

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

**FAKULTÄT ELEKTROTECHNIK UND
INFORMATIONSTECHNIK**

Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie

DIPLOMARBEIT

Thema: Implementierung, Test und Bewertung eines zeitvarianten
Algorithmus zur Ansteuerung einer Bewegungsplattform

Vorgelegt von: Tobias Lorenz
geboren am: 10.03.1984 in: Grimma

zum
Erlangen des akademischen Grades

DIPLOMINGENIEUR

(Dipl.-Ing.)

Betreuer: Dipl.-Ing. Martin Fischer,
Institut für Verkehrssystemtechnik (DLR)
Verantwortlicher Hochschullehrer: PD Dr.-Ing. habil. Dipl.-Math. Klaus Röbenack
Tag der Einreichung: 18.08.2008

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage dem Prüfungsausschuss der Fakultät Elektrotechnik eingereichte Diplomarbeit zum Thema

„Implementierung, Test und Bewertung eines zeitvarianten Algorithmus
zur Ansteuerung einer Bewegungsplattform“

vollkommen selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Braunschweig, den 18.08.2008

Unterschrift

Kurzfassung

In Zeiten zunehmenden Verkehrsaufkommens erfahren Fahrerassistenzsysteme eine immer größere Bedeutung. Ziel dieser Systeme ist es, die Fahrzeuginsassen und andere Verkehrsteilnehmer besser zu schützen. Mit dem stetig steigenden Zeit- und Kostendruck bei der Entwicklung neuer Assistenzsysteme sind Fahrsimulatoren eine Möglichkeit, den Nutzen und die Wirkung dieser Systeme ohne eine teure hardwaremäßige Umsetzung vorab zu testen. Ein weiterer Vorteil von Fahrsimulatorversuchen gegenüber Tests im realen Straßenverkehr liegt darin, dass gefährliche Fahrsituationen ohne Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer und jederzeit exakt reproduzierbar sind. Die Nachbildung der Bewegungen eines realen Fahrzeugs im Simulator muss so exakt wie möglich erfolgen, um die Übertragbarkeit der Testergebnisse im Simulator auf den realen Straßenverkehr sicherzustellen. Das Fachgebiet des Motion-Cueing beschäftigt sich mit der Darstellung realer Bewegungen in einer simulativen Umgebung. Die Schwierigkeiten bei der Präsentation der Bewegungen des realen Fahrzeugs mit dem Fahrsimulator liegen in den physikalischen Beschränkungen des Arbeitsraumes. Zur Abbildung der realen Bewegungen in die simulative Umgebung wird ein Motion-Cueing-Algorithmus verwendet. Dieser ermöglicht es, die Fahrzeugbewegungen im eingeschränkten Arbeitsraum des Simulators zu präsentieren. Die Hauptkomponenten eines solchen Algorithmus sind Hochpassfilter, Tiefpassfilter und Skalierungsfaktoren. Durch Veränderung der Parameter dieser Komponenten des Motion-Cueing-Algorithmus kann die Performance des Fahrsimulators beeinflusst werden. Um die hochdynamischen Bewegungen eines Automobils im Fahrsimulator zu präsentieren wird momentan ein Motion-Cueing-Algorithmus mit zeitinvarianten Parametern verwendet. Ziel dieser Arbeit ist es, diesen Algorithmus fahrsituationsabhängig und somit mit zeitvarianten Parametersätzen zu implementieren. Damit kann für bestimmte Fahrsituationen die bestmögliche Performance des Simulators sichergestellt werden. Aufgrund der erheblichen Masse der Simulatorplattform wirkt sie als starker Tiefpassfilter. Dies wirkt sich negativ auf die gewünschte Bewegungspräsentation aus. Diesem Effekt soll mit einer Kompensationsregelung entgegengewirkt werden. Zum Abschluss wird eine vergleichende Bewertung der Motion-Cueing-Algorithmen bezüglich der Simulator-Performance und der realen Fahrzeugbewegung vorgestellt.



Abbildung: Dynamischer Fahrsimulator des DLR Braunschweig

Abstract

Due to the continuously increasing traffic and the goal to protect humans, driver assistance systems have become more and more important. Driving simulators are a tool to limit time and costs of driver assistance systems development process. Thus the benefits and the effects of a new driving assistance system can be tested in virtual reality without the implementation of the expensive hardware. Another advantage of driving simulators is the possibility to test dangerous traffic scenarios which is not possible in real traffic. Thus, no human is put at risk and the test scenarios can be repeated as often as necessary. The exact presentation of real car motion in the driving simulator is very important to ensure the transferability of the test results in the simulator to real driving behaviour. The field of science which deals with presenting real car motion in a driving simulator is called motion cueing. Because of the limited simulator working space it's not possible to present the whole accelerations in the driving simulator. To model the real car motion in simulator a motion cueing algorithm is used. The main components of a motion cueing algorithm are high-pass filter, low-pass filter and scaling factors. By changing the parameter of these components the performance of the simulator is influenced. At the moment a motion cueing algorithm with fixed parameter-set is used to present the highly dynamic real car motion in simulator. The goal of this work is to develop a driving-situation-dependent, motion cueing algorithm with time-variant parameter-sets. Thus the best possible performance of the simulator for each driving situation is guaranteed. Due to the huge mass of the simulator platform it generally acts as a strong low-pass filter which influences the presentation of motion in a negative way. This effect can be minimized by using a control algorithm which was developed for that purpose. Finally an evaluation of the simulator performance referred to the real car motion was done.



figure: Dynamic Driving Simulator of the German Aerospace Center Brunswick

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	12
1 Einleitung	13
2 Grundlagen des Motion-Cueing	14
2.1 Was ist Motion-Cueing?	14
2.2 Der Motion-Cueing-Algorithmus (MCA)	15
2.3 Vorstellung des Motion-Cueing-Algorithmus „Fast-Tilt-Coordination“	18
2.4 Die Menschlichen Wahrnehmungsschwellen	19
2.5 Der Dynamische Fahrsimulator des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt	20
3 Entwurf eines zeitvarianten Motion-Cueing-Algorithmus	21
3.1 Einführung	21
3.2 Aufbau und Realisierung der Parameterumschaltung des zeitvarianten Algorithmus	22
3.2.1 Aufbau und Funktionsweise des zeitvarianten Algorithmus	22
3.2.2 Untersuchung linearer zeitvarianter Übertragungsfunktionen	23
3.2.3 Umschalten des Filterkoeffizienten $a_0(t)$ mittels Anpassung des Zustandes $x(t)$ für Hochpassfilter 1.Ordnung	32
3.2.4 Test der Parameterumschaltung am zeitvarianten Algorithmus	34
3.3 Ermittlung des aktuellen Parametersatzes	36
3.3.1 Einführung	36
3.3.2 Funktionsweise der Parametersatzbestimmung	37
3.4 Test des zeitvarianten Motion-Cueing-Algorithmus mit Online-Parametersatzbestimmung	56
4 Untersuchung der Dynamik des Fahrsimulators	59
4.1 Einführung	59
4.2 Grundlagen der Simulatorsteuerung	60
4.3 Systemidentifikation der Simulatordynamik	62
4.3.1 Einführung	62

4.3.2	Vorgehensweise zur Systemidentifikation	63
4.3.3	Präsentation und Auswertung der Ergebnisse	64
4.3.4	Bestimmung der Koeffizienten der Übertragungsfunktionen und Test des Übertragungssystems	66
4.4	Entwurf einer Kompensationsregelung	68
4.4.1	Aufbau der Kompensationsregelung	68
4.4.2	Algorithmus zur Stellgrößenbegrenzung	69
4.4.3	Untersuchung und Auslegung der Kompensationsregelung	78
4.4.4	Test der Kompensationsregelung	83
5	Objektive Bewertung der Güte von Motion-Cueing-Algorithmen	84
5.1	Einführung	84
5.2	Vorstellung des Bewertungskriteriums	84
5.2.1	Bewertungskriterium von Pouliot et al.	84
5.2.2	Erweiterung des Bewertungskriteriums von Pouliot et al.	87
5.3	Anwendung des erweiterten Bewertungskriteriums	90
6	Zusammenfassung und Ausblick	93
	Literaturverzeichnis	95
	Abbildungsverzeichnis	97
	Tabellenverzeichnis	99
A	Entwurf eines zeitvarianten Motion-Cueing-Algorithmus	100
A.1	Parameter des Motion-Cueing-Algorithmus	100
A.2	Online-Parametersatz	101
A.3	Datenpakete	101
A.3.1	Fahrdynamikmodelldaten	101
A.3.2	DED-Datenpaket	102
A.4	Schaltfunktionen des Zustandsautomaten	104
A.5	Bestimmung des Initialzustandes	106
A.6	Automatentabelle des Mealy-Automaten	107
A.7	Konventionen zur Bestimmung der Distanz bis zum Fahrsituationswechsel . . .	108
A.8	Test des zeitvarianten Motion-Cueing-Algorithmus mit Online-Parametersatzbestimmung	108
B	Untersuchung der Dynamik des Fahrmodells	113
B.1	Systemidentifikation der Simulatordynamik	113
B.1.1	Bestimmung der Koeffizienten der Übertragungsfunktionen und Test des Übertragungssystems	114
B.2	Entwurf einer Kompensationsregelung	115
B.2.1	Algorithmus zur Stellgrößenbegrenzung	115

B.2.2 Test der Kompensationsregelung	119
C Objektive Bewertung der Güte von Motion-Cueing-Algorithmen	125
C.1 Anwendung des erweiterten Bewertungskriteriums	125
Thesen zur Diplomarbeit	I

Symbolverzeichnis

Allgemeingültige Symbole

\underline{a}	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Vektor der drei translatorischen Beschleunigungskomponenten $[a_x, a_y, a_z]^T$
a_n	$[\]$	Koeffizienten des Nenners einer gebrochenrationalen Übertragungsfunktion mit $n \in \mathbb{N}$
a_x, \ddot{x}	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	translatorische Beschleunigungskomponente in Richtung der x-Achse
a_y, \ddot{y}	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	translatorische Beschleunigungskomponente in Richtung der y-Achse
a_z, \ddot{z}	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	translatorische Beschleunigungskomponente in Richtung der z-Achse
b_n	$[\]$	Koeffizienten des Zählers einer gebrochenrationalen Übertragungsfunktion mit $n \in \mathbb{N}$
\underline{f}	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Vektor der drei Komponenten der spezifischen Kräfte $[f_x, f_y, f_z]^T$
g	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Erdbeschleunigung $g = -9.81 \frac{m}{s^2}$
k_a	$[\]$	3×1 Vektor der Skalierungsfaktoren der Beschleunigungskomponenten im Motion-Cueing Algorithmus
$k_{a,tilt}$	$[\]$	2×1 Vektor der Skalierungsfaktoren der Winkelgeschwindigkeitskomponenten der Tilt-Coordination im Motion-Cueing Algorithmus
k_{scale}	$[\]$	allgemeiner Skalierungsfaktor

k_ω	[]	3×1 Vektor der Skalierungsfaktoren der Winkelgeschwindigkeitskomponenten im Motion-Cueing Algorithmus
\underline{L}_{IS}	[]	Transformationsmatrix zur Umrechnung der Beschleunigungen des Fahrdynamikmodells vom fahrzeugfesten ins inertielle Koordinatensystem
\underline{R}_{IS}	[]	Transformationsmatrix zur Umrechnung der Winkelgeschwindigkeiten des Fahrdynamikmodells vom fahrzeugfesten ins inertielle Koordinatensystem
l	[mm]	Länge um die ein Hydraulikzylinder ausgefahren ist
l_{max}	[mm]	maximale Länge um die ein Hydraulikzylinder ausgefahren werden kann
l_{min}	[mm]	minimale Länge um die ein Hydraulikzylinder ausgefahren werden kann
\underline{s}	[m]	Vektor der drei Positionskomponenten $[x, y, z]^T$
v	[$\frac{m}{s}$]	Geschwindigkeit in Bewegungsrichtung
x	[m]	Position bei translatorischer Bewegung in Richtung der x-Achse
y	[m]	Position bei translatorischer Bewegung in Richtung der y-Achse
z	[m]	Position bei translatorischer Bewegung in Richtung der z-Achse
$\underline{\beta}$	[rad]	Vektor der drei Drehwinkel $[\Phi, \Theta, \Psi]^T$
Θ	[rad]	Rotationswinkel bei Drehung um die y-Achse (Nickwinkel)
π	[rad]	Kreiszahl $\pi = 3.1416$
Φ	[rad]	Rotationswinkel bei Drehung um die x-Achse (Rollwinkel)
Ψ	[rad]	Rotationswinkel bei Drehung um die z-Achse (Gierwinkel)
$\underline{\omega}$	[$\frac{rad}{s}$]	Vektor der drei Winkelgeschwindigkeitskomponenten $[\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$
ω_{HP}	[Hz]	allgemeiner Filterkoeffizient

ω_{HP_a}	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	3×1 Vektor der Filterkoeffizienten im translatorischen Pfad des Motion-Cueing Algorithmus
$\omega_{HP_{WO}}$	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	3×1 Vektor der Wash-Out Filterkoeffizienten im translatorischen Pfad des Motion-Cueing Algorithmus
ω_{HP_ω}	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	3×1 Vektor der Filterkoeffizienten im rotatorischen Pfad des Motion-Cueing Algorithmus
$\omega_x, \dot{\Phi}$	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	Winkelgeschwindigkeit bei Rotation um die x-Achse
$\omega_y, \dot{\Theta}$	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	Winkelgeschwindigkeit bei Rotation um die y-Achse
$\omega_z, \dot{\Psi}$	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	Winkelgeschwindigkeit bei Rotation um die z-Achse

Symbole Kapitel 3

A_{end}	$[\]$	Parameterwert auf den umgeschaltet werden soll
a_{grenz}	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Grenzwert der Beschleunigung zur Parameterumschaltung
$A_{sc}(t)$	$[\]$	zeitabhängiger Skalierungsfaktor
A_{start}	$[\]$	Parameterwert zu Beginn der Parameterumschaltung
$a_{y_{curve}}$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	berechnete Querbewegung in einer Kurve
d_{switch}	$[m]$	verbleibende Strecke bis zum Fahrsituationswechsel
$G(s)$	$[\]$	allgemeine gebrochenrationale Übertragungsfunktion
$H(s)$	$[\]$	allgemeine Übertragungsfunktion
p_n	$[\]$	Platzbezeichnung im steuerungstechnisch interpretierten Petri Netz mit $n \in \mathbb{N}$
t	$[s]$	aktueller Simulationszeitpunkt
t_{end}	$[s]$	Zeitpunkt des Eingangssignalsprungs zurück auf $0 \frac{m}{s^2}$
t_{sim}	$[s]$	Simulationsdauer

t_{start}	[s]	Zeitpunkt des Eingangssignalsprungs auf $1 \frac{m}{s^2}$
t_{switch}	[s]	Zeitpunkt des Starts der Parameterumschaltung
T_{period}	[s]	Dauer der Parameterumschaltung
T_{zoff}	[s]	maximale Zeitspanne innerhalb der keine neuen Fahrsituationsinformationen vorliegen dürfen
$u(t)$	[]	Eingangssignal eines Übertragungssystems
v_{dn}	[]	Schaltbedingung zur Wahl von d_{switch} mit $n \in \mathbb{N}$
v_n	[]	Schaltbedingungen des Sequentiellen Automaten mit $n \in \mathbb{N}$
$x(t)$	[]	Zustandsgröße eines Übertragungssystems
x_n	[]	Eingangssignalbelegung im steuerungstechnisch interpretierten Petri Netz mit $n \in \mathbb{N}$
$y(t)$	[]	Ausgangssignal eines Übertragungssystems
ω_{grenz}	$[\frac{rad}{s}]$	Grenzwert der Winkelgeschwindigkeit zur Parameterumschaltung
Ω_u	[]	Eingangsmenge des Sequentiellen Automaten
Ω_y	[]	Ausgangsmenge des Sequentiellen Automaten
Ω_z	[]	Zustandsmenge des Sequentiellen Automaten

Symbole Kapitel 4

$C_{xy}^2(f)$	[]	Kohärenz
f	[Hz]	Frequenz
$F(s)$	[]	Übertragungsfunktion des Vorfilters der Kompensationsregelung
$G(s)$	[]	lineares Übertragungsfunktion der Simulatordynamik

$G_{CL}(s)$	[]	Übertragungsfunktion des Geschlossenen Kreises ohne Vorsteuerpfad
$G_{CL,VS}(s)$	[]	Übertragungsfunktion des Geschlossenen Kreises mit Vorsteuerpfad
$G_{Cyl}(s)$	[]	Übertragungsfunktion zwischen Soll- und Ist-Zylinderpositionen
$G_{Lim}(s)$	[]	lineare Übertragungsfunktion des Stellgrößenbegrenzers
$G_{OL}(s)$	[]	Übertragungsfunktion der Offenen Kette ohne Vorsteuerpfad
$\underline{G}_{Pos}(s)$	[]	Übertragungsfunktionsmatrix zwischen Sollpositionsvorgaben und Ist-Zylinderpositionen
$G_{PT_2}(s)$	[]	Übertragungsfunktion eines allgemeinen PT_2 -Gliedes
k_n	[]	Verstärkungsfaktoren des Stellgrößenbegrenzers $n \in \mathbb{N}$
$K_R(s)$	[]	Reglerübertragungsfunktion
$P_{xx}(f)$	[]	Autoleistungsdichte des Eingangssignals
$P_{xy}(f)$	[]	mittlere Kreuzleistungsdichte
$P_{yy}(f)$	[]	Autoleistungsdichte des Ausgangssignals
s	[m]	Positionssignal
\dot{s}	[$\frac{m}{s}$]	Geschwindigkeitssignal
\ddot{s}	[$\frac{m}{s^2}$]	Beschleunigungssignal
β	[rad]	Drehwinkelsignal
$\dot{\beta}$	[$\frac{rad}{s}$]	Winkelgeschwindigkeitssignal
$\ddot{\beta}$	[$\frac{rad}{s^2}$]	Winkelbeschleunigungssignal
δ	[]	Dämpfungsfaktor

Φ_R	$[rad]$	Phasenreserve
ω_0	$[\frac{rad}{s}]$	Eigenfrequenz des Stellgrößenbegrenzers
ω_D	$[\frac{rad}{s}]$	Durchtrittsfrequenz

Symbole Kapitel 5

a_{norm}	$[\frac{m}{s^2}]$	Normierungsfaktor für Fehler bei der Darstellung der translatorischen Beschleunigung im erweiterten Bewertungskriterium
\dot{a}_{norm}	$[\frac{m}{s^3}]$	Normierungsfaktor für Fehler bei der Darstellung des Rucks im erweiterten Bewertungskriterium
\underline{e}_{MCA}	$[\frac{m}{s^2}]$ bzw. $[\frac{rad}{s}]$	Fehler der durch das Motion-Cueing verursacht wird
f_{norm}	$[\frac{m}{s^2}]$	Normierungsfaktor für Fehler bei der Darstellung der translatorischen Beschleunigung im Bewertungskriterium von Pouliot et al.
\dot{f}_{norm}	$[\frac{m}{s^3}]$	Normierungsfaktor für Fehler bei der Darstellung des Rucks im Bewertungskriterium von Pouliot et al.
N	$[\]$	Anzahl der Simulationszeitschritte
P_{MCA}	$[\]$	Maß für die Performance eines MCA mit $(0 \leq P_{MCA} \leq 1)$, $P_{MCA} \in \mathbb{R}$
w_i	$[\]$	Wichtungsfaktoren der Einzelfehlerkomponenten mit $(w_i \geq 0)$, $w_i \in \mathbb{R}$
$\underline{\zeta}$	$[\frac{m}{s^2}]$ bzw. $[\frac{rad}{s}]$	6×1 Vektor der Bewegungsgrößen $[f_x, f_y, f_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$
λ_1	$[\]$	Güteindikator zur Beschreibung des Fehlers bei der Präsentation von translatorischen Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten
λ_2	$[\]$	Güteindikator zur Beschreibung des Fehlers bei der Präsentation des Rucks und der Winkelbeschleunigungen
ω_{norm}	$[\frac{rad}{s^2}]$	Normierungsfaktor für Fehler bei der Darstellung der Winkelgeschwindigkeiten im Bewertungskriterium

$\dot{\omega}_{norm}$ $[\frac{rad}{s^3}]$

Normierungsfaktor für Fehler bei der Darstellung der Winkelbeschleunigungen im Bewertungskriterium

Indizes

<i>FDD</i>	Daten des Fahrdynamikmodells
<i>grenz</i>	Grenzwerte von Bewegungsgrößen
<i>(I)</i>	Signale im inertialen Koordinatensystem betrachtet
<i>Ist</i>	Istgröße
<i>Lim</i>	limitiertes Signal
<i>max</i>	maximal zulässige Größe
<i>MC</i>	Größe am Ausgang des Motion-Cueing-Algorithmus
<i>R</i>	Signal am Reglerausgang
<i>(S)</i>	Signale im fahrzeugfesten Koordinatensystem betrachtet
<i>Sim</i>	Daten die an die Simulatorsteuerung gesendet werden
<i>Soll</i>	Sollgröße
<i>Stell</i>	Stellgröße
<i>TC</i>	rotatorische Bewegungsgrößen die durch die Tilt-Coordination dargestellt werden
<i>V</i>	Signal am Ausgang des Vorsteuerpfades

Abkürzungsverzeichnis

<i>DEA</i>	Deterministischer Endlicher Automat
<i>DED</i>	Dominian Environment Detection
<i>DLR</i>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
<i>FTC</i>	Fast-Tilt-Coordination
<i>MCA</i>	Motion-Cueing Algorithmus
<i>StVO</i>	Straßenverkehrsordnung

Kapitel 1

Einleitung

Aufgrund des stetig wachsenden Verkehrsaufkommens und den damit steigenden Gefahren für die Verkehrsteilnehmer kommt den Fahrerassistenzsystemen eine immer größere Bedeutung zu. Gleichzeitig wächst bei der Entwicklung neuer Konzepte dieser Systeme der Zeit- und Kostendruck. Eine Möglichkeit, die Wirkung und den Nutzen von Fahrerassistenzsystemen bereits vorab ohne einen kostenintensiven Aufbau der Hardware zu ermöglichen, stellen Fahr-simulatoren dar. Weiterhin ermöglichen Fahr-simulatoren den exakt reproduzierbaren Test von gefährlichen Fahrmanövern ohne Verkehrsteilnehmer zu gefährden. Ein solcher Fahr-simulator steht beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig. Um die in Testfahrten mit dem Simulator ermittelten Testergebnisse bei Untersuchungen von Fahrer-assistenzsystemen auf den realen Straßenverkehr übertragen zu können ist es wichtig, dass die im Simulator dargestellte Bewegung so gut wie möglich mit der realen Fahrzeugbewegung übereinstimmt. Mit der Abbildung realer Bewegungen in einer simulativen Umgebung befasst sich das Fachgebiet des Motion-Cueing. Das Hauptproblem bei der Darstellung der realen Fahrzeugbewegungen im Fahr-simulator ist die physikalische Beschränkung des Arbeits-raumes. Um die Fahrzeugbewegungen innerhalb des Arbeitsraumes präsentieren zu können wird ein Motion-Cueing-Algorithmus verwendet. Dieser bildet die Bewegung des realen Fahr-zeuges mittels Tiefpass-Filtern, Hochpass-Filtern und Skalierungsfaktoren auf den Arbeitsraum des Simulators ab. Momentan wird dabei ein Motion-Cueing-Algorithmus mit festem Para-metersatz für Skalierungsfaktoren und Filtereckfrequenzen verwendet. Da aber verschiedene Fahrmanöver auch verschiedene Anforderungen an den Simulator stellen, wird der Motion-Cueing-Algorithmus fahrsituationsabhängig mit zeitvarianten Parametersätzen implementiert um bei den entsprechenden Fahrsituationen die bestmögliche Performance sicherzustellen. Dies soll Gegenstand des ersten zu bearbeitenden Themas sein. Eine weitere Einflussgröße, die sich negativ auf die Darstellung realer Fahrzeugbewegungen im Fahr-simulator auswirkt, ist die auf-grund der erheblichen Masse des Simulators auftretende Trägheit des Systems. Zwar können diese Effekte aufgrund der physikalischen Grenzwerte des Systems nicht komplett beseitigt werden, dennoch wird in der Arbeit ein Regelungskonzept zur Minimierung des Tiefpassver-haltens des Simulators erarbeitet. Zum Abschluss der Arbeit wird ein Bewertungskriterium erarbeitet um die Performance der Motion-Cueing-Algorithmen einer Bewertung unterziehen zu können.

Kapitel 2

Grundlagen des Motion-Cueing

2.1 Was ist Motion-Cueing?

Für den Begriff Motion-Cueing ist in der Fachliteratur (vgl. z.B. [Gra95]) keine exakte Definition angegeben. Trotzdem soll im Folgenden versucht werden eine Definition für den Begriff Motion-Cueing anzugeben.

Motion-Cueing¹: „*Mit Motion-Cueing werden akustische², visuelle³, vestibuläre⁴ und haptische⁵ Reize bezeichnet, welche reale Bewegungen widerspiegeln sollen.*“

Das Ziel des Motion-Cueing besteht darin, reale Bewegungen in einer simulativen Umgebung darzustellen. Es ist erforderlich die für einen realen Fahreindruck nötigen dynamischen Größen Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung nachzubilden. Die Positions- und die Geschwindigkeitsdarstellung kann durch eine grafische Umgebungssimulation und der Verwendung von akustischen Reizen z.B. Fahrgeräusche nahezu exakt dargestellt werden. Die Darstellung der über den vestibulären Apparat wahrnehmbaren Beschleunigungen kann in der simulativen Umgebung nur eingeschränkt erfolgen. Dies ist auf den begrenzten Arbeitsraum von dynamischen Fahrsimulatoren zurückzuführen. Um die Beschleunigungen dennoch so gut wie möglich darstellen zu können ist es notwendig die realen Fahrzeugbeschleunigungen auf den eingeschränkten Simulatorarbeitsraum abzubilden. Diese Umrechnung erfolgt mit einem Motion-Cueing-Algorithmus der im Weiteren nur noch als MCA bezeichnet wird.

¹Quelle: Fachlaborversuche 2008 DLR Braunschweig; Dipl.-Ing. Martin Fischer

²Reize die über das Hören wahrgenommen werden

³Reize die über das Sehen wahrgenommen werden

⁴Reize die über das Gleichgewichtsorgan im Innenohr wahrgenommen werden (Kinästhesie)

⁵Reize die über die Haut wahrgenommen werden

2.2 Der Motion-Cueing-Algorithmus (MCA)

Der folgende Abschnitt erläutert die Funktionsweise eines Motion-Cueing-Algorithmus. Dieser transformiert die Bewegungen des realen Fahrzeugs derart, dass sie im begrenzten Arbeitsraum des Simulators abgebildet werden können. Mit einem Fahrdynamikmodell werden aus den vom Fahrer eingegebenen Eingangsgrößen Lenkradwinkel, Gaspedalstellung und Bremspedalstellung die aktuellen Fahrdynamikdaten (FDD) in Form von Winkelgeschwindigkeiten und spezifischen Kräften berechnet. Die spezifischen Kräfte

$$\underline{f} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z - g \end{bmatrix}$$

sind dabei Beschleunigungen bei denen die Erdbeschleunigung in der z-Komponente mit berücksichtigt wird. Der Motion-Cueing-Algorithmus rechnet diese Bewegungsgrößen in mit dem Simulator darstellbare Positionsvorgaben $\underline{s}_{Sim}^{(I)}$ und Orientierung $\underline{\beta}_{Sim}^{(I)}$ um. In Abbildung 2.1 ist der Wirkungsplan des klassischen Motion-Cueing-Algorithmus dargestellt. Mit Hilfe dieser Darstellung werden die Grundprinzipien des Motion-Cueing-Algorithmus erläutert (vgl. [Nah90] und [Rey00]).

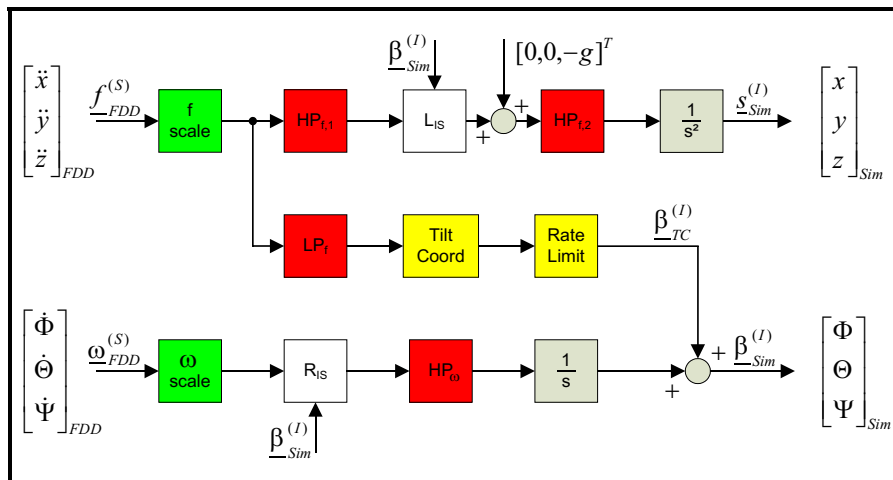


Abbildung 2.1: Wirkungsplandarstellung des klassischen MCA; grün: Skalierungsfaktoren; rot: Hoch- und Tiefpassfilter; gelb: Tilt Coordination; weiß: Koordinatentransformation

Die am Eingang des MCA eingehenden Fahrdynamikdaten werden zu Beginn mit einem Skalierungsfaktor k_{scale} mit $0 \leq k_{scale} \leq 1$ multipliziert. Dies wird durch die in Abbildung 2.1 grün dargestellten Blöcke repräsentiert. Wählt man beispielsweise einen Skalierungsfaktor von $k_{scale} = 0.5$ so halbiert man die Amplitude der MCA-Eingangssignale und kann damit die Größe des Simulatorarbeitsraumes verdoppeln. Im nächsten Schritt erfolgt eine Aufteilung der

MCA-Eingangssignale in hochfrequente und niederfrequente Signalanteile. Dies ist in Abbildung 2.1 durch die rot gekennzeichneten Blöcke dargestellt. Die hochfrequenten Signalanteile der spezifischen Kräfte werden in Beschleunigungen umgerechnet und ergeben sich nach zweimaliger Integration zu den Positionsvorgaben am Ausgang des MCA. Die Positionsvorgaben bewirken eine translatorische Bewegung der Simulatorplattform. Dieser Vorgang wird durch den obersten Pfad in Abbildung 2.1 repräsentiert. Die Behandlung der niederfrequenten Signalanteile der spezifischen Kräfte erfolgt im mittleren Pfad des Wirkungsplans. Mit der als Tilt Coordination bezeichneten Transformation werden die spezifischen Kräfte in Drehwinkel umgerechnet (vgl. Abbildung 2.1 gelbe Blöcke). Durch die Drehung der Simulatorplattform können unter Ausnutzung des Erdbeschleunigungsvektors

$$\underline{g} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{m}{s^2} \\ 0 & \frac{m}{s^2} \\ -9.81 & \frac{m}{s^2} \end{bmatrix}$$

die langanhaltenden Beschleunigungsanteile innerhalb des beschränkten Simulatorarbeitsraumes dargestellt werden. Die Tilt-Coordination kann aufgrund der für die Umrechnung der Beschleunigung in einen Drehwinkel notwendigen Orthogonalität des Erdbeschleunigungsvektors und des jeweiligen Beschleunigungsvektors nur für die zwei Beschleunigungskomponenten in longitudinale und laterale Bewegungsrichtung erfolgen (vgl. Gleichungen 2.1). Die Herleitung der Gleichungen 2.1 zur Bestimmung der Drehwinkel wird von Reid und Nahon in [Nah85] beschrieben. Für die langanhaltenden Beschleunigungsanteile in Richtung der z-Achse ist diese Transformation aufgrund der Parallelität des g-Vektors und der z-Achse nicht möglich (vgl. [Pou98]). In Abbildung 2.2 wird die Bestimmung des Drehwinkels $\Theta_{TC}^{(I)}$ exemplarisch für $\Phi_{TC}^{(I)} = 0^\circ$ grafisch verdeutlicht.

$$\begin{aligned} \Phi_{TC}^{(I)} &= -\arctan\left(\frac{a_y}{g}\right) \\ \Theta_{TC}^{(I)} &= \arctan\left(\left(\cos \Phi_{TC}^{(I)}\right) \cdot \frac{a_x}{g}\right) \\ \Psi_{TC}^{(I)} &= 0 \end{aligned} \tag{2.1}$$

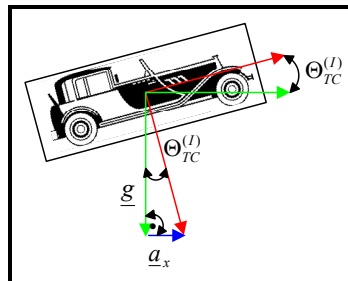


Abbildung 2.2: Grafische Darstellung zur Illustration der Bestimmung des Drehwinkels $\Theta_{TC}^{(I)}$ für $\Phi_{TC}^{(I)} = 0^\circ$

Im unteren Pfad in Abbildung 2.1 ist die Behandlung der Winkelgeschwindigkeiten $\underline{\omega}_{FDD}^{(S)}$ abgebildet. Bei der Präsentation der Winkelgeschwindigkeiten werden ausschließlich die hochfrequenten Signalanteile berücksichtigt. Die aus dem mittleren und dem unteren Pfad resultierenden Drehwinkel werden zu einem Gesamtdrehwinkel addiert und bilden die Winkelvorgaben am Ausgang des MCA. Diese werden gemeinsam mit den Positionsvorgaben des oberen Pfades an die Simulatorsteuerung als Sollvorgaben weitergeleitet. Der in Abbildung 2.1 durch einen roten Block gekennzeichnete Hochpassfilter $HP_{f,2}$ wird als Wash-Out-Filter bezeichnet. Mit diesem Filter wird sichergestellt, dass die translatorischen Simulatorbewegungen während der Simulation in die Ausgangslage des Simulators zurückgeführt werden. Die weiß dargestellten Blöcke repräsentieren Koordinatentransformationen. Diese sind notwendig da die Daten des Fahrdynamikmodells im fahrzeugfesten Koordinatensystem (S) berechnet werden und die Simulatorsteuerung die Sollvorgaben zur Steuerung der Simulatorplattform im inertialen Koordinatensystem (I) benötigt. Die Koordinatentransformation der spezifischen Kräfte \underline{f}_{FDD} vom fahrzeugfesten ins inertielle Koordinatensystem erfolgt mit der Transformationsmatrix \underline{L}_{IS} .

$$\underline{f}_{FDD}^{(I)} = \underline{L}_{IS} \cdot \underline{f}_{FDD}^{(S)}$$

$$\underline{L}_{IS} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_{Sim}^{(I)} \cos \Psi_{Sim}^{(I)} & \sin \Phi_{Sim}^{(I)} \sin \Theta_{Sim}^{(I)} \cos \Psi_{Sim}^{(I)} & \cos \Phi_{Sim}^{(I)} \sin \Theta_{Sim}^{(I)} \cos \Psi_{Sim}^{(I)} \\ & -\cos \Phi_{Sim}^{(I)} \sin \Psi_{Sim}^{(I)} & +\sin \Phi_{Sim}^{(I)} \sin \Psi_{Sim}^{(I)} \\ \cos \Theta_{Sim}^{(I)} \sin \Psi_{Sim}^{(I)} & \sin \Phi_{Sim}^{(I)} \sin \Theta_{Sim}^{(I)} \sin \Psi_{Sim}^{(I)} & \cos \Phi_{Sim}^{(I)} \sin \Theta_{Sim}^{(I)} \sin \Psi_{Sim}^{(I)} \\ & +\cos \Phi_{Sim}^{(I)} \cos \Psi_{Sim}^{(I)} & -\sin \Phi_{Sim}^{(I)} \cos \Psi_{Sim}^{(I)} \\ -\sin \Theta_{Sim}^{(I)} & \sin \Phi_{Sim}^{(I)} \cos \Theta_{Sim}^{(I)} & \cos \Phi_{Sim}^{(I)} \cos \Theta_{Sim}^{(I)} \end{bmatrix}$$

Die Koordinatentransformation der Winkelgeschwindigkeiten $\underline{\omega}_{FDD}$ wird mit der Transformationsmatrix \underline{R}_{IS} durchgeführt.

$$\underline{\omega}_{FDD}^{(I)} = \underline{R}_{IS} \cdot \underline{\omega}_{FDD}^{(S)}$$

$$\underline{R}_{IS} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \Phi_{Sim}^{(I)} \tan \Theta_{Sim}^{(I)} & \cos \Phi_{Sim}^{(I)} \tan \Theta_{Sim}^{(I)} \\ 0 & \cos \Phi_{Sim}^{(I)} & -\sin \Phi_{Sim}^{(I)} \\ 0 & \frac{\sin \Phi_{Sim}^{(I)}}{\cos \Theta_{Sim}^{(I)}} & \frac{\cos \Phi_{Sim}^{(I)}}{\cos \Theta_{Sim}^{(I)}} \end{bmatrix}$$

2.3 Vorstellung des Motion-Cueing-Algorithmus „Fast-Tilt-Coordination“

Im vorigen Abschnitt wurde das Grundprinzip eines Motion-Cueing-Algorithmus am Beispiel des klassischen MCA erläutert. Ein weiterführender Ansatz eines MCA ist der beim DLR Braunschweig entwickelte Algorithmus „Fast-Tilt-Coordination“ der im Weiteren nur noch als FTC bezeichnet wird. Der Wirkungsplan dieses Algorithmus ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Das Grundprinzip dieses Algorithmus entspricht dem des klassischen Motion-Cueing-Algorithmus mit dem Unterschied, dass die Eingangssignale bereits in Beschleunigungen umgerechnet wurden. Der Hauptunterschied liegt in der Bestimmung der niederfrequenten Signalanteile, die im mittleren Pfad durch die Tilt-Coordination präsentiert werden. Die Bestimmung dieser Signalanteile erfolgt beim klassischen Ansatz mit einem Tiefpassfilter. Beim FTC hingegen erfolgt eine Differenzbildung zwischen den Eingangsbeschleunigungen aus dem Fahr-dynamikmodell $\underline{a}_{FDD}^{(S)}$ und den in das fahrzeugfeste Koordinatensystem (S) rücktransformierten Ausgangsbeschleunigungen $\underline{a}_{Sim}^{(S)}$ des oberen Pfades des FTC (vgl. Abbildung 2.3). Dies bedeutet, dass alle Signalanteile des MCA-Eingangssignals $\underline{a}_{FDD}^{(S)}$, die nicht über die translatorische Bewegung der Simulatorplattform präsentiert werden, durch die Tilt-Coordination dargestellt werden. Dies bringt einen erheblichen Eintrag von höherfrequenten Signalanteilen im mittleren Signalpfad. Es wirkt sich jedoch positiv auf die Nachbildung der hochdynamischen realen Fahrzeugbewegung im Simulator aus.

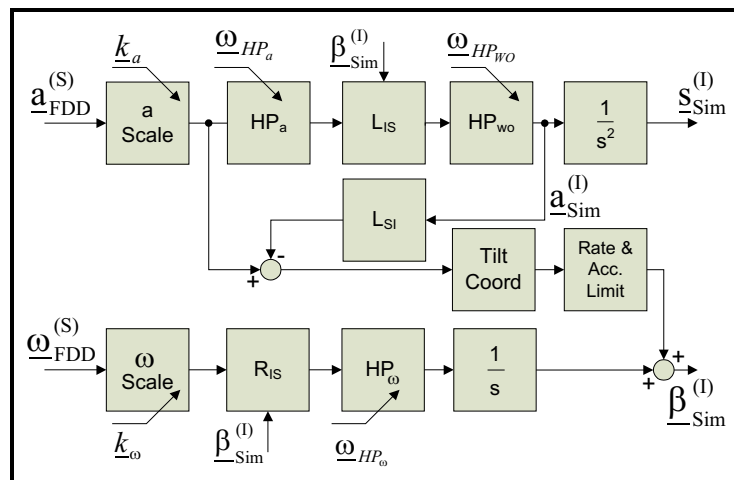


Abbildung 2.3: Wirkungsplandarstellung des FTC

2.4 Die Menschlichen Wahrnehmungsschwellen

Beim Motion-Cueing ist die Menschliche Wahrnehmung eine entscheidende Einflussgröße. Besonders deutlich wird dies bei der Tilt-Coordination. Dabei werden Beschleunigungen durch Kippbewegungen der Simulatorplattform erzeugt. Um trotzdem einen realen Fahreindruck zu vermitteln sollte diese Drehbewegung des Simulators während der Fahrt nicht spürbar sein. Allerdings erweisen sich diese Grenzen als problematisch bei der Darstellung der hochdynamischen Bewegung eines realen Fahrzeugs im Fahrsimulator. Die Menschlichen Wahrnehmungsgrenzen für die translatorischen Beschleunigungen und die Winkelgeschwindigkeiten sind in Tabelle 2.1 für alle 6 Freiheitsgrade dargestellt (vgl. [Ben89a] und [Ben89b]).

Eingangsgrößen	Schwellwert
a_x	0.063 $\frac{m}{s^2}$
a_y	0.057 $\frac{m}{s^2}$
a_z	0.154 $\frac{m}{s^2}$
ω_x	2.04 $\frac{^\circ}{s}$
ω_y	2.07 $\frac{^\circ}{s}$
ω_z	1.20 $\frac{^\circ}{s}$

Tabelle 2.1: Menschliche Wahrnehmungsschwellen [Ben89a], [Ben89b]

2.5 Der Dynamische Fahr Simulator des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

Der dynamische Fahr Simulator des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig (Abbildung 2.4) weist eine Hexapod-Struktur auf. Diese weicht aufgrund der Aufhängung der Simulatorplattform von der klassischen Hexapod-Struktur ab. Bei der klassischen Struktur ist die Simulatorkabine oberhalb der Zylinderenden angeordnet. Beim dynamischen Fahr Simulator des DLR Braunschweig hingegen ist Simulatorkabine unterhalb der Zylinderenden angebracht. Die verwendeten 6 Hydraulikzylinder dienen zur Steuerung der Simulatorplattform. Durch das Ein- und Ausfahren der Hydraulikzylinder können die kommandierten Sollvorgaben mit dem Simulator dargestellt werden. Allerdings sind die Zylinderlängen⁶ jeweils auf die Grenzwerte $l_{min} = 0 \text{ mm}$ und $l_{max} = 2000 \text{ mm}$ beschränkt. Die Darstellungsgrenzen des Simulators für Position und Winkel, sowie rotatorische und translatorische Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sind in 2.2 dargestellt.

	Translation			Rotation		
	x	y	z	x	y	z
Weg/Winkel	$\pm 1.5 \text{ m}$	$\pm 1.4 \text{ m}$	$\pm 1.4 \text{ m}$	$+21^\circ / -20^\circ$	$\pm 21^\circ$	$\pm 21^\circ$
Geschwindigkeit	$\pm 2.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\pm 2.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\pm 1.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\pm 50 \frac{^\circ}{\text{s}}$	$\pm 50 \frac{^\circ}{\text{s}}$	$\pm 50 \frac{^\circ}{\text{s}}$
Beschleunigung	$\pm 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\pm 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\pm 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$\pm 250 \frac{^\circ}{\text{s}^2}$	$\pm 250 \frac{^\circ}{\text{s}^2}$	$\pm 250 \frac{^\circ}{\text{s}^2}$

Tabelle 2.2: Physikalische Grenzen des DLR-Fahr Simulators



Abbildung 2.4: Dynamischer Fahr Simulator des DLR Braunschweig

⁶Beschreibt die Länge l um die ein Hydraulikzylinder ausgefahren ist ($0 \text{ mm} \leq l \leq 2000 \text{ mm}$)

Kapitel 3

Entwurf eines zeitvarianten Motion-Cueing-Algorithmus

3.1 Einführung

Im realen Straßenverkehr treten verschiedene Fahrsituationen auf, die durch unterschiedlich starke Ausprägung einzelner Frequenzanteile in den Bewegungsgrößen charakterisiert sind. Diese sich ändernden fahrsituationsabhängigen Frequenzanteile haben Einfluß auf die Abbildung der Fahrzeugbewegung im Simulator.

Der zur Umrechnung der realen Fahrzeugdaten in Steuergrößen des Simulators verantwortliche MCA arbeitet momentan mit einem festen Parametersatz für Skalierungsfaktoren und Eckfrequenzen der Filter.

Durch den Entwurf eines zeitvarianten MCA, dessen Parametersätze situationsabhängig umschaltbar sind, soll eine Verbesserung der Simulatorperformance durch der jeweiligen Fahrsituation angepasste Parameter erfolgen. Der Aufbau dieser zeitvarianten Steuerung ist in 3.1 dargestellt. Es soll mittels eines Indikators möglich sein, zwischen einem statischen Parametersatz und einem dynamischen Parameterauswahlverfahren zu wählen. Die Erläuterung dieser Verfahren soll in Abschnitt 3.3 erfolgen.

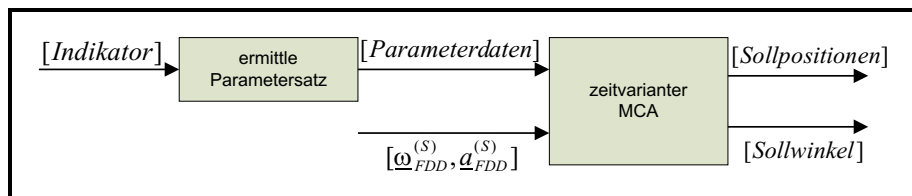


Abbildung 3.1: Aufbau der zeitvarianten Steuerung

3.2 Aufbau und Realisierung der Parameterumschaltung des zeitvarianten Algorithmus

3.2.1 Aufbau und Funktionsweise des zeitvarianten Algorithmus

Als Ausgangsalgorithmus für den zeitvarianten MCA wird der FTC verwendet (vgl. Abbildung 2.3). Der Aufbau des zeitvarianten Algorithmus ist in Abbildung 3.2 als Wirkungsplan dargestellt. Die variablen Parameter sind die Skalierungsfaktoren, sowie die Eckfrequenzen der Hochpassfilter. Sie werden durch die roten Blöcke in Abbildung 3.2 repräsentiert. Die Funktionsweise des modifizierten Algorithmus unterscheidet sich bis auf die Zeitvarianz der Parameter und dem zusätzlich eingeführten Skalierungsfaktor $\underline{k}_{a,tilt}$ nicht von der des FTC. Der zusätzliche Skalierungsfaktor $\underline{k}_{a,tilt}$ ist ein Vektor der Dimension 3×1 , wobei für die z-Komponente des Vektors immer $k_{a_z,tilt} = 0$ gilt. Der Vektor ermöglicht es die einzelnen Komponenten des mittleren Tilt-Pfades an- und abzuschalten. Deshalb können die Elemente $k_{a_x,tilt}$ und $k_{a_y,tilt}$ des Vektors nur die Werte null oder eins annehmen.

Zur Realisierung der zeitvarianten linearen Übertragungsfunktionen wurde die von Matlab/Simulink bereitgestellte C-Mex Funktion „stvctf.c“ verwendet. Auf die Steuerung und die Umschalteffekte dieser zeitvarianten Funktion soll im nächsten Abschnitt näher eingegangen werden.

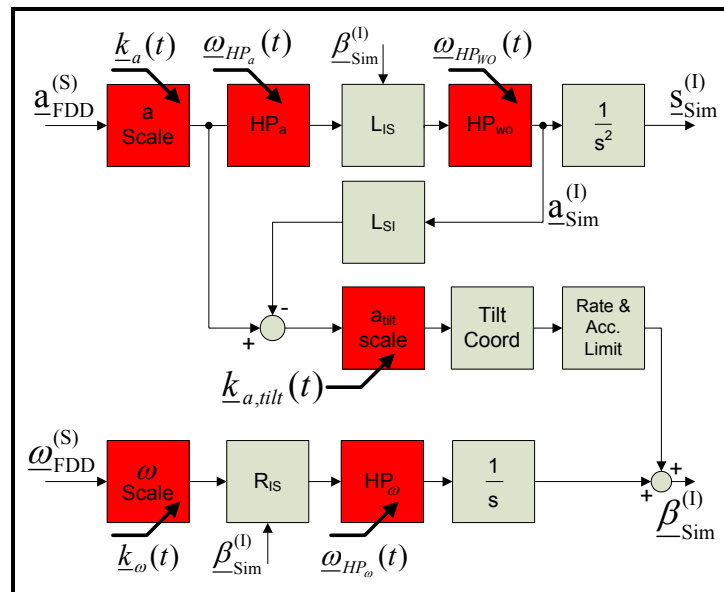


Abbildung 3.2: Wirkungsplan des zeitvarianten MCA

3.2.2 Untersuchung linearer zeitvarianter Übertragungsfunktionen

Betrachtung allgemeiner, linearer, zeitvarianter Systeme

Der zeitvariante Motion-Cueing-Algorithmus beinhaltet lineare Übertragungsfunktionen, deren Koeffizienten zeitvariant sind. Um den Einfluss dieser zeitveränderlichen Koeffizienten auf das Ausgangssignal $y(t)$ des Übertragungssystems besser verstehen zu können, wird ein zeitvariantes, lineares, properes Übertragungssystem n -ter Ordnung näher untersucht. Die Übertragungsfunktion $G(s)$ dieses Systems ist in Gleichung 3.1 für den Fall zeitinvarianter Koeffizienten dargestellt:

$$G(s) = \frac{b_0 + b_1s + \dots + b_ns^n}{a_0 + a_1s + \dots + a_ns^n} = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (3.1)$$

Mit den Transformationsvorschriften für die Laplace-Rücktransformation bei verschwindenden Anfangsbedingungen $\left(\frac{d^{n-1}y}{dt^{n-1}}(0) = \frac{d^{n-1}u}{dt^{n-1}}(0) = 0, \dots, \frac{dy}{dt}(0) = \frac{du}{dt}(0) = 0, y(0) = u(0) = 0\right)$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^{-1}\{s^n Y(s)\} &= \frac{d^n y}{dt^n} \\ \mathcal{L}^{-1}\{s^n U(s)\} &= \frac{d^n u}{dt^n} \end{aligned}$$

wird die Übertragungsfunktion aus Gleichung 3.1 in die Darstellung der allgemeinen Differentialgleichung überführt. Die daraus resultierende allgemeine Differentialgleichung ist für den Fall zeitinvarianter Koeffizienten in Gleichung 3.2 dargestellt. Dabei repräsentiert $u(t)$ das Eingangssignal und $y(t)$ das Ausgangssignal des Übertragungsgliedes.

$$a_n \cdot \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1 \cdot \frac{dy}{dt} + a_0 \cdot y(t) = b_n \cdot \frac{d^n u}{dt^n} + \dots + b_1 \cdot \frac{du}{dt} + b_0 \cdot u(t) \quad (3.2)$$

Im Folgenden wird die Darstellung der allgemeinen Differentialgleichung für den Fall zeitvarianter Koeffizienten aus der Gleichung 3.2 abgeleitet. Die resultierende allgemeine Differentialgleichung zeitvarianter Koeffizienten ist in Gleichung 3.3 dargestellt.

$$a_n(t) \cdot \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1(t) \cdot \frac{dy}{dt} + a_0(t) \cdot y(t) = b_n(t) \cdot \frac{d^n u}{dt^n} + \dots + b_1(t) \cdot \frac{du}{dt} + b_0(t) \cdot u(t) \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \text{mit} \quad u(t), y(t) &\in \mathbb{R}; t \geq 0 \\ a_n(t), \dots, a_1(t), a_0(t) &\in \mathbb{R}; t \geq 0 \\ b_n(t), \dots, b_1(t), b_0(t) &\in \mathbb{R}; t \geq 0 \end{aligned}$$

Im Folgenden soll die Bestimmung der Regelungsnormalform der Zustandsgleichungen für zeitvariante Übertragungssysteme aus der allgemeinen Differentialgleichung 3.3 erfolgen. Ausgangspunkt dafür ist die zeitvariante Darstellung des Zustandsraummodells (Gleichung 3.4).

$$\begin{aligned}\dot{\underline{x}}(t) &= \mathbf{A}(t)\underline{x}(t) + \mathbf{B}(t)u(t) \\ y(t) &= \mathbf{C}(t)\underline{x}(t) + \mathbf{D}(t)u(t)\end{aligned}\quad (3.4)$$

Die aus der Differentialgleichung 3.3 resultierende zeitvariante Regelungsnormalform der Zustandsgleichungen ist in den Gleichungen 3.5 und 3.6 dargestellt.

$$\underline{x}(t) = \left[x, \frac{dx}{dt}, \dots, \frac{d^{n-1}x}{dt^{n-1}} \right]^T$$

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & 1 \\ -\frac{a_0(t)}{a_n(t)} & -\frac{a_1(t)}{a_n(t)} & \dots & \dots & -\frac{a_{n-1}(t)}{a_n(t)} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}(t)} \underline{x}(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ \frac{1}{a_n(t)} \end{bmatrix}}_{\mathbf{B}(t)} u(t)\quad (3.5)$$

$$y(t) = \underbrace{\left[b_0(t) - a_0(t)\frac{b_n(t)}{a_n(t)}, \dots, b_{n-1}(t) - a_{n-1}(t)\frac{b_n(t)}{a_n(t)} \right]}_{\mathbf{C}(t)} \underline{x}(t) + \underbrace{\left[\frac{b_n(t)}{a_n(t)} \right]}_{\mathbf{D}(t)} u(t)\quad (3.6)$$

Aus den Matrizen $\mathbf{C}(t)$ und $\mathbf{D}(t)$ der Gleichung 3.6 kann der Einfluss der zeitvarianten Koeffizienten auf das Ausgangssignal entnommen werden. Das Verhalten des Ausgangssignals $y(t)$ bei sprungförmiger Änderung einzelner zeitvarianter Koeffizienten wird in Abhängigkeit von $b_n(t)$ unter der Bedingung $a_n(t) \neq 0$ in Tabelle 3.1 präsentiert. Für die weiteren Untersuchungen wird nur noch der Fall $b_n(t) \neq 0$ betrachtet, da im zeitvarianten FTC ausschließlich Hochpassfilter verwendet werden.

$b_n(t)$	Verhalten des Ausgangssignals $y(t)$
Tiefpassfilter $b_n(t) = 0$	Wird einer der Koeffizienten $a_m(t)$ mit $(0 \leq m \leq n)$ sprunghörmig umgeschaltet kommt es im Ausgangssignal $y(t)$ zu keiner sprunghörmigen Änderung. Ändert sich allerdings einer der Koeffizienten $b_k(t)$ mit $(0 \leq k < n)$ sprunghörmig so erfolgt ein Ausgangssignalsprung.
Hochpassfilter $b_n(t) \neq 0$	In diesem Fall führt sowohl eine sprunghörmige Änderung eines Koeffizienten von $b_k(t)$ mit $(0 \leq k \leq n)$ als auch eine Änderung von $a_m(t)$ mit $(0 \leq m \leq n)$ zu einem Ausgangssignalsprung.

Tabelle 3.1: Auswirkungen der zeitvarianten Koeffizienten auf das Ausgangssignal $y(t)$

Untersuchung der zeitvarianten Übertragungsfunktionen für den Einsatz im Motion-Cueing-Algorithmus

Die im zeitvarianten FTC verwendeten zeitvarianten Übertragungsglieder sind grundsätzlich Hochpassfilter erster Ordnung. Der vorkommende Hochpassfilter zweiter Ordnung im Motion-Cueing-Algorithmus ergibt sich aus der Reihenschaltung zweier Übertragungsfunktionen erster Ordnung. Aufgrund dieser Festlegungen wurde die im letzten Abschnitt hergeleitete allgemeine, zeitvariante Zustandsraumdarstellung für die im MCA verwendeten Übertragungsglieder erster Ordnung spezifiziert. Die für die Ordnung $n = 1$ vorkommenden zeitvarianten Koeffizienten sind in den Gleichungen 3.7 definiert.

$$\begin{aligned}
 b_0(t) &= 0 & \forall t \geq 0 \\
 b_1(t) &= 1 & \forall t \geq 0 \\
 a_0(t) &> 0 & \forall t \geq 0 \\
 a_1(t) &= 1 & \forall t \geq 0
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Die aus den Definitionen 3.7 resultierende spezifische zeitvariante Regelungsnormform der Zustandsgleichungen ist in den Gleichungen 3.8 und 3.9 dargestellt. Die Matrizen der in diesen Gleichungen dargestellten Zustands- und Ausgangsgleichung, wobei nur noch die Matrizen $A(t)$ und $C(t)$ zeitvariant sind, ergeben sich zu Skalaren.

$$\dot{x}(t) = \underbrace{-a_0(t)}_{A(t)} x(t) + \underbrace{1}_B u(t) \tag{3.8}$$

$$y(t) = \underbrace{-a_0(t)}_{C(t)} x(t) + \underbrace{1}_D u(t) \tag{3.9}$$

Aus den Gleichungen der Zustandsraumdarstellung ist ersichtlich, dass für den Fall einer sprungförmigen Änderung des Koeffizienten $a_0(t)$ zum Zeitpunkt t_{switch} für $x(t_{switch}) \neq 0$ ein Sprung und somit eine für die Anwendung nicht wünschenswerte Unstetigkeit im Ausgangssignal $y(t)$ entsteht. Die Sprunghöhe ist abhängig vom aktuellen Zustand und von der Differenz des Koeffizienten $a_0(t_{switch}^-)$ vor der Umschaltung und $a_0(t_{switch}^+)$ nach der Umschaltung. Der Parameter $a_0(t)$ wird in Anlehnung an den Fall zeitinvarianter Koeffizienten als Filtereckfrequenz des jeweiligen Hochpassfilters bezeichnet. Im folgenden Abschnitt sollen die Ergebnisse experimentell untersucht werden.

Experimentelle Untersuchung des Umschaltverhaltens

Im nun folgenden Abschnitt soll das Umschaltverhalten dieser linearen, zeitvarianten Hochpassfilter experimentell untersucht werden. Dazu wird zur Umsetzung der zeitvarianten Übertragungsglieder die in Matlab/Simulink zur Verfügung stehende C-Mex Funktion „stvcf.c“ verwendet. Es soll gezeigt werden, dass wie im vorigen Kapitel bereits hergeleitet bei sprungförmiger Umschaltung des zeitvarianten Koeffizienten $a_0(t)$ Unstetigkeiten im Ausgangssignal $y(t)$ entstehen die vermieden werden sollen. In Abbildung 3.3 sind zwei Diagramme dargestellt, aus denen das Verhalten des zeitvarianten linearen Übertragungsgliedes bei einem Umschaltvorgang ersichtlich wird. Als Filtereingangssignal wurde ein Beschleunigungssprung der Höhe $1 \frac{m}{s^2}$ gewählt. Zum Zeitpunkt t_{switch} erfolgte das sprungförmige Umschalten des Koeffizienten $a_0(t)$. Die zum Test verwendete lineare Übertragungsfunktion ist ein Hochpassfilter 1.Ordnung.

$$H_{HP}(s) = \frac{s}{s + a_0}$$

Die verwendeten Werte von $a_0(t)$ vor und nach dem Schalten sind ebenfalls angegeben.

$$a_0(t) = \begin{cases} 2.5 & \text{für } 0 \leq t < t_{switch} \\ 0.75 & \text{für } t \geq t_{switch} \end{cases} \quad (3.10)$$

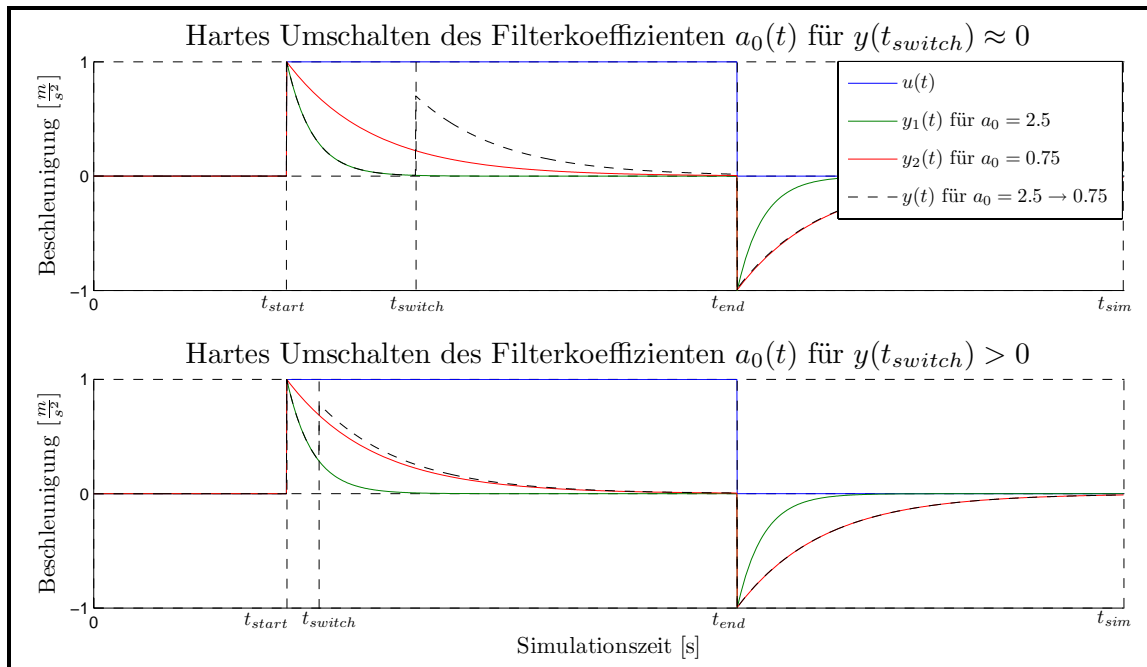


Abbildung 3.3: Darstellung eines Umschaltvorgangs der Filtereckfrequenz für einen Hochpassfilter 1.Ordnung

In den oberen Diagrammen 3.3 wird der bereits beschriebene Sachverhalt eines unstetigen Signalverlaufes bei sprunghöförmiger Änderung von $a_0(t)$ bestätigt. Wie man erkennen kann ist der Sprung im Ausgangssignal $y(t)$ im Oberen der beiden Diagramme betragsmäßig größer als im Unteren. Das zeigt, dass die Sprunghöhe im Ausgangssignal $y(t)$ zum Umschaltzeitpunkt t_{switch} für $x(t) > 0$ abhängig vom aktuellen Ausgangssignal und der Differenz der Koeffizienten vor dem Umschalten und nach dem Umschalten ist. Dieser Sachverhalt wird nun näher untersucht. Als Ausgangspunkt fungiert die Ausgangsgleichung der Zustandsraumdarstellung aus Gleichung 3.9.

$$y(t) = -a_0(t)x(t) + u(t)$$

Unter der Bedingung, dass der Zustand $x(t)$ unmittelbar vor und nach dem Umschaltvorgang gleich ist $x(t_{switch}^-) = x(t_{switch}^+) = x(t)$ kann man folgendes Gleichungssystem aufstellen, wobei $y_1 = y(t_{switch}^-)$, $y_2 = y(t_{switch}^+)$ und $u = u(t_{switch})$ gilt.

$$\begin{aligned} I. \quad y_1 &= -a_0(t_{switch}^-)x(t) + u \\ II. \quad y_2 &= -a_0(t_{switch}^+)x(t) + u \end{aligned}$$

Stellt man nun Gleichung *II.* nach $x(t)$ um und setzt den resultierenden Ausdruck in Gleichung *I.* ein, so erhält man eine Gleichung die die Bestimmung des Ausgangssignals y_2 unmittelbar nach dem Umschaltvorgang ermöglicht.

$$y_2 = \frac{y_1 a_0(t_{switch}^+) - u \cdot [a_0(t_{switch}^+) - a_0(t_{switch}^-)]}{a_0(t_{switch}^-)}$$

Die Bestimmung der Sprunghöhe des durch den Umschaltvorgang von $a_0(t)$ verursachten Ausgangssignalsprungs h mit $h = y_2 - y_1$ ist in Abhängigkeit der Parameter $a_0(t_{switch}^+)$, $a_0(t_{switch}^-)$, y_1 und u möglich.

$$h = \frac{[y_1 - u] \cdot [a_0(t_{switch}^+) - a_0(t_{switch}^-)]}{a_0(t_{switch}^-)} \quad (3.11)$$

Aus der hergeleiteten Gleichung 3.11 zur Bestimmung der Sprunghöhe h kann geschlussfolgert werden, dass je größer die Differenz zwischen den Koeffizienten $a_0(t)$ vor dem Umschalten und nach dem Umschalten ist umso größer ist der Ausgangssignalsprung. Ausserdem gilt, je kleiner die Differenz der Signale am Eingang des Übertragungssystems u und am Ausgang des Übertragungssystems y_1 zum Umschaltzeitpunkt ist umso geringer ist die Höhe h des Ausgangssignalsprungs. Um die Sprunghöhe h im Ausgangssignal bei Parameterumschaltung zu minimieren und um die Unstetigkeiten im Signalverlauf $y(t)$ zu beseitigen werden in den folgenden Abschnitten zwei Lösungsansätze präsentiert.

Einführung einer Überföhrungsfunktion zur Parameterumschaltung

Die im vorigen Abschnitt beim Umschalten der Filterkoeffizienten aufgezeigten Unstetigkeitsstellen im Filterausgangssignal sollen mittels einer stetigen Überföhrungsfunktion beseitigt werden. Das Ziel besteht darin den Parameterwechsel mit möglichst geringem Überschwüngen und ohne Sprungstellen am Ausgang des linearen zeitvarianten Hochpassfilters 1.Ordnung durchzuführen. Die an die Überföhrungsfunktion gestellten Anforderungen sind Stetigkeit, variable Umschaltzeiten und keine Phasenverschiebungen des Ausgangssignals, sowie ein möglichst geringes Überschwüngen des Filterausgangssignals $y(t)$. Um diese Anforderungen erfüllen zu können wurde als Ausgangsfunktion die in Gleichung 3.12 dargestellte, frei parametrierbare Cosinusfunktion gewählt.

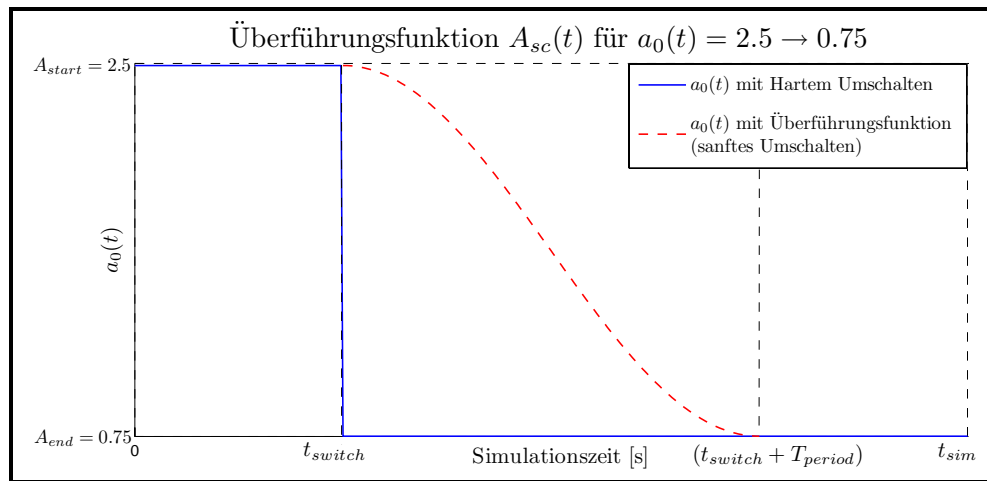
$$A_{sc}(t) = \left(\frac{A_{start} - A_{end}}{2} \right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi t}{2 \cdot T_{period}} \right) + \left(\frac{A_{start} + A_{end}}{2} \right) \quad (3.12)$$

$$\forall t \in [0, T_{period}]$$

Die darin verwendeten Parameter werden in Tabelle 3.2 definiert. In Abbildung 3.4 ist die Überföhrungsfunktion exemplarisch für den Umschaltvorgang von $a_0(t)$ von 2.5 auf 0.75 dem im vorigen Abschnitt präsentierten harten Umschalten gegenübergestellt.

Eingangsvariablen	Erläuterung
A_{start}	aktueller Parameterwert, entspricht $a_0(t)$ für $0 \leq t < t_{switch}$
A_{end}	gewünschter Parameterwert auf den umgeschaltet werden soll, entspricht $a_0(t)$ für $t \geq (t_{switch} + T_{period})$
T_{period}	Dauer der Parameterumschaltung
t_{switch}	Beginn des Umschaltvorgangs
Ausgangsfunktion	
$A_{sc}(t)$	zeitabhängiger Skalierungsfaktor der Überföhrungsfunktion, entspricht $a_0(t)$ für $t_{switch} \leq t \leq (t_{switch} + T_{period})$

Tabelle 3.2: Variablendefinition für die Überföhrungsfunktion $A_{sc}(t)$

Abbildung 3.4: Überföhrungsfunktion $A_{sc}(t)$ für $a_0(t) = 2.5 \rightarrow 0.75$

Nach der Einführung der in Gleichung 3.12 beschriebenen Überföhrungsfunktion, soll im folgenden Abschnitt die Anwendung dieser Funktion auf den Umschaltvorgang des Filterkoeffizienten $a_0(t)$ untersucht werden.

Umschalten des Filterkoeffizienten $a_0(t)$ mit einer Überföhrungsfunktion

Die im vorigen Abschnitt aufgestellte Überföhrungsfunktion soll nun auf das Umschalten des Filterkoeffizienten $a_0(t)$ angewendet werden. Zur Durchführung des Testversuches, mit den in Abbildung 3.5 dargestellten Ergebnissen, wurden als Filterkoeffizienten die in den Gleichungen 3.10 eingeföhrten Größen verwendet.

Im Diagramm ist das Filterausgangssignal für die Parameterumschaltzeiten $T_{period} \in \{1s, 3s, 5s\}$ dargestellt. Als Eingangssignal $u(t)$ fungiert wieder der bereits verwendete Beschleunigungssprung mit der Sprunghöhe $1 \frac{m}{s^2}$.

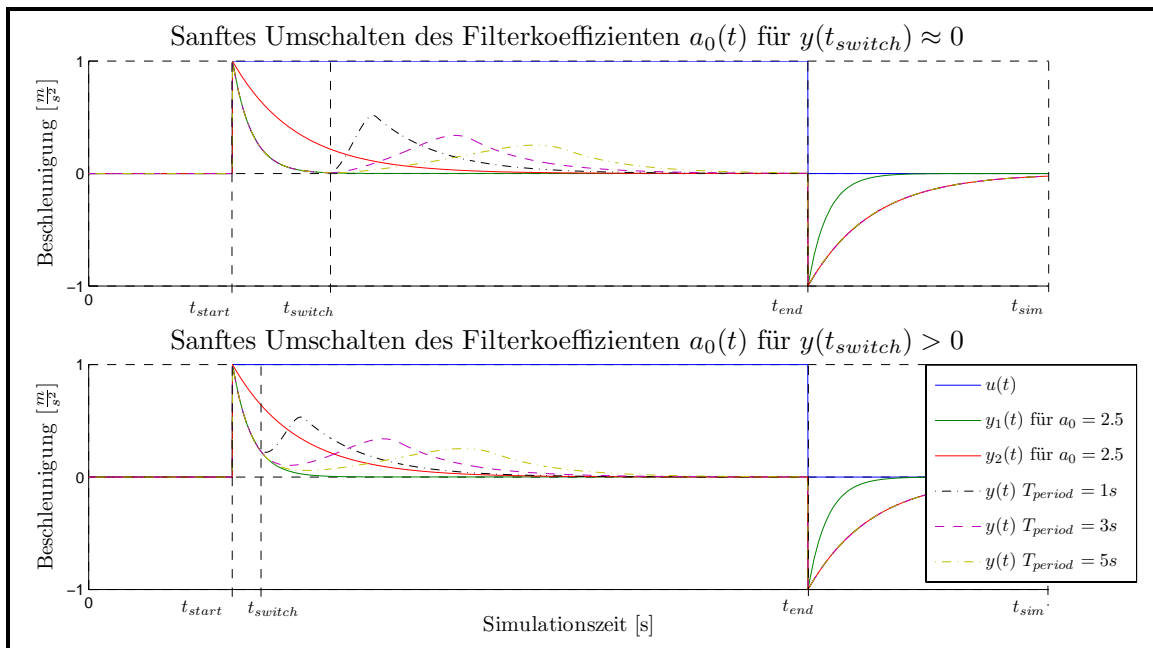


Abbildung 3.5: Umschaltvorgang des Filterkoeffizienten $a_0(t)$ mit Überföhrungsfunktion

Wie in den Diagrammen in Abbildung 3.5 gut zu sehen ist, kann die in Abbildung 3.3 dargestellte Systemantwort auf eine sprunghafte Änderung von $a_0(t)$ mit der im vorigen Abschnitt präsentierten stetigen Überföhrungsfunktion minimiert werden. Je größer dabei die Zeitspanne des Umschaltvorgangs T_{period} gewählt wird, umso geringer ist die Amplitude des auftretenden Signalartefakts im Filterausgangssignal $y(t)$. Aufgrund dieser Daten folgt, dass für den Umschaltvorgang der Filterkoeffizienten möglichst große Umschaltperioden T_{period} gewählt werden sollten.

3.2.3 Umschalten des Filterkoeffizienten $a_0(t)$ mittels Anpassung des Zustandes $x(t)$ für Hochpassfilter 1.Ordnung

Nach der Einführung einer Überföhrungsfunktion $A_{sc}(t)$ wird nun eine weitere M6glichkeit f6r das Umschalten des Filterkoeffizienten $a_0(t)$ vorgestellt. Der Ansatz f6r die Parameterumschaltung beruht darauf, anstelle eines Ausgangssignalsprungs einen Zustandssprung zu verursachen. Der Ausgangspunkt dieser Variante ist die in der Gleichung 3.9 dargestellte Ausgangsgleichung der zeitvarianten Regelungsnormform f6r Hochpassfilter 1.Ordnung. Das Grundprinzip dieser Methode ist in Abbildung 3.6 grafisch verdeutlicht.

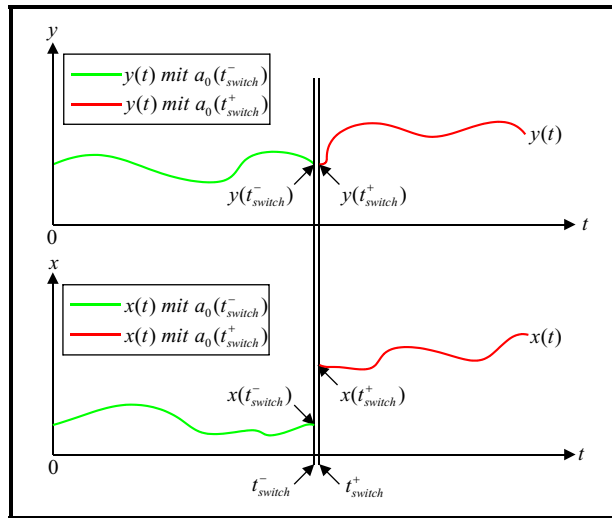


Abbildung 3.6: Grundprinzip des Umschaltens des Filterkoeffizienten mit Zustandsanpassung

Mit den in den Gleichungen 3.13 getroffenen Festlegungen $y(t_{switch}^-) = y(t_{switch}^+) = y(t_{switch})$ und $u(t_{switch}^-) = u(t_{switch}^+) = u(t_{switch})$ gilt, dass das Ausgangssignal $y(t_{switch})$ und das Eingangssignal $u(t_{switch})$ w6hrend des Umschaltvorganges konstant sind.

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow t_{switch}^-} y(t) &= \lim_{t \rightarrow t_{switch}^+} y(t) = y(t_{switch}) \\ \lim_{t \rightarrow t_{switch}^-} u(t) &= \lim_{t \rightarrow t_{switch}^+} u(t) = u(t_{switch}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Erfolgt nun eine sprungf6rmige 6nderung des Filterkoeffizienten $a_0(t)$ zum Zeitpunkt t_{switch} , dann wird das Ausgangssignal $y(t_{switch})$ aus $x(t_{switch}^-)$, $u(t_{switch})$ und $a_0(t_{switch}^-)$ nach der aus Gleichung 3.9 resultierenden Gleichung 3.14 berechnet.

$$\begin{aligned} y(t_{switch}^-) &= -a_0(t_{switch}^-)x(t_{switch}^-) + u(t_{switch}^-) \\ y(t_{switch}^+) &= -a_0(t_{switch}^+)x(t_{switch}^+) + u(t_{switch}^+) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Zusammen mit der Gleichung 3.13 lässt sich, wie in Gleichung 3.15 dargestellt, der Zustand im selben Zeitschritt derart anpassen, dass ein Sprung im Filterausgangssignal $y(t_{switch})$ vermieden wird.

$$x(t_{switch}^+) = -\frac{y(t_{switch}) - u(t_{switch})}{a_0(t_{switch}^+)} \quad (3.15)$$

Nachdem die Funktionsweise der Parameterumschaltung mittels Zustandsanpassung erläutert wurde soll deren Verhalten bei einem Umschaltvorgang simulativ untersucht werden. Im Diagramm in Abbildung 3.7 sind zwei Umschaltvorgänge dargestellt. Die Werte des Filterkoeffizienten $a_0(t)$ sind die in 3.10 definierten Größen. Als Eingangssignal fungiert wiederum ein Beschleunigungssprung der Höhe $1 \frac{m}{s^2}$.

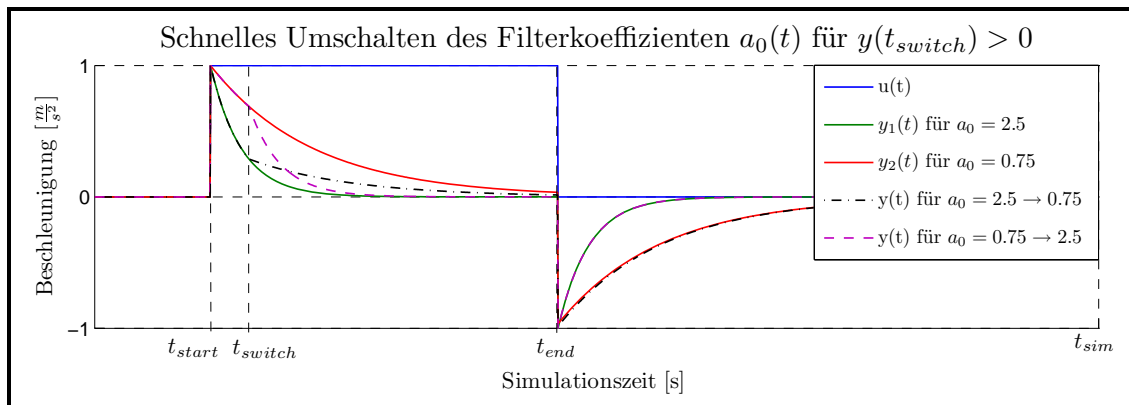


Abbildung 3.7: Umschaltung des Filterkoeffizienten $a_0(t)$ mit Zustandsanpassung

In der Abbildung 3.7 ist gut zu erkennen, dass es zum Umschaltzeitpunkt t_{switch} keinen Sprung im Ausgangssignal $y(t)$ mehr gibt. Allerdings entsteht ein Artefakt im Signalverlauf. Der Vorteil dieser Methode ist, dass der Filterkoeffizient $a_0(t)$ innerhalb eines Simulationszeitschrittes umgeschaltet werden kann. Für den Fall $y(t_{switch}) = 0$ treten dabei keinerlei Artefakte im Ausgangssignal $y(t)$ auf. Betrachtet man den Fall $y(t_{switch}) > 0$ (Vgl. Abbildung 3.7) so kann man zum Umschaltzeitpunkt ein Artefakt im Signalverlauf $y(t)$ erkennen. Der Einfluss dieses Effekts auf das Umschaltverhalten des zeitvarianten FTC wird im nächsten Abschnitt aufgezeigt.

3.2.4 Test der Parameterumschaltung am zeitvarianten Algorithmus

Im Folgenden wird die Funktionsweise des zeitvarianten Motion-Cueing-Algorithmus bei Parametersatzumschaltung nach den in den vorigen Abschnitten vorgestellten Methoden durchgeführt. Dazu wurden die in Anhang A.1 beschriebenen Parametersätze verwendet. Wird zwischen diesen Parametersätzen umgeschaltet erfolgt ausschließlich eine Änderung der Parametergrößen, die einen Einfluss auf die Darstellung der lateralen Bewegungskomponenten a_y , ω_x und ω_z im Simulator haben. Zur Untersuchung der Parametersatzumschaltung wurde das MCA-Eingangssignal $a_{y,FDD}(t) = \sin(2\pi t)$ ausgewählt. Die anderen Eingänge wurden auf Null gesetzt. In der Abbildung 3.8 sind die Ergebnisse einer Parametersatzumschaltung von Parametersatz „Landstraße“ auf Parametersatz „Stadt“ für unterschiedliche Umschaltperioden T_{period} dargestellt. Darin sind ausschließlich die Bewegungsgrößen $a_{y,Sim}$ und $\omega_{x,Sim}$ aufgetragen. Wobei $a_{y,Sim}$ in diesem Fall die Gesamtbeschleunigung in lateraler Richtung repräsentiert. Diese setzt sich aus der Summe des hochfrequenten und über die translatorische Simulatorbewegung dargestellten Beschleunigungsanteil in lateraler Richtung und dem durch den Kippwinkel $\Phi_{Sim}^{(I)}$ präsentierten lateralen Beschleunigungsanteil zusammen. Die Umrechnung des Kippwinkels in eine Beschleunigung erfolgt nach Gleichung 3.16.

$$a_{y,tilt} = g \cdot \tan(\Phi_{Sim}^{(I)}) \quad (3.16)$$

Durch die Koordinatentransformation vom fahrzeugfesten ins inertielle Koordinatensystem ergibt sich bei Verwendung des FTC und einer Änderung der lateralen Beschleunigungskomponente $a_{y,Sim}$ am Ausgang des MCA auch eine Änderung in den Bewegungsgrößen $a_{x,Sim}$, $a_{z,Sim}$, $\omega_{y,Sim}$ und $\omega_{z,Sim}$ im MCA-Ausgangssignal. Diese sind allerdings so klein, dass sie weit unterhalb der in Tabelle 2.1 vorgestellten menschlichen Wahrnehmungsschwellen liegen und deshalb vernachlässigt werden. Die Umschaltung der Filterkoeffizienten der Hochpassfilter 1.Ordnung des Algorithmus erfolgt nach den beiden vorgestellten Methoden mit Nutzung einer Überföhrungsfunktion und mit der Methode der Zustandsanpassung. Da sich zusätzlich zu den Filterkoeffizienten auch die Skalierungsfaktoren ändern müssen auch diese so umgeschaltet werden, dass keine Sprünge in den Ausgangssignalen des MCA entstehen. Dazu werden die Skalierungsfaktoren bei beiden Methoden mit der eingeföhrten Überföhrungsfunktion $A_{sc}(t)$ umgeschaltet.

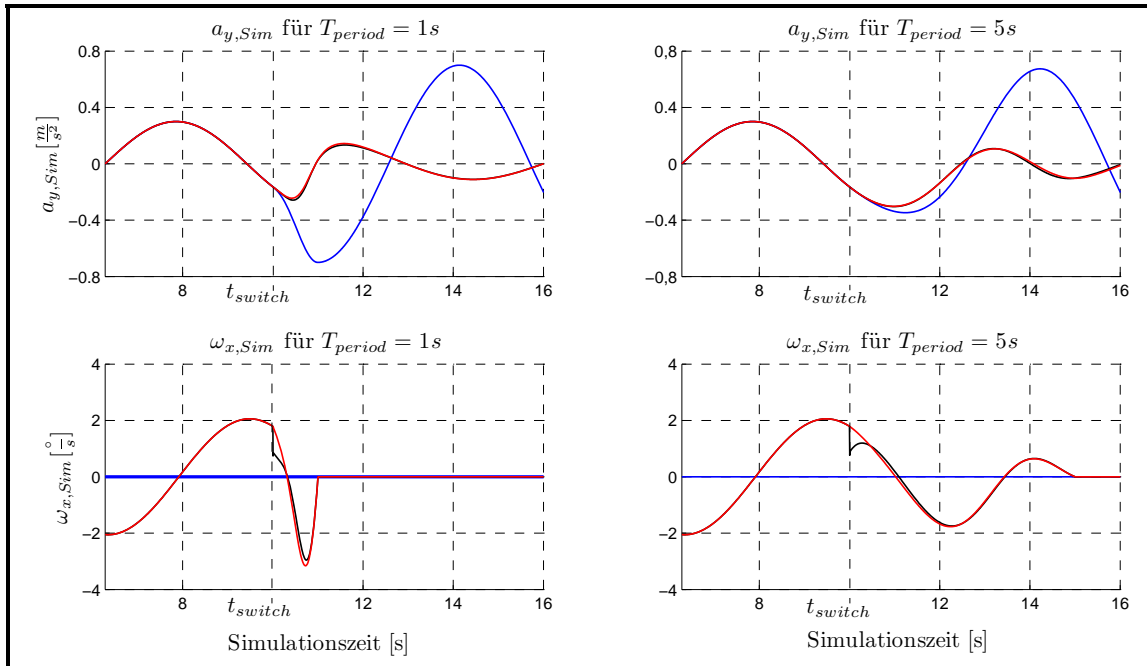


Abbildung 3.8: $a_{y,Sim}$ und $\omega_{x,Sim}$ bei MCA-Parametersatzumschaltung „Landstraße“ \rightarrow „Stadt“;
 blau: skaliertes MCA-Eingangssignal; rot: MCA-Ausgangssignal mit Überföhrungsfunktion; schwarz: MCA-Ausgangssignal mit Zustandsanpassung

Aus den Diagrammen geht hervor, dass die beiden getesteten Methoden beim Umschalten der MCA-Parametersätze im Signalverlauf von $a_{y,Sim}$ nahezu identisch sind. Der Unterschied zwischen beiden Methoden liegt hier im Verhalten von $\omega_{x,Sim}$ während des Umschaltens. Dort ist zu erkennen, dass für die Methode mit Überföhrungsfunktion ein stetiger Signalverlauf auftritt. Für die Methode der Zustandsanpassung tritt zum Umschaltzeitpunkt ein Sprung in $\omega_{x,Sim}$ auf der für die Anwendung nicht wönschenswert ist. Dieser lässt sich auf das im vorigen Abschnitt bereits erwähnte und in Abbildung 3.7 dargestellte Artefakt im Filterausgangssignal $y(t)$ zum Umschaltzeitpunkt t_{switch} zurückföhren. Dieses Artefakt föhrt dazu, dass das Filterausgangssignal $y(t)$ nicht differenzierbar ist. Der Sprung in der Winkelgeschwindigkeit $\omega_{x,Sim}$ ist auf die Funktionsweise des zum Entwurf des zeitvarianten MCA zu verwendenden FTC-Algorithmus zurückzuföhren. Die Bestimmung der niederfrequenten und somit über die Tilt-Coordination darzustellenden Beschleunigungssignale bestimmen sich im FTC als Differenz des Gesamtbeschleunigungssignals und der hochfrequenten, über die translatorische Simulatorbewegung darzustellenden Beschleunigungsanteile (vgl. Abbildung 2.3). Durch diese Differenzbildung wird die Unstetigkeitsstelle zum Umschaltzeitpunkt t_{switch} in das niederfrequente Beschleunigungssignal übertragen und anschließend durch die Umrechnung in Drehwinkel in ein Positionssignal transformiert. Dadurch entstehen bei der Methode der Zustandsanpassung zum Umschaltzeitpunkt t_{switch} Sprünge in den Winkelgeschwindigkeiten $\omega_{x,Sim}$ und $\omega_{y,Sim}$. Diese Sprünge sind spürbar und müssen deshalb vermieden werden. Im

weiteren Signalverlauf von $\omega_{x,Sim}$ unterscheiden sich die beiden Methoden nur unwesentlich. Weiterhin ist zu beobachten, dass die Amplitude von $\omega_{x,Sim}$ während des Umschaltvorgangs mit der Überföhrungsfunktion mit sinkender Umschaltperiode T_{period} zunimmt. Aufgrund der Unstetigkeiten im Ausgangssignal $\omega_{x,Sim}$ bei Parameterumschaltung mit der Methode der Zustandsanpassung, soll im Weiteren der Ansatz mit Überföhrungsfunktion verwendet werden.

3.3 Ermittlung des aktuellen Parametersatzes

3.3.1 Einführung

Nachdem in Abschnitt 3.2 der zeitvariante MCA vorgestellt und dessen Funktionsweise erläutert wurde, soll im Folgenden die Funktion zur Bestimmung des aktuell zu verwenden MCA-Parametersatzes vorgestellt werden. Diese Funktion ist in Abbildung 3.1 im Wirkungssplanschema der zeitvarianten Steuerung dargestellt.

Ziel ist es während der laufenden Simulation durch die Vorgabe des in Tabelle 3.3 definierten Indikators festzulegen, ob der zeitvariante FTC mit einem statischen oder einem dynamischen, der Fahrsituation angepassten, Parametersatz arbeiten soll. Bei der Verwendung eines statischen Parametersatzes kann entweder auf die im Speicher abgelegten Parametersätze zurückgegriffen werden oder es besteht für den Anwender die Möglichkeit einen Parametersatz während der Simulation frei vorzugeben. Wird ein statischer Parametersatz gewählt, so wird dieser solange unverändert verwendet, bis sich der Indikator ändert. Die Verwendung der dynamischen Parametersatzbestimmung erfolgt unter Nutzung der Umgebungsinformationen und der aktuellen Fahrdynamikdaten. Dazu wird anhand dieser Daten die aktuelle Fahrsituation bestimmt und der jeweilige im Speicher abgelegte Parametersatz zugeordnet. Die drei im Speicher hinterlegten Parametersätze sind auf die Anforderungen bei Stadtfahrten (City), Landstraßenfahrten (Rural) und Autobahnfahrten (Highway) abgestimmt. Die Bestimmung der drei Parametersätze erfolgte bereits in früheren Untersuchungen und ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Die jeweiligen Skalierungsfaktoren und Filtereckfrequenzen sind in Anhang A.1 Tabelle A.1 für die drei Fahrsituationen aufgeführt.

Indikator	Parametersatz	Auswahlmodus	Definition der Parametersätze
0	Landstraße (standard)	statisch	a priori
1	Stadt	statisch	a priori
2	Landstraße	statisch	a priori
3	Autobahn	statisch	a priori
4	Stadt, Landstraße, Autobahn	dynamisch	a priori
5	Online-Parameter	statisch	Online-Vorgabe

Tabelle 3.3: Definition der Indikatorwerte und der zugehörigen Parametersätze

3.3.2 Funktionsweise der Parametersatzbestimmung

Nach Einführung des Indikators und der drei fahrsituationspezifischen Parameterdatensätze, soll nun der Aufbau und der Ablauf der Funktion zur Parametersatzbestimmung vorgestellt werden. Zur Erläuterung der Ablaufsteuerung der Implementierung, wurde die Funktion in 5 Teilprozesse dekomponiert und mittels eines steuerungstechnisch interpretierten Petrinetzes in der Abbildung 3.9 dargestellt. Die darin vorkommenden Teilprozesse (Plätze) und die zur Steuerung verwendeten Eingangssignale sind in den Tabellen 3.4 und 3.5 definiert. Ein Zyklus des Petrinetzes von p_0 bis p_0 entspricht einem Simulationszeitschritt.

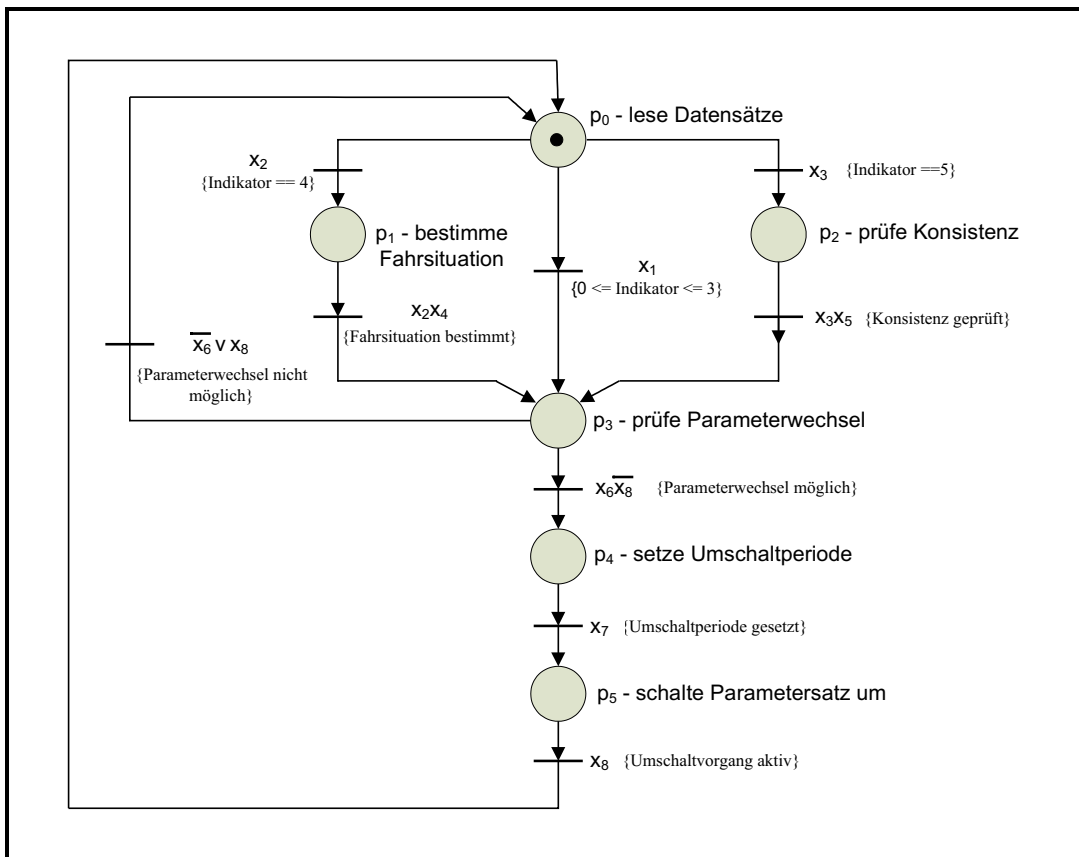


Abbildung 3.9: Aufbau und Ablauf der Funktion zur Parametersatzbestimmung

Prozess	Prozessbeschreibung	Ausgangssignal $y = [y_0, y_1, y_2, y_3, y_4, y_5]^T$
p_0	lese Datensätze	$y = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$
p_1	bestimme Fahrsituation	$y = [0, 1, 0, 0, 0, 0]^T$
p_2	prüfe Konsistenz	$y = [0, 0, 1, 0, 0, 0]^T$
p_3	prüfe Parameterwechsel	$y = [0, 0, 0, 1, 0, 0]^T$
p_4	setze Umschaltperiode	$y = [0, 0, 0, 0, 1, 0]^T$
p_5	schalte Parametersatz um	$y = [0, 0, 0, 0, 0, 1]^T$

Tabelle 3.4: Definition der Teilprozesse der Parametersatzbestimmung

Eingangssignal	Belegung
x_1	$(0 \leq \text{Indikator} \leq 3) \Rightarrow x_1 = 1$ $(3 < \text{Indikator} \leq 5) \Rightarrow x_1 = 0$
x_2	$(\text{Indikator} = 4) \Rightarrow x_2 = 1$ $(\text{Indikator} \neq 4) \Rightarrow x_2 = 0$
x_3	$(\text{Indikator} = 5) \Rightarrow x_3 = 1$ $(\text{Indikator} \neq 5) \Rightarrow x_3 = 0$
x_4	Fahrsituation bestimmt $\Rightarrow x_4 = 1$ sonst $\Rightarrow x_4 = 0$
x_5	Konsistenz geprüft $\Rightarrow x_5 = 1$ sonst $\Rightarrow x_5 = 0$
x_6	Parameterumschaltung möglich $\Rightarrow x_6 = 1$ sonst $\Rightarrow x_6 = 0$
x_7	Umschaltperiode gesetzt $\Rightarrow x_7 = 1$ sonst $\Rightarrow x_7 = 0$
x_8	Umschaltvorgang aktiv $\Rightarrow x_8 = 1$ Umschaltvorgang beendet $\Rightarrow x_8 = 0$

Tabelle 3.5: Definition der Ereignissignale des Petrinetzes

Zur Verdeutlichung der einzelnen Teilprozesse werden deren Aufgaben kurz verbal umschrieben, bevor die exakte Funktionsweise der einzelnen Prozesse in den folgenden Abschnitten ausführlich erläutert wird.

Teilprozesse

lese Datensätze	In jedem Zyklus werden die aktuellen Datensätze (soweit vorhanden) bestehend aus Fahrdynamikdaten, Umgebungsinformationen, Online-Parametervorgaben und Indikator ausgelesen.
bestimme Fahrsituation	Unter Nutzung der Umgebungsinformationen wird die Fahrsituation mittels eines Zustandsautomaten bestimmt.
prüfe Konsistenz	Die vom Nutzer während der Simulation vorgebbaren Parameterdaten werden auf die Einhaltung definierter Intervallgrenzen geprüft.
prüfe Parameterwechsel	Durch die Verwendung der Fahrdynamikdaten und der aktuellen Umgebungsinformationen wird geprüft ob ein Umschaltvorgang so durchgeführt werden kann, dass er vom Probanden möglichst nicht wahrgenommen wird. Weiterhin wird die Umschaltzeit bestimmt.
setze Umschaltperiode	Die Funktion übergibt die Parameterdatensätze des vorigen Zyklus und des aktuellen Zyklus, sowie die Dauer des Umschaltvorgangs an die Umschaltfunktion.
schalte Parameter um	Mit dieser Funktion werden die Parameterdatensätze unter der Verwendung einer Überföhrungsfunktion umgeschaltet.

Erläuterung des Teilprozesses „lese Datensätze“

Zur Bestimmung des MCA-Parametersatzes stehen Informationen zur Verfügung, die Daten bezüglich des Fahrzeugzustandes und der Fahrsituation, sowie des in Kapitel 3.3.1 definierten Indikators und des Online-Parametersatzes beinhalten. Das Datenpaket zur Beschreibung des Fahrzeugzustandes enthält die aktuell im Fahrdynamikmodell berechneten Bewegungsgrößen. Diese sind in der Tabelle A.2 im Anhang A.3 definiert.

Die Fahrsituation kann mittels der DED¹-Daten eindeutig beschrieben werden. Die Software DED liefert dabei Daten, die in der simulativen Fahrstrecke hinterlegt sind. Zur Konstruktion neuer Fahrstrecken wird beim DLR das Programm „StRoadDesign“² verwendet. Mit dieser Software können neue Streckencharakteristika aus einzelnen Segmenten, wie z.B. Kurve, Gerade oder Kreuzung, zusammengefügt werden. Diese Teilstücke sind durch spezifische Variablen, z.B. Kurvenradius oder Segmentlänge, definiert. Aus den in diesen Streckensegmenten gespeicherten Informationen können mit der DED-Software die im Anhang A.3, Tabelle A.3 dargestellten fahrsituationspezifischen Größen ermittelt werden. Der in Tabelle 3.3 eingeführte Indikator und der in Anhang A.2 definierte Online-Parametersatz werden vom Benutzer vorgegeben.

Zum Auslesen der über ein lokales Netzwerk übertragenen Datensätze, wurden in Matlab/Simulink zur Verfügung stehende Funktionen verwendet. Der sich aus den Datenpaketen Fahrzeugzustand, DED, Indikator und Online-Parametersatz ergebende Eingangsvektor \underline{u} hat die Dimension 34×1 . Die Eingangsgrößen werden in den folgenden Abschnitten zur Bestimmung und Umschaltung der Parameter des MCA verwendet.

¹Dominian Environment Detection

²Programm der niederländischen Firma „StSoftware“ zur Konstruktion von simulativen Fahrstrecken

Erläuterung des Teilprozesses „bestimme Fahrsituation“

Die im Folgenden beschriebene Funktion ermöglicht eine fahrsituationsspezifische, dynamische Bestimmung des zu verwendenden MCA-Parametersatzes. Zur Ermittlung der vorliegenden Fahrsituation und somit des MCA-Parametersatzes kommt ein Zustandsautomat zum Einsatz, dessen Entwurf nun erläutert wird. Ziel dieser dynamischen Situationserkennung ist es den für die Fahrsituation benötigten Parametersatz im Moment des Auftretens einer neuen Fahrsituation bereits umgeschaltet zu haben ohne dass der Proband dies wahrnimmt. Dazu muss die Fahrsituation prediktiv unter Nutzung der DED-Daten bestimmt werden, um den Umschaltvorgang bereits vor dem Eintreten der neuen Fahrsituation beginnen und abzuschließen zu können.

Wie aus der in Abbildung 3.9 gezeigten Ablaufsteuerung hervorgeht ist der Block zur Fahrsituationsbestimmung nur aktiv, wenn der Indikator den Wert 4 annimmt. Ist der Wert des Indikators ungleich 4 wird der Zustandsautomat in der Simulation nicht ausgeführt. Dies hat den Vorteil dass beim Verzicht auf die dynamische Parametersatzbestimmung Rechenzeit eingespart werden kann.

Zum Automatenentwurf wurde ein prozessorientierter Top-Down Entwurf durchgeführt (Vgl. [Jan05]). Der in Abbildung 3.10 dargestellte Ausgangspunkt für den Automatenentwurf besteht in der Unterscheidung ob sich das Fahrzeug auf der Straße oder abseits der Straße befindet. Die zur Bestimmung der Fahrsituation verwendeten Variablen, des in Anhang A.3 Tabelle A.3 vorgestellten DED-Datenpakets, dienen als Eingangssignale des DEA³. Als Ausgangssignal fungieren die aktuellen fahrsituationsspezifischen MCA-Parametersätze, deren Kenngrößen im Anhang A.1 Tabelle A.1 definiert sind.

Eingangssignale	Bezeichnung
OnRoad	u_1
MaxVelocity	u_2
LaneType	u_3
Indicator	u_4
LaneIndex	u_5
DisToLaneTypeChange	u_6
LaneTypeAtChange	u_7
DisToMaxVelChange	u_8
MaxVelAtChange	u_9
Ausgangssignal	Bezeichnung
fahrsituationsabhängiger Parametersatz	w

Tabelle 3.6: Definition der Ein- und Ausgangssignale zur dynamischen Fahrsituationsbestimmung

³Deterministischer Endlicher Automat

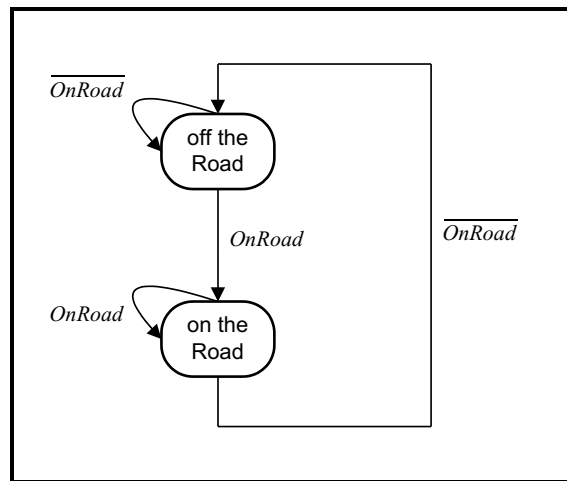


Abbildung 3.10: Ausgangspunkt für den Automatenentwurf

Im nächsten Entwurfsschritt wird der Zustand „on the Road“ in die 4 Zustände „City“, „Rural“, „Highway“ und „Intersection“ dekomponiert. Der daraus resultierende Automat wird in 5 Teilautomaten zerlegt, die im Anschluss einzeln betrachtet werden. In Abbildung 3.12 ist der Automatengraph des aus diesem Dekompositionsschritt entstehenden DEA abgebildet. Wie dort gut zu erkennen ist kommt ein Mealy-Automat zum Einsatz. Unter einem Mealy-Automaten versteht man einen DEA bei dem jedem Automatenzustand eine zustandsspezifische Ausgabe zugeordnet wird, die zusätzlich von den aktuellen Eingängen abhängt (Vgl. [Jan05]). Da der Zustand „off the Road“ kein festes Ausgangssignal aufweist sondern das Ausgangssignal des Vorzustandes übernimmt kommt ein Mealy-Automat zum Einsatz. In Abbildung 3.11 ist die verwendete Symbolik der folgenden Automaten Darstellungen beschrieben.

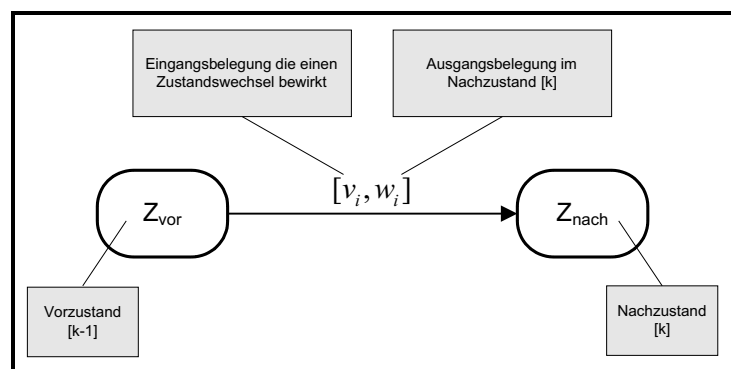


Abbildung 3.11: Symbolik des Zustandsautomaten

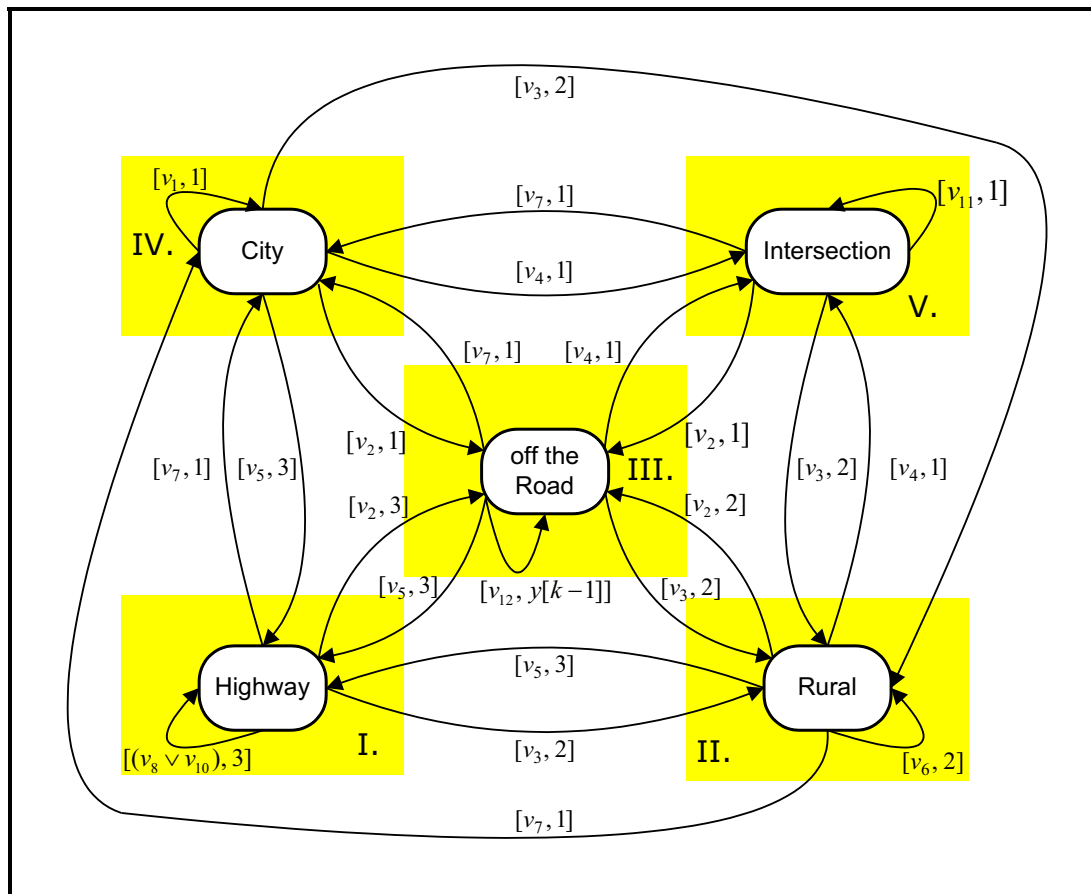


Abbildung 3.12: Zustandsautomat nach 1.Dekompositionsschritt

Die im dargestellten Automatengraphen in Abbildung 3.12 bereits ablesbaren und auch im Weiteren gültigen Schaltfunktionen sind in Anhang A.4 definiert.

Durch die Einführung von fünf Teilautomaten soll eine weitere Dekomposition des Zustandsautomaten erfolgen. Die Präsentation der einzelnen Teilautomaten erfolgt so, dass die Folgezustände inklusive der Übergangsbedingungen und des Ausgangswertes dargestellt werden.

Zu Beginn soll der Teilautomat I „Autobahn“ betrachtet werden. Er wird, wie in Abbildung 3.13 erkennbar, in 2 Zustände dekomponiert. Dabei treten die Fahrsituationen auf der Autobahn inklusive der Auffahrt auf die Autobahn z_{HW} und das Erkennen einer Ausfahrt $z_{HW,exit}$ auf. Es ist aus jedem der zwei Zustände z_{HW} und $z_{HW,exit}$ möglich die Straße, z.B. wegen einer Unachtsamkeit zu verlassen. Dies wird durch den Zustand z_{off} beschrieben. Als weiterer Folgezustand von z_{HW} fungiert $z_{HW,exit}$. Bei einer regulären Simulationsfahrt ohne Verlassen der Straße ist die Ausfahrt die einzige Möglichkeit die Autobahn zu verlassen. Der Zustand $z_{HW,exit}$ besitzt drei weitere Folgezustände. Entweder folgt der kurzen Strecke der Ausfahrt eine Fahrt auf einer Landstraße z_{Rural} oder eine Fahrt durch eine Stadt z_{City} oder es ist möglich bei der Wahl der falschen Ausfahrt zurück auf die Autobahn zu wechseln. Somit kann ebenfalls ein Zustandsübergang von $z_{HW,exit}$ nach z_{HW} erfolgen.

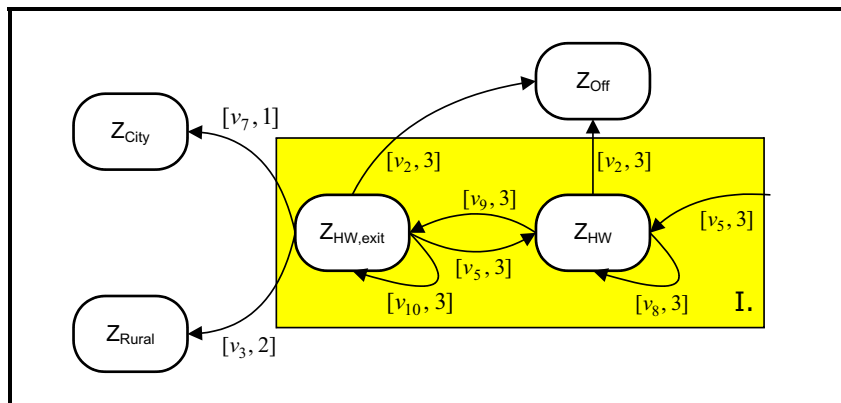


Abbildung 3.13: Dekomposition des Teilautomaten I „Autobahn“

Im nächsten Schritt wird der Teilautomat II „Landstraße“ in der Abbildung 3.14 betrachtet. Hier erfolgt keine weitere Dekomposition. Dieser Teilprozess repräsentiert die Detektion einer Überlandfahrt (z_{Rural}). Der Zustand besitzt vier Folgezustände. Es ist möglich, dass der Landstraße eine Ortschaft folgt und somit in den Zustand z_{City} gewechselt wird. Weiterhin ist es möglich das eine Kreuzung erreicht wird und der Zustand z_{inter} aktiviert wird. Auch eine folgende Autobahnauffahrt ist möglich welche durch den Zustand z_{HW} charakterisiert ist. Auch in diesem Zustand ist ein Verlassen der Fahrbahn durch eine Unachtsamkeit durch den Folgezustand z_{off} charakterisiert.

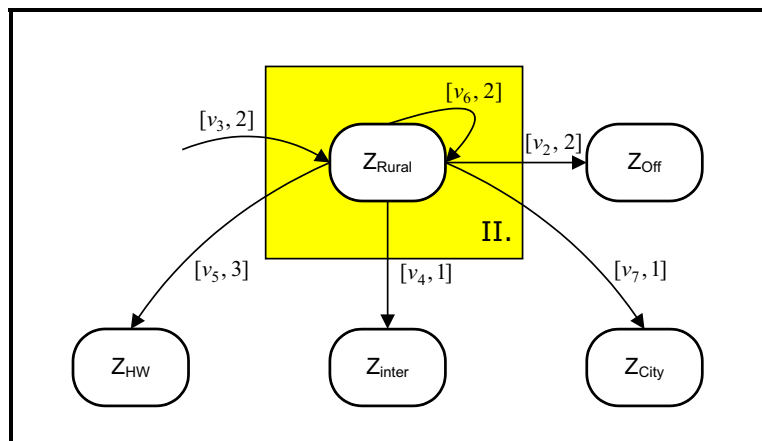


Abbildung 3.14: Dekomposition des Teilautomaten II „Landstraße“

Der mit III beschriebene und in Abbildung 3.15 dargestellte Teil des Automaten „off the Road“ erfährt keine weitere Aufteilung des bisherigen Zustandes. Er (z_{off}) ist aktiv im Falle des Verlassens der Straße oder für den Fall das mittels der DED-Daten keinerlei Fahr-situationsbestimmung möglich ist. Beim Eintreten dieses Zustandes wird der Parametersatz des Vorzustandes oder der im Initialisierungszyklus des Mealy-Automaten, auf welchen im Verlauf dieses Abschnitts noch näher eingegangen wird, ermittelte Zustand verwendet. Dem Zustand z_{off} kann jeder andere Zustand folgen.

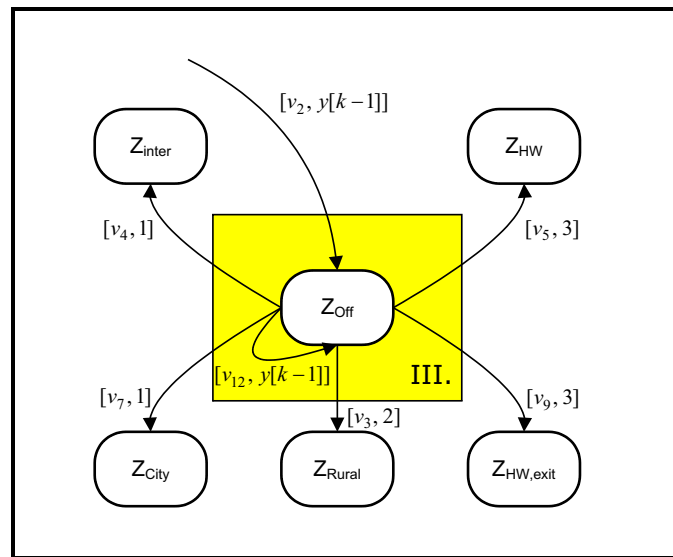


Abbildung 3.15: Dekomposition des Teilautomaten III „off the Road“

Im Teilautomaten IV „Stadt“, der in Abbildung 3.16 dargestellt ist, erfolgt ebenfalls keine weitere Zustandsdekomposition. Im Zustand z_{City} wird die Fahrsituation der Stadtfahrt repräsentiert. Die Folgezustände sind äquivalent der Zustände des Teilautomaten II „Landstraße“. Jedoch kann nun bei verlassen der Ortschaft dem Zustand z_{City} der Zustand Fahrt auf der Landstraße z_{Rural} folgen.

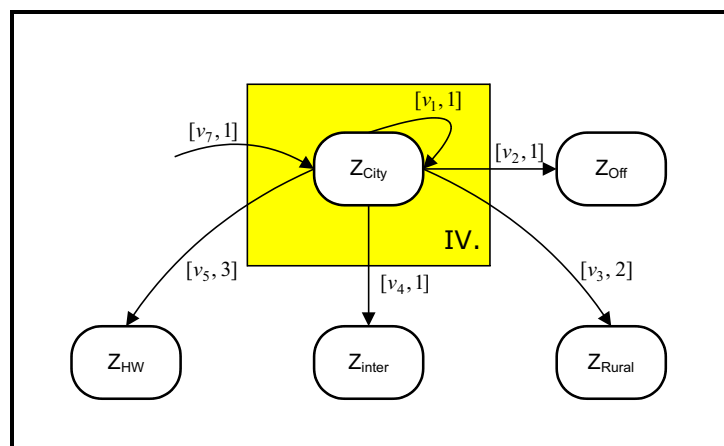


Abbildung 3.16: Dekomposition des Teilautomaten IV „Stadt“

Der noch verbleibende Teilautomat V „Kreuzung“ ist in Abbildung 3.17 beschrieben und erfährt keine weitere Dekomposition. Mit diesem Zustand (z_{inter}) wird das Erreichen und Überfahren einer Kreuzung beschrieben. Die Folgezustände von z_{inter} können nach dem Verlassen die Fahrt durch eine Stadt z_{City} , die Fahrt auf einer Landstraße z_{Rural} oder wiederum das Verlassen der Straße z_{off} sein.

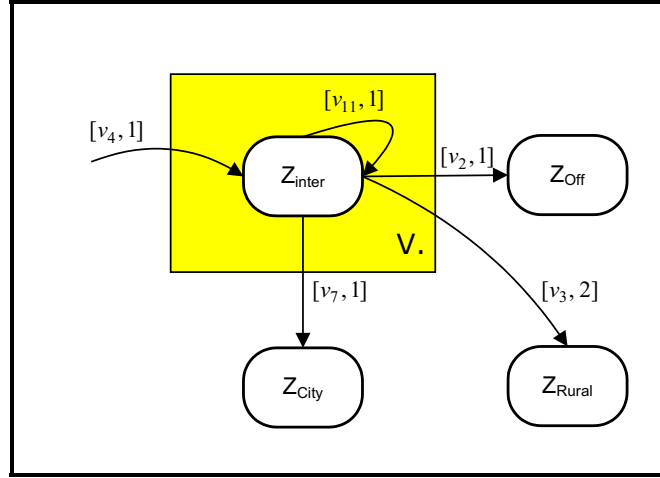


Abbildung 3.17: Dekomposition des Teilautomaten V „Kreuzung“

Im Folgenden sind die Belegungsmengen des Automaten Eingabealphabet, Zustandsmenge und Ausgabealphabet definiert. Das Eingabealphabet in Gleichung 3.18 wird durch die Potenzmenge der 9 Eingangsmengen Ω_{u_i} (Vgl. Gleichungen 3.17) bestimmt. Es enthält alle geordneten Tupel der Dimension 9×1 , die aus den Eingangsmengen Ω_{u_i} gebildet werden können. Die Elemente der Eingangsmengen Ω_{u_i} sind dem Anhang A.3, Tabelle A.3 zu entnehmen. Die geordneten Tupel repräsentieren alle möglichen Schaltbedingungen v_n mit $n \in \mathbb{N}$ und $(1 \leq n \leq 12)$ des Automaten (Vgl. Anhang A.4). In Gleichung 3.19 ist die Zustandsmenge Ω_z die alle im Automaten auftretenden Zustände enthält angegeben. Das Ausgabealphabet Ω_w enthält alle möglichen Ausgangsbelegungen des Automaten und ist in Gleichung 3.20 angegeben. Der vollständige Mealy-Automat ist in Abbildung 3.18 aufgezeichnet. Die zugehörige Automatentabelle ist in Tabelle A.5 im Anhang A.6 abgebildet.

$$\begin{aligned}
 \Omega_{u_1} &= \{0, 1\} \\
 \Omega_{u_2} &= \{-9999, 50, 100, 130\} \\
 \Omega_{u_3} &= \{-1, 1, 2, 3, 4, 5, 6\} \\
 \Omega_{u_4} &= \{-1, 0, 1, 2, 3\} \\
 \Omega_{u_5} &= \{-1, s_1\} \Rightarrow \forall s_1 \in R \text{ gilt, } s_1 \geq 0 \\
 \Omega_{u_6} &= \{-1, 0, 1\} \\
 \Omega_{u_7} &= \{-1, 1, 2, 3, 4, 5, 6\} \\
 \Omega_{u_8} &= \{-1, s_2\} \Rightarrow \forall s_2 \in R \text{ gilt, } s_2 \geq 0 \\
 \Omega_{u_9} &= \{-9999, 50, 100, 130\}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

$$\Omega_u = \Omega_{u_1} \times \Omega_{u_2} \times \Omega_{u_3} \times \Omega_{u_4} \times \Omega_{u_5} \times \Omega_{u_6} \times \Omega_{u_7} \times \Omega_{u_8} \times \Omega_{u_9} \tag{3.18}$$

$$\Omega_z = \{z_{Off}, z_{City}, z_{Rural}, z_{HW}, z_{HW,exit}, z_{inter}\} \tag{3.19}$$

$$\Omega_w = \{1, 2, 3\} \tag{3.20}$$

Aufgrund der Verwendung eines sequentiellen Zustandsautomaten muss, bei jeder neuen Aktivierung der Zustandsmaschine durch Änderung des Indikatorwertes auf vier, eine Bestimmung des Initialzustandes erfolgen. Dazu werden wiederum Parameter des DED-Datenpakets verwendet. Der Initialzustand wird Anhand der drei Parameter „OnRoad“, „MaxVelocity“ und „LaneType“ bestimmt. Die zugehörigen schaltalgebraischen Bestimmungsgleichungen der Zustände sind im Anhang A.5 angegeben.

Nach Abschluss der Entwurfsphase soll der Automat nun getestet werden. Dazu wurde im Fahr Simulator eine Teststrecke interaktiv abgefahren und die DED-Daten aufgezeichnet. Anschließend wurde der DEA mit Hilfe von Matlab/Simulink und den aufgezeichneten Umgebungsdaten getestet. Diese Ergebnisse sind in der Abbildung 3.19 dargestellt.

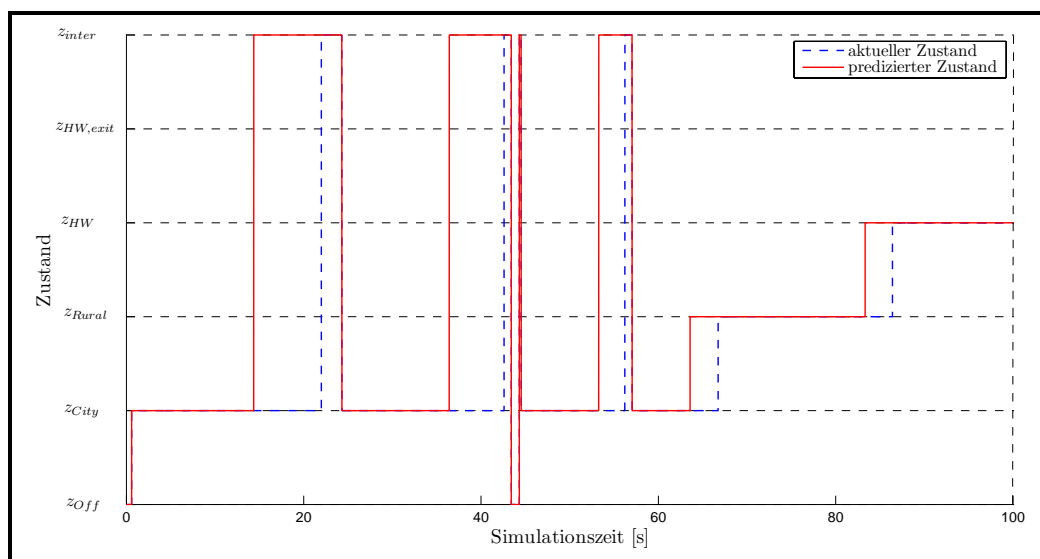


Abbildung 3.19: Bestimmung der Zustände des DEA zur Ermittlung der aktuellen Fahrsituation

Wie im obigen Diagramm gut zu erkennen ist kann mittels der Zustände des DEA die zukünftige Fahrsituation vorhergesagt werden. Die Entfernung ab der vom aktuell vorliegenden Zustand in den neuen vorhergesagten Zustand umgeschaltet wird kann in den Schaltfunktionen des DEA im Anhang A.4 variiert werden. Sie sollte jedoch nicht zu groß gewählt werden um ein zu frühes Umschalten und somit eine unnötig lange Verwendung eines der aktuellen Fahrsituation nicht angepassten Parametersatzes zu vermeiden. Die Zeit die zwischen dem Umschalten in die zukünftige und dem Erreichen der vorhergesagten Fahrsituation liegt ist für den Parametersatzwechsel vorgesehen.

Nachdem die Funktionalität des Prozesses der Fahrsituationsbestimmung erläutert wurde, soll im folgenden Abschnitt die Funktionsweise des Teilprozesses „prüfe Konsistenz“ vorgestellt werden.

Erläuterung des Teilprozesses „prüfe Konsistenz“

Da es dem Nutzer möglich sein soll während der Simulation Parametersätze vorzugeben, wurde eine Konsistenzprüfung dieser Parametersatzvorgaben implementiert. Dieser Prüfalgorithmus ist nur aktiv, falls der in Abschnitt 3.3.1 eingeführte Indikator den Wert fünf annimmt. Die Struktur des Online-Parametersatzes ist in Anhang A.2 definiert. Der Parametersatz enthält die Skalierungsfaktoren und die Eckfrequenzen der im MCA verwendeten Hochpassfilter. Um die Gefahr fehlerhafter Vorgaben des Datensatzes durch den Nutzer einzuschränken werden die Online-Eingaben, bezüglich der in den Beziehungen 3.21 und 3.22 definierten Intervallgrenzen, geprüft. Dabei gilt für die Skalierungsfaktoren k_{scale} , dass die Fahrdynamikdaten im Simulator immer vorzeichenrichtig und betragsmäßig nie größer als die Fahrdynamikdaten selbst zu präsentieren sind. Da es mit dem Simulator nicht möglich ist Frequenzen darzustellen, die größer als 10 Hz sind werden die Eckfrequenzen der Hochpassfilter auf den Maximalwert 10 Hz begrenzt. Wird eine der Konsistenzbedingungen verletzt, so wird der Indikator auf den Wert 0 gesetzt und somit der Standardparametersatz „Landstraße“ verwendet. Die Prüfung der Konsistenz der Parametersätze wurde bewusst nur auf die Vermeidung von Eingabefehlern ausgelegt um Vorzeichenrichtigkeit und die Lage der Eckfrequenzen innerhalb des mit dem Simulator darstellbaren Frequenzbereiches zu garantieren. Ansonsten sind dem Nutzer bei der Parametrierung, innerhalb dieser Grenzen, keine Konventionen auferlegt. Die Online-Parametervorgabe sollte ausschließlich von einem Fachmann auf dem Gebiet des Motion-Cueing vorgenommen werden. Kommt es aufgrund der Parametervorgabe trotzdem zu einer Überschreitung der technischen Grenzen des Simulators, so vermeiden die internen Sicherheitssysteme des Simulators eine potenzielle Gefahrensituation.

$$0 \leq k_{scale} \leq 1 \quad (3.21)$$

$$0\text{Hz} < \omega_{HP} \leq 10\text{Hz} \quad (3.22)$$

Erläuterung des Teilprozesses „prüfe Parameterwechsel“

Da die Parametersätze des MCA während der Simulation umgeschaltet werden sollen muss dies so geschehen, dass der Fahrer es nicht wahrnimmt. Der durch die Parametersatzumschaltung verursachte Einschwingvorgang (Vgl. Abschnitt 3.2.2) muss so vollzogen werden, dass die maximalen Amplituden unterhalb der in Tabelle 2.1 beschriebenen Wahrnehmungsschwellen liegen. Deshalb wird in diesem Teilprozess, anhand der aktuellen Fahrdynamikdaten und der DED-Daten, geprüft ob ein Umschaltvorgang unter diesen Bedingungen möglich ist oder nicht. Dazu wird diese Funktion in jedem Simulationszeitschritt abgearbeitet. Die Definition der Umschaltgrenzen soll im Folgenden erläutert werden. Grundsätzlich wurde definiert, dass ein Umschaltvorgang nur vollzogen werden kann, falls ein bereits aktiver Umschaltvorgang abgeschlossen ist und falls sich das Fahrzeug nicht auf einer Kreuzung befindet. Die zu untersuchenden Schaltsituationen umfassen das Schalten in Kurven, das Schalten auf geraden Abschnitten und das Schalten bei fehlenden Fahrsituationsinformationen. Ein weiterer Unterscheidungspunkt liegt darin ob zwischen den drei in Anhang A.1, Tabelle A.1 a priori festgelegten Parametersätzen umgeschaltet wird oder ob ein Umschaltvorgang von oder zu einem Online durch den Nutzer vorgegebenen Parametersatz durchgeführt wird. Wird nur zwischen den a priori festgelegten Parametersätzen umgeschaltet so werden nur die MCA-Parameter verändert die einen Einfluss auf die Bewegungsgrößen a_y , ω_x und ω_z haben. Da der Einfluss dieser Bewegungsgrößen auf die restlichen drei Bewegungsgrößen über die Koordinatentransformation vernachlässigbar ist, werden zur Bestimmung der Umschaltbedingung nur die Werte von a_y , ω_x und ω_z überprüft. Wird von einem Online-Parametersatz aus oder zu einem Online-Parametersatz umgeschaltet, so werden alle sechs Bewegungsgrößen auf die Erfüllung der Umschaltbedingung geprüft, da nicht bekannt ist welche der Größen von der Parameterumschaltung beeinflusst werden. Ein weitere Aufgabe der Funktion „prüfe Parameterwechsel“ besteht in der Bestimmung der Umschaltperiode T_{period} . Sind die Bedingungen für eine Parameterumschaltung nicht erfüllt so wird kein Umschaltvorgang initialisiert und es wird in den Zustand „lese Datensätze“ gewechselt (Vgl. Abbildung 3.9). Die Definition der Eingangssignale erfolgt mittels der im Anhang A.3, Tabelle A.2 und A.3 definierten Fahrdynamikdaten und des DED-Datenpakets.

Eingangssignale	Beschreibung
LaneType	aktuelle Straßenart
$[\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$	aktuelle Winkelgeschwindigkeiten
$[a_x, a_y, a_z]^T$	aktuelle translatorische Beschleunigungen
DisToLaneTypeChange	Distanz bis zur nächsten Straßenartsänderung
DisToMaxVelChange	Distanz bis zur nächsten Höchstgeschwindigkeitsänderung
v	aktuelle Geschwindigkeit in Fahrtrichtung
CurveRadius	aktueller Kurvenradius
Indikator	Parametersatzwahl (statisch, dynamisch, Online-Vorgabe)
state	aktueller Zustand des DEA
MsgRcv	Online-Parametersatz empfangen $[0 \rightarrow \text{nein}, 1 \rightarrow \text{ja}]$
Ausgangssignale	Beschreibung
switch	Schaltbedingung $[0 \rightarrow \text{nicht erfüllt}, 1 \rightarrow \text{erfüllt}]$
T_{period}	Umschaltperiode des Schaltvorgangs

Tabelle 3.7: Definition der Ein- und Ausgangssignale des Prozesses „prüfe Parameterwechsel“

Bestimmung der Umschaltperiode T_{period}

Die Umschaltperiode T_{period} ergibt sich aus der noch verbleibenden Entfernung bis zum nächsten Fahrsituationwechsel d_{switch} abzüglich einer Sicherheitstrecke von 10 % und der aktuellen Geschwindigkeit v für $v > 0$, nach Gleichung 3.23. Der Wert d_{switch} wird aus den beiden Eingangsgrößen „DisToLaneTypeChange“ und „DisToMaxVelChange“ ermittelt.

$$T_{period} = \frac{0.9 \cdot d_{switch}}{v} \quad (3.23)$$

Das Intervall das für T_{period} definiert wurde lautet:

$$0 \text{ s} \leq T_{period} \leq 5 \text{ s}$$

Erhält man bei der Berechnung einen Wert $T_{period} > 5 \text{ s}$, dann gilt:

$$T_{period} = \begin{cases} 5 \text{ s} & \text{falls } T_{period} > 5 \text{ s} \\ T_{period} & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.24)$$

Um zu bestimmen welches der beiden Eingangssignale als d_{switch} zu verwenden ist wurden Konventionen definiert. Die drei möglichen Fälle sind durch die im Anhang A.7 bestimmten schaltalgebraischen Bestimmungsgleichungen v_{d_1} , v_{d_2} und v_{d_3} beschrieben. Dabei gelten die folgenden Zuordnungen:

$$\begin{aligned} d_{switch} &= 0 && , \text{ wenn } v_{d_1} = 1 \\ d_{switch} &= \text{DisToLaneTypeChange} && , \text{ wenn } v_{d_2} = 1 \\ d_{switch} &= \text{DisToMaxVelChange} && , \text{ wenn } v_{d_3} = 1 \end{aligned}$$

Ermittlung der Schaltbedingung *switch* für Parameterumschaltung

Zur Bestimmung ob eine Parametersatzumschaltung erfolgen kann oder nicht werden die zu Beginn des Abschnitts definierten Eingangssignale verwendet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Schaltvorgänge möglichst nicht wahrnehmbar sind. Die Umschaltgrenzen der Parametersatzumschaltung für die zu prüfenden Bewegungsgrößen der Fahrdynamikdaten sind in den Gleichungen 3.25 und 3.26 definiert. Dabei wurden als Schaltgrenzen der Bewegungsgrößen etwa die Mittelwerte der in Tabelle 2.1 präsentierten menschlichen Wahrnehmungsschwellen gewählt. So soll gewährleistet werden, dass die maximalen Amplituden des Einschwingvorgangs während der Parameterumschaltung nicht wahrnehmbar sind.

$$a_{grenz} = 0.1 \frac{m}{s^2} \quad (3.25)$$

$$\omega_{grenz} = 1 \frac{1}{s} \quad (3.26)$$

Eine weitere Begrenzung der maximalen Amplitude der MCA-Ausgangssignale beim Umschaltvorgang soll durch die Limitierung der Umschaltperiode T_{period} erfolgen. Wie bereits erwähnt kann die Amplitude des MCA-Ausgangssignals beim Umschaltvorgang mit steigender Umschaltperiode T_{period} minimiert werden. Da die maximale Umschaltdauer im vorigen Abschnitt bereits bei der Berechnung von T_{period} auf 5 s begrenzt wurde, wird nun eine untere Grenze für die Umschaltperiode benötigt. Dazu wird eine minimal zulässige Umschaltperiode von 1 s gewählt (Vgl. Gleichung 3.27).

$$T_{period,grenz} = 1 \text{ s} \quad (3.27)$$

Ein weiterer zur Bestimmung der Schaltbedingungen notwendiger Parameter ist das Eingangssignal „LaneType“ (Vgl. Anhang A.3, Tabelle A.3). Es beschreibt die aktuelle Straßenart auf der man sich befindet. Bei der im Folgenden getroffenen Unterscheidung zwischen geradem Streckenabschnitt und Kurve ist diese Variable der Hauptunterscheidungspunkt. Das Eingangssignal „MsgRcv“ ist nur bei der Verwendung eines Online vorgegebenen Parametersatzes relevant und ist ein Indikator dafür ob sich der Online vorgegebene Parametersatz während der Simulation geändert hat oder nicht. Die Schaltbedingung für die Parameterumschaltung *switch* ist genau dann erfüllt, wenn genau eine der im Weiteren eingeführten Schaltbedingungen v_{sw_i} mit $(1 \leq i \leq 5, i \in \mathbb{N})$ erfüllt ist.

Bestimmung der Schaltbedingungen für gerade Streckenabschnitte

Aufgrund der oben definierten Schaltschwellen wurden die folgenden Schaltbedingungen, für das Umschalten zwischen den a priori festgelegten Parametersätzen v_{sw_1} und das Umschalten von oder zu einem Online-Parametersatz v_{sw_2} , definiert. Da beim Umschalten zwischen den drei festen Parametersätzen nur drei Bewegungsgrößen durch den Parametersatzwechsel beeinflusst werden, wurden die restlichen Größen jeweils bezüglich der in Tabelle 2.2 definierten physikalischen Darstellungsgrenzen des Simulators geprüft.

a. Umschalten zwischen den a priori festgelegten Parametersätzen

$$\begin{aligned}
 v_{sw_1} = & (|\omega_x| \leq 1 \frac{\circ}{s}) \wedge (|\omega_y| < 50 \frac{\circ}{s}) \wedge (|\omega_z| \leq 1 \frac{\circ}{s}) \wedge \\
 & (|a_x| < 10 \frac{m}{s^2}) \wedge (|a_y| \leq 0.1 \frac{m}{s^2}) \wedge (|a_z| < 10 \frac{m}{s^2}) \wedge \\
 & (T_{period} \geq 1 s) \wedge (2 \leq LaneType \leq 4) \wedge \\
 & (Indikator[k] \neq Indikator[k-1]) \wedge \\
 & [(0 \leq Indikator[k] \leq 4) \wedge (0 \leq Indikator[k-1] \leq 4)]
 \end{aligned}$$

b. Umschalten von oder zu einem Online-Parametersatz

$$\begin{aligned}
 v_{sw_2} = & (|\omega_x| \leq 1 \frac{\circ}{s}) \wedge (|\omega_y| \leq 1 \frac{\circ}{s}) \wedge (|\omega_z| \leq 1 \frac{\circ}{s}) \wedge \\
 & (|a_x| \leq 0.1 \frac{m}{s^2}) \wedge (|a_y| \leq 0.1 \frac{m}{s^2}) \wedge (|a_z| \leq 0.1 \frac{m}{s^2}) \wedge \\
 & (T_{period} \geq 1 s) \wedge (2 \leq LaneType \leq 4) \wedge \\
 & \left[[(Indikator[k] == 5) \wedge (Indikator[k-1] \neq 5)] \vee \right. \\
 & \left. [(Indikator[k] \neq 5) \wedge (Indikator[k-1] == 5)] \vee \right. \\
 & \left. [(Indikator[k] == 5) \wedge (Indikator[k-1] == 5) \wedge (MsgRcv == 1)] \right]
 \end{aligned}$$

Bestimmung der Schaltbedingungen in Kurven

Zur Bestimmung ob die Möglichkeit der Parametersatzumschaltung in Kurven besteht wurden die Schaltbedingungen um ein weiteres Kriterium erweitert. Dazu wird aus den Eingangsvariablen „v“ und „CurveRadius“ die in der aktuell zu fahrenden Kurve, auftretende Querbeschleunigung $a_{y_{curve}}$ nach der Gleichung 3.28 bestimmt. Die daraus resultierenden Umschaltbedingungen v_{sw_3} und v_{sw_4} wurden nun definiert.

$$a_{y_{curve}} = \frac{v^2}{CurveRadius} \quad (3.28)$$

a. Umschalten zwischen den a priori festgelegten Parametersätzen

$$\begin{aligned} v_{sw_3} = & (|\omega_x| \leq 1 \frac{\circ}{s}) \wedge (|\omega_y| < 50 \frac{\circ}{s}) \wedge (|\omega_z| \leq 1 \frac{\circ}{s}) \wedge \\ & (|a_x| < 10 \frac{m}{s^2}) \wedge (|a_y| \leq 0.1 \frac{m}{s^2}) \wedge (|a_z| < 10 \frac{m}{s^2}) \wedge \\ & (T_{period} \geq 1 s) \wedge (5 \leq LaneType \leq 6) \wedge (|a_{y_{curve}}| \leq 0.1 \frac{m}{s^2}) \wedge \\ & (Indikator[k] \neq Indikator[k-1]) \wedge \\ & [(0 \leq Indikator[k] \leq 4) \wedge (0 \leq Indikator[k-1] \leq 4)] \end{aligned}$$

b. Umschalten von oder zu einem Online-Parametersatz

$$\begin{aligned} v_{sw_2} = & (|\omega_x| \leq 1 \frac{\circ}{s}) \wedge (|\omega_y| \leq 1 \frac{\circ}{s}) \wedge (|\omega_z| \leq 1 \frac{\circ}{s}) \wedge \\ & (|a_x| \leq 0.1 \frac{m}{s^2}) \wedge (|a_y| \leq 0.1 \frac{m}{s^2}) \wedge (|a_z| \leq 0.1 \frac{m}{s^2}) \wedge \\ & (T_{period} \geq 1 s) \wedge (5 \leq LaneType \leq 6) \wedge (|a_{y_{curve}}| \leq 0.1 \frac{m}{s^2}) \wedge \\ & \left[[(Indikator[k] == 5) \wedge (Indikator[k-1] \neq 5)] \vee \right. \\ & \left. [(Indikator[k] \neq 5) \wedge (Indikator[k-1] == 5)] \vee \right. \\ & \left. [(Indikator[k] == 5) \wedge (Indikator[k-1] == 5) \wedge (MsgRcv == 1)] \right] \end{aligned}$$

Schaltbedingungen bei fehlenden Fahrsituationsinformationen

Dieser Block ist nur bei der Nutzung der Zustandsmaschine zur Fahrsituationsbestimmung aktiv. Liegen länger als die vorgegebene Zeitdauer T_{zoff} keine aktuellen Fahrsituationsinformationen vor, was dem aktuellen Zustand „ z_{off} “ des DEA entspricht, dann wird die Parametersatzumschaltung in den Parametersatz „Landstraße“, der auch als Standardparametersatz vorgesehen ist, initialisiert. Dazu muss die folgende Schaltbedingung v_{sw5} erfüllt sein. Die Umschaltperiode T_{period} ist in diesem Fall mit 5 s fest definiert.

$$v_{sw5} = (state == 0) \wedge (T_{zOff} > 10 s) \wedge (|\omega_x| \leq 1 \frac{\circ}{s}) \wedge (|\omega_y| < 50 \frac{\circ}{s}) \wedge (|\omega_z| \leq 1 \frac{\circ}{s}) \wedge (|a_x| < 10 \frac{m}{s^2}) \wedge (|a_y| \leq 0.1 \frac{m}{s^2}) \wedge (|a_z| < 10 \frac{m}{s^2}) \wedge (Indikator == 4)$$

Da immer nur genau eine der fünf Umschaltbedingungen erfüllt ist, sind die jeweils übergebenen Umschaltperioden T_{period} ebenfalls eindeutig definiert. Die zwei noch fehlenden Teilprozesse sollen in den nächsten Abschnitten beschrieben werden.

Erläuterung des Teilprozesses „setze Umschaltperiode“

Dieser Teilprozess wird nur aktiviert, wenn die Bedingungen für einen Parameterumschaltvorgang erfüllt sind. Ist dies der Fall und liegt eine Änderung des zu verwendenden Parametersatzes vor, dann werden die für den Umschaltvorgang relevanten Parameter Startparametersatz, Endparametersatz und Umschaltperiode T_{period} an den Algorithmus der Überföhrungsfunktion übergeben. Dabei bestimmt der in Abschnitt 3.3.1 definierte Indikator, welcher der 4 Parameterdatensätze verwendet wird. Weiterhin wird ein Timer gestartet, der die verstrichene Zeitdauer des Umschaltvorgangs misst.

Erläuterung des Teilprozesses „schalte Parameter um“

Wurde der Umschaltvorgang im Prozess „setze Umschaltperiode“ initialisiert, dann werden die Parametersätze unter Verwendung der im Abschnitt 3.2.2 eingeföhrten Überföhrungsfunktion umgeschaltet. Dieser Umschaltvorgang dauert solange, bis die gemessene Zeit des im Prozess „setze Umschaltperiode“ gestarteten Timers gleich der Umschaltzeit T_{period} ist. Während dieses Umschaltvorgangs kann solange kein neuer Umschaltvorgang gestartet werden bis der aktuelle abgeschlossen ist.

3.4 Test des zeitvarianten Motion-Cueing-Algorithmus mit Online-Parametersatzbestimmung

Nachdem alle Komponenten des zeitvarianten Motion-Cueing-Algorithmus erläutert wurden erfolgt nun der Abschlusstest des Gesamtsystems. Dazu wird nur zwischen den a priori festgelegten Parametersätzen und unter Verwendung der dynamischen Fahrsituationsbestimmung umgeschaltet. Es wird eine interaktive Fahrt betrachtet, bei der alle drei a priori festgelegten Parametersätze zum Einsatz kommen. Das Diagramm in Abbildung 3.20 veranschaulicht die vom DEA bestimmte Fahrsituation und die mit der Überföhrungsfunktion skalierten Parametersätze. Dabei wurden dem Parametersatz „Stadt“ die Konstante 1, dem Parametersatz „Landstraße“ die Konstante 2, dem Parametersatz „Autobahn“ die Konstante 3 und dem Online-Parametersatz die Konstante 4 zugewiesen. Dies dient der Verbesserung der Anschaulichkeit des Umschaltