. Zielsetzung) auf einen spezifischen Nachweisversuch verzichtet.

Für den Wirksamkeitsnachweis der dynamischen Ausführungsgrenzen werden zwei unabhängige Versuche durchgeführt. Zunächst wird die Wirksamkeit der querdynamischen Grenzen auf Basis des maximalen Reibwerts zwischen Reifen und Fahrbahn nachgewiesen. Zu diesem Zweck wird eine zuziehende Kreisfahrt simuliert (vgl. Abbildung 8-16). Die Kurvenkrümmung steigt auf der Strecke monoton an. Um dabei die Querschleunigung (bzw. Zentripetalbeschleunigung) des Fahrzeugs konstant zu halten, muss die Längsgeschwindigkeit des Fahrzeugs gemäß Gleichung 8-6 an die jeweilige Kurvenkrümmung und die geplante Längsbeschleunigung  $a_{\text{set},s}$  angepasst werden:

$$v_{\text{set},s} = \sqrt{\frac{a_{n,\text{max}}}{\kappa}} = \frac{\sqrt[4]{(\mu_{\text{max}} \cdot g)^2 - a_{\text{set},s}^2}}{\sqrt{\kappa}} \quad (8-6)$$

Die für diesen Versuch eingesetzte TP ist in der Lage, die Geschwindigkeit der Soll-Trajektorie auf Basis der Randbedingung aus Gleichung 8-6 anzupassen. Eine Kenntnis der Kurvenkrümmung innerhalb der TP vorausgesetzt, ist die geplante Längsgeschwindigkeit abhängig vom maximalen

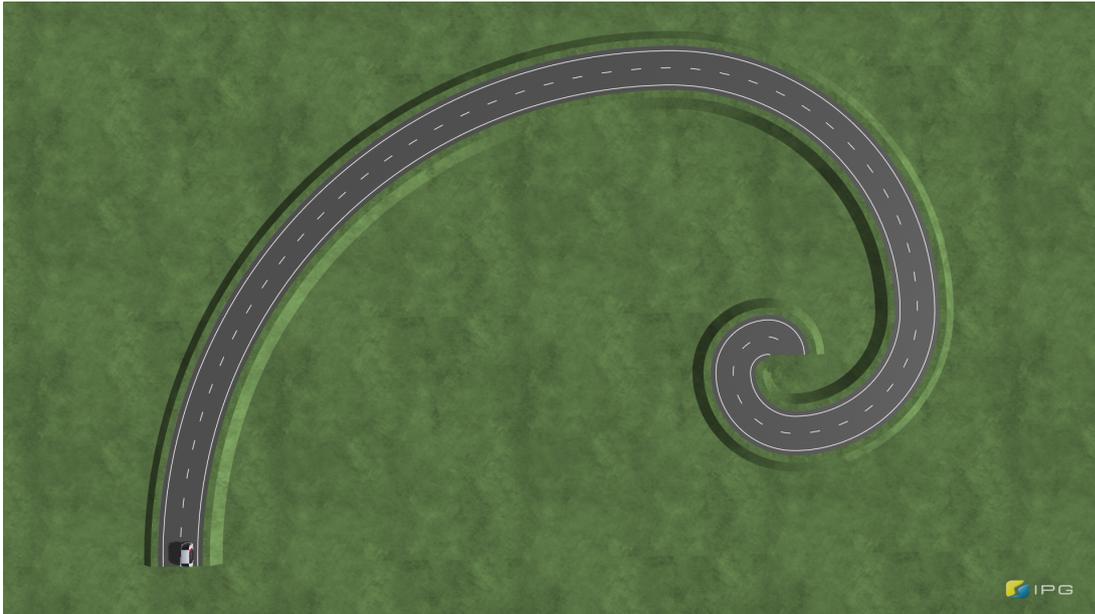


Abbildung 8-16: Zuziehende Kreisfahrt als Testmanöver für die Begrenzung der Fahrzeug-Querbeschleunigung. Die Kurvenkrümmung steigt mit der gefahrenen Strecke monoton an.

Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn  $\mu_{\max}$  sowie der zeitgleichen Längsbeschleunigung  $a_{\text{set},s}$ . Der Versuch besteht aus zwei Fahrten entlang der in Abbildung 8-16 dargestellten Straße. Dabei werden dem Planer unterschiedliche Grenzwerte für  $\mu_{\max}$  übergeben:

Tabelle 8-1: Verwendete Reibwerte für die Versuche zur Begrenzung der maximalen Querbeschleunigung.

Versuch Nr.	$\mu_{\max,\text{sim}}$	$\mu_{\max}$	$\Delta_{\text{pos},\text{max}}$
1	0,2	0,25	$\begin{bmatrix} \infty \\ \infty \\ \infty \end{bmatrix}$
2	0,2	0,19	$\begin{bmatrix} \infty \\ \infty \\ \infty \end{bmatrix}$

Der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn  $\mu_{\max,\text{sim}}$  wird in beiden Versuchen in CarMaker auf  $\mu_{\max,\text{sim}} = 0,2$  gesetzt. In Versuch 1 wird dem Planer ein zu hoher Wert ( $\mu_{\max} = 0,25$ ) übergeben, was zur Planung zu dynamischer Soll-Trajektorien für die aktuellen Bedingungen führt. Der Wert von  $\mu_{\max}$  wird dabei gewählt, da dies dem Maximum entspricht, das die verwendete TP verarbeiten kann<sup>255</sup>. Im zweiten Versuch wird hingegen eine korrekte Schätzung der Grenzen simuliert ( $\mu_{\max} = 0,19$ ). Während dieser Versuche wird die Neuplanung der Soll-Trajektorien bei Überschreitung eines Grenzwerts für die Regelabweichung (BLS als Eskalationsmechanismus) verhindert, indem  $\Delta_{\text{pos},\text{max}} = \infty$  (bzw. auf einem Wert deutlich größer als die auftretenden Regelabweichungen) gesetzt wird.

<sup>255</sup>Die eingesetzte TP ist für den Einsatz im innerstädtischen Personenverkehr konzipiert und unterstützt daher keine Planung sehr hoher Querbeschleunigungen. Die hier präsentierte Versuchsdurchführung mit niedrigen Reibwerten und Beschleunigungen ändert aufgrund der Linearität des Modells jedoch nichts an den erhaltenen Aussagen.

Das zweite Szenario betrachtet die maximale Längsbeschleunigung als Teil der dynamischen Ausführungsgrenzen. Dazu wird ein Anfahren an einer 10 %igen Steigung simuliert (vgl. Abbildung 8-17). In diesem Szenario limitiert die spezifische Aktorleistung und die vorhandene Steigung die maximale Längsbeschleunigung des Fahrzeugs (vgl. Abbildung 6-2). Ohne Berücksichtigung der Aktorgrenzen wird durch die TP eine Soll-Trajektorie geplant, der das Fahrzeug aufgrund der begrenzten Aktorleistung nicht folgen kann, was in der Folge zu einer longitudinalen Regelabweichung führt. Der Reibwert der Fahrbahn stellt in diesem Szenario keinen begrenzenden Faktor dar ( $\mu_{\max, \text{sim}} = \mu_{\max} = 1$ ).

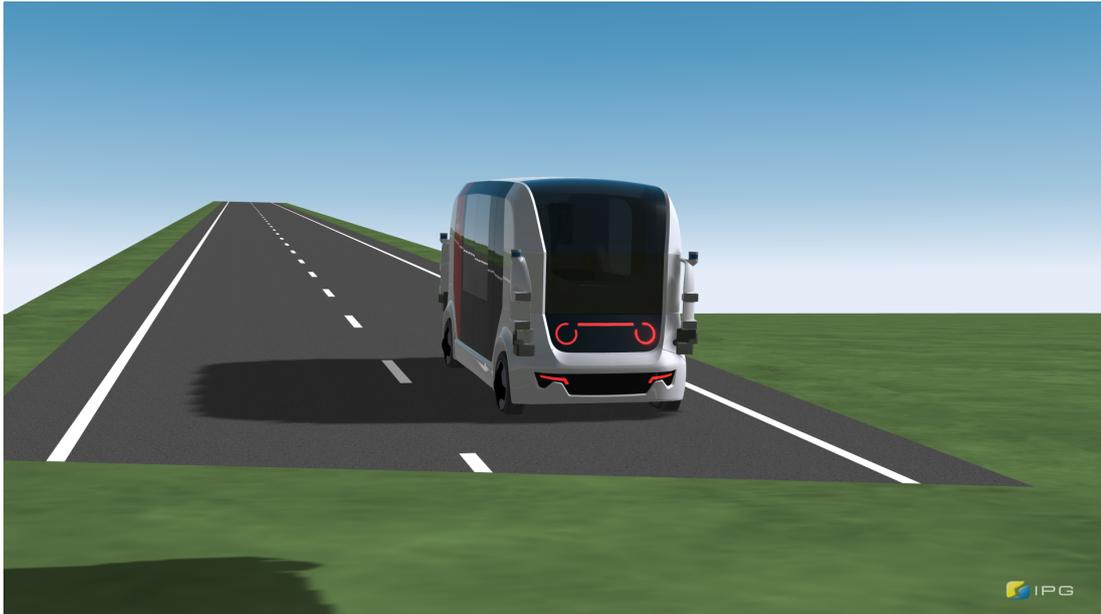


Abbildung 8-17: Anfahrt an einer 10 %igen Steigung als Testmanöver für die Beschleunigungsbegrenzung durch die Aktorik des Fahrzeugs.

Die Simulation wird dabei erneut zweifach durchgeführt (vgl. Tabelle 8-2). Die Aktormodelle des Fahrzeugs sind so parametrisiert, dass auf der Steigung in der Simulation eine maximale Längsbeschleunigung von  $1,75 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  realisiert werden kann. Der TP wird im ersten Versuch eine zu hohe Längsbeschleunigungsgrenze von  $2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  übergeben. Anschließend wird eine weitere Simulation mit Übergabe einer korrekten Grenze ( $1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ ) an die TP simuliert. In diesen Szenarien wird wie zuvor eine Trajektorienneuplanung verhindert, indem  $\Delta_{\text{pos}, \text{max}} = \infty$  gesetzt wird.

Tabelle 8-2: Verwendete Grenzen für die Versuche zur Analyse der maximalen Längsbeschleunigung.

Versuch Nr.	$\left(\frac{P_{\text{tr}, \text{max}}}{m \cdot v_{\text{set}, s}} - q_s \cdot g\right)_{\text{sim}}$	$\left(\frac{P_{\text{tr}, \text{max}}}{m \cdot v_{\text{set}, s}} - q_s \cdot g\right)_{\text{TP}}$	$\Delta_{\text{pos}, \text{max}}$
1	$1,75 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\begin{bmatrix} \infty \\ \infty \\ \infty \end{bmatrix}$
2	$1,75 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\begin{bmatrix} \infty \\ \infty \\ \infty \end{bmatrix}$

### Versuchsauswertung

Abbildung 8-18 zeigt die geplante Soll-Längsgeschwindigkeit des Fahrzeugs für beide Versuche der zuziehenden Kreisfahrt. In der ersten Phase des Versuchs (bis ca. 15 s) beschleunigt das Fahrzeug konstant von der Startgeschwindigkeit, bis die krümmungsabhängige Maximalgeschwindigkeit für den derzeitigen Streckenabschnitt erreicht wird. Anschließend beginnt die Reduktion der Soll-Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Kurvenkrümmung.

Für den betrachteten Fall eines zu hohen angenommenen Reibwerts ( $\mu_{\max} = 0,25$ ) wird die Soll-Längsgeschwindigkeit nicht rechtzeitig ausreichend reduziert, so dass nach 18 s die erforderliche Querbeschleunigung zum Folgen der Soll-Trajektorie das vorhandene Reibwertpotential übersteigt. Ab diesem Zeitpunkt geht die Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs verloren und die Positionsabweichung zwischen Soll-Trajektorie und Ist-Zustand steigt stark an (vgl. Abbildung 8-19). Die Überschreitung des Reibwertpotentials führt schließlich zu einem vollständigen Verlassen der Fahrbahn und somit unter Realbedingungen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Unfall.

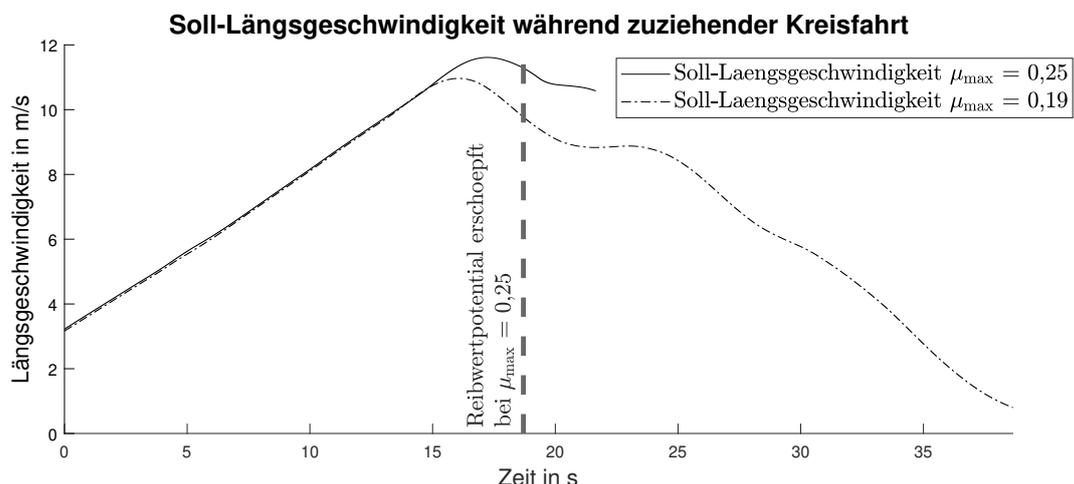


Abbildung 8-18: Von der TP geplante Soll-Längsgeschwindigkeiten des Fahrzeugs für die zuziehende Kreisfahrt.

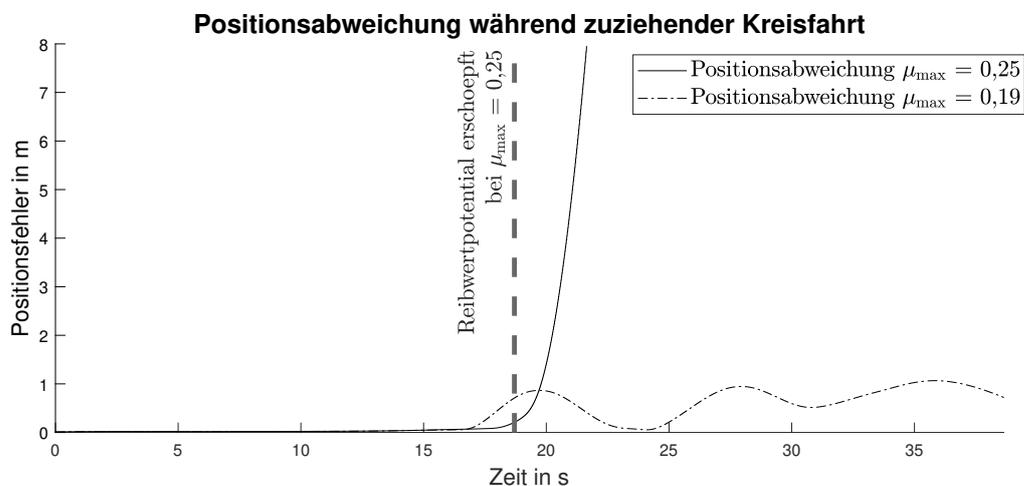


Abbildung 8-19: Absolute Positionsabweichung des Fahrzeugs während des Szenarios der zuziehenden Kreisfahrt.

Wird der TP hingegen eine korrekte Schätzung der Reibwertbedingungen als Randbedingung übergeben, wird die Soll-Längsgeschwindigkeit frühzeitig reduziert (gestrichelte Linie in Abbildung 8-18), so dass die resultierende Querschleunigung unterhalb des Reibwertpotentials bleibt. Die Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs bleibt somit erhalten und die Positionsabweichung bleibt limitiert (gestrichelte Linie in Abbildung 8-19), so dass die zuziehende Kreisfahrt bis zum Fahrbahnde abgefahren werden kann. Die im Vergleich zu anderen Versuchen innerhalb dieses Kapitels hohe Regelabweichung (vgl. bspw. Abbildung 8-14) ist auf den Betrieb nah an den Reibwertgrenzen zurückzuführen.

In Abbildung 8-20 ist die Positionsabweichung in Längsrichtung für die beiden Szenarien der Steigungsanfahrt dargestellt. Wird die Längsbeschleunigungsgrenze der verfügbaren Akteurleistung bei der Planung der Soll-Trajektorie berücksichtigt ( $a_{s,max} = 1,5 \frac{m}{s^2}$ ), ist das Fahrzeug in der Lage, die Soll-Trajektorie mit einer kurzzeitigen maximalen Positionsabweichung von 39 cm zu folgen, die anschließend vollständig ausgegletzt wird. Ohne Berücksichtigung der korrekten Grenzen ( $a_{s,max} = 2 \frac{m}{s^2}$ ) entsteht ein dauerhafter Beschleunigungsfehler, wodurch die Positionsabweichung kontinuierlich und unbegrenzt anwächst. Dies stellt ein potentiell gefährliches Verhalten dar und muss daher durch die Rückmeldung der spezifischen Akteurleistung in Gleichung 6-9 verhindert werden. Bei der Vorgabe der Beschleunigungsgrenze  $a_{s,max}$  für die TP ist zudem zu beachten, dass die FTR Beschleunigungsreserven zur Kompensation von Positions- bzw. Geschwindigkeitsabweichungen benötigt. Andernfalls kann eine einmal entstandene Abweichung nicht durch eine zusätzliche Längsbeschleunigung kompensiert werden.

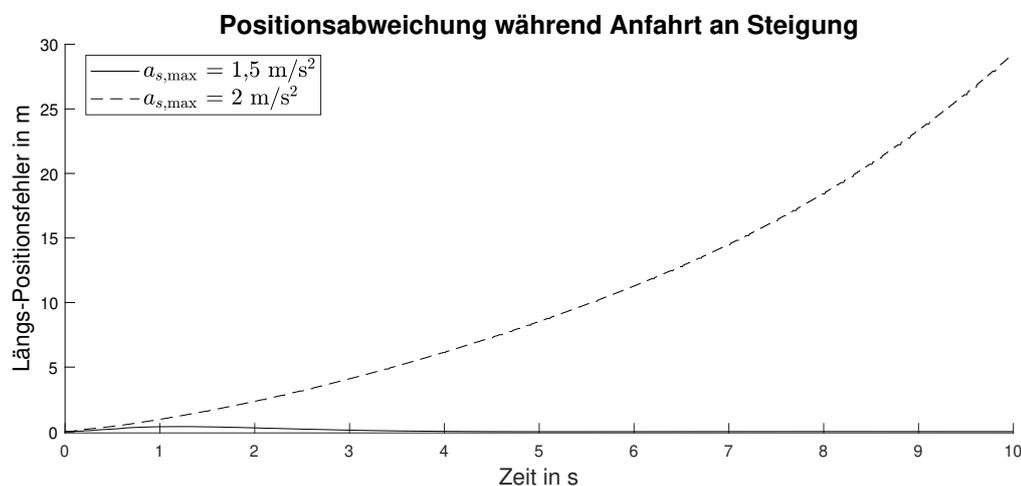


Abbildung 8-20: Längs-Positionsabweichung des Fahrzeugs während der Anfahrt an einer 10 %igen Steigung.

Durch die beiden Versuche der zuziehenden Kreisfahrt sowie der Anfahrt an einer Steigung konnte die Relevanz und Wirksamkeit der entwickelten Rückmeldung von Beschleunigungsgrenzen an die TP nachgewiesen werden. Ohne die Kenntnis der fahrdynamischen Grenzen plant die TP Soll-Trajektorien, die zu einem Verlust der Kontrollierbarkeit führen können. Im Falle einer korrekten Schätzung der fahrdynamischen Grenzen stellt die Berücksichtigung selbiger durch die TP hingegen die dynamische Umsetzbarkeit geplanter Soll-Trajektorien sicher. Da eine korrekte

Schätzung im Betrieb nicht garantiert werden kann, ist darüber hinaus der Eskalationsmechanismus in Form der BLS-Architektur erforderlich. Durch das Triggern einer Neuplanung und gleichzeitiger Reduktion der angenommenen Beschleunigungsgrenzen kann so ein unbegrenztes Anwachsen der Regelabweichung, wie sie in Abbildung 8-19 zu beobachten ist, verhindert werden<sup>256</sup>.

Die Wirksamkeit der kinematischen Grenzen ist unmittelbar aus der Herleitung auf Basis der möglichen Momentanpollagen ersichtlich und bedarf daher keiner separaten Überprüfung.

Die entwickelte Schnittstelle zwischen FTR und TP zur Übermittlung der fahrdynamischen Konsequenzen aus den Fahrzeugeigenschaften ermöglicht somit die Abstrahierung der TP von einem spezifischen Fahrzeug. Der TP wurde in den durchgeführten Versuchen kein Fahrzeugwissen über die Inhalte der Schnittstelle aus Gleichung 6-9 hinaus übergeben. Die Tatsache, dass ohne eine Berücksichtigung der korrekten Grenzen ein unbegrenztes Anwachsen der Regelabweichung stattfindet, erfüllt die in Anforderung A1.3 aufgestellte Voraussetzung für einen Informationsaustausch zwischen Modulen bzw. Diensten. Da die Wirksamkeit der Schnittstelle durch die zuvor diskutierten Versuche aufgezeigt werden konnte, ist zudem Anforderung A1.8 erfüllt.

### 8.3.4 Prädiktive Vorsteuerung

Der in Kapitel 5 entwickelte Ansatz für eine prädiktive Vorsteuerungsarchitektur wird innerhalb der HiL-Testumgebung getestet. Die Wahl der Testumgebung ist mit der in Abschnitt 8.3.1 aufgezeigten Lokalisierungsqualität begründet. Dabei besteht die Zielsetzung, durch die Gegenüberstellung des transienten Fahrzeugverhaltens mit der entwickelten prädiktiven Vorsteuerung und einer FTR ohne entsprechende Maßnahmen nachzuweisen, dass die Regelabweichung bei Umsetzung des transienten Fahrzeugverhaltens signifikant reduziert werden kann. Die Reduktion der Regelabweichung trotz der architekturbedingten grundlegenden Asynchronität stellt die vorrangige Motivation für die Entwicklung der prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur dar.

Für die Anwendung der prädiktiven Vorsteuerung ist zunächst eine Parametrisierung der FIR-Filter gemäß der in Kapitel 5 entwickelten Methodik erforderlich. Das Vorgehen und die resultierende Parametrisierung für die Simulationsmodelle der UNICAR<sup>agil</sup> Fahrzeuge in der CarMaker Simulationsumgebung wird in Anhang A.4 beschrieben.

### Versuchsbeschreibung

Es wird ein Testszenario für ein Ausweichmanöver vor einem Hindernis simuliert (vgl. Abbildung 8-21). Das Ego-Fahrzeug beschleunigt zunächst aus dem Stillstand und folgt anschließend mit konstanter Geschwindigkeit dem Fahrstreifen. Das blau dargestellte Fahrzeug fährt rückwärts aus einer Parklücke und blockiert somit die freie Weiterfahrt. Um das transiente Fahrzeugverhalten zu untersuchen, wird angenommen, dass das blaue Fahrzeug aufgrund einer Verdeckung (z. B.

---

<sup>256</sup>Die korrekte Umsetzung des Eskalationsmechanismus durch die Algorithmen der verwendeten TP ist vor einer Anwendung des Konzepts gesondert zu überprüfen (vgl. Abschnitt 9.2).

Baumbewuchs, grün markiert) erst kurz zuvor von der Umfeldsensorik des Ego-Fahrzeugs erkannt wurde und daher ein Ausweichen in Form eines Fahrstreifenwechsels die beste Option darstellt<sup>257</sup>. Das Szenario kombiniert Längs- und Querdynamik und demonstriert so die Bedeutung der Umsetzung des transienten Fahrzeugverhaltens mit möglichst geringer zeitlicher Verzögerung, um eine Kollision zu verhindern. Die Simulation wird erneut zweimal durchgeführt, einmal mit der entwickelten prädiktiven Vorsteuerung auf Basis von FIR-Filtern und einmal als Referenz mit einer Vorsteuerung, die ausschließlich auf den Sollgrößen für den aktuellen Zeitpunkt basiert, d. h. ohne zeitliche Vorausschau auf der Soll-Trajektorie. Der Gierwinkel des Fahrzeugs wird in beiden Simulationen so gewählt, dass während des gesamten Manövers  $\psi_{\text{set}} = \psi_{\text{c,set}}$  gilt.

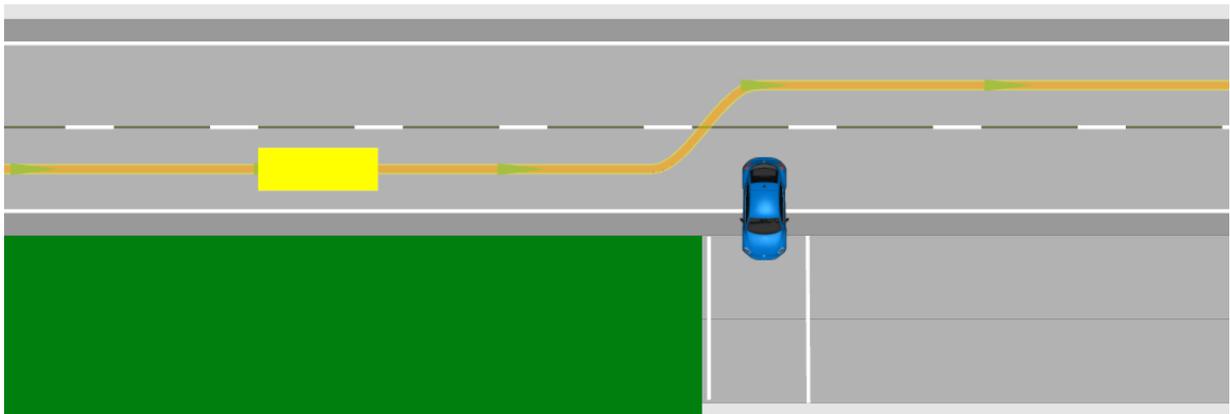


Abbildung 8-21: Szenario zum Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur. Dargestellt ist das Ego-Fahrzeug (gelb), der translatorische Pfad der gefahrenen Soll-Trajektorie und ein ausparkendes Fahrzeug als dynamisches Hindernis (blau). Die grüne Fläche symbolisiert eine Verdeckung, z. B. durch Baumbewuchs.

Um den Einfluss der prädiktiven Vorsteuerung bei sprunghaftigen Umplanungen der Soll-Trajektorie aufgrund einer Änderung im dynamischen Umfeld des Fahrzeugs zu überprüfen, wird weiterhin das bereits in Abschnitt 5.2.3 diskutierte und in Abbildung 5-6 dargestellte Szenario simuliert. Dabei wird zunächst eine von der Ausgangsgeschwindigkeit von 15 km/h beschleunigte Soll-Trajektorie entlang des Fahrstreifens (ohne Quer- bzw. Gieranregung) verwendet. Zum Zeitpunkt des Erkennens eines neuen Hindernisses wird sprunghaft auf eine neue Soll-Trajektorie umgeschaltet, die einen Fahrstreifenwechsel sowie ein zeitgleiches Verzögern in den Stillstand beinhaltet. Der Gierwinkel des Fahrzeugs wird erneut so gewählt, dass während des Ausweichvorgangs  $\psi_{\text{set}} = \psi_{\text{c,set}}$  gilt.

### Versuchsauswertung

Die Posenabweichungen der drei Fahrzeug-Freiheitsgrade während des Testszenarios sind in den Abbildungen 8-22, 8-23 und 8-24 dargestellt. Dabei repräsentiert die gestrichelte Linie jeweils den Abweichungsverlauf für das Referenzszenario ohne prädiktive Vorsteuerung und die durchgezogene Linie den Verlauf bei der Nutzung der FIR-Filterarchitektur.

<sup>257</sup>Winner, H.: Grundlagen von Frontkollisionsschutzsystemen (2015), S. 896.

Die Versuche zeigen, dass durch die Nutzung der prädiktiven Vorsteuerung eine signifikante Verbesserung der Posenabweichungen erzielt werden kann. Für den Längsfreiheitsgrad zeigt sich die Verbesserung bereits beim Anfahrvorgang zu Beginn des Szenarios. Durch die frühzeitige Anforderung einer Längsbeschleunigung im Vergleich zum Referenzszenario kann die Überhöhung der Regelabweichung um ca. 49 % reduziert werden. Da das Szenario über die gesamte Distanz längsdynamische Anregungen enthält, wirkt sich die prädiktive Vorsteuerung durchweg positiv aus.

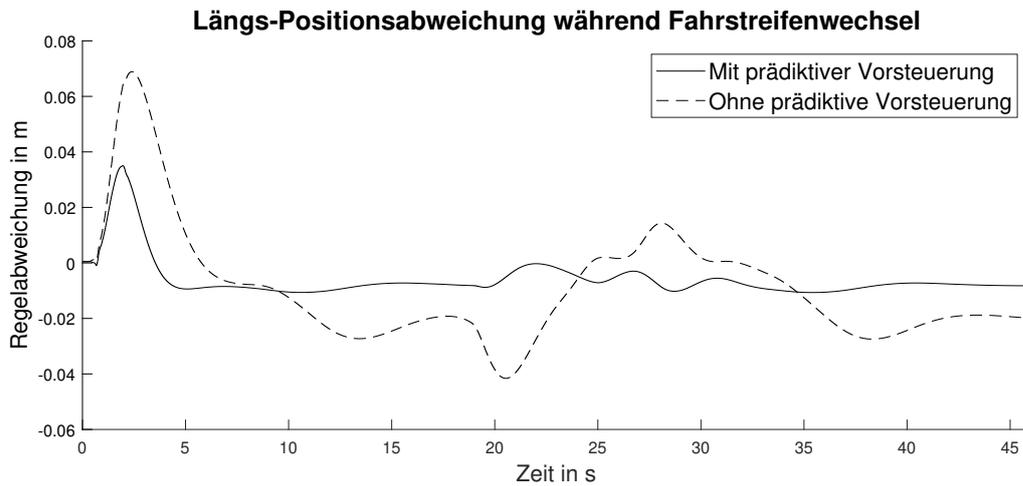


Abbildung 8-22: Längsabweichung des Fahrzeugs während des Szenarios zum Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur.

Bei der Querabweichung während des Fahrstreifenwechsels zeigt sich eine wechselnde negative bzw. positive Regelabweichung (vgl. Abbildung 5-5). Durch die frühzeitige Anforderung der Soll-Lenkwinkel wird die resultierende Querabweichung signifikant reduziert und zudem früher der stationäre Zustand ohne bleibende Regelabweichung erreicht. Gleiches gilt für die Gierabweichung, die ebenfalls maßgeblich von den FIR-Filtern der Lenkung abhängig ist.

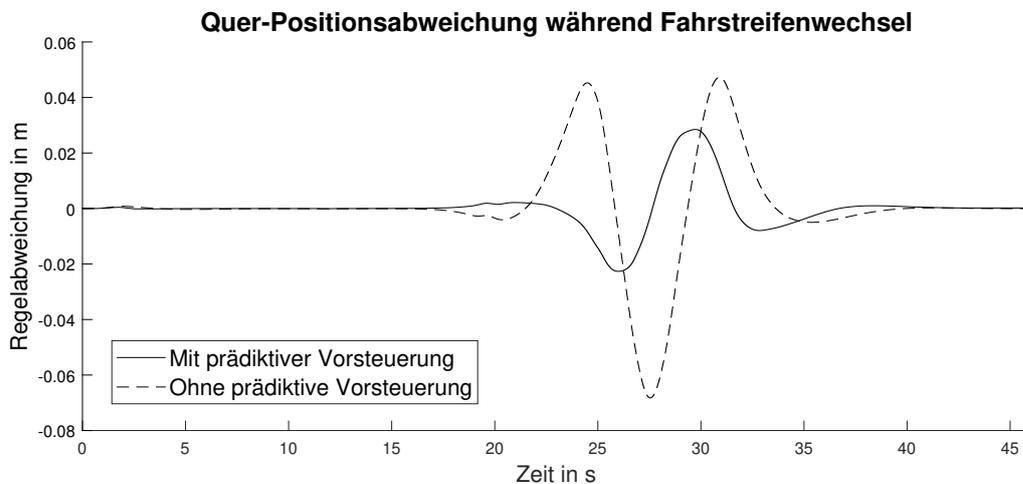


Abbildung 8-23: Querabweichung des Fahrzeugs während des Szenarios zum Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur.

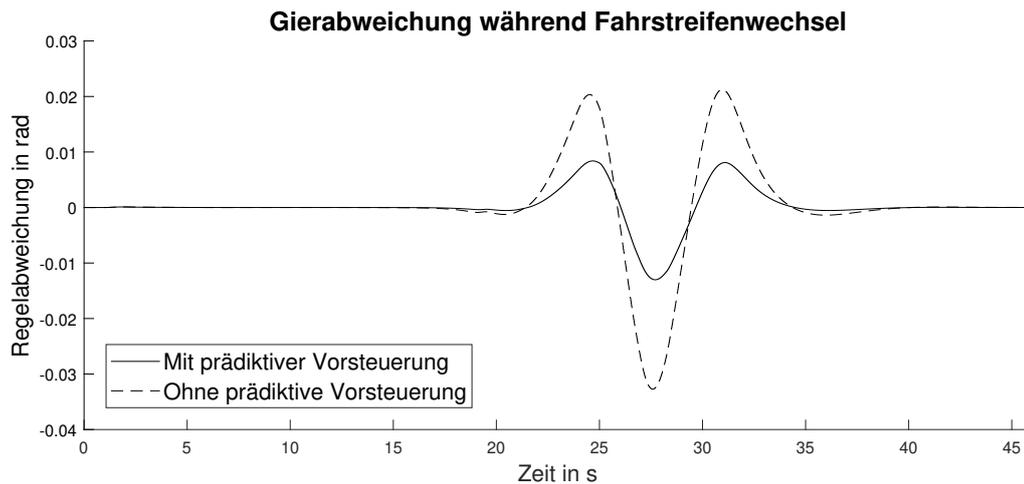


Abbildung 8-24: Gierabweichung des Fahrzeugs während des Szenarios zum Nachweis der Wirksamkeit der entwickelten prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur.

Das Testszenario demonstriert somit das Potential der prädiktiven Vorsteuerung für die Anwendung im Rahmen einer gekapselten FTR und kann in Situationen wie dem in Abbildung 8-21 dargestellten unerwartetem Hindernis den Unterschied zwischen einer Kollision und einem erfolgreichen Ausweichen darstellen. Obwohl die erzielten Verbesserungen der Posenausweichungen erheblich sind, kann keine perfekte Kompensation erreicht werden. Dies resultiert aus mehreren prinzipbedingten Einschränkungen. Zunächst ist die Stellratengrenze der Aktorik zu nennen, die eine vollständige Kompensation der Systemdynamik durch Anhebung der Sollwertamplitude verhindert und somit ein wechselndes Voraus- bzw. Nacheilen des Fahrzeugs erforderlich macht. Weiterhin verursachen unvollkommene Modellannahmen einen Fehler, da die für die Parametrisierung der FIR-Filter gemessenen Impulsantworten nicht zeitinvariant sind und bspw. von der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängen<sup>258</sup>. Abhilfe können hier adaptive Herangehensweisen wie bspw. ein Gain-Scheduling Ansatz schaffen, in dessen Rahmen FIR-Filter für unterschiedliche Fahrzeuggeschwindigkeiten ermittelt werden und zwischen den verschiedenen Parametrisierungen während der Fahrt umgeschaltet wird. Weiterhin führt die erhöhte zeitliche Verschmierung des kombinierten Filter-Aktor-Systems zu einem erhöhten Fehler, da der Zustandsrückführung ein größeres Zeitbudget für kompensatorische Reaktionen innerhalb der Zwei-Freiheitsgrade-Struktur der FTR zur Verfügung steht. Die Zustandsrückführung wirkt sich zudem während der Systemanregung der Vorsteuerung unterschiedlich aus. Während des Vorseilens des Systems vor der eigentlichen Anregung bewirkt die Zustandsrückführung eine Dämpfung der Vorsteuerung, d. h. die Regeleinriffe wirken der Vorsteuerung entgegen. Im Zeitbereich nach der Anregung unterstützt die Zustandsrückführung hingegen die Vorsteuerung<sup>259</sup>.

Die Ergebnisse des simulierten sprungartigen Umschaltvorgangs sind in Abschnitt A.5 im Anhang dargestellt. Durch den durchgeführten Vergleich der Regelabweichungen zwischen einer sprung-

<sup>258</sup>Das Bohrmoment des Reifens verringert sich bspw. stark mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit.

<sup>259</sup>Mögliche Gegenmaßnahmen für die Interaktionseffekte zwischen prädiktiver Vorsteuerung und Zustandsrückführung wurden in Abschnitt 5.2.3 vorgestellt.

artig geänderten Soll-Trajektorie mit einer Referenzfahrt ohne Umschaltung wurde aufgezeigt, dass die entwickelte prädiktive Vorsteuerung mit der gewählten Parametrisierung die Regelgüte bei Umschaltungen nur geringfügig verschlechtert. Die absolute Höhe der Abweichung ist dabei von Randbedingungen wie der gewählten Vorausschauweite, der Systemdynamik der Aktorik sowie der Parametrisierung der Zustandsrückführung abhängig. Für eine spezifische Anwendung müssen daher die in Abschnitt 5.2.3 aufgezeigten Abwägungen im Rahmen der Auslegung erfolgen. Wird die Regelgüte bei Umschaltungen für eine Anwendung unzulässig verschlechtert, kann auf den in Abschnitt 6.2.2 vorgestellten Mechanismus zur zeitlichen Überschneidung von Soll-Trajektorien zurückgegriffen werden, um einen Anteil der Vorausschau hinsichtlich ihrer Wirkung bei Umschaltungen zu neutralisieren.

In Summe kann mit den gewählten Testszenarios die Wirksamkeit der prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur zur Unterstützung der Kapselung der FTR in einer modularen, serviceorientierten Systemarchitektur aufgezeigt werden. Das Fahrzeug ist in der Lage, das transiente Fahrzeugverhalten umzusetzen, ohne dass eine zeitliche Synchronisierung mit der FTR oder eine über die in Gleichung 6-9 kommunizierten Größen hinausgehende Anpassung der Soll-Trajektorie an die Systemdynamik der Aktorik erforderlich ist. Die TP kann daher ohne fahrzeugspezifisches Wissen agieren, ohne durch die Trennung der planenden und ausführenden Ebene funktional eingeschränkt zu sein. Dabei sind die Anforderungen A1.1, A1.4 und A1.9 betroffen, deren vollständige Erfüllung sich jedoch erst in Kombination mit den übrigen Nachweisversuchen im Rahmen dieses Kapitels ergibt.

### 8.3.5 Weitere Versuche

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die in den Kapitel 4 bis 6 entwickelten zentralen Gegenmaßnahmen für die Defizitvermeidung durch die Kapselung der FTR getestet und die zugehörigen Anforderungen aus Tabelle 3-1 verifiziert. Um die darüber hinaus noch ausstehenden Anforderungen an die gekapselte FTR zu verifizieren, werden weitere Versuche durchgeführt.

#### **Robustheit der FTR gegenüber Latenzen und Jitter der Planungsebene**

Gemäß Anforderung A1.4 dürfen Latenzen und Jitter der TP keinen Einfluss auf die Performance und Stabilität der FTR besitzen. Durch die gewählte Trajektorienschnittstelle mit einer absolut zeitreferenzierten Soll-Trajektorie und deutlich größerer zeitlicher Länge als der durchschnittlichen Zykluszeit der TP (vgl. Abschnitt 7.1.1), wird dieses Ziel berücksichtigt. Die Zielsetzung des folgenden Tests besteht dabei darin nachzuweisen, dass durch Latenzen bzw. im Jitter auf dem Kommunikationspfad zwischen TP und FTR keine signifikanten Steigerungen der Regelabweichungen verursacht werden.

Zur Verifikation der Anforderungen werden Versuche in der HiL-Testumgebung durchgeführt. Diese Wahl ist damit begründet, dass für die Bewertung des Einflusses von Latenzen und Jitter

erneut genaue Kenntnisse des fahrdynamischen Ist-Zustands erforderlich sind, die in den Realfahrzeugen nur eingeschränkt zur Verfügung stehen. In der HiL-Testumgebung können dabei gezielt Störungen eingestreut werden, die in identischer Form in den Realfahrzeugen auftreten können, so dass eine Übertragbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist.

### Versuchsbeschreibung

Der Versuch besteht aus einem doppelten Fahrstreifenwechsel, der durch Festlegung des Gierwinkelprofils  $\psi_{\text{set}} = \psi_{c,\text{set}}$  Anregungen für alle drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs enthält. Das Manöver beginnt mit einer Längsgeschwindigkeit von 50 km/h, die während des Fahrstreifenwechsels soweit reduziert wird, dass eine Quereschleunigung von  $1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  nicht überschritten wird. Die hohe Geschwindigkeit wird gewählt, da erwartet wird, dass nicht kompensierte Latenzen bzw. Jitter bei höheren Geschwindigkeiten größere Auswirkungen entfalten. Abbildung 8-25 zeigt den translatorischen Pfad der gefahrenen Soll-Trajektorie.



Abbildung 8-25: Doppelter Fahrstreifenwechsel als Testszenario für die Robustheit ggü. Latenzen der Planungsebene. Der Gierwinkel des Fahrzeugs wird so gewählt, dass während des gesamten Manövers  $\psi_{\text{set}} = \psi_{c,\text{set}}$  gilt.

Um eine Latenz der TP künstlich zu erzeugen, wird eine empfangene Soll-Trajektorie im zugehörigen Conditional Task des FTR-ASOA-Dienstes (vgl. Abbildung 8-1) für einen definierten Zeitraum zurückgehalten. Die dargestellte Soll-Trajektorie wird insgesamt 9 Mal hintereinander abgefahren und dabei variierende Latenzen in das System eingeführt (Tabelle 8-3). Als Referenz werden zunächst drei Fahrten ohne Latenz simuliert, anschließend werden Soll-Trajektorien für jeweils 500 ms zurückgehalten. Um eine kombinierte Latenz und Jitter zu simulieren, finden weiterhin drei Versuche mit einer zufälligen Latenz zwischen 0 und 1000 ms für jede neue Soll-Trajektorie statt. Während der Versuche wird die Posenabweichung für die drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs gemessen.

Tabelle 8-3: Testszenarien zum Nachweis der Robustheit der FTR ggü. Latenzen der Planungsebene.

Szenario-Nr.	Eingestreuete Latenz	Anzahl Wiederholungen
1	0	3
2	500 ms	3
3	[0, 1000] ms	3

### Versuchsauswertung

Aus den durchgeführten Versuchen geht hervor, dass Latenzen und Jitter der TP keinen signifikanten Einfluss auf die Regelabweichungen besitzen, da die Unterschiede der Regelabweichungen im

Vergleich zum Referenzszenario 1 äußerst gering ausfallen<sup>260</sup>. Die maximale Differenz beträgt für Szenario 2 ca. 0,24 cm in der Translation und ca. 0,01° im Gierfreiheitsgrad, für Szenario 3 fallen die Abweichungen mit 0,26 cm bzw. 0,01° ähnlich gering aus. Die Ergebnisse konnten in den beiden Wiederholungen der Versuche bestätigt werden. Da die eingestreuten Latenzen in Szenario 2 und 3 bereits als sehr hoch im Vergleich zu realen Einflüssen in den Fahrzeugen anzusehen sind, wird die auftretende Abweichung als ausreichend gering bewertet, um Anforderung A1.4 zu verifizieren.

Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, da für die Schnittstelle zwischen TP und FTR eine Soll-Trajektorie mit absoluter Zeitreferenz und signifikant größerer zeitlicher Länge als die Zykluszeit der TP gewählt wurde (vgl. Abschnitt 7.1.1). Eine Latenz der TP, die größer als die zeitliche Länge der Soll-Trajektorie ist, würde zu einem Fehler in den Eingangsdatenüberprüfungen der FTR führen. Dies wird jedoch als unkritisch erachtet, da eine solch hohe Latenz bereits durch die Fahrzeug-Selbstwahrnehmung erkannt werden muss und entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden<sup>261</sup>.

### Unabhängigkeit der FTR von Trajektorien-Quelle

Gemäß der Anforderungen A1.1 sowie A1.2 darf die FTR nicht auf eine Kenntnis der Quelle der empfangenen Soll-Trajektorie angewiesen sein und sie muss eine dynamische Rekonfiguration zur Laufzeit durch den Orchestrator unterstützen, ohne interne Moduswechsel zu erfordern. Um die Erfüllung dieser Anforderungen nachzuweisen, wird ein Versuch entworfen und durchgeführt. Dabei besteht die Zielsetzung nachzuweisen, dass die FTR in der Lage ist, ohne zusätzliche Maßnahmen mit Umschaltungen der Trajektorienquelle durch den zentralen Orchestrator umzugehen und dabei nicht auf vordefinierte Verteilungsstrategien der Radlenkwinkel angewiesen zu sein. Da für den Nachweis der Anforderungserfüllung keine Anforderungen an die Lokalisierungsgüte gestellt werden, wird für die Versuchsdurchführung auf die Realfahrzeuge des Projekts UNICAR*agil* zurückgegriffen.

### Versuchsbeschreibung

Zur Verifikation der o. g. Anforderungen wird ein zweistufiges Szenario durchgeführt. Es werden zwei unabhängige TP-Dienste instanziiert, die jeweils eine unterschiedliche Soll-Trajektorie versenden. In der ersten Stufe des Szenarios wird die erste TP mit der Trajektorienvorverarbeitung verbunden und die versendete Soll-Trajektorie an die FTR weitergereicht. Nachdem das Ende dieser Soll-Trajektorie erreicht wurde, wird durch den Orchestrator im Fahrzeug eine Rekonfiguration auf den zweiten TP-Dienst vorgenommen und die entsprechende Soll-Trajektorie weitergegeben.

---

<sup>260</sup>Die exakten Verläufe der Regelabweichungsdifferenzen (absolute translatorische Abweichung und Gierabweichung) zwischen den verschiedenen Szenarien sind in Abbildung A-12 und A-13 in Anhang A.6 dargestellt.

<sup>261</sup>Das Abfahren einer Soll-Trajektorie mit entsprechend hoher Latenz bedeutet, dass diese Soll-Trajektorie nicht auf seit dem Planungszeitpunkt aufgetretene Änderungen des dynamischen Umfeld angepasst wurde. Dies ist aus Safety-Überlegungen ab einer gewissen Latenz als kritisch zu erachten, auch wenn es aus regelungstechnischer Perspektive keine Herausforderung für die FTR darstellt.

Der Wechsel zwischen den beiden TP-Diensten erfolgt dabei ausschließlich vor dem Dienst der Trajektorienvorverarbeitung. Die übrigen Dienste, inkl. der FTR, bleiben identisch konfiguriert und besitzen keine Kenntnis über den Umschaltprozess. In der FTR findet daher insbesondere kein Moduswechsel statt und der Programmablauf wird nicht angepasst.

Der translatorische Pfad des innerhalb dieses Szenarios verwendeten Manövers ist in Abbildung 8-26 dargestellt. Die Soll-Trajektorie der ersten TP stellt einen doppelten Fahrstreifenwechsel dar, an dessen Ende angehalten wird. Die zweite Soll-Trajektorie ist erneut ein doppelter Fahrstreifenwechsel, jedoch in die entgegengesetzte longitudinale und laterale Richtung. Dabei wird das Fahrzeug nicht gewendet, d. h. der zweite Teil des Szenarios erfolgt in umgekehrter Fahrtrichtung.

Um zusätzlich die Erfüllung der Anforderung A1.7 (Ableitung der Lenkstrategie allein aus der Soll-Trajektorie) nachzuweisen, wird für beide Soll-Trajektorien innerhalb dieses Szenarios eine unterschiedliche Lenkstrategie gewählt. In der ersten Hälfte wird eine vorrangige Vorderachslenkung in der Soll-Trajektorie kodiert, in der zweiten Hälfte wird diese Vorgabe gespiegelt, so dass erneut die beiden Räder in Fahrtrichtung vorne höhere Lenkwinkel realisieren.

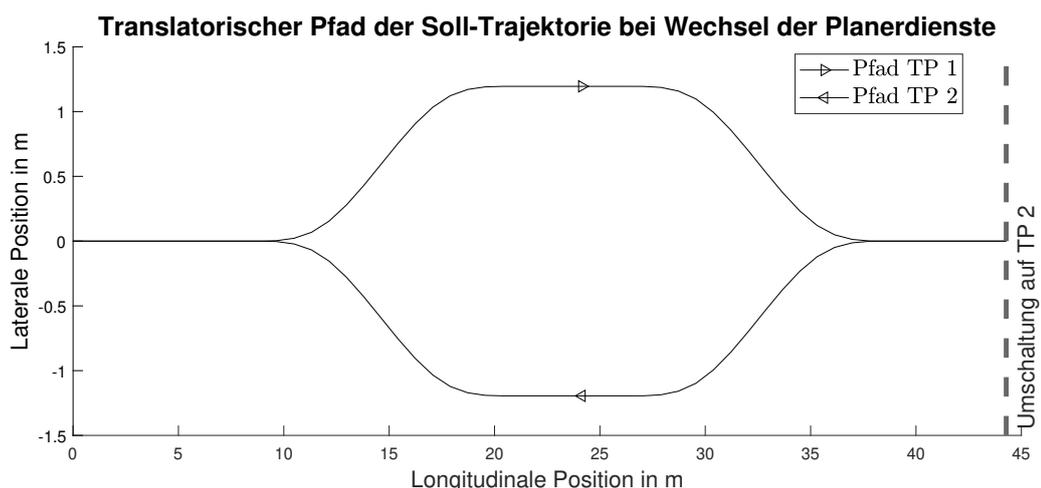


Abbildung 8-26: Translatorischer Pfad der beiden gefahrenenen Soll-Trajektorien zum Nachweis der Unabhängigkeit der gekapselten FTR von der Quelle der empfangenen Soll-Trajektorie. Die Soll-Trajektorie der ersten TP führt von links nach rechts und wird in Vorzugsrichtung abgefahren. Die Soll-Trajektorie der zweiten TP wird von rechts nach links entgegen der Vorzugsrichtung (ohne Wenden) befahren. Am rechten Ende des Pfades findet eine dynamische Rekonfiguration durch den Orchestrator statt.

## Versuchsauswertung

Die von der FTR berechneten Soll-Lenkwinkel für die 4 Dynamikmodule des Fahrzeugs sind in Abbildung 8-27 dargestellt. Aus dem symmetrischen Verlauf der Soll-Lenkwinkel ist ersichtlich, dass nach dem Wechsel des TP-Dienstes erfolgreich eine gespiegelte Lenkstrategie angewandt wird. Da dies allein auf den Wechsel der Soll-Trajektorie zurückzuführen ist, wird Anforderung A1.7 erfüllt. Weiterhin zeigt der Versuch, dass keine verdeckten Asymmetrien in Form ungewollter Offsets zwischen den beiden Fahrtrichtungen innerhalb der FTR existieren.

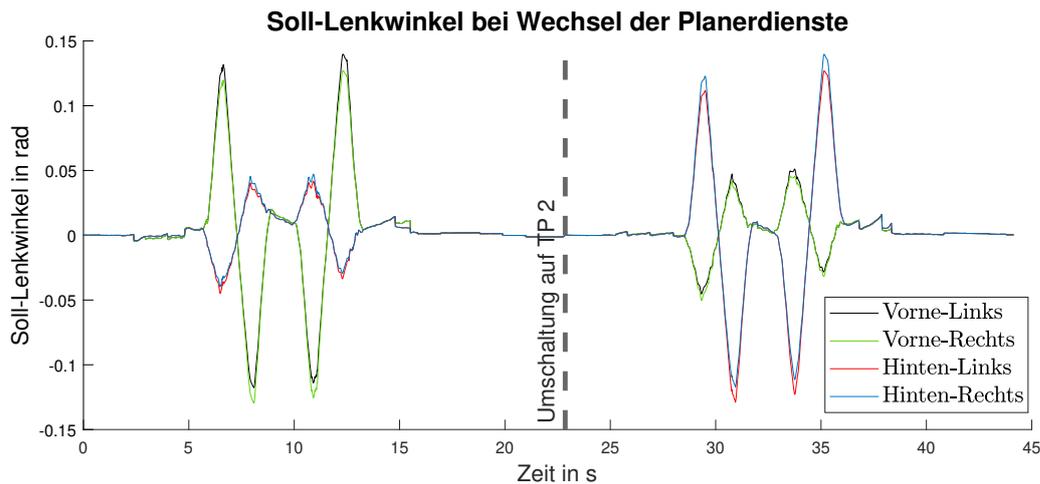


Abbildung 8-27: Von der FTR berechnete Soll-Lenkwinkel für die 4 Dynamikmodule des Fahrzeugs während des Szenarios zum Nachweis der Unabhängigkeit der gekapselten FTR von der Quelle der empfangenen Soll-Trajektorie. Der Zeitpunkt der Umschaltung der TP-Dienste ist durch die gestrichelte vertikale Linie gekennzeichnet.

Aus der Tatsache, dass die unterschiedlichen Soll-Trajektorien der beiden unabhängigen TP-Dienste erfolgreich abgefahren werden, wird die Erfüllung der Anforderungen A1.1 und A1.2 gefolgert. Die FTR besitzt während des gesamten Szenarios keine Kenntnis über die Quelle der empfangenen Soll-Trajektorie und führt keine Anpassungen des Programmablaufs oder des Betriebsmodus durch. Die zu fahrende Soll-Trajektorie der FTR wird allein durch die Rekonfiguration des Orchestrators variiert<sup>262</sup>. Für die FTR besteht somit keine Abhängigkeit von der konkreten Instanz der TP, so lange ausschließlich Umschaltvorgänge im Stillstand betrachtet werden. Für eine Umschaltung während der Fahrt, wie sie bspw. bei einem Wechsel in den Betriebsmodus "Sicheres Anhalten" im Projekt UNICARagil erforderlich ist, sind zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der Übergänge zwischen den Soll-Trajektorien der TP-Dienste zu berücksichtigen.

### Unabhängigkeit der Freiheitsgrade

Anforderung A1.5 fordert die unabhängige Beeinflussbarkeit der drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs (horizontale Translation + Gieren). Durch die Einzelradaktorik wird das Fahrzeug zu einem holonomen System, sofern keine Lenkwinkelgrenzen erreicht werden. Die Zielsetzung der folgenden Versuche besteht daher darin nachzuweisen, dass die einzelnen Freiheitsgrade allein auf Basis der Soll-Trajektorie ohne signifikante Verkopplungen manipuliert werden können. Potentielle Verkopplungen zeigen sich dabei unmittelbar an den Regelabweichungen für die jeweiligen Freiheitsgrade.

Zum Nachweis der Anforderungserfüllung werden Versuche mit dem Realfahrzeug durchgeführt. Die Wahl der Testumgebung resultiert aus dem Umstand, dass im Rahmen der Tests keine quantitativen Schlüsse aus den gemessenen Regelabweichungen gezogen, sondern ausschließlich qualitative Aussagen abgeleitet werden. Die Versuche demonstrieren daher neben der Erfüllung

<sup>262</sup>Die beiden TP-Dienste dieses Szenarios können in einer realen Anwendung bspw. die reguläre Automation und eine Leitwarte darstellen.

von Anforderung A1.5 auch erneut die Funktionsfähigkeit der entwickelten Referenzarchitektur im Realfahrzeug.

## Versuchsbeschreibung

Zum Nachweis der Unabhängigkeit der drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs werden drei spezifische Versuche durchgeführt, in denen jeweils einzelne Freiheitsgrade aktiv manipuliert werden, während die Bewegung der anderen Freiheitsgrade konstant gehalten wird.

Zunächst wird ein Slalom ohne Gieraktivität, d. h. ohne Rotation des Fahrzeugs um die Hochachse durchgeführt. Die verwendete Soll-Trajektorie enthält daher einen konstanten Gierwinkel entsprechend der Fahrbahnrichtung und einen variablen Kurswinkel, der eine Translation des Fahrzeugs entlang einer abklingenden Sinus-Schwingung erzeugt (vgl. Abbildung 8-28). Die Fahrt wird mit einer Längsgeschwindigkeit von 15 km/h durchgeführt.

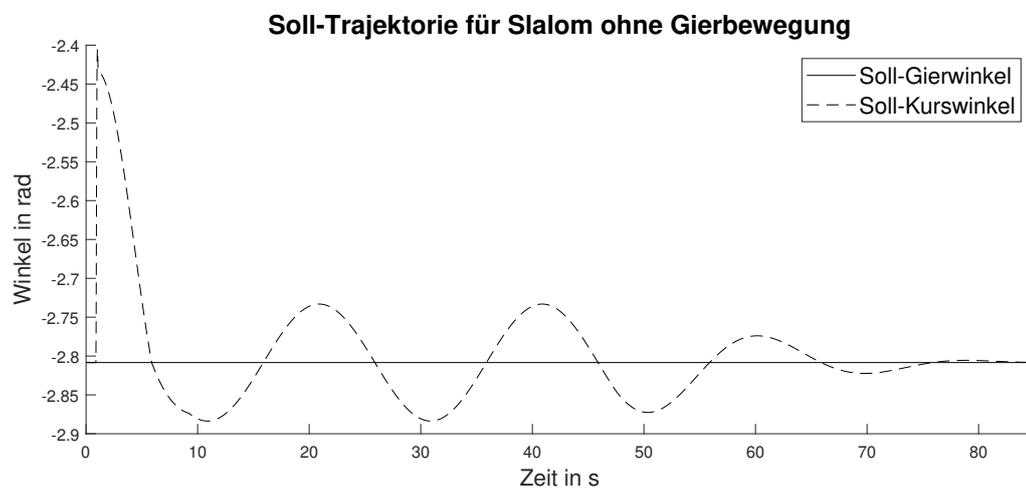


Abbildung 8-28: Soll-Gierwinkel und Soll-Kurswinkel für einen Slalom ohne Gierbewegung des Fahrzeugs. Die Nulllage der Winkel ergibt sich aus der Ausrichtung der Runway des "August-Euler-Flugplatzes" in Griesheim.

Der zweite Versuch stellt eine konstante Translation des Fahrzeugmittelpunkts dar, während das Fahrzeug eine rotatorische Bewegung um die Hochachse vollführt. Für diesen Fall ist der Kurswinkel des Fahrzeugs konstant in Richtung der Ausrichtung der Fahrbahn und der Gierwinkel wird über eine Sinusschwingung variiert (vgl. Abbildung 8-29). Die Fahrt wird mit einer Längsgeschwindigkeit von 8 km/h durchgeführt<sup>263</sup>.

Der dritte und letzte Versuch beinhaltet ein seitliches Einparken durch einen Querversatz des Fahrzeugs (ohne Längs- bzw. Gieraktivität). Der Soll-Gierwinkel des Fahrzeugs ist in diesem Fall erneut konstant, der Soll-Kurswinkel ist für die Dauer des Einparkvorgangs um 90° gedreht ggü. dem Soll-Gierwinkel (vgl. Abbildung 8-30). Der Versuch wird aufgrund der deutlich erhöhten Kippgefahr bei einer Fahrt mit 90° Schwimmwinkel mit einer reduzierten Geschwindigkeit von 1 km/h durchgeführt.

<sup>263</sup>Die geringere Geschwindigkeit dient der Minimierung des Risikos eines Umkippens des Fahrzeugs.

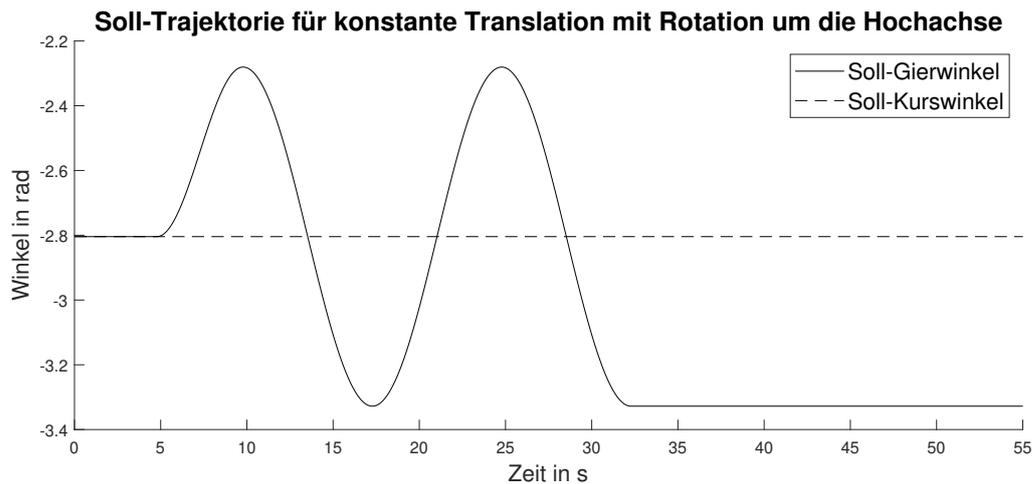


Abbildung 8-29: Soll-Gierwinkel und Soll-Kurswinkel für eine konstante Translation des Fahrzeugs mit einer gleichzeitigen Rotation um die Hochachse.

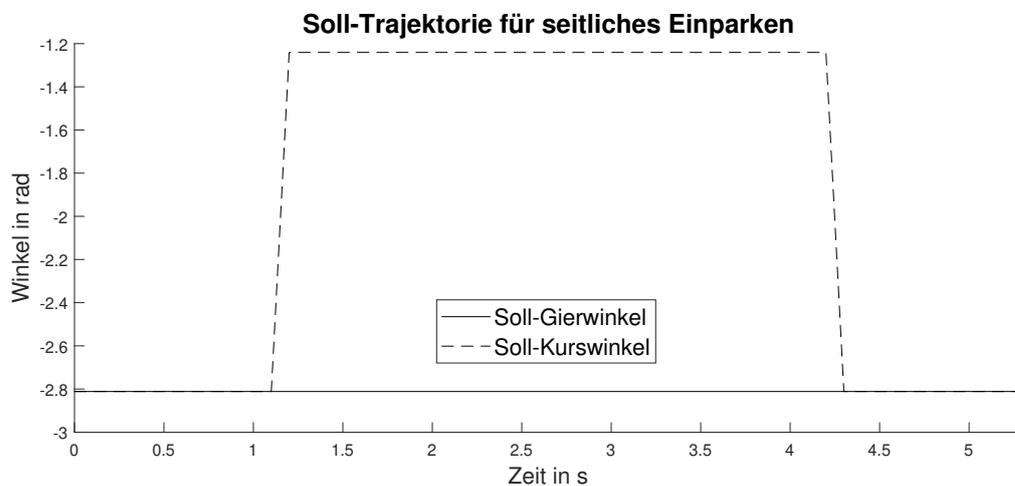


Abbildung 8-30: Soll-Gierwinkel und Soll-Kurswinkel für einen seitlichen Einparkvorgang.

## Versuchsauswertung

Abbildung 8-31 zeigt die von der FTR berechneten Soll-Lenkwinkel für die 4 Räder des Fahrzeugs während des Szenarios der Slalomfahrt ohne Gieren. Aufgrund der nicht vorhandenen Gieraktivität führen alle Räder dieselbe Lenkbewegung zur Erzeugung der Translation aus. Aus Abbildung 8-32 ist zudem ersichtlich, dass das Ziel des Szenarios erfüllt wird. Die maximale Gierabweichung ist unter  $0,5^\circ$ , so dass die Translation näherungsweise ohne Gierbewegung erfolgt. Die Längs- und Querabweichung des Fahrzeugs liegen innerhalb der zuvor ermittelten Genauigkeit der FZS.

Die Soll-Lenkwinkel für die 4 Räder während der konstanten Translation mit Rotation um die Fahrzeug-Hochachse sind in Abbildung 8-33 dargestellt. Aufgrund der angeforderten Gieraktivität unterscheiden sich die Lenkwinkel der 4 Räder voneinander<sup>264</sup>. Auch in diesem Szenario wird das Ziel der unabhängigen Beeinflussung des Gier-Freiheitsgrades erreicht (vgl. Abbildung 8-34).

<sup>264</sup>Zur Begründung siehe Abbildung 7-2.



Abbildung 8-31: Von der FTR berechnete Soll-Lenkwinkel für den Slalom ohne Gieraktivität des Fahrzeugs.

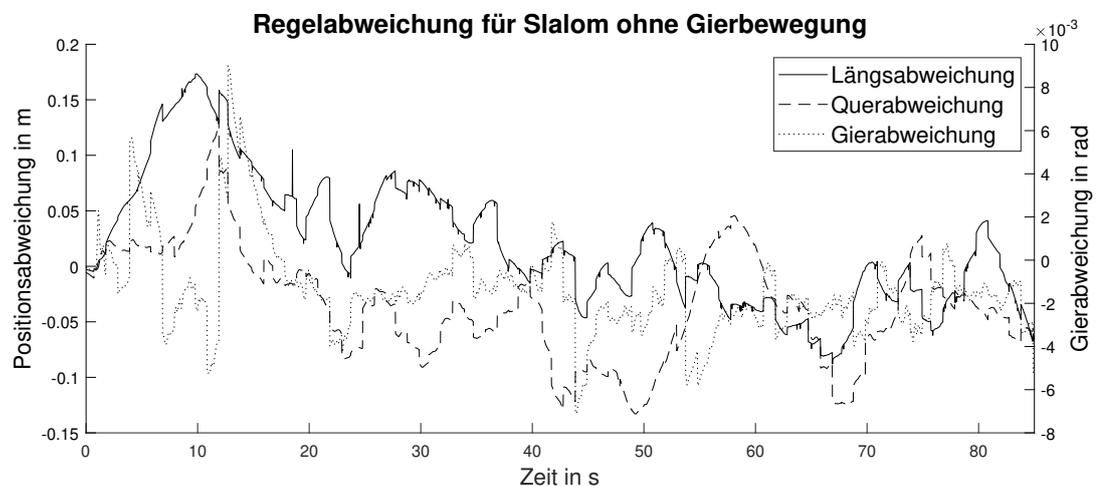


Abbildung 8-32: Regelabweichungen der drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs in Frenet-Koordinaten während des Slaloms ohne Gieraktivität des Fahrzeugs.

Die Positionsabweichungen des Fahrzeugs in Längs- und Querrichtungen sind innerhalb des Unsicherheitsintervalls der FZS, die maximale Gierabweichung liegt unter  $0,8^\circ$ . Das Fahrzeug ist damit in der Lage, die Gieraktivität von der Translation zu entkoppeln.

Für das seitliche Einparken des Fahrzeugs über einen Querversatz ist aufgrund der asymmetrischen Lenkwinkelgrenzen der UNICARagil Fahrzeuge eine unterschiedliche Drehung der Räder erforderlich. Durch diese Einschränkung kann das Fahrzeug ohne kinematische Verzwängungen nur mit einem Schwimmwinkel von exakt  $90^\circ$  fahren, jedoch dabei keine Korrekturen in Fahrzeug-Längsrichtung vornehmen. Die Regelabweichung während des Einparkens ist in Abbildung 8-35 dargestellt. Auch hier ist die Positionsabweichung innerhalb des Unsicherheitsintervalls der FZS und das Fahrzeug ist in der Lage, den Einparkvorgang ohne signifikante Gieraktivität vorzunehmen. Bei der dargestellten Abweichung ist zu beachten, dass durch die Darstellung in Frenet-Koordinaten die aus Fahrzeugsicht seitliche Bewegung durch die Längsabweichung repräsentiert wird. Die kurzzeitig hohen Gradienten der Längsabweichung bei  $t = 0,6$  s und

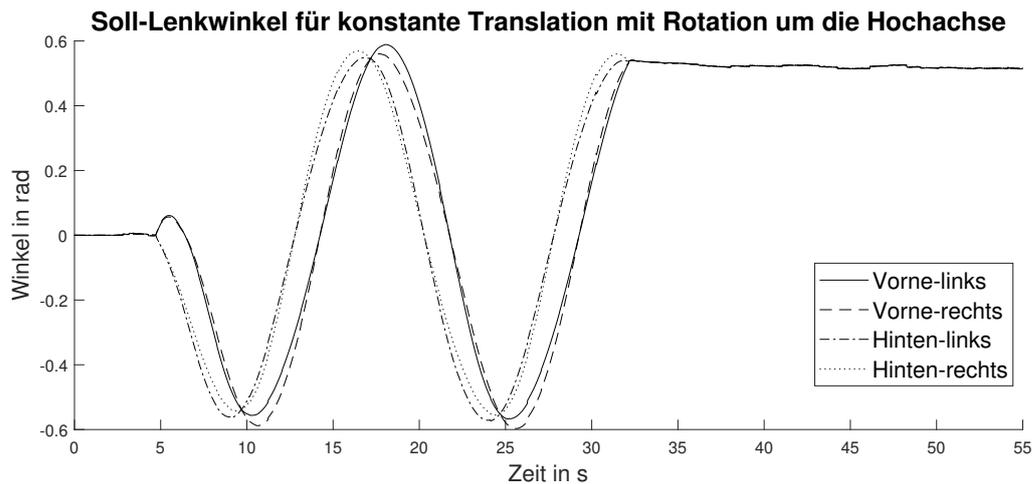


Abbildung 8-33: Von der FTR berechnete Soll-Lenkwinkel für die konstante Translation mit Rotation um die Hochachse des Fahrzeugs.

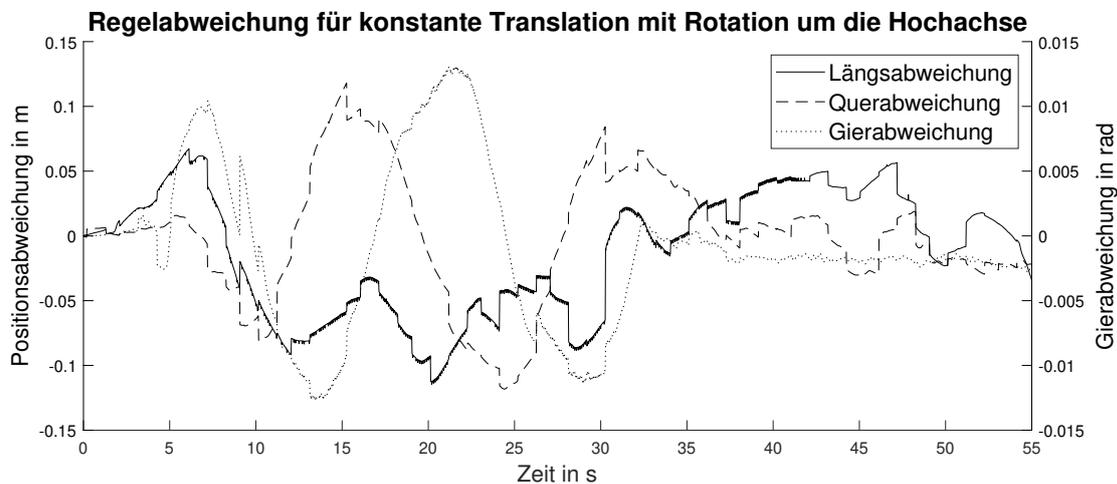


Abbildung 8-34: Regelabweichungen der drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs in Frenet-Koordinaten während der konstanten Translation mit Rotation um die Hochachse des Fahrzeugs.

$t = 3,8$  s sind mit der unebenen Fahrbahn zu erklären, da die Realfahrzeuge mit dem derzeitigen Integrationsstand der Aktorik noch nicht in der Lage sind, im Stillstand ein Haltemoment zu erzeugen. Unebenheiten führen somit unmittelbar zu einer Bewegung des Fahrzeugs, wenn die Soll-Trajektorie eine Stillstandsaufforderung enthält und daher keine Regeleingriffe erfolgen<sup>265</sup>.

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs von der entwickelten FTR unabhängig voneinander beeinflusst werden können, wodurch Anforderung A1.5 erfüllt wird. Weiterhin demonstriert die Nutzung der Realfahrzeuge erneut, dass die präsentierte Referenzarchitektur in der Lage ist, in einer realen Applikation und in realen Fahrversuchen ihre Funktion zu erfüllen. Die bereits zuvor diskutierte Eigenschaft der FTR, die Lenkstrategie alleine aus der erhaltenen Soll-Trajektorie ohne Modusumschaltung abzuleiten, wird in den Versuchen dieses Abschnitts ebenfalls erneut demonstriert (Anforderung A1.7).

<sup>265</sup>vgl. Zustandsdefinitionen der FTR in Abschnitt A.1.

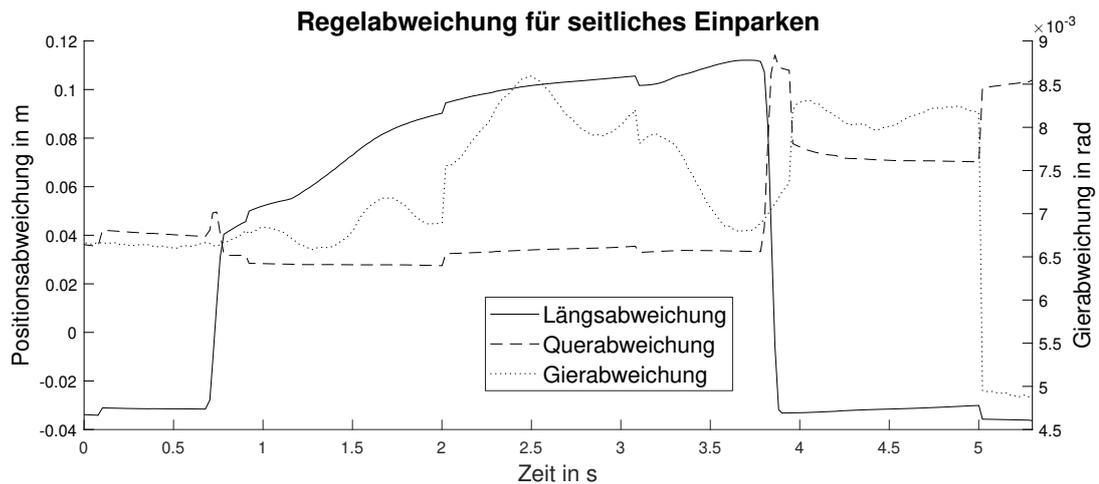


Abbildung 8-35: Regelabweichungen der drei Freiheitsgrade des Fahrzeugs in Frenet-Koordinaten während des seitlichen Einparkens des Fahrzeugs.

## 8.4 Zusammenfassung

Innerhalb des aktuellen Kapitels wurde die zuvor entwickelte Referenzarchitektur für eine gekapselte FTR auf die Forschungsfahrzeuge des Projekts UNICARagil appliziert. Die Anwendung innerhalb der Systemarchitektur des Projekts ermöglicht die Untersuchung des Verhaltens bzw. der Eigenschaften der FTR innerhalb einer realen bzw. realitätsnahen Umgebung. Dabei wurden abgestufte Testumgebungen in Form einer SiL- und HiL-Simulation sowie Fahrten mit den Realfahrzeugen genutzt.

Durch die Definition von Testfällen für die einzelnen Anforderungen aus Tabelle 3-1 und anschließende Durchführung sowie Auswertung der Tests konnten die übergeordneten Anforderungen an die gekapselte FTR verifiziert und somit Forschungsfrage 9 beantwortet werden. Die Erfüllung der teilfunktionsspezifischen Anforderungen (A2.x, A3.x und A4.x) wurde bereits während der Konzeptentwicklung in den vorherigen Kapiteln berücksichtigt. Auf diese Weise wurde die Wirksamkeit der entwickelten Gegenmaßnahmen gegen die zuvor identifizierten kapselungsbedingten Defizite aufgezeigt. Die Gegenmaßnahmen unterliegen dabei konzeptbedingten Limitationen, die während der Auswertung der jeweiligen Testfälle diskutiert wurden.

Die Robustheit der entwickelten Reglerarchitektur gegenüber Parameterunsicherheiten wurde in einer früheren Veröffentlichung bereits nachgewiesen. Durch eine Variation der angenommenen Fahrzeugmasse und des Massenträgheitsmoments des Fahrzeugs innerhalb der SiL-Testumgebung wurde gezeigt, dass eine Unterschätzung der Parameter um 20 % die Regelgüte nur geringfügig verschlechtert<sup>266</sup>. Die Schwankung der Masse bzw. des Massenträgheitsmoments stellt eine häufige Parameterunsicherheit im realen Betrieb dar, da die Anzahl und Position der Insassen bzw. die Zuladung variiert. Durch die Versuche konnte somit gezeigt werden, dass die entwickelte FTR hinsichtlich dieser Unsicherheit für einen realen Einsatz geeignet ist.

<sup>266</sup>Homolla, T.; Winner, H.: Encapsulated trajectory tracking control for autonomous vehicles (2022), S. 303-304.

Durch die Tests konnten die Anforderungen A1.1, A1.2, A1.4, A1.5, A1.7, A1.8 und A1.11 unmittelbar verifiziert werden. Anforderung A1.12 ist bereits formal durch die kontinuierliche Koordinatentransformation in ein lokales Navigationskoordinatensystem verifiziert, so dass kein separater Nachweisversuch erforderlich ist<sup>267</sup>. Die Erfüllung der übrigen Anforderungen (A1.3, A1.9 und A1.10) ergibt sich mittelbar aus den grundlegenden Konzeptentscheidungen für die entwickelte Referenzarchitektur. Lediglich die in Anforderung A1.6 geforderte Stabilitätsregelung wurde noch nicht verifiziert und stellt somit einen Teilbereich zukünftiger Forschungsaktivität dar (vgl. Abschnitt 9.2). Eine Übersicht über alle Anforderungen, die jeweilige Verifikationsmethode und die Ergebnisse der zugehörigen Tests ist in Tabelle A-1 in Anhang A.7 dargestellt.

---

<sup>267</sup>Die erforderlichen Koordinatentransformationen werden von der dazu verwendeten Programmbibliothek mit doppelter Genauigkeit ("double-precision") durchgeführt, was die Einführung für die automatisierte Fahrzeugführung signifikanter Rechenungenauigkeiten verhindert.

---

## 9 Fazit und Ausblick

Im nun folgenden abschließenden Kapitel der Arbeit werden zunächst die wesentlichen Aspekte der vorherigen Abschnitte zusammengefasst und anschließend eine Einordnung des erzielten Erkenntnisgewinns im Rahmen eines Gesamtfazits vorgenommen. Abschließend wird ein Ausblick auf weitere Forschungsaspekte gegeben.

### 9.1 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein vollständiger Entwicklungsprozess für eine gekapselte FTR innerhalb einer modularen und serviceorientierten Systemarchitektur mit starker Entkopplung der planenden und ausführenden Ebene durchlaufen. Basierend auf einer Funktionsdefinition wurden Anforderungen an die FTR abgeleitet, deren Einhaltung für die Funktionserfüllung ohne kapselungsbedingte Defizite erforderlich ist. Weiterhin wurde gezeigt, welchen Einfluss Einzelradaktork auf die Funktion und Architektur der FTR hat. Durch die Analyse wurden konkrete architekturbedingte Herausforderungen für die FTR identifiziert und aufgezeigt, dass etablierte Regelungskonzepte nicht ohne wesentliche Anpassungen bzw. Erweiterungen durch neue Teilfunktionen angewandt werden können.

Um zu vermeiden, dass die identifizierten Herausforderungen zu Defiziten für die automatisierte Fahrzeugführung durch die FTR führen, wurde der Lösungsraum erforderlicher Gegenmaßnahmen definiert und hinsichtlich der Anwendbarkeit in der betrachteten Architektur untersucht. Auf diese Weise wurde der Raum der möglichen Gegenmaßnahmen eingegrenzt und mögliche Lösungen zur Defizitvermeidung technisch ausgestaltet. Als Ergebnis liegen somit belastbare Lösungen zur Minimierung der kapselungsbedingten Auswirkungen auf die Funktionserfüllung der FTR vor.

Die auf Basis der ausgestalteten Gegenmaßnahmen entwickelte Referenzarchitektur für die gekapselte FTR wurde implementiert und dabei noch vorhandene Gestaltungsspielräume für eine konkrete Applikation der Architektur gesondert ausgewiesen. Durch die Ableitung und Durchführung geeigneter Tests wurde die Wirksamkeit der entwickelten Gegenmaßnahmen zur Defizitvermeidung analysiert und somit nachgewiesen, dass die identifizierten Herausforderungen in einer Anwendung in realen Fahrzeugen beherrscht werden können. Der Anwendungsbereich der FTR konnte daher auf modulare Systemarchitekturen mit starker funktionaler Trennung der planenden und ausführenden Ebene erweitert werden.

Die Ergebnisse der Arbeit bieten dabei einen Erkenntnisgewinn ggü. dem verfügbaren Stand der Technik aus der Literatur. Aufgrund der Defizite etablierter Fahrzeug-Systemarchitekturen und der damit verbundenen absehbaren Schwierigkeiten bei der effizienten Bewältigung der

durch die zunehmende Automatisierung erwarteten Herausforderungen, besteht offensichtlicher Handlungsbedarf für die Konzeption neuartiger Fahrzeugarchitekturen. Diese Motivation hat zur Schaffung des Forschungsprojekts UNICAR*agil* geführt, das die Zielsetzung verfolgt, disruptive und modulare Systemarchitekturen als Basis für zukünftige Anwendungen zu entwickeln. Die Handlungsbedarfe motivieren weiterhin unmittelbar die Entwicklung einer gekapselten FTR, deren genaue Sollfunktion durch Beantwortung von Forschungsfrage 1 (vgl. Abbildung 1-2) definiert werden konnte.

Neben den offensichtlichen Vorteilen der beschriebenen Systemarchitektur mit starker Entkopplung der verschiedenen Ebenen entstehen jedoch zusätzliche Herausforderungen bei der Entwicklung der beteiligten Komponenten. Falls aufgrund der Entkopplung signifikante Defizite entstehen sollten, welche die Vorteile der modularen Systemarchitektur überwiegen, würde dies die Anwendung der neuartigen Systemarchitektur einschränken bzw. verhindern. Diese Tatsache stellt die primäre Motivation für die durchgeführte Forschung innerhalb dieser Arbeit dar.

Die Herausforderungen für die gekapselte FTR sind dabei nicht unmittelbar offensichtlich. Der in Kapitel 3 durchgeführten Analyse und dem damit verbundenen Aufzeigen der drohenden Verluste an Funktionalität bzw. Performance kommt daher bereits ein Erkenntnisgewinn zu, da es das erste Mal ist, dass diese Probleme explizit aufgezeigt wurden. Durch diesen Erkenntnisgewinn wurden daher die Forschungsfragen 2 und 3 beantwortet. Die anschließende Untersuchung des Lösungsraums und die Ausgestaltung technischer Gegenmaßnahmen für die identifizierten Herausforderungen ermöglichte Klarheit über die zu erwartenden Gewinne und Verluste durch den Einsatz der betrachteten Architektur zu erzielen.

Der primäre Gewinn liegt in der Anwendbarkeit des Modularitätsansatzes selbst. Die konkreten Vorteile dieser Architektur wurden in Abschnitt 1.1 beschrieben und umfassen u. a. die Wiederverwendbarkeit von Modulen, die Reduktion der Komplexität und die dynamische Rekonfigurierbarkeit in Abhängigkeit der derzeitigen Rahmenbedingungen. Durch die Anwendung in den Forschungsfahrzeugen des Projekts UNICAR*agil* wurde die Wirksamkeit des Ansatzes formal verifiziert.

Durch die in dieser Arbeit vorgestellten Maßnahmen wurden die Auswirkungen der architekturbedingten Defizite minimiert. Dabei existiert keine explizite Referenz, mit der im Rahmen der Tests eine Falsifikation durchgeführt werden kann. Es wurde jedoch gezeigt, dass durch die entwickelten Gegenmaßnahmen die Herausforderungen soweit adressiert werden konnten, dass diese in einer realen Applikation keine Defizite darstellen.

Die neuartige Lokalisierungsangleichung ermöglicht die Verwendung unabhängiger sowie inkonsistenter Lokalisierungsfunktionen für die TP und FTR innerhalb derselben Wirkkette der automatisierten Fahrzeugführung. Durch diese Erweiterung werden unabhängige Entwicklungen für die einzelnen Module gefördert und es werden zusätzliche Freiheiten bei der Konfiguration der einzelnen Software-Dienste innerhalb des Fahrzeugs erreicht. Die zuvor unbeantwortete Forschungsfrage 5 konnte somit durch die präsentierte Lokalisierungsangleichung beantwortet

werden. Die Anwendung in den Fahrzeugen des Projekts UNICAR*agil* hat gezeigt, dass unabhängige Lokalisierungsfunktionen auch bzgl. des gewünschten Ausfallverhaltens im Rahmen des Safety-Konzepts Vorteile bieten. Treten in einer der Lokalisierungsfunktionen Posendriffs mit sehr hohen Gradienten auf, kann der Einfluss auf die Fahrzeugführung hingegen nicht vollständig kompensiert werden. Diese Einschränkung ist bei der Systementwicklung entsprechend zu berücksichtigen.

Durch die entwickelte prädiktive Vorsteuerungsarchitektur wird der Einfluss der grundlegenden Asynchronität zwischen TP und FTR auf die Umsetzung des geplanten Soll-Verhaltens minimiert. Dabei wird gezielt die Kenntnis des zukünftigen Fahrzeugverhaltens ausgenutzt, um die resultierende Regelabweichung und die benötigte Stellrate zu minimieren. Somit wurde Forschungsfrage 6 beantwortet. Da keine Anforderungen an fahrzeugspezifisches Wissen innerhalb der planenden Ebene gestellt werden, ist keine Anpassung der TP an nachgelagerte Komponenten erforderlich. Das Verfahren ermöglicht somit den Verzicht auf eine tiefgreifende Integration der planenden und ausführenden Ebene der automatisierten Fahrzeugführung und erweitert die Freiheiten bei der Gestaltung der Systemarchitektur im Rahmen einer konkreten Applikation. Durch die physikalischen Randbedingungen wie den begrenzten Stellraten ist es nicht möglich, eine vollständige Kompensation der Aktor-Systemdynamik vorzunehmen. Die präsentierte Lösung demonstriert jedoch einen Kompromiss, der unter den gegebenen Rahmenbedingungen die gegensätzlich Zielsetzungen gegeneinander abwägt und eine Verbesserung der Umsetzung des transienten Verhaltens erreicht.

Obwohl eine vollständige Trennung der TP und FTR theoretisch möglich wäre, wurde aufgezeigt, dass dies in Bezug auf die physikalische Umsetzbarkeit geplanter Trajektorien nicht vorteilhaft ist. Im Rahmen der Analysen konnte daher Kenntnis über die notwendige Integration der beiden Ebenen erlangt werden, die für die Vermeidung negativer Effekte erforderlich ist, und somit Forschungsfrage 4 beantwortet werden. Durch die Ableitung einer standardisierten Schnittstelle wird die Modularisierung nicht behindert und es wird ermöglicht, modulare Planungsdienste zu entwickeln, die nicht an eine konkrete Fahrzeugarchitektur angepasst sein müssen. Dies erweitert die Anwendbarkeit entwickelter Algorithmen und es wird erwartet, auf diese Weise Ressourceneinsparungen zu erzielen und Entwicklungszeiträume zu verkürzen. Durch die entwickelte Architektur, in der Wissen über das Fahrzeug ausschließlich innerhalb der FTR abgelegt ist und die daraus resultierenden Konsequenzen über die eingeführte Schnittstelle im Fahrzeug bereitgestellt werden, findet keine Verschlechterung ggü. einer integrierten Architektur statt. Dies ist damit begründet, dass die unterlagerte FTR eine höhere Taktrate aufweist als die TP und somit in jedem Zyklus der TP entsprechende aktuelle Informationen über die physikalischen Ausführungsgrenzen zur Verfügung stehen. Ein explizites Ablegen dieser Grenzen in der TP, wie es in etablierten Architekturen erfolgt, bietet somit in Hinblick auf die Informationsverfügbarkeit für die Planungsalgorithmen keine Vorteile.

In Summe sind somit keine wesentlichen Nachteile im Bezug auf die Bewegungsregelung durch die Verwendung der modularen Systemarchitektur erkennbar. Bei der Verwendung der entwickel-

ten Referenzarchitektur bestehen in verschiedenen Bereichen Freiheitsgrade für den Entwickler, die für die Verfolgung sekundärer bzw. eigener Zielsetzungen genutzt werden können. Die präsentierte Architektur beantwortet Forschungsfrage 8 und ermöglicht zudem, die Vorteile von Einzelradaktorik auszunutzen und vermeidet daher weitgehende Spezialisierungen hinsichtlich der Aktorarchitektur (Forschungsfrage 7), wie sie anderweitig häufig vorgenommen werden.

Die Arbeit trifft bewusst keine Aussage darüber, ob die Nutzung einer modularen serviceorientierten Systemarchitektur für einen bestimmten Anwendungsfall sinnvoll ist. Diese Entscheidung ist stets vor dem Hintergrund der konkreten Rahmenbedingungen zu treffen. Mit den erzielten Erkenntnissen wird jedoch die Grundlage für eine informierte Entscheidung über die eingesetzte Systemarchitektur gelegt, da die damit verbundenen Konsequenzen ersichtlich sind. Weiterhin konnte durch die Applikation auf die Fahrzeuge im Projekt UNICAR*agil* die Anwendbarkeit für reale Problemstellungen demonstriert und somit die finale Forschungsfrage 9 beantwortet werden.

## 9.2 Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit wurden die Rahmenbedingungen für eine gekapselte FTR innerhalb einer modularen, serviceorientierten Systemarchitektur geschaffen. Die einzelnen Teilfunktionen der Referenzarchitektur können dabei im Kontext konkreter Anwendungen weiter optimiert werden und so weitergehende Erkenntnisse generiert werden.

Dies umfasst alle in Abbildung 7-3 dargestellten Bereiche mit Gestaltungsspielraum, wie bspw. der Control Allocation zur Verfolgung sekundärer Zielsetzungen der Fahrzeugführung (z. B. einer Erhöhung der Reibwertreserve und eine energieoptimale Stellgrößenaufteilung). Auch das verwendete Regelgesetz für die Zustandsrückführung innerhalb der FTR sollte weitere Forschung erfahren. Es ist zu erwarten, dass durch die Integration von fortgeschrittenen Regelgesetzen eine Verbesserung des Störverhaltens erzielt und der Anwendungsbereich auf den fahrdynamischen Grenzbereich erweitert werden kann.

Für die Nutzung des vollständigen Potentials der in Kapitel 5 entwickelten prädiktiven Vorsteuerungsarchitektur ist die Auflösung des identifizierten mehrdimensionalen Optimierungsproblems zwischen TP, Vorsteuerung und Zustandsrückführung erforderlich. Dazu muss im Kontext einer konkreten Applikation eine Abwägung zwischen zeitlicher Vorausschau der Vorsteuerung und der Reglersteifigkeit erfolgen. Durch eine holistische Betrachtung gemeinsam mit den eingesetzten TP Algorithmen<sup>268</sup> kann zudem eine Filterung der Soll-Trajektorie als Basis für die Zustandsrückführung geprüft werden, um gegensätzliche Stelleingriffe vollständig zu vermeiden.

---

<sup>268</sup>Durch die Filterung wird die Soll-Trajektorie modifiziert, wofür Informationen aus der TP erforderlich sind, wie stark geplante Soll-Trajektorien verändert werden dürfen, ohne Folgeprobleme zu verursachen.

In Abschnitt 8.3.3 wurde die Wirksamkeit der Beschleunigungsgrenzenrückmeldung an die TP gezeigt. Für weitere Forschungen ist eine Integration der FTR mit einer TP angeraten, die den vollständigen Vektor der Ausführungsgrenzen aus Gleichung 6-9 integriert. So kann z. B. untersucht werden, ob die Neuplanung und Fahrzeugstabilisierung durch den diskutierten Eskalationsmechanismus in einer realen Anwendung gelingt. Weiterhin können bzw. sollten Umschaltvorgänge zwischen Soll-Trajektorien verschiedener Quellen genauer untersucht werden.

Weitere Aufmerksamkeit erfordert die Integration der Stabilitätsregelung in die FTR, um die Erfüllung von Anforderung A1.6 nachzuweisen. Durch eine Erweiterung der Stellgrößen der FTR durch dynamische Drehzahlgrenzen der einzelnen Räder können die beiden Systeme der ASR und des ABS unmittelbar in die FTR integriert und die Begrenzung des Radschlupfes auf den stabilen Teil der  $\mu$ -Schlupf-Kurve sichergestellt werden. Zur Verifikation des Ansatzes muss der Umsetzung dieser Grenzen in den Einzelradaktoren besondere Aufmerksamkeit zuteilwerden. Da einzelne Komponenten der Einzelradaktorik im Betrieb degradiert werden oder sogar vollständig ausfallen können, stellt die Kompensation von Aktordegradationen zudem einen weiteren vielversprechenden Pfad für weitere Forschungsaktivität dar.

Durch die modulare Struktur der FTR-Referenzarchitektur können die zuvor genannten Aspekte weitestgehend unabhängig verfolgt und modifiziert werden. Daher sind Weiterentwicklungen möglich, ohne die zentralen Erkenntnisse bzw. architektonischen Aspekte dieser Arbeit zu gefährden. Sie gibt somit den Rahmen für die weiteren Entwicklungen gekapselter FTR vor. Die Stabilität des Gesamtsystem muss dennoch stets individuell betrachtet und sichergestellt werden.

Eine vollständige Entfaltung der Vorteile der modularen Systemarchitektur ist erst zu erwarten, wenn die Architektur in einem größerem Umfang appliziert und verwendet wird. Dies umfasst die Nutzung verschiedener, diversitärer Implementierungen für die einzelnen Funktionen und somit die Ausnutzung der Austausch- und Wiederverwendbarkeit. Es ist daher zu hoffen, dass die Erkenntnisse dieser Arbeit und des Forschungsprojekts UNICAR*agil* Einzug in die Konzeption von Fahrzeug-Systemarchitekturen bei der Entwicklung zukünftiger Fahrzeugkonzepte finden.

## A Anhang

### A.1 Randbedingungen für die Funktionserfüllung der FTR

#### Notwendige Schnittstellen

Die FTR ist funktional maßgeblich von der TP sowie der FZS abhängig. Aus den beiden Modulen wird der Soll- bzw. Ist-Zustand des Fahrzeugs bezogen. Zusätzlich werden hochaufgelöste und genaue Informationen über die Systemzeit benötigt. Die von der FTR berechneten Stellgrößen werden an die Aktorik des Fahrzeugs kommuniziert, von der im Gegenzug Informationen über den aktuellen Aktorikzustand erhalten werden. Die Selbstbewertung der FTR wird an die zentrale Fahrzeug-Selbstwahrnehmung übermittelt.

Die FTR darf nicht auf Informationen über den derzeitigen Betriebsmodus des Fahrzeugs angewiesen sein, stattdessen wird die (De-)Aktivierung der FTR sowie die Verknüpfung von Schnittstellen über den zentralen Orchestrator und die verwendete Middleware vorgenommen.

#### Anwendungsfälle

Die FTR kommt in allen Betriebsmodi des automatisierten Fahrzeugs zum Einsatz, in denen es erforderlich ist, einer Soll-Trajektorie automatisiert zu folgen. So ist ihr Einsatz bspw. während einer regulären Automation, einem Degradationsmodus (z. B. "Sicheres Anhalten" im Projekt UNICAR*agil*) oder im Rahmen einer Teleoperation denkbar. Die FTR sollte keine Informationen über den Betriebsmodus des Gesamtfahrzeugs benötigen und ist daher in ihrer Konzeption nicht auf bestimmte Anwendungsfälle beschränkt. Ihre Aufgabe besteht stets aus den definierten Teilfunktionen.

#### Betriebszustände und Zustandswechsel

Die FTR verfügt über die folgenden Betriebszustände:

- Z1 (Nichtexistenz): Vollständige Deaktivierung des Dienstes, es finden daher keinerlei Berechnungen und keine Kommunikation statt. Die Rechenkapazitäten des Steuergeräts können anderweitig verwendet werden (z. B. während des Parkens oder dem Laden der Batterien).
- Z2 (Initialisierung): Startzustand nach erfolgter Instanziierung zur Reservierung von Speicher und Initialisierung aller relevanten Variablen.

- Z3 (Idle-Betrieb): Empfangsbereitschaft und Prüfung auf Erfüllung aller notwendigen Voraussetzungen zur Funktionserfüllung (Verfügbarkeit gültiger Eingangsdaten, erfolgte Zeitsynchronisierung und positive Statusrückmeldung der Aktorik). In diesem Zustand werden keine Stellgrößen an die Aktorik versendet.
- Z4 (Stillstand): Alle Kriterien aus Z3 sind erfüllt und die Soll-Trajektorie enthält für den aktuellen Zeitpunkt eine Stillstandsaufforderung. In diesem Zustand führt das Fahrzeug keine Bewegung aus, evtl. vorhandene Regelabweichungen werden daher nicht kompensiert. Die Räder können jedoch bereits in Richtung der späteren Fahrtrichtung gestellt werden.
- Z5 (Fahren): Alle Kriterien aus Z3 sind erfüllt und es liegt keine Stillstandsaufforderung vor. Die FTR berechnet Stellgrößen für die Aktorik und das Fahrzeug führt die gewünschte Soll-Bewegung aus.
- Z6 (Error): Zustand, in dem mind. ein Fehler innerhalb der FTR aufgetreten ist und daher keine Funktionsfähigkeit mehr gegeben ist. Je nach konkreter Implementierung können verschiedene Fehlerzustände vorliegen, deren Auswirkungen sich unterscheiden. Z6 stellt innerhalb der vorliegenden Beschreibung daher einen Sammelzustand dar.

Die FTR ist betriebsmodusunabhängig und besitzt daher auch keine Kenntnis über den derzeit gewählten Modus. Daher findet insbesondere auch keine Modusumschaltung für verschiedene Trajektorienquellen statt, die Rekonfiguration erfolgt bereits am Eingang der Soll-Trajektorie durch den zentralen Orchestrator.

Nachfolgend sind die Zustände sowie die Transitionen zwischen diesen dargestellt. Der Zustand Z6 kann aus allen anderen Zuständen mit Ausnahme von Z1 erreicht werden, aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine Darstellung verzichtet.

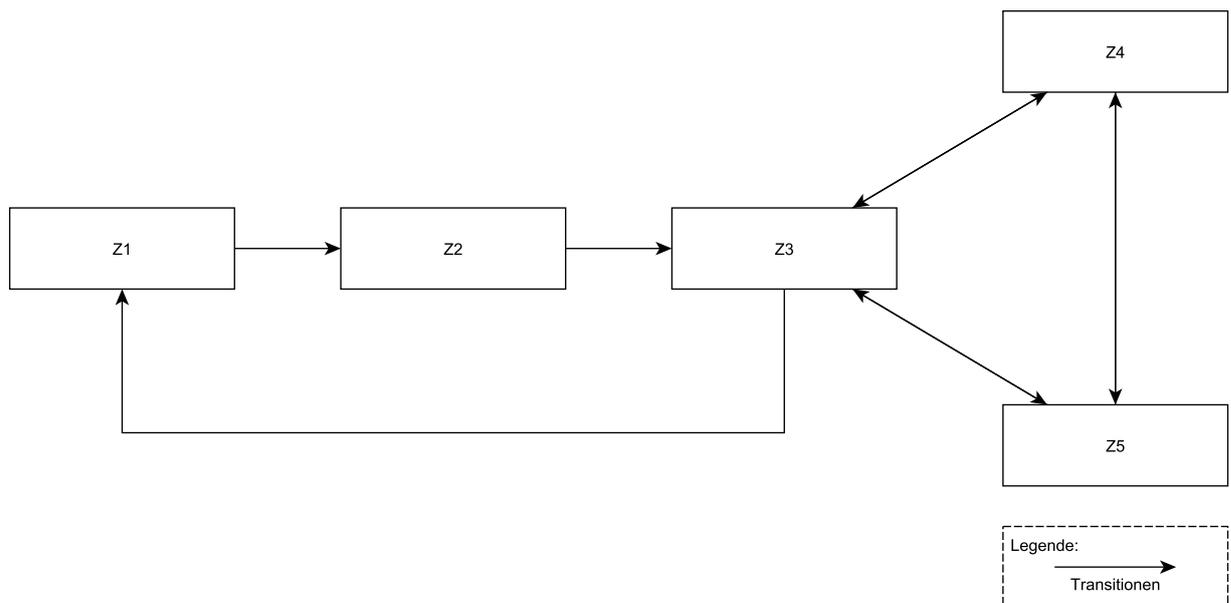


Abbildung A-1: Zustände und mögliche Transitionen der FTR.

## **Funktionale Systemgrenzen**

Die FTR stellt ein klar abgegrenztes Modul innerhalb der Wirkkette des automatisierten Fahrzeugs dar. Basierend auf den definierten (Teil-)Funktionen sind daher die folgenden funktionalen Grenzen der FTR zu berücksichtigen:

- Die FTR verfügt über keine Kenntnisse des statischen bzw. dynamischen Umfelds des Fahrzeugs, weshalb keine eigenständige Reaktion auf das Umfeld stattfindet. Jede gewünschte Änderung des Fahrzeugzustands muss in der Soll-Trajektorie enthalten sein. Die Soll-Zustände in der Trajektorie werden nicht eigenständig modifiziert.
- Steigungen, welche die Fähigkeiten der vorhandenen Aktorik übersteigen, können nicht befahren werden. Gleiches gilt für Störungen, deren Kompensation die Fähigkeiten der Aktorik übersteigt.
- Sollte keine Soll-Trajektorie mit Soll-Zuständen für den aktuellen Zeitpunkt vorliegen, kann die FTR keinen Soll-Ist-Vergleich durchführen und ist daher nicht weiter funktionsfähig. Gleiches gilt für den geschätzten Ist-Zustand des Fahrzeugs und die weiteren Voraussetzungen zum Verlassen des Zustands Z3.
- Es wird vorausgesetzt, dass die Aktoren des Fahrzeugs über unterlagerte Regelkreise verfügen, welche die Stellgrößen der FTR einregeln. Die FTR berechnet Stellgrößen für die Einzelradaktorik, deren Umsetzung Aufgabe der unterlagerten Regelkreise außerhalb der Systemgrenzen der FTR ist.
- Ausfälle der Aktorik sind nur innerhalb bestimmter Grenzen kompensierbar. Ungünstige Ausfälle (z. B. Arretierung des Lenkaktors bei 90° Lenkwinkel) führen zum Verlust der Funktionsfähigkeit der gesamten FTR. Daher sind Hüllkurven für Degradationen zu definieren, innerhalb derer ein Ausfall kompensiert werden kann.

Aufgabe der FTR ist u. a. die Reaktion auf externe Störungen. Dazu gehören die folgenden Einflussparameter:

- Wind (inkl. Bernoulli-Effekt durch vorbeifahrende Fahrzeuge)
- Nicht in der Soll-Trajektorie enthaltene Steigungen
- Fahrbahnunebenheiten
- Lokale Schwankungen des Reibwerts zwischen Reifen und Fahrbahn (z. B. durch Feuchtigkeit, Eis oder wechselnde Fahrbahnbeläge)
- Regelfehler der unterlagerten Aktorregelkreise

## A.2 CarMaker Modellstruktur

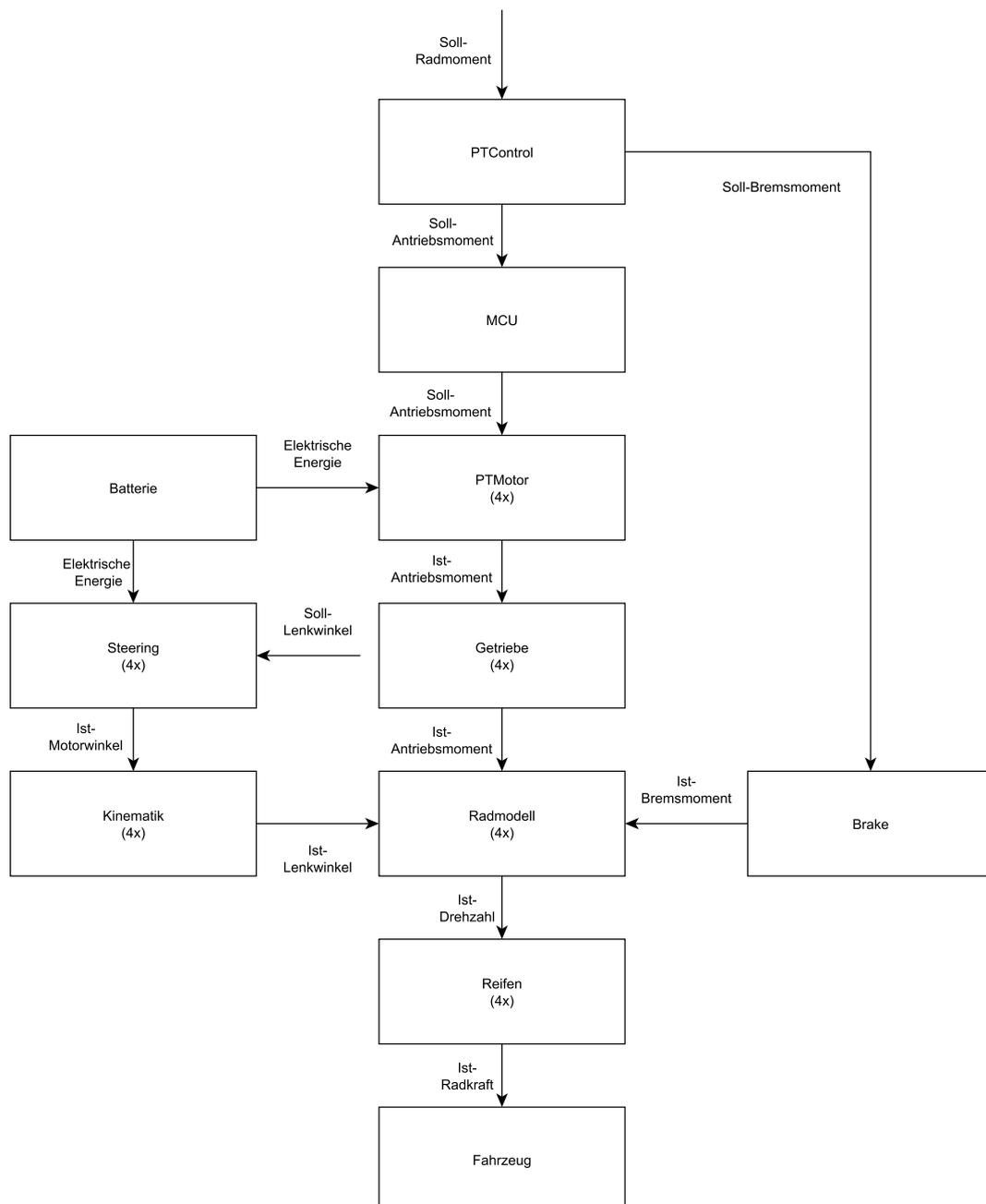


Abbildung A-2: Gesamtarchitektur des eingesetzten CarMaker Simulationsmodells des UNICARagil Fahrzeugs autoSHUTTLE mit elektrischer Einzelradaktorik.

## A.3 Herleitung der Reglerparametrisierung

Gemäß Gleichung 7-2 bemisst sich die zusätzlich angeforderte Beschleunigung bei Vorliegen einer Regelabweichung für einen beliebigen Freiheitsgrad nach:

$$a_d = \frac{\frac{p_{\text{set}} - p_{\text{act}}}{\tau_{\text{pos}}} + v_{\text{set}} - v_{\text{act}}}{\tau_v} + a_{\text{set}} - a_{\text{act}} \quad (\text{A-1})$$

Da die Geschwindigkeit und Beschleunigung zeitliche Ableitungen der Position sind, stellt Gleichung A-1 eine lineare gewöhnliche Differentialgleichung 2. Ordnung dar. Für das Schwingungsverhalten ist dabei ausschließlich die homogene Lösung der Differentialgleichung relevant. Durch eine Laplace Transformation der Gleichung und Nullsetzen der Soll-Größen sowie anschließendes Umformen ergibt sich:

$$d^2 p_{\text{act}} + d \frac{p_{\text{act}}}{\tau_v} + \frac{p_{\text{act}}}{\tau_v \tau_{\text{pos}}} = 0 \quad (\text{A-2})$$

wobei  $d$  die Laplace-Variable darstellt. Aus Gleichung A-2 kann die Ist-Position gekürzt werden (Positionen ungleich null vorausgesetzt):

$$d^2 + d \frac{1}{\tau_v} + \frac{1}{\tau_v \tau_{\text{pos}}} = 0 \quad (\text{A-3})$$

Um ein nicht schwingungsfähiges System zu erhalten, muss die Lösung der quadratischen Gleichung A-3 rein reell sein. Die Lösung ist gegeben durch:

$$d_{1|2} = -\frac{1}{2\tau_v} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2\tau_v}\right)^2 - \frac{1}{\tau_v \tau_{\text{pos}}}} \quad (\text{A-4})$$

Für eine reelle Lösung darf der Term innerhalb der Wurzel nicht negativ werden, daher muss

$$\frac{1}{4\tau_v} - \frac{1}{\tau_{\text{pos}}} \geq 0 \quad (\text{A-5})$$

gelten. Daraus folgt unmittelbar die notwendige Beziehung

$$\tau_{\text{pos}} \geq 4\tau_v \quad (\text{A-6})$$

für die Zeitkonstanten der Zustandsrückführung.

## A.4 Herleitung der Parametrisierung der prädiktiven Vorsteuerung

Entsprechend der in Kapitel 5 entwickelten Methodik zur Herleitung von FIR-Filtern für die prädiktive Vorsteuerungsarchitektur wird zunächst die Impulsantwort der Aktorik ermittelt. Zu diesem Zweck werden über die Schnittstelle aus Gleichung 7-16 Anregungsimpulse auf den Soll-Lenk Winkel bzw. das Soll-Antriebsmoment in der CarMaker Simulationsumgebung appliziert und der resultierende Ist-Lenk Winkel bzw. das resultierende Ist-Antriebsmoment mit hoher Frequenz (1 kHz) abgetastet. Die Auswertung findet bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 10 km/h statt, da dies der mittleren gefahrenen Geschwindigkeit entspricht.

Um sicherzustellen, dass durch das angestrebte Sampling mit  $f_{\text{FIR}}$  keine Aliasing Effekte verursacht werden, wird anschließend das Leistungsdichtespektrum der gemessenen Impulsantworten bestimmt. Es zeigt sich, dass oberhalb von 25 Hz in beiden Signalen nur geringe Leistungen enthalten sind. Aus dieser Tatsache wird eine Filterfrequenz  $f_{\text{FIR}}$  von 100 Hz abgeleitet. Um Aliasing vollständig auszuschließen und eine akzeptable Rekonstruktionsqualität sicherzustellen, wird vor dem Sampling der Impulsantworten mit  $f_{\text{FIR}}$  eine Tiefpassfilterung mit der Matlab-Funktion *filtfilt* und der Grenzfrequenz 25 Hz vorgenommen. Die Abbildungen A-3 und A-4 zeigen die ersten 100 Elemente der resultierenden IIR.

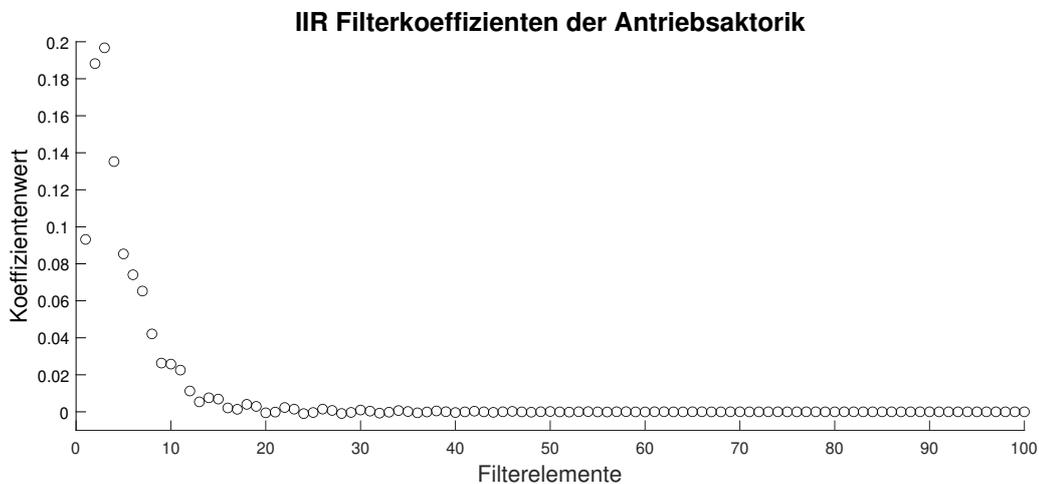


Abbildung A-3: Normierte Impulsantwort der Antriebsaktorik bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 10 km/h, gesampelt mit  $f_{\text{FIR}} = 100$  Hz.

Für die Ableitung der FIR-Filter ist die Festlegung der Anzahl der Filterelemente  $n_{\text{ff,max}}$  und somit des Vorausschauhorizonts erforderlich. Zu diesem Zweck wird die kumulierte Summe der Koeffizientenwerte über der Anzahl der Koeffizienten in den Abbildungen A-5 und A-6 betrachtet. Die Wahl von  $n_{\text{ff,max}}$  unterliegt dem in Kapitel 5 diskutierten Auslegungskonflikt zwischen Abbildungstreue und Verhalten bei Umschaltungen der Soll-Trajektorie. Auf Grundlage der Verteilung der Koeffizientenwerte wird  $n_{\text{ff,max}} = 25$  gewählt. Für die Lenkaktorik wird somit

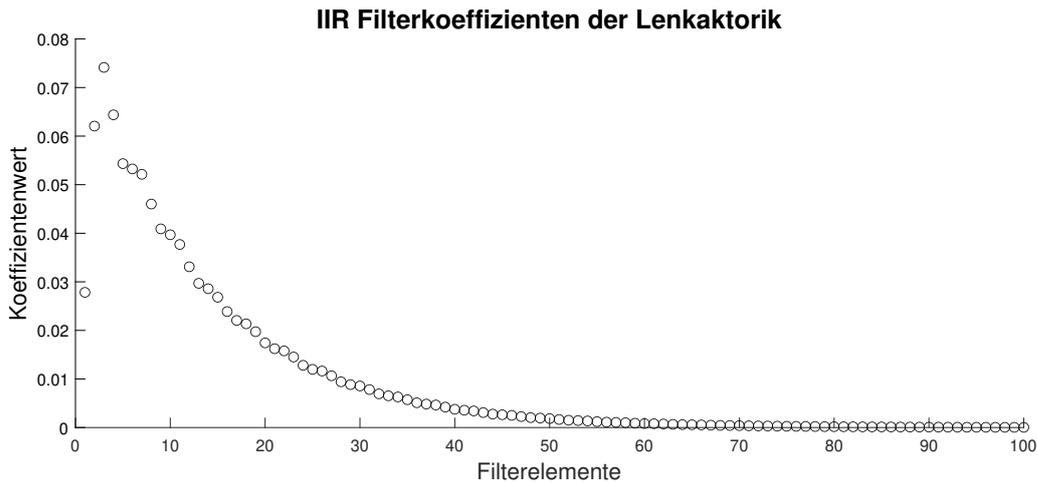


Abbildung A-4: Normierte Impulsantwort der Lenkaktorik bei einer Fahrtgeschwindigkeit von 10 km/h, gesampelt mit  $f_{\text{FIR}} = 100$  Hz.

ca. 85 % der Filterverstärkung abgedeckt, für die Antriebsaktorik<sup>269</sup> über 99 %. Die zeitliche Vorausschau beträgt 250 ms.

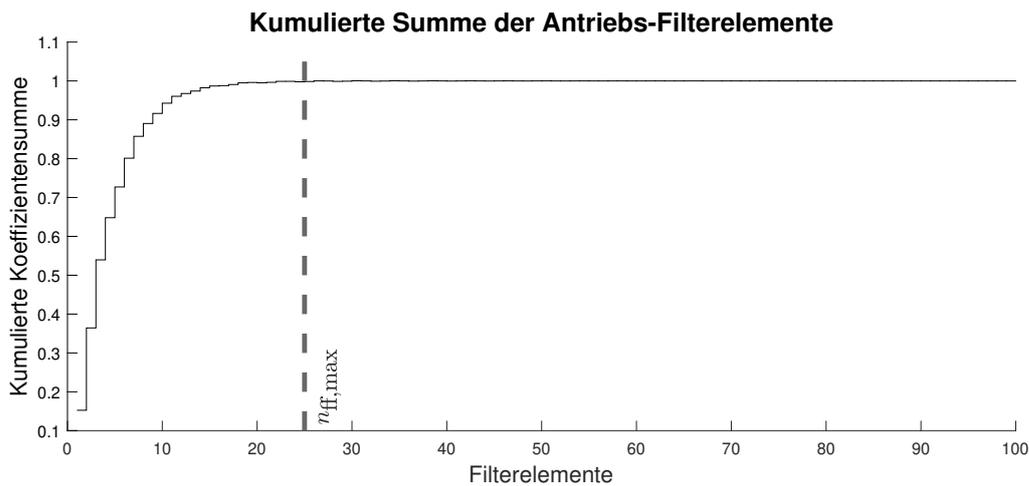


Abbildung A-5: Kumulierte Summe der Koeffizientenwerte der Antriebs-IIR über der Anzahl der Filterelemente.

Die durch Abschneiden der IIR erhaltenen FIR-Filter werden auf die Koeffizientensumme 1 normiert und so die in Abbildung A-7 bzw. A-8 dargestellten finalen Filter bestimmt.

Um der Erforderlichkeit der Filterung mit einer zusätzlichen Fensterfunktion zur Vermeidung bzw. Reduktion des Gibb'schen Phänomens zu beurteilen, wird der Frequenzgang der resultierenden FIR-Filter analysiert. Es wird angenommen, dass die Soll-Trajektorie bei einer Abtastfrequenz von  $f_{\text{traj}} = 10$  Hz maximale Frequenzanteile bis 1 Hz beinhalten darf, um eine näherungsweise verlustfreie Rekonstruktion zu ermöglichen. Bei einer Frequenz von 1 Hz beträgt die Dämpfung der FIR-Filter -0,2 dB (Antriebsaktor) bzw. -1,46 dB (Lenkaktor). Beide Filter befinden sich daher

<sup>269</sup>Für die Antriebsaktorik könnte ohne signifikante Verluste bei der Abbildungsqualität ein noch niedrigerer Wert von  $n_{\text{ff,max}}$  gewählt werden. Aus Gründen einer vereinfachten Implementierung wird jedoch auf die unabhängige Festlegung oberer Grenzen verzichtet und eine einheitliche zeitliche Vorausschau für beide Aktoren appliziert.

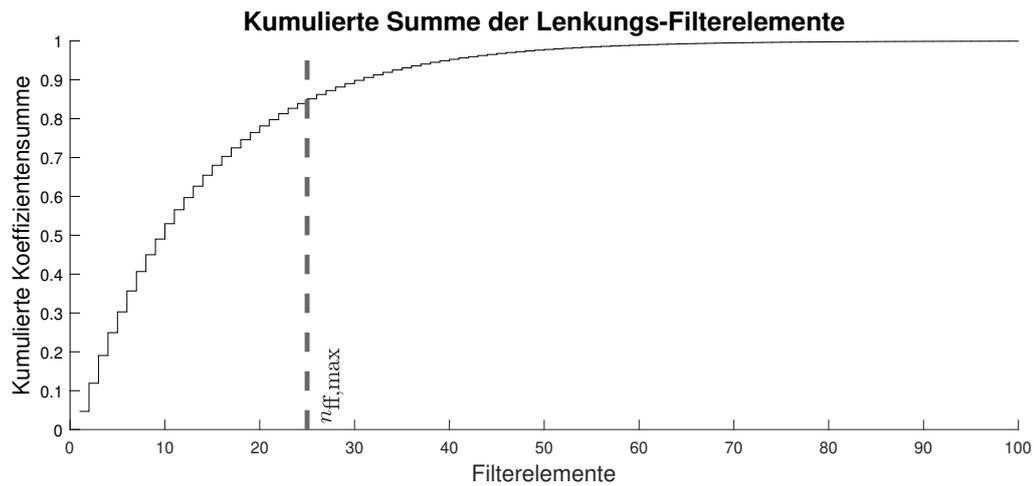


Abbildung A-6: Kumulierte Summe der Koeffizientenwerte der Lenkungs-IIR über der Anzahl der Filterelemente.

bei der definierten Grenzfrequenz noch im Durchlassbereich, so dass keine Anregung der aus dem scharfen Abschneiden resultierenden Überschwinger erwartet wird. Es wird daher auf eine separate Filterung mittels Fensterfunktion verzichtet.

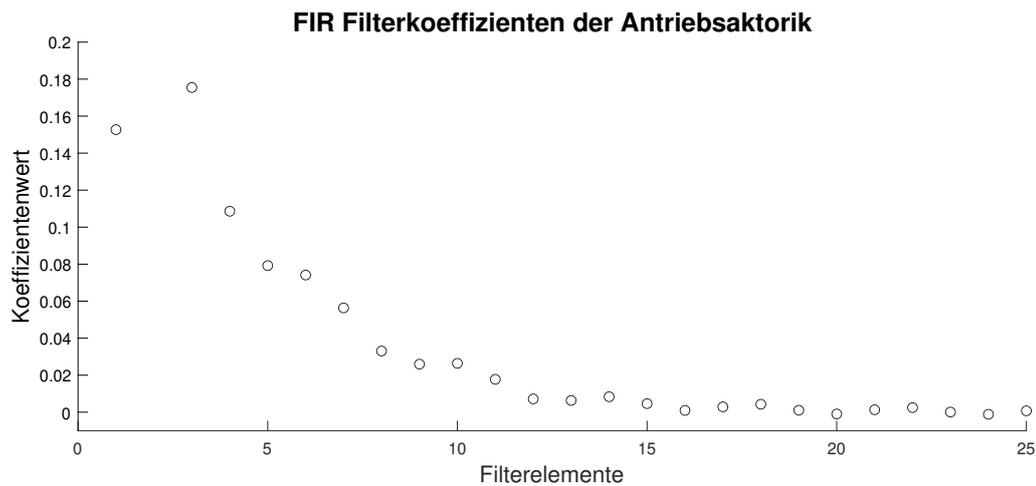


Abbildung A-7: Finale FIR-Filterkoeffizienten zur Kompensation der Systemdynamik der Antriebsaktorik.

Durch die Ableitung einer zeitlichen Überschneidung von Soll-Trajektorien ( $\tau_{traj}$  in Gleichung 6-9) kann der Einfluss von sprunghaften Trajektorienumschaltungen stark reduziert werden. Mit einer beispielhaften Überschneidung von 200 ms wird für die schnellere Antriebsaktorik über 99 % der Verstärkung des finalen FIR-Filters neutralisiert, für die langsamere Lenkungsaktorik noch ca. 92 %. Der Einfluss der Umschaltung kann daher durch die Festlegung angepasster Werte von  $\tau_{traj}$  beeinflusst und minimiert werden.

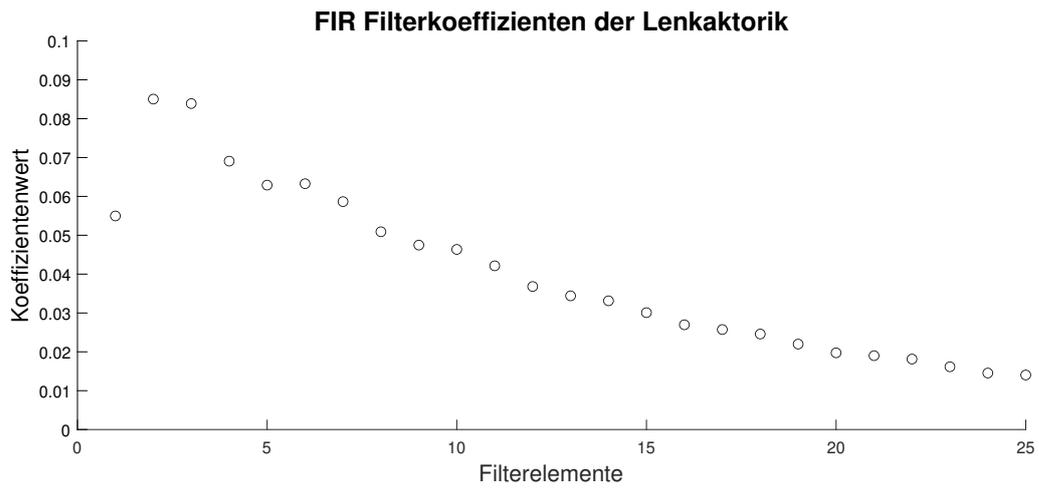


Abbildung A-8: Finale FIR-Filterkoeffizienten zur Kompensation der Systemdynamik der Lenkaktorik.

## A.5 Versuchsergebnisse für sprungartige Umschaltung zwischen Soll-Trajektorien

Für die Untersuchung des Einflusses einer sprungartigen Umschaltung der Soll-Trajektorie bei einer unerwarteten Änderung des dynamischen Umfelds wird das in Abbildung 5-6 dargestellte Szenario simuliert. Die folgenden Abbildungen A-9, A-10 und A-11 zeigen die Posenabweichung zwischen einer Fahrt mit und ohne Umschaltung. Als Referenz dient die Simulation des kombinierten Ausweichens und Bremsens in den Stillstand, in deren Rahmen der FTR durchweg die Soll-Trajektorie für den Ausweichvorgang zur Verfügung steht. Die enthaltene prädiktive Vorsteuerung kann daher den Ausweich- bzw. Bremsvorgang im Rahmen der Möglichkeiten durch die gewählte Parametrisierung vorsteuern.

Von der dabei ermittelten Posenabweichung wird die Posenabweichung bei einer sprungartigen Umplanung der Soll-Trajektorie subtrahiert. In dieser Situation wurden der Aktorik vor der Umschaltung bereits Stellgrößen für die Beschleunigung entlang des Fahrstreifens übergeben, die nach der Umplanung nicht mehr gültig sind. Die FTR muss daher durch verstärkte Regeleingriffe diesen Einfluss kompensieren, was zu der dargestellten (leicht) erhöhten Regelabweichung führt.

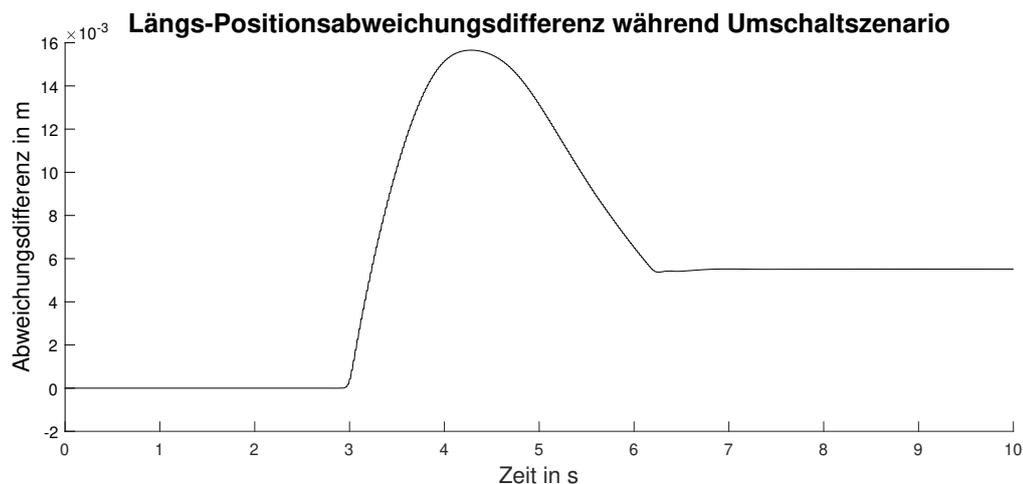


Abbildung A-9: Differenz zwischen Längs-Positionsabweichung während des Referenzszenarios ohne Umschaltung sowie der Simulation mit sprungartiger Umschaltung der Soll-Trajektorie zur Untersuchung des Einflusses einer fehlerhaften Prädiktion im Rahmen der Vorsteuerung.

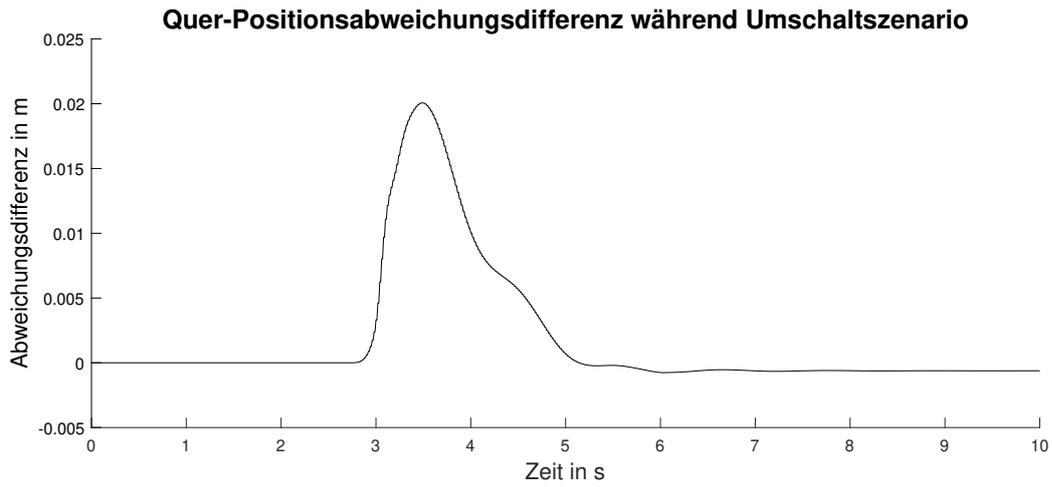


Abbildung A-10: Differenz zwischen Quer-Positionsabweichung während des Referenzszenarios ohne Umschaltung sowie der Simulation mit sprungartiger Umschaltung der Soll-Trajektorie zur Untersuchung des Einflusses einer fehlerhaften Prädiktion im Rahmen der Vorsteuerung.



Abbildung A-11: Differenz zwischen Gierabweichung während des Referenzszenarios ohne Umschaltung sowie der Simulation mit sprungartiger Umschaltung der Soll-Trajektorie zur Untersuchung des Einflusses einer fehlerhaften Prädiktion im Rahmen der Vorsteuerung.

## A.6 Versuchsergebnisse für den Robustheitsnachweis der FTR gegenüber Latenzen und Jitter der Planungsebene

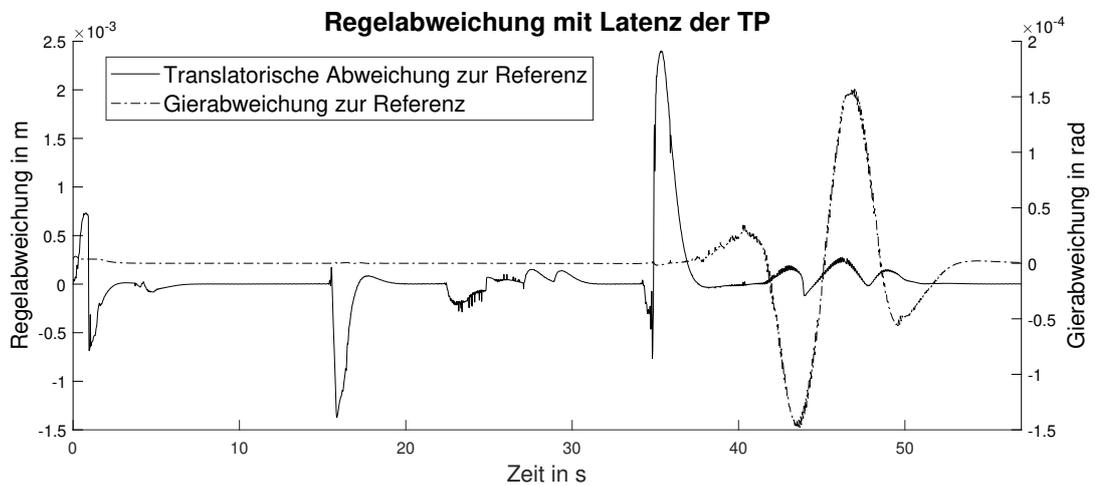


Abbildung A-12: Differenz zwischen den Regelabweichungen während Szenario 1 und 2 zum Nachweis der Robustheit ggü. Latenzen der Planungsebene.

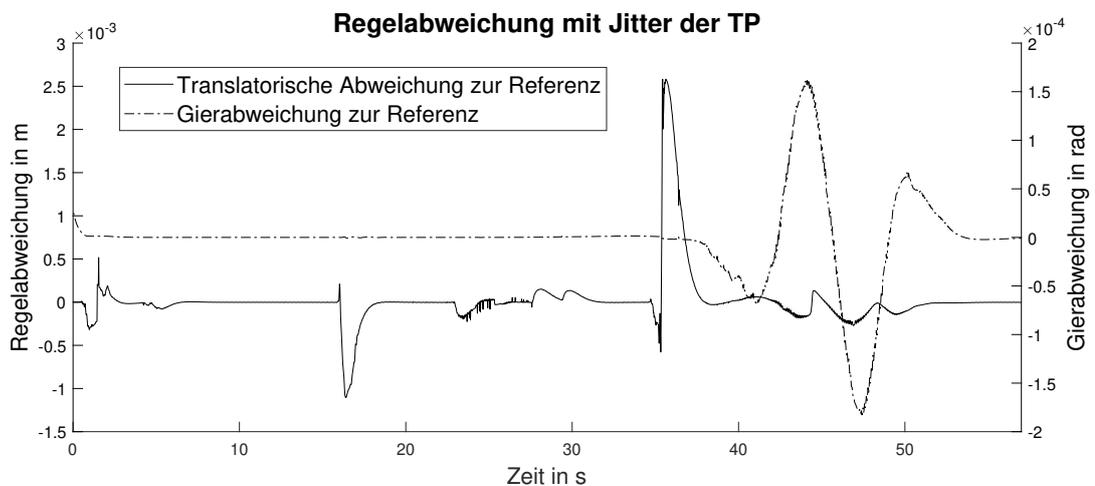


Abbildung A-13: Differenz zwischen den Regelabweichungen während Szenario 1 und 3 zum Nachweis der Robustheit ggü. Jitter der Planungsebene.

## A.7 Übersicht der verifizierten Anforderungen

Tabelle A-1: Anforderungen an gekapselte FTR, verwendete Verifikationsmethode und Testergebnisse.

Nr.	Beschreibung	Verifikationsmethode	Verifiziert?
A1.1	Keine Kenntnis der TP bzw. Synchronisierung mit TP	- Notausweichen in HiL-Testumgebung - TP-Wechsel mit Realfahrzeugen	Ja
A1.2	Rekonfigurierbarkeit zur Laufzeit	TP-Wechsel mit Realfahrzeugen	Ja
A1.3	Informationskapselung	Formale Verifikation durch gewähltes Konzept	Ja
A1.4	Latenzrobustheit der FTR	Notausweichen und doppelter Fahrstreifenwechsel mit Latenz / Jitter in HiL-Testumgebung	Ja
A1.5	Unabhängige Beeinflussung der Bewegungsfreiheitsgrade	Sweep/Slalom/Einparken mit Realfahrzeugen	Ja
A1.6	Begrenzung des Radschlupfs	Offen	Nein
A1.7	Keine vordefinierten Lenkwinkel-Verteilungsstrategien	- TP-Wechsel mit Realfahrzeugen - Sweep/Slalom/Einparken mit Realfahrzeugen	Ja
A1.8	Sicherstellung physikalisch umsetzbarer Soll-Trajektorien	Zuziehende Kreisfahrt / Steigungsanfahrt in SiL-Testumgebung	Ja
A1.9	Keine Berücksichtigung zurückliegender Systemzustände innerhalb der FTR	- Formale Verifikation durch gewähltes Konzept - Zusätzlich: Notausweichen in HiL-Testumgebung	Ja
A1.10	Modulare Testbarkeit	Formale Verifikation durch gewähltes Konzept	Ja
A1.11	Verwendbarkeit inkonsistenter Lokalisierungsinformationen	Tunneldurchfahrt in HiL-Testumgebung	Ja
A1.12	Kein Einfluss der Erdkrümmung	Formale Verifikation durch gewähltes Konzept	Ja

## A.8 Vollständige Schnittstellenbeschreibung

Tabelle A-2: Gesamtstruktur der von der TP bereitgestellten Soll-Trajektorie im GCS-Koordinatensystem.

Bezeichnung	Beschreibung
unsigned long long tai_seconds[51]	Zeitstempel Aufpunkte (ganze Sekunden)
unsigned long tai_nanoseconds[51]	Zeitstempel Aufpunkte (Nanosekunden)
unsigned long long send_tai_seconds	Sendezeitpunkt (ganze Sekunden)
unsigned long send_tai_nanoseconds	Sendezeitpunkt (Nanosekunden)
octet use_previous_trj	Flag für Planung auf Basis vorheriger Trajektorie
octet use_atlatec	Flag zur Planung auf Basis der unabhängigen Lokalisierung
unsigned short standstill[51]	Stillstands-Flag
unsigned short parking[51]	Flag zum seitlichen Einparken
double pos_ell_lat_rad[51]	Sollposition (Breitengrad)
double pos_ell_lon_rad[51]	Sollposition (Längengrad)
double pos_ell_h_m[51]	Sollposition (Geodätische Höhe)
double slope_long[51]	Längssteigung
double slope_lat[51]	Quersteigung
double vel_enu_mag_m_s[51]	Sollgeschwindigkeit (Betrag)
double vel_enu_angle_rad[51]	Sollgeschwindigkeit (Winkel)
double acc_enu_mag_m_s2[51]	Sollbeschleunigung (Betrag)
double acc_enu_angle_rad[51]	Sollbeschleunigung (Winkel)
double ori_enu_psi_rad[51]	Gierwinkel
double ori_vel_enu_psi_rad_s[51]	Gierrate
double ori_acc_enu_psi_rad_s2[51]	Gierbeschleunigung

Tabelle A-3: Gesamtstruktur der Soll-Trajektorie nach der Trajektorienvorverarbeitung im Navigationskoordinatensystem.

Bezeichnung	Beschreibung
unsigned long long tai_seconds[50]	Zeitstempel Aufpunkte (ganze Sekunden)
unsigned long tai_nanoseconds[50]	Zeitstempel Aufpunkte (Nanosekunden)
unsigned long long send_tai_seconds	Sendezeitpunkt (ganze Sekunden)
unsigned long send_tai_nanoseconds	Sendezeitpunkt (Nanosekunden)
octet use_previous_trj	Flag für Planung auf Basis vorheriger Trajektorie
octet use_atlatec	Flag zur Planung auf Basis der unabhängigen Lokalisierung
unsigned short standstill[50]	Stillstands-Flag
unsigned short parking[50]	Flag zum seitlichen Einparken
double pos_enu_east_m[50]	Sollposition (East)
double pos_enu_north_m[50]	Sollposition (North)
double plan_pos_ell_lat_rad	Planungspose (Breitengrad)
double plan_pos_ell_lon_rad	Planungspose (Längengrad)
double plan_pos_ell_h_m	Planungspose (Geodätische Höhe)
double plan_ori_enu_psi_rad	Planungspose (Gierwinkel)
unsigned long long plan_tai_seconds	Zeitstempel Planungspose (ganze Sekunden)
unsigned long plan_tai_nanoseconds	Zeitstempel Planungspose (Nanosekunden)
double slope_long[50]	Längssteigung
double slope_lat[50]	Quersteigung
double vel_enu_mag_m_s[50]	Sollgeschwindigkeit (Betrag)
double vel_enu_angle_rad[50]	Sollgeschwindigkeit (Winkel)
double acc_enu_mag_m_s2[50]	Sollbeschleunigung (Betrag)
double acc_enu_angle_rad[50]	Sollbeschleunigung (Winkel)
double ori_enu_psi_rad[50]	Gierwinkel
double ori_vel_enu_psi_rad_s[50]	Gierrate
double ori_acc_enu_psi_rad_s2[50]	Gierbeschleunigung

Tabelle A-4: Gesamtstruktur der Schnittstelle zur FZS.

Bezeichnung	Beschreibung
octet frame_counter	Nachrichtenzähler
unsigned long long tai_seconds	Zeitstempel (ganze Sekunden)
unsigned long tai_nanoseconds	Zeitstempel (Nanosekunden)
octet status	Status der FZS
double pos_ell_lat_rad	Position (Breitengrad)
double pos_ell_lon_rad	Position (Längengrad)
float pos_ell_h_m	Position (Geodätische Höhe)
float vel_enu_m_s[3]	Geschwindigkeit
float acc_enu_m_s2[3]	Beschleunigung
float rpy_rad[3]	Ausrichtung
float omg_enu_rad_s[3]	Ausrichtungsrate
float SSA_rad	Schwimmwinkel

Tabelle A-5: Gesamtstruktur der Schnittstelle zu den Dynamikmodulen.

<b>Bezeichnung</b>	<b>Beschreibung</b>
octet frame_counter	Nachrichtenzähler
unsigned long long tai_seconds	Zeitstempel (ganze Sekunden)
unsigned long tai_nanoseconds	Zeitstempel (Nanosekunden)
boolean prk_brk_bool	Parkbremsaktivierung
float wheel_trq_Nm	Soll-Radmoment
float speed_lim_rad_s	Raddrehzahlgrenze
float wheel_acc_rad_s2	Radbeschleunigung zur Extrapolation
float steer_angle_rad	Soll-Radlenkwinkel
octet unconventional_mode	Flag für Ackermann-ähnliche Lenkung
octet high_speed_enabled	Festlegung des zulässigen Geschwindigkeitsbereichs

## Literaturverzeichnis

**Ackermann, S. M. et al.: Systemarchitektur zum sicheren Anhalten autom. Fahrzeuge (2020)**

Ackermann, Stefan Martin; Winner, Hermann: Systemarchitektur und Fahrmanöver zum sicheren Anhalten modularer automatisierter Fahrzeuge, in: 13. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren, Walting, S. 144–153, 2020

**Adamy, J.: Nichtlineare Systeme und Regelungen (2018)**

Adamy, Jürgen: Nichtlineare Systeme und Regelungen, 3. Auflage, Springer Vieweg, 2018

**Ahmar, I. et al.: Taxonomy, Definition, Approaches of Software Reusability (2014)**

Ahmar, Ibraheem; Abualki, Abdallah; Mohd Yusof, Mohd Zaliman: Taxonomy, Definition, Approaches, Benefits, Reusability Levels, Factors and Adaption of Software Reusability: A Review of the Research Literature, in: Journal of Applied Sciences, Vol. 14, S. 2396–2421, 2014

**Ahmed, F. et al.: Using SADT in simulation conceptual modeling (2014)**

Ahmed, Fahim; Robinson, Stewart; Tako, Antuela A.: Using the structured analysis and design technique (SADT) in simulation conceptual modeling, in: Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014, S. 1038–1049, 2014

**ALGLIB: Spline interpolation and fitting - Akima spline (2022)**

ALGLIB: Spline interpolation and fitting - Akima spline, <https://www.alglib.net/interpolation/spline3.php#header5>, 2022, Aufgerufen 25.08.2022

**Amend, J. M.: Delphi: Industry Must Go Digital or Die (2017)**

Amend, James M.: Delphi: Industry Must Go Digital or Die, <https://www.wardsauto.com/technology/delphi-industry-must-go-digital-or-die>, 2017, Aufgerufen 09.05.2022

**Bächle, T. et al.: Model Predictive Control Allocation in Electric Vehicle Drive Trains (2015)**

Bächle, T.; Graichen, K.; Buchholz, M.; Dietmayer, K.: Model Predictive Control Allocation in Electric Vehicle Drive Trains, in: IFAC-PapersOnLine, Vol. 48, S. 335–340, 2015

**Bae, I. et al.: Toward a Comfortable Driving Experience for a Self-Driving Shuttle (2019)**

Bae, Il; Moon, Jaeyoung; Seo, Jeongseok: Toward a Comfortable Driving Experience for a Self-Driving Shuttle Bus, in: Electronics, Vol. 8, 2019

**Baggen, M. et al.: Data-based feed-forward control in MIMO motion systems (2008)**

Baggen, Mark; Heertjes, Marcel; Kamidi, Ramidin: Data-based feed-forward control in MIMO motion systems, in: 2008 American Control Conference, S. 3011–3016, 2008

**Bandur, V. et al.: Making the Case for Centralized Automotive E/E Architectures (2021)**

Bandur, Victor; Selim, Gehan; Pantelic, Vera; Lawford, Mark: Making the Case for Centralized Automotive E/E Architectures, in: IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 70, S. 1230–1245, 2021

**Bartels, A. et al.: Querführungsassistentz (2015)**

Bartels, Arne; Rohlf, Michael; Hamel, Sebastian; Saust, Falko; Klauske, Lars Kristian: Querführungsassistentz, in: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015

**Becker, M. et al.: Geodäsie (2012)**

Becker, Matthias; Hehl, Klaus: Geodäsie, Geowissen kompakt, wbg Academic, 2012

**Bender, P. et al.: Lanelets: Efficient map representation for autonomous driving (2014)**

Bender, Philipp; Ziegler, Julius; Stiller, Christoph: Lanelets: Efficient map representation for autonomous driving, in: 2014 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, S. 420–425, 2014

**Bernhard, S.: Folgeregelung für quadratische, über- und unteraktuierte Systeme (2020)**

Bernhard, Sebastian: Optimale Folgeregelung über unendliche Horizonte und optimale Output Regulation für quadratische, über- und unteraktuierte Systeme, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2020

**Betz, A. et al.: Motion analysis of a wheeled mobile driving simulator (2012)**

Betz, Alexander; Winner, Hermann; Ancochea, Marc; Graupner, Maren: Motion analysis of a wheeled mobile driving simulator for urban traffic situations, in: Proceedings of driving simulation conference, S. 123–136, 2012

**Blödel, A. P.: Entwicklung eines Verfahrens zur Generierung von Trajektorien (2022)**

Blödel, Alexander Paul: Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens zur Generierung von Trajektorien für das modulare Testen automatisierter Fahrfunktionen, Masterthesis, Technische Universität Darmstadt, 2022

**Buchholz, M. et al.: Automation of the UNICARagil vehicles (2020)**

Buchholz, Michael; Gies, Fabian; Danzer, Andreas; Henning, Matti; Hermann, Charlotte; Herzog, Manuel; Horn, Markus; Schön, Markus; Rexin, Nils; Dietmayer, Klaus; Fernandez, Carlos; Janosovits, Johannes; Kamran, Danial; Kinzig, Christian; Lauer, Martin; Molinos, Eduardo; Stiller, Christoph; Ackermann, Stefan; Homolla, Tobias; Winner, Hermann; Gottschalg, Grischa; Leinen, Stefan; Becker, Matthias; Feiler, Johannes; Hoffmann, Simon; Diermeyer, Frank; Lampe, Bastian; Beemelmans, Till; Van Kempen, Raphael; Woopen, Timo; Eckstein, Lutz; Voget, Nicolai; Moormann, Dieter; Jatzkowski, Inga; Stolte, Torben; Maurer, Markus; Graf, Jürgen; Hinüber, Edgar Leuer Von; Siepenkötter, Norbert: Automation of the UNICARagil vehicles, in: 29th Aachen Colloquium Sustainable Mobility, 2020

**Burkacky, O. et al.: Rethinking Car Software And Electronics Architecture (2018)**

Burkacky, Ondrej; Deichmann, Johannes; Doll, Georg; Knochenhauer, Christian: Rethinking Car Software And Electronics Architecture, in: Tech Report, McKinsey & Company, 2018

**Butzkamm, C. et al.: Serviceorientierte E/E-Architektur (2020)**

Butzkamm, Cornelius; Brand, Konstantin: Serviceorientierte E/E-Architektur mit der Innovationsplattform HARRI, in: ATZelektronik, Vol. 15, S. 26–30, 2020

**Cao, H. et al.: Decision Making, Planning, and Control for Intelligent Vehicles (2020)**

Cao, Haotian; Li, Mingjun; Zhao, Song; Song, Xiaolin: Decision Making, Planning, and Control Strategies for Intelligent Vehicles, in: Synthesis Lectures on Advances in Automotive Technology, Vol. 4, S. 1–138, 2020

**Chen, Y. et al.: Vehicle real-time tire-road friction coefficient estimation (2010)**

Chen, Yan; Wang, Junmin: Vehicle-longitudinal-motion-independent real-time tire-road friction coefficient estimation, in: 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), S. 2910–2915, 2010

**Christ, F. et al.: Time-optimal trajectory planning considering friction coefficients (2021)**

Christ, Fabian; Wischnewski, Alexander; Heilmeyer, Alexander; Lohmann, Boris: Time-optimal trajectory planning for a race car considering variable tyre-road friction coefficients, in: Vehicle System Dynamics, Vol. 59, S. 588–612, 2021

**Chu, W. et al.: Traction fault accommodation system for four wheel driven vehicle (2012)**

Chu, Wenbo; Luo, Yugong; Dai, Yifan; Li, Keqiang: Traction fault accommodation system for four wheel independently driven electric vehicle, in: Proc. 26th electric vehicle symposium, 2012

**Claus, S.: Vorausschauende Kompensation von Verzugszeiten im Regelkreis (2017)**

Claus, Sebastian: Vorausschauende Kompensation von Verzugszeiten im Regelkreis der semi-aktiven Fahrwerkregelung, Dissertation, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, Verkehrstechnik, Fahrzeugtechnik, VDI Verlag GmbH, 2017

**DAUP: System Engineering Fundamentals (2001)**

DAUP: System Engineering Fundamentals, Defense Acquisition University Press, 2001

**Devasia, S. et al.: Nonlinear inversion-based output tracking (1996)**

Devasia, S.; Degang Chen; Paden, B.: Nonlinear inversion-based output tracking, in: IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 41, S. 930–942, 1996

**DIN: DIN 1338 - Formelschreibweise und Formelsatz (2011)**

DIN: DIN 1338:2011-03, Formelschreibweise und Formelsatz, Beuth Verlag, 2011

**Elster, L.: Entwicklung eines Simulationsmodells für elektrische Radnabenantriebe (2022)**

Elster, Lukas: Entwicklung eines Simulationsmodells für elektrische Radnabenantriebe, Masterthesis, Technische Universität Darmstadt, 2022

**Ersoy, M. et al.: Einleitung und Grundlagen (2017)**

Ersoy, Metin; Gies, Stefan; Heißing, Bernd: Einleitung und Grundlagen, in: Ersoy, Metin; Gies, Stefan (Hrsg.): Fahrwerkhandbuch, 5. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017

**Europäisches-Parlament: Verordnung (EU) 2019/2144 (2019)**

Europäisches-Parlament: Verordnung (EU) 2019/2144 des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge im Hinblick auf ihre allgemeine Sicherheit und den Schutz der Fahrzeuginsassen und von ungeschützten Verkehrsteilnehmern, 2019

**Feigel, H.-J.: MK C1 - Eine neue Generation integrierter Bremssysteme (2012)**

Feigel, Hans-Jörg: MK C1 - Eine neue Generation integrierter Bremssysteme, in: XXXI. Internationales [My]-Symposium - Bremsen-Fachtagung, 2012

**Feiler, J. et al.: Concept of a Control Center for an Automated Vehicle Fleet (2020)**

Feiler, Johannes; Hoffmann, Simon; Diermeyer, Frank: Concept of a Control Center for an Automated Vehicle Fleet, in: 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2020

**Feng, Y. et al.: Road tire friction coefficient estimation for electric vehicle (2020)**

Feng, Yuchi; Chen, Hong; Zhao, Haiyan; Zhou, Hao: Road tire friction coefficient estimation for four wheel drive electric vehicle based on moving optimal estimation strategy, in: Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 139, 2020

**Fouque, C. et al.: Navigable map-aided differential odometry to enhance GNSS (2009)**

Fouque, Clément; Bonnifait, Philippe: Navigable map-aided differential odometry to enhance GNSS in adverse conditions, in: Accurate localization for land transportation, Paris, 2009

**Fried, J. et al.: Curve fitting by spline and akima methods (1973)**

Fried, Jerrold; Zietz, Stanley: Curve fitting by spline and akima methods: possibility of interpolation error and its suppression, in: Physics in Medicine and Biology, Vol. 18, S. 550–558, 1973

**Fu, D. et al.: Model-based feedforward control for electric power steering system (2022)**

Fu, Duo; Li, De-Zheng; Shangguan, Wen-Bin: Model-based feedforward control for suppressing torque oscillation of electric power steering system, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 236, S. 2306–2317, 2022

**Furst, S. et al.: AUTOSAR for Connected and Autonomous Vehicles (2016)**

Furst, Simon; Bechter, Markus: AUTOSAR for Connected and Autonomous Vehicles: The AUTOSAR Adaptive Platform, in: 2016 46th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshop (DSN-W), S. 215–217, 2016

**Fürst, S. et al.: AUTOSAR (2015)**

Fürst, Simon; Bunzel, Stefan: AUTOSAR, in: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015

**Gonzalez, D. et al.: A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles (2016)**

Gonzalez, David; Perez, Joshue; Milanés, Vicente; Nashashibi, Fawzi: A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles, in: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 17, S. 1135–1145, 2016

**Gottschalg, G.: Data Fusion Architecture for State Estimation (2022)**

Gottschalg, Grischa: Data Fusion Architecture with Integrity Monitoring for State Estimation in Automated Driving, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2022

**Gottschalg, G. et al.: Evaluation of Integrity Algorithms for Vehicle State Estimation (2021)**

Gottschalg, Grischa; Leinen, Stefan: Comparison and Evaluation of Integrity Algorithms for Vehicle Dynamic State Estimation in Different Scenarios for an Application in Automated Driving, in: Sensors, Vol. 21, 2021

**Guo, C. et al.: Driver–vehicle cooperation (2019)**

Guo, Chunshi; Sentouh, Chouki; Haué, Jean-Baptiste; Popieul, Jean-Christophe: Driver–vehicle cooperation: a hierarchical cooperative control architecture for automated driving systems, in: Cognition, Technology & Work, Vol. 21, S. 657–670, 2019

**Gut, G. et al.: Reduction of Electronic Control Units in Electric Vehicles (2012)**

Gut, Georg; Allmann, Christian; Schurius, Markus; Schmidt, Karsten: Reduction of Electronic Control Units in Electric Vehicles Using Multicore Technology, in: Multicore Software Engineering, Performance, and Tools, S. 90–93, 2012

**Hammond, M. et al.: Redundant pose generation system (2019)**

Hammond, Marcus; Kentley-Klay, Timothy David: „Redundant pose generation system“, Patent Nr. US20190138000A1, 2019

**Hartwich, F. et al.: Driving comfort, enjoyment and acceptance of automated driving (2018)**

Hartwich, Franziska; Beggiato, Matthias; Krems, Josef F.: Driving comfort, enjoyment and acceptance of automated driving – effects of drivers’ age and driving style familiarity, in: Ergonomics, Vol. 61, S. 1017–1032, 2018

**He, Y. et al.: Adaptive Cruise Control Strategies Implemented on Vehicles (2019)**

He, Yinglong; Ciuffo, Biagio; Zhou, Quan; Makridis, Michail; Mattas, Konstantinos; Li, Ji; Li, Ziyang; Yan, Fuwu; Xu, Hongming: Adaptive Cruise Control Strategies Implemented on Experimental Vehicles: A Review, in: IFAC-PapersOnLine, Vol. 52, S. 21–27, 2019

**Heertjes, M. et al.: MIMO feed-forward design in wafer scanners (2010)**

Heertjes, Marcel; Hennekens, Daan; Steinbuch, Maarten: MIMO feed-forward design in wafer scanners using a gradient approximation-based algorithm, in: Control Engineering Practice, Vol. 18, S. 495–506, 2010

**Heilmeier, A. et al.: Minimum curvature trajectory planning and control (2020)**

Heilmeier, Alexander; Wischnewski, Alexander; Hermansdorfer, Leonhard; Betz, Johannes; Lienkamp, Markus; Lohmann, Boris: Minimum curvature trajectory planning and control for an autonomous race car, in: Vehicle System Dynamics, Vol. 58, S. 1497–1527, 2020

**Heißing, B. et al.: Fahrwerkhandbuch (2013)**

Heißing, Bernd; Ersoy, Metin; Gies, Stefan: Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven, 4. Auflage, Springer Vieweg, 2013

**Henle, J. et al.: Architecture platforms for future vehicles (2022)**

Henle, Jacqueline; Stoffel, Martin; Schindewolf, Marc; Nagele, Ann-Therese; Sax, Eric: Architecture platforms for future vehicles: a comparison of ROS2 and Adaptive AUTOSAR, in: 2022 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), S. 3095–3102, 2022

**Hermansdorfer, L. et al.: A Concept for Estimation of the Friction Potential (2019)**

Hermansdorfer, Leonhard; Betz, Johannes; Lienkamp, Markus: A Concept for Estimation and Prediction of the Tire-Road Friction Potential for an Autonomous Racecar, in: 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), S. 1490–1495, 2019

**Herrmann, T. et al.: Real-Time Adaptive Velocity Optimization for Autonomous Cars (2021)**

Herrmann, Thomas; Wischnewski, Alexander; Hermansdorfer, Leonhard; Betz, Johannes; Lienkamp, Markus: Real-Time Adaptive Velocity Optimization for Autonomous Electric Cars at the Limits of Handling, in: IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Vol. 6, S. 665–677, 2021

**Holder, M. et al.: Digitalize the Twin (2022)**

Holder, Martin; Elster, Lukas; Winner, Hermann: Digitalize the Twin: A Method for Calibration of Reference Data for Transfer Real-World Test Drives into Simulation, in: Energies, Vol. 15, 2022

**Homolla, T. et al.: Verfahren zur Korrektur von inkonsistenten Lokalisierungsdaten (2020)**

Homolla, Tobias; Gottschalg, Grischa; Winner, Hermann: Verfahren zur Korrektur von inkonsistenten Lokalisierungsdaten in modularen technischen Systemen, in: 13. Workshop Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren, Walting, 2020

**Homolla, T. et al.: Encapsulated trajectory tracking control for autonomous vehicles (2022)**

Homolla, Tobias; Winner, Hermann: Encapsulated trajectory tracking control for autonomous vehicles, in: Automotive and Engine Technology, Vol. 7, S. 295–306, 2022

**Homolla, T. et al.: Predictive feedforward control architecture for motion control (2022)**

Homolla, Tobias; Winner, Hermann: Predictive feedforward control architecture for the encapsulated motion control of automated vehicles, in: 15th International Symposium on Advanced Vehicle Control, 2022

**Horiuchi, S.: Evaluation of chassis control method through controllability region (2012)**

Horiuchi, Shinichiro: Evaluation of chassis control method through optimisation-based controllability region computation, in: Vehicle System Dynamics, Vol. 50, S. 19–31, 2012

**Hrycej, T.: Robuste Regelung (2018)**

Hrycej, Tomas: Robuste Regelung, 1. Auflage, Springer Vieweg, 2018

**Hu, J. et al.: Real-time estimation of tire–road friction coefficient (2020)**

Hu, Juqi; Rakheja, Subhash; Zhang, Youmin: Real-time estimation of tire–road friction coefficient based on lateral vehicle dynamics, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 234, S. 2444–2457, 2020

**Huang, C.-M. et al.: „Visual positioning and navigation device and method thereof“ (2018)**

Huang, Chi-Min; Huang, Cheng: „Visual positioning and navigation device and method thereof“, Patent Nr. US20180297207A1, 2018

**Huang, Y. et al.: Performance Enhancement of an Overactuated Vehicle (2021)**

Huang, Y.; Wang, F.; Li, A.; Shi, Y.; Chen, Y.: Development and Performance Enhancement of an Overactuated Autonomous Ground Vehicle, in: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 26, S. 33–44, 2021

**Humig, C.: Flexible und skalierbare Fahrzeugarchitekturen für Upgrades (2020)**

Humig, Christian: Flexible und skalierbare Fahrzeugarchitekturen für Upgrades über die gesamte Fahrzeuglebenszeit, in: ATZelektronik, Vol. 15, S. 16–19, 2020

**Hunt, L. et al.: Noncausal inverses for linear systems (1996)**

Hunt, L.R.; Meyer, G.; Su, R.: Noncausal inverses for linear systems, in: IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 41, S. 608–611, 1996

**IPG-Automotive: CarMaker (2022)**

IPG-Automotive: CarMaker, <https://ipg-automotive.com/de/produkte-loesungen/software/carmaker/>, 2022, Aufgerufen 09.05.2022

**IPG-Automotive: CarMaker 9.1 Programmer’s Guide (2020)**

IPG-Automotive: CarMaker 9.1 Programmer’s Guide, 2020

**ISO/IEC-JTC-1/SC-7: ISO/IEC 25010:2011 - Systems and software engineering (2011)**

ISO/IEC-JTC-1/SC-7: ISO/IEC 25010:2011 - Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — System and software quality models, 2011

**ISO/TC-204: ISO 11270:2014: Lane keeping assistance systems (LKAS) (2014)**

ISO/TC-204: ISO 11270:2014: Intelligent transport systems — Lane keeping assistance systems (LKAS) — Performance requirements and test procedures, 2014

**ISO/TC-204: ISO 15622:2018: Adaptive cruise control systems (2018)**

ISO/TC-204: ISO 15622:2018: Intelligent transport systems — Adaptive cruise control systems — Performance requirements and test procedures, 2018

**ISO/TC-22/SC-32: ISO 26262-3:2018: Road vehicles – Functional safety (2018)**

ISO/TC-22/SC-32: ISO 26262-3:2018: Road vehicles – Functional safety - Concept Phase, 2018

- Jiang, Y. et al.: A Data-Driven Iterative Decoupling Feedforward Control Strategy (2015)**  
Jiang, Yi; Zhu, Yu; Yang, Kaiming; Hu, Chuxiong; Yu, Dongdong: A Data-Driven Iterative Decoupling Feedforward Control Strategy With Application to an Ultraprecision Motion Stage, in: IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, S. 620–627, 2015
- Johansen, T. A. et al.: Control allocation—A survey (2013)**  
Johansen, Tor A.; Fossen, Thor I.: Control allocation—A survey, in: Automatica, Vol. 49, S. 1087–1103, 2013
- Kampmann, A. et al.: A Dynamic Service-Oriented Software Architecture (2019)**  
Kampmann, Alexandru; Alrifaae, Bassam; Kohout, Markus; Wustenberg, Andreas; Woopen, Timo; Nolte, Marcus; Eckstein, Lutz; Kowalewski, Stefan: A Dynamic Service-Oriented Software Architecture for Highly Automated Vehicles, in: 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), S. 2101–2108, 2019
- Kampmann, A. et al.: Implementation of the Real-Time Publish-Subscribe Protocol (2019)**  
Kampmann, Alexandru; Wustenberg, Andreas; Alrifaae, Bassam; Kowalewski, Stefan: A Portable Implementation of the Real-Time Publish-Subscribe Protocol for Microcontrollers in Distributed Robotic Applications, in: 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), S. 443–448, 2019
- Kitching, K. et al.: An Experimental Investigation of Preview Control (1999)**  
Kitching, K.J.; Cebon, D.; Cole, D.J.: An Experimental Investigation of Preview Control, in: Vehicle System Dynamics, Vol. 32, S. 459–478, 1999
- Klamann, B. et al.: Defining Pass-/Fail-Criteria for Particular Tests (2019)**  
Klamann, Bjorn; Lippert, Moritz; Amersbach, Christian; Winner, Hermann: Defining Pass-/Fail-Criteria for Particular Tests of Automated Driving Functions, in: 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), S. 169–174, 2019
- Klamann, B. et al.: Comparing Technical Systems for a Modular Safety Approval (2021)**  
Klamann, Björn; Winner, Hermann: Comparing Different Levels of Technical Systems for a Modular Safety Approval—Why the State of the Art Does Not Dispense with System Tests Yet, in: Energies, Vol. 14, 2021
- Klauer, V.: Systemidentifikation elektrischer Einzelradaktorik (2022)**  
Klauer, Vanessa: Systemidentifikation elektrischer Einzelradaktorik für die Bewegungsregelung automatisierter Fahrzeuge, Masterthesis, Technische Universität Darmstadt, 2022
- Koegel, M. et al.: Auto update – safe and secure over-the-air software update (2018)**  
Koegel, Markus; Wolf, Marko: Auto update – safe and secure over-the-air (SOTA) software update for advanced driving assistance systems, in: Isermann, Rolf (Hrsg.): Fahrerassistenzsysteme 2016, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018

**Kraus, M. et al.: A solution for future urban mobility (2020)**

Kraus, Manfred; Harkort, Christian; Wuebbolt-Gorbatenko, Benjamin: A solution for future urban mobility: the Schaeffler mover – the fusion of chassis and drive, in: Pfeffer, Peter E. (Hrsg.): 10th International Munich Chassis Symposium 2019, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020

**Kugele, S. et al.: On Service-Oriented Architecture for Automotive Software (2017)**

Kugele, Stefan; Obergfell, Philipp; Broy, Manfred; Creighton, Oliver; Traub, Matthias; Hopfensitz, Wolfgang: On Service-Oriented Architecture for Automotive Software, in: 2017 IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA), S. 193–202, 2017

**Laumanns, N.: Reglerstruktur zur Abstimmung von Fahrdynamiksystemen (2007)**

Laumanns, Nando: Integrale Reglerstruktur zur effektiven Abstimmung von Fahrdynamiksystemen, Dissertation, Schriftenreihe Automobiltechnik, Forschungsges. Kraftfahrwesen (fka), 2007

**Lazard et al.: Global Automotive Supplier Study (2017)**

Lazard; Roland-Berger: Global Automotive Supplier Study, URL: [https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/roland\\_berger\\_global\\_automotive\\_supplier\\_study\\_2018.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_global_automotive_supplier_study_2018.pdf), 2017, Aufgerufen 08.04.2022

**Li, M. et al.: An Integrated Model-Data-Based Feedforward Control Strategy (2017)**

Li, Min; Zhu, Yu; Yang, Kaiming; Hu, Chuxiong; Mu, Haihua: An Integrated Model-Data-Based Zero-Phase Error Tracking Feedforward Control Strategy With Application to an Ultraprecision Wafer Stage, in: IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 64, S. 4139–4149, 2017

**Lim, W. et al.: Hybrid Trajectory Planning for Autonomous Driving (2021)**

Lim, Wontek; Lee, Seongjin; Sunwoo, Myoungsoo; Jo, Kichun: Hybrid Trajectory Planning for Autonomous Driving in On-Road Dynamic Scenarios, in: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 22, S. 341–355, 2021

**Lotz, F. G. O.: Referenzarchitektur für die automatisierte Fahrzeugführung (2017)**

Lotz, Felix Gerhard Otto: Eine Referenzarchitektur für die assistierte und automatisierte Fahrzeugführung mit Fahrereinbindung, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2017

**Lunze, J.: Regelungstechnik 1 (2020)**

Lunze, Jan: Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen, 12. Auflage, Springer Vieweg, 2020

**Lunze, J.: Regelungstechnik 2 (2020)**

Lunze, Jan: Regelungstechnik 2: Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung, 10. Auflage, Springer Vieweg, 2020

**Marro, G. et al.: Convolution profiles for inversion of non-minimum phase systems (2002)**

Marro, Giovanni; Prati, Domenico; Zattoni, Elena: Convolution profiles for right inversion of multivariable non-minimum phase discrete-time systems, in: Automatica, Vol. 38, S. 1695–1703, 2002

**Martens, T. et al.: UNICARagil Dynamics Module (2020)**

Martens, Timm; Pouansi Majiade, LB; Li, Minglu; Henkel, Niclas; Eckstein, L; Wielgos, S; Schlupek, M: UNICARagil Dynamics Module, in: 29th Aachen Colloquium Sustainable Mobility, 2020

**Marzbani, H. et al.: Autonomous Vehicles (2019)**

Marzbani, Hormoz; Khayyam, Hamid; To, Ching Nok; Quoc, Dai Vo; Jazar, Reza N.: Autonomous Vehicles: Autodriver Algorithm and Vehicle Dynamics, in: IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 68, S. 3201–3211, 2019

**Meyer, M.: Signalverarbeitung (2021)**

Meyer, Martin: Signalverarbeitung: Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter, 9. Auflage, Springer Vieweg, 2021

**Mihailescu, A.: Umsetzung von Querdynamik-Zieleigenschaften (2016)**

Mihailescu, Adrian: Effiziente Umsetzung von Querdynamik-Zieleigenschaften durch Fahrdynamikregelsysteme, Dissertation, Forschungsges. Kraftfahrwesen (fka), 2016

**Mitschke, M. et al.: Dynamik der Kraftfahrzeuge (2014)**

Mitschke, Manfred; Wallentowitz, Henning: Dynamik der Kraftfahrzeuge, 5. Auflage, Springer Vieweg, 2014

**Mokhtarian, A. et al.: Dynamic Service-oriented Software Architecture UNICARagil (2020)**

Mokhtarian, Armin; Alrifaae, Bassam; Kampmann, Alexandru: The Dynamic Service-oriented Software Architecture for the UNICARagil Project, in: 29th Aachen Colloquium Sustainable Mobility, S. 275–284, 2020

**Moseberg, J.-E.: Regelung der Horizontalbewegung eines überaktuierten Fahrzeugs (2016)**

Moseberg, Jan-Erik: Regelung der Horizontalbewegung eines überaktuierten Fahrzeugs unter Berücksichtigung von Realisierungsanforderungen, Dissertation, FAU University Press, 2016

**Münch, E. et al.: Vehicle motion control layer (2019)**

Münch, Eckehard; Bestmann, Harald; Lovell, Caspar; Pollmeyer, Stephan; Khaniki, Mehrdad Salari; Schulte, Dirk: Vehicle motion control layer – a modular abstraction layer to decouple ADAS from chassis actuators, in: Pfeffer, Peter (Hrsg.): 9th International Munich Chassis Symposium, 1. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019

**Ni, J. et al.: A review for design and dynamics control of unmanned ground vehicle (2021)**

Ni, Jun; Hu, Jibin; Xiang, Changle: A review for design and dynamics control of unmanned ground vehicle, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 235, S. 1084–1100, 2021

**Niedballa, D. et al.: Concepts of functional safety in E/E-architectures (2020)**

Niedballa, Dennis; Reuss, H.-C.: Concepts of functional safety in E/E-architectures of highly automated and autonomous vehicles, in: 20. Internationales Stuttgarter Symposium, S. 457–470, 2020

**Orend, R.: Fahrzeugbewegung mit optimaler Nutzung der Kraftschlusspotentiale (2005)**

Orend, Ralf: Steuerung der ebenen Fahrzeugbewegung mit optimaler Nutzung der Kraftschlusspotentiale aller vier Reifen, in: at - Automatisierungstechnik, Vol. 53, S. 20–27, 2005

**Peters, Y.: Ein Beitrag zur Entwicklung eines zentralen Fahrwerkreglers (2020)**

Peters, Yannik: Ein Beitrag zur Entwicklung eines zentralen Fahrwerkreglers, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2020

**Qu, Z.: Cooperative Control of Dynamical Systems (2009)**

Qu, Zhihua: Cooperative Control of Dynamical Systems: Applications to Autonomous Vehicles, 1. Auflage, Springer London, 2009

**Rathgeber, C.: Trajektorienplanung und -folgeregung (2016)**

Rathgeber, Christian: Trajektorienplanung und -folgeregung für assistiertes bis hochautomatisiertes Fahren, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2016

**Reid, T. G. et al.: Localization Requirements for Autonomous Vehicles (2019)**

Reid, Tyler G.R.; Houts, Sarah E.; Cammarata, Robert; Mills, Graham; Agarwal, Siddharth; Vora, Ankit; Pandey, Gaurav: Localization Requirements for Autonomous Vehicles, in: SAE International Journal of Connected and Automated Vehicles, Vol. 2, S. 173–190, 2019

**Reinhardt, D. et al.: Domain Controlled Architecture (2013)**

Reinhardt, Dominik; Kucera, Markus: Domain Controlled Architecture - A New Approach for Large Scale Software Integrated Automotive Systems:, in: Proceedings of the 3rd International Conference on Pervasive Embedded Computing and Communication Systems, S. 221–226, 2013

**Reinold, P.: Selbstoptimierende Fahrdynamikregelung mit Einzelradaktorik (2017)**

Reinold, Peter: Integrierte, selbstoptimierende Fahrdynamikregelung mit Einzelradaktorik, Dissertation, Universität Paderborn, 2017

**Reuper, B.: Multi-Frequency GNSS Sensor Fusion for Automotive Applications (2020)**

Reuper, Björn: Multi-Frequency GNSS Sensor Fusion With Quality Assessment for Automotive Applications, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2020

**Rieth, P. E. et al.: Integrationskonzepte der Zukunft (2015)**

Rieth, Peter E.; Raste, Thomas: Integrationskonzepte der Zukunft, in: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015

**On-Road Automated Driving (ORAD) committee: J3016 - Taxonomy and Definitions (2021)**

On-Road Automated Driving (ORAD) committee: J3016 - Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles, 2021

**Robert-Bosch-GmbH: Safe GNSS/Inertial Positioning by VMPS (2018)**

Robert-Bosch-GmbH: Safe GNSS/Inertial Positioning by VMPS for Highly Automated Driving, URL: <https://www.bosch.co.jp/aee2018/pdf/bosch-automotive-engineering-exposition-2018-automated-cc-vehicle-motion-and-position-sensor-vmeps-02.pdf>, 2018, Aufgerufen 09.05.2022

**Roland-Berger: Consolidation in Vehicle Electronic Architectures (2015)**

Roland-Berger: Consolidation in Vehicle Electronic Architectures, URL: [https://www.rolandberger.com/publications/publication\\_pdf/roland\\_berger\\_tab\\_consolidation\\_in\\_vehicle\\_electronic\\_architectures\\_20150721.pdf](https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_tab_consolidation_in_vehicle_electronic_architectures_20150721.pdf), 2015, Aufgerufen 08.04.2022

**Rumez, M. et al.: An Overview of Automotive Service-Oriented Architectures (2020)**

Rumez, Marcel; Grimm, Daniel; Kriesten, Reiner; Sax, Eric: An Overview of Automotive Service-Oriented Architectures and Implications for Security Countermeasures, in: IEEE Access, Vol. 8, S. 221852–221870, 2020

**Rupp, A. et al.: Survey on Control Schemes for Automated Driving on Highways (2017)**

Rupp, Astrid; Stolz, Michael: Survey on Control Schemes for Automated Driving on Highways, in: Watzenig, Daniel; Horn, Martin (Hrsg.): Automated Driving, 1. Auflage, Springer International Publishing, 2017

**Schramm, D. et al.: Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen (2018)**

Schramm, Dieter; Hiller, Manfred; Bardini, Roberto: Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen, 3. Auflage, Springer Vieweg, 2018

**Schwartz, M.: Topologie-Optimierung eines radselektiv angesteuerten Fahrzeugs (2022)**

Schwartz, Manuel: Topologie-Optimierung eines radselektiv angesteuerten Fahrzeugs basierend auf einer optimalen Fahrzeugführungsregelung, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2022

**Schwartz, M. et al.: Model Predictive Control Allocation of an Over-actuated Vehicle (2019)**

Schwartz, Manuel; Siebenrock, Florian; Hohmann, Sören: Model Predictive Control Allocation of an Over-actuated Electric Vehicle with Single Wheel Actuators, in: IFAC-PapersOnLine, Vol. 52, S. 162–169, 2019

**Schwartz, M. et al.: Predictive and Bounded Reference Generation of the Actuators (2020)**

Schwartz, Manuel; Zhao, Kunteng; Hohmann, Soren: Predictive and Bounded Reference Generation of the Actuators of Four-wheel Drive and Four-wheel Steer Vehicles, in: 2020 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), S. 291–298, 2020

**Smith, B. W.: Lawyers and engineers should speak the same robot language (2016)**

Smith, Bryant Walker: Lawyers and engineers should speak the same robot language, in: Calo, Ryan; Froomkin, A.; Kerr, Ian (Hrsg.): Robot Law, 1. Auflage, Edward Elgar Publishing, 2016

**Soler, T. et al.: A note on frame transformations with applications to geodetic datums (2003)**

Soler, Tomás; Marshall, John: A note on frame transformations with applications to geodetic datums, in: GPS Solutions, Vol. 7, S. 23–32, 2003

**Sommerville, I.: Software Engineering (2018)**

Sommerville, Ian: Software Engineering, Informatik, 10. Auflage, Pearson, 2018

**Song, P. et al.: A novel integrated chassis controller for full drive-by-wire vehicles (2015)**

Song, Pan; Tomizuka, Masayoshi; Zong, Changfu: A novel integrated chassis controller for full drive-by-wire vehicles, in: Vehicle System Dynamics, Vol. 53, S. 215–236, 2015

**Sorniotti, A. et al.: Path Tracking for Automated Driving (2017)**

Sorniotti, Aldo; Barber, Phil; De Pinto, Stefano: Path Tracking for Automated Driving: A Tutorial on Control System Formulations and Ongoing Research, in: Watzenig, Daniel; Horn, Martin (Hrsg.): Automated Driving, 1. Auflage, Springer International Publishing, 2017

**Stahl, T. N.: Safeguarding complex automated driving functions (2022)**

Stahl, Tim Nikolaus: Safeguarding complex and learning-based automated driving functions via online verification, Dissertation, Technische Universität München, 2022

**Staron, M.: Automotive Software Architectures (2021)**

Staron, Mirosław: Automotive Software Architectures: An Introduction, 2. Auflage, Springer Nature, 2021

**Stein, G.: Respect the unstable (2003)**

Stein, Gunter: Respect the unstable, in: IEEE Control Systems, Vol. 23, S. 12–25, 2003

**Stiller, C.: Grundlagen der Mess- und Regelungstechnik (2006)**

Stiller, Christoph: Grundlagen der Mess- und Regelungstechnik, Shaker, 2006

**Stolte, T.: Actuator Fault-Tolerant Vehicle Motion Control (2021)**

Stolte, Torben: Actuator Fault-Tolerant Vehicle Motion Control: A Survey, in: arXiv Preprint, URL: <https://arxiv.org/abs/2103.13671>, 2021, Aufgerufen 05.09.2022

**Stolte, T. et al.: Towards Safety Concepts for Automated Vehicles (2020)**

Stolte, Torben; Graubohm, Robert; Jatzkowski, Inga; Maurer, Markus; Ackermann, Stefan; Klammann, Björn; Lippert, Moritz; Winner, Hermann: Towards Safety Concepts for Automated Vehicles by the Example of the Project UNICARagil, in: 29th Aachen Colloquium Sustainable Mobility, 2020

**Strohm, J. N. et al.: Optimal Feedforward Preview Control by FIR Filters (2017)**

Strohm, Johannes N.; Lohmann, Boris: Optimal Feedforward Preview Control by FIR Filters, in: IFAC-PapersOnLine, Vol. 50, S. 5115–5120, 2017

**Strohm, J. N. et al.: Vorausschauende Störgrößenaufschaltung am Viertelfahrzeug (2017)**

Strohm, Johannes N.; Lohmann, Boris: Vorausschauende Störgrößenaufschaltung für die Schwingungsdämpfung am Viertelfahrzeug, in: at - Automatisierungstechnik, Vol. 65, S. 596–607, 2017

**Struth, M. et al.: Poster: Dynamikmodul Antrieb, Fahrwerk und Lenkung (2020)**

Struth, M.; Martens, T.; Wielgos, S.; Brandt, S.; Schlupek, M.: Poster: Dynamikmodul Antrieb, Fahrwerk und Lenkung, in: Digitales Halbzeitevent des Projekts UNICARagil, 2020

**Subosits, J. et al.: Autonomous vehicle control for emergency maneuvers (2015)**

Subosits, John; Gerdes, J. Christian: Autonomous vehicle control for emergency maneuvers: The effect of topography, in: 2015 American Control Conference (ACC), S. 1405–1410, 2015

**Szabova, M. et al.: Survey Of GNSS Coordinates Systems (2016)**

Szabova, Martina; Duchon, Frantisek: Survey Of GNSS Coordinates Systems, in: European Scientific Journal, Vol. 12, S. 33–42, 2016

**Tanenbaum, A. S. et al.: Moderne Betriebssysteme (2016)**

Tanenbaum, Andrew S.; Bos, Herbert: Moderne Betriebssysteme, 4. Auflage, Pearson, 2016

**Urmson, C. et al.: Autonomous driving in urban environments (2008)**

Urmson, Chris; Anhalt, Joshua; Bagnell, Drew; Baker, Christopher; Bittner, Robert; Clark, M. N.; Dolan, John; Duggins, Dave; Galatali, Tugrul; Geyer, Chris; Gittleman, Michele; Harbaugh, Sam; Hebert, Martial; Howard, Thomas M.; Kolski, Sascha; Kelly, Alonzo; Likhachev, Maxim; McNaughton, Matt; Miller, Nick; Peterson, Kevin; Pilnick, Brian; Rajkumar, Raj; Rybski, Paul; Salesky, Bryan; Seo, Young-Woo; Singh, Sanjiv; Snider, Jarrod; Stentz, Anthony; Whittaker, William “Red”; Wolkowicki, Ziv; Ziglar, Jason; Bae, Hong; Brown, Thomas; Demitrish, Daniel; Litkouhi, Bakhtiar; Nickolaou, Jim; Sadekar, Varsha; Zhang, Wende; Struble, Joshua; Taylor, Michael; Darms, Michael; Ferguson, Dave: Autonomous driving in urban environments: Boss and the Urban Challenge, in: Journal of Field Robotics, Vol. 25, S. 425–466, 2008

**van Zanten, A. et al.: Bremsenbasierte Assistenzfunktionen (2015)**

van Zanten, Anton; Kost, Friedrich: Bremsenbasierte Assistenzfunktionen, in: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015

**Velenis, E.: Analysis and control of high-speed wheeled vehicles (2006)**

Velenis, Efsthios: Analysis and control of high-speed wheeled vehicles, Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2006

**Vermeille, H.: Direct transformation to geodetic coordinates (2002)**

Vermeille, H.: Direct transformation from geocentric coordinates to geodetic coordinates, in: Journal of Geodesy, Vol. 76, S. 451–454, 2002

**Wachenfeld, W. et al.: Die Freigabe des autonomen Fahrens (2015)**

Wachenfeld, Walther; Winner, Hermann: Die Freigabe des autonomen Fahrens, in: Maurer, Markus; Gerdes, J. Christian; Lenz, Barbara; Winner, Hermann (Hrsg.): Autonomes Fahren, 1. Auflage, Springer Vieweg, 2015

**Wagner, M. et al.: SODA (2014)**

Wagner, Marco; Zobel, Dieter; Meroth, Ansgar: SODA: Service-Oriented Architecture for Runtime Adaptive Driver Assistance Systems, in: 2014 IEEE 17th International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing, S. 150–157, 2014

**Wan, G. et al.: Robust and Precise Vehicle Localization Based on Multi-Sensor Fusion (2018)**

Wan, Guowei; Yang, Xiaolong; Cai, Renlan; Li, Hao; Zhou, Yao; Wang, Hao; Song, Shiyu: Robust and Precise Vehicle Localization Based on Multi-Sensor Fusion in Diverse City Scenes, in: 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 4670–4677, 2018

**Wang, N. et al.: Feedforward Control for Wind Turbine Load Mitigation (2012)**

Wang, Na; Johnson, Kathryn E.; Wright, Alan D.: FX-RLS-Based Feedforward Control for LIDAR-Enabled Wind Turbine Load Mitigation, in: IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 20, S. 1212–1222, 2012

**Watt, S. T. et al.: Understanding and applying precision time protocol (2015)**

Watt, Steve T.; Achanta, Shankar; Abubakari, Hamza; Sagen, Eric; Korkmaz, Zafer; Ahmed, Husam: Understanding and applying precision time protocol, in: 2015 Saudi Arabia Smart Grid (SASG), 2015

**Weilkiens, T. et al.: Model-Based System Architecture (2016)**

Weilkiens, Tim; Lamm, Jesko G.; Roth, Stephan; Walker, Markus: Model-Based System Architecture, 1. Auflage, Wiley, 2016

**Werling, M.: Trajektoriengenerierung in Verkehrsszenarien (2011)**

Werling, Moritz: Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien, Dissertation, KIT Scientific Publishing, 2011

**Werling, M.: Integrated Trajectory Optimization (2016)**

Werling, Moritz: Integrated Trajectory Optimization, in: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): Handbook of Driver Assistance Systems, 1. Auflage, Springer International Publishing, 2016

**Werling, M. et al.: Different schemes for bumpless manual/automatic transfer (2008)**

Werling, Moritz; Kaufmann, Michael; Gröll, Lutz: Different schemes for bumpless manual/automatic transfer, in: 9th International Workshop on Research and Education in Mechatronics, 2008

**Winner, H.: Grundlagen von Frontkollisionsschutzsystemen (2015)**

Winner, Hermann: Grundlagen von Frontkollisionsschutzsystemen, in: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015

**Winner, H. et al.: Vorrichtung zur Korrektur von Lokalisierungsinformationen (2021)**

Winner, Hermann; Gottschalg, Grischa; Homolla, Tobias: „Vorrichtung zur Korrektur von Abweichungen in Lokalisierungsinformationen einer Planungsebene und einer Ausführungsebene“, Patent Nr. DE102020107899, 2021

**Winner, H. et al.: Adaptive Cruise Control (2015)**

Winner, Hermann; Schopper, Michael: Adaptive Cruise Control, in: Winner, Hermann; Hakuli, Stephan; Lotz, Felix; Singer, Christina (Hrsg.): Handbuch Fahrerassistenzsysteme, 3. Auflage, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015

**Woopen, T. et al.: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures (2018)**

Woopen, Timo; Eckstein, Lutz; Kowalewski, Stefan; Moormann, Dieter; Maurer, Markus; Ernst, Rolf; Winner, Hermann; Katzenbeisser, Stefan; Becker, Matthias; Stiller, Christoph; Furmans, Kai; Bengler, Klaus; Lienkamp, Markus; Reuss, Hans-Christian; Dietmayer, Klaus; Lategahn, Henning; Siepenkötter, Norbert; Elbs, Martin; V. Hinüber, Edgar; Dupuis, Marius; Hecker, Christian: UNICARagil - Disruptive Modular Architectures for Agile, Automated Vehicle Concepts, in: 27th Aachen Colloquium Sustainable Mobility, S. 663–694, 2018

**Zaccaria, R. et al.: A method and a device for determining the position of a vehicle (2009)**

Zaccaria, Renato; Vernazza, Tullio; Sgorbissa, Antonio; Mastrogiovanni, Fulvio; Capezio, Francesco: „A method and a device for determining the position of a vehicle for the autonomous driving of a vehicle, in particular a robotized vehicle“, Patent Nr. WO2009118043A1, 2009

**Zhang, Z. et al.: Coordinated control with friction coefficient identification (2022)**

Zhang, Zheng; Liu, Chun-guang; Ma, Xiao-jun; Zhang, Yun-yin; Chen, Lu-ming: Driving force coordinated control of an 8×8 in-wheel motor drive vehicle with tire-road friction coefficient identification, in: Defence Technology, Vol. 18, S. 119–132, 2022

**Ziegler, J.: Optimale Bahn- und Trajektorienplanung für Automobile (2015)**

Ziegler, Julius: Optimale Bahn- und Trajektorienplanung für Automobile, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015

**Ziegler, J. et al.: Making Bertha Drive—An Autonomous Journey on a Historic Route (2014)**

Ziegler, Julius; Bender, Philipp; Schreiber, Markus; Lategahn, Henning; Strauss, Tobias; Stiller, Christoph; Thao Dang; Franke, Uwe; Appenrodt, Nils; Keller, Christoph G.; Kaus, Eberhard; Herrtwich, Ralf G.; Rabe, Clemens; Pfeiffer, David; Lindner, Frank; Stein, Fridtjof; Erbs, Friedrich; Enzweiler, Markus; Knoppel, Carsten; Hipp, Jochen; Haueis, Martin; Trepte, Maximilian; Brenk, Carsten; Tamke, Andreas; Ghanaat, Mohammad; Braun, Markus; Joos, Armin; Fritz, Hans; Mock, Horst; Hein, Martin; Zeeb, Eberhard: Making Bertha Drive—An Autonomous Journey on a Historic Route, in: IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, Vol. 6, S. 8–20, 2014

**Zou, Y. et al.: An integrated control strategy of path following (2021)**

Zou, Yuan; Guo, Ningyuan; Zhang, Xudong: An integrated control strategy of path following and lateral motion stabilization for autonomous distributed drive electric vehicles, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 235, S. 1164–1179, 2021

**Zwiener, J.: Robuste Zustandsschätzung (2019)**

Zwiener, Jan: Robuste Zustandsschätzung zur Navigation und Regelung autonomer und bemannter Multikopter mit verteilten Sensoren, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2019

## Eigene Veröffentlichungen

**Homolla, Tobias; Winner, Hermann:** Encapsulated trajectory tracking control for autonomous vehicles, *Automotive and Engine Technology*, Vol. 7, S. 295-306, 2022.

**Homolla, Tobias; Winner, Hermann:** Predictive feedforward control architecture for the encapsulated motion control of automated vehicles, 15th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Kanagawa, 12.-16.09.2022.

**Gottschalg, Grischa; Homolla, Tobias; Neidhardt, Dominik:** Localization & Motion Control, Posterpräsentation, 33rd IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Aachen, 05.-09.06.2022.

**Winner, Hermann; Gottschalg, Grischa; Homolla, Tobias:** Vorrichtung zur Korrektur von Abweichungen in Lokalisierungsinformationen einer Planungsebene und einer Ausführungsebene, Zum Patent angemeldet, DE102020107899, Offenlegungstag: 23.09.2021.

**Buchholz, Michael; Gies, Fabian; Danzer, Andreas; Henning, Matti; Hermann, Charlotte; Herzog, Manuel; Horn, Markus; Schön, Markus; Rexin, Nils; Dietmayer, Klaus; Fernandez, Carlos; Janosovits, Johannes; Kamran, Danial; Kinzig, Christian; Lauer, Martin; Molinos, Eduardo; Stiller, Christoph; Wang, Lingguang; Ackermann, Stefan; Homolla, Tobias; Winner, Hermann; Gottschalg, Grischa; Leinen, Stefan; Becker, Mathias; Feiler, Johannes; Hoffmann, Simon; Diermeyer, Frank; Lampe, Bastian; Beemelmans, Till; Kempen, Raphael van; Woopen, Timo; Eckstein, Lutz; Voget, Nicolai; Moormann, Dieter; Jatzkowski, Inga; Stolte, Torben; Maurer, Markus; Graf, Jürgen; Hinüber, Edgar von; Siepenköter, Norbert:** Automation of the UNICARagil Vehicles, 29. Aachen Colloquium Sustainable Mobility, Aachen, 06.-07.10.2020.

**Homolla, Tobias; Gottschalg, Grischa; Winner, Hermann:** Verfahren zur Korrektur von inkonsistenten Lokalisierungsdaten in modularen technischen Systemen, 13. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren, Walting, 16.-17.07.2020.

**Gottschalg, Grischa; Becker, Matthias; Homolla, Tobias; Winner, Hermann; Graf, Jürgen:** Lokalisierung & Bewegungsregelung, Posterpräsentation, Halbzeitevent UNICARagil, 2020.

**Lv, Cunjing; Homolla, Tobias; Varanakkottu, Subramanyan; Hardt, Steffen:** “Tears of Wine” in Capillary Tubes, Posterpräsentation, 1st International Conference on Multiscale Applications of Surface Tension, Brüssel, 05.-08.09.2016.

---

## Betreute studentische Arbeiten

**Advanced Design Project:** Entwicklung einer Kalibrationsmethodik für Umfeldsensorik für das aDDa 4 Students Projekt. ADP Nr. 113/18

**Chipelik, Alexander:** Analyse der Nutzungsmöglichkeiten der Überaktuierung eines radnabenangetriebenen automatisierten Fahrzeugs. Bachelorthesis Nr. 1335/18

**Lyu, Chunghyun:** Anforderungsanalyse und Architekturentwicklung für die Bewegungsregelung eines automatisierten Fahrzeugs. Bachelorthesis Nr. 1336/18

**Höh-Zaid, Daniel:** Verbesserung und Simulation der Bewegungsregelung einer unbemannten Fahrzeugplattform mit Hilfe eines evolutionären Algorithmus. Masterthesis Nr. 726/18

**Advanced Design Project:** Definition von Testfällen für automatisierte Fahrfunktionen und deren Modellierung in einer Simulationsumgebung. ADP Nr. 119/19

**Advanced Design Project:** Erstinbetriebnahme eines automobilen Experimentalradars in einem Versuchsträger. ADP Nr. 120/19

**Sehn-Henn, Julian:** Konzeption zur Bewertung der Eignung eines Gesamtfahrzeugmodells für domänenübergreifende Funktionsentwicklungen. Masterthesis Nr. 737/19

**Macho, Tilman:** Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens zur Schätzung der Beschleunigungsreserven eines automatisierten Fahrzeugs. Masterthesis Nr. 744/19

**Elster, Lukas:** Entwicklung eines Simulationsmodells für elektrische Radnabenantriebe. Masterthesis Nr. 756/19

**Kern, Sarah Franziska:** Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens zur Nutzung der Überaktuierung eines radnabenangetriebenen automatisierten Fahrzeugs. Masterthesis Nr. 757/19

**Advanced Design Project:** Erstinbetriebnahme einer Hardwareplattform für automatisierte Fahrfunktionen. ADP Nr. 132/19

**Advanced Design Project:** Entwicklung eines Bewegungsreglers für das Einparken eines automatisierten Fahrzeugs mit Einzelradaktorik. ADP Nr. 134/19

**Winterstein, Nicolai:** Entwicklung und Implementierung einer Fahrdynamikregelung zur Teleoperation automatisierter Fahrzeuge. Masterthesis Nr. 768/20

**Ebersbach, Maximilian:** Entwicklung und Implementierung einer Vorsteuerung für automatisierte Fahrzeuge mittels Finite Impulse Response Filter. Masterthesis Nr. 774/20

**Advanced Design Project:** Adaption von automatisierten Fahrfunktionen auf einen Versuchsträger. ADP Nr. 138/20

**Scheffel, Timo:** Entwicklung und Implementierung von Ausfallmodellen für elektrische Radnabenantriebe. Masterthesis Nr. 786/20

**Deng, Chen:** Analyse von Aktordegradationen und Kompensationsstrategien für automatisierte Fahrzeuge mit Einzelradaktorik. Masterthesis Nr. 787/20

**Blödel, Alexander:** Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens zur Generierung von Trajektorien für das modulare Testen automatisierter Fahrfunktionen. Masterthesis Nr. 803/20

**Muneeb, Syed Rafay:** Entwicklung eines Inbetriebnahme- und Debugging-Prozesses für die dienstorientierte Architektur eines automatisierten Fahrzeugs. Masterthesis Nr. 806/20

**Advanced Design Project:** Entwicklung eines Bedienkonzepts für die Inbetriebnahme und Überwachung fahrerloser Fahrzeuge. ADP Nr. 142/20

**Advanced Design Project:** Optimierung und Erweiterung eines Bedienkonzepts für die Inbetriebnahme und Überwachung fahrerloser Fahrzeuge. ADP Nr. 155/21

**Klauer, Vanessa:** Systemidentifikation elektrischer Einzelradaktorik für die Bewegungsregelung automatisierter Fahrzeuge. Masterthesis Nr. 814/21

**Melnyk, Nataliia:** Entwicklung und Implementierung einer Testumgebung für automatisierte Fahrfunktionen auf Basis von Continuous Integration. Bachelorthesis Nr. 1381/21

**Müller, Robin:** Entwicklung und Implementierung eines Testkonzepts für die Teleoperation eines automatisierten Fahrzeugs. Bachelorthesis Nr. 1382/21

**Velazquez, Fermin:** Entwicklung einer Benchmarking-Methodik für Bewegungsregelungsalgorithmen. Bachelorthesis Nr. 1385/21

**Khan, Mohammad Ibrahim Aftab:** Entwicklung und Implementierung eines Verfahrens zur Nutzung der Überaktuierung eines radnabenangetriebenen automatisierten Fahrzeugs. Masterthesis Nr. 831/21

**Advanced Design Project:** Entwicklung eines manuellen Steuerungskonzepts für den Rangierbetrieb autonomer Fahrzeuge. ADP Nr. 161/22

**Lyu, Chunghyun:** Entwicklung einer Methodik zur Untersuchung der Auswirkungen eines Betriebsmoduswechsels in den Modus "Sicheres Anhalten" im Projekt UNICARagil. Masterthesis Nr. 849/22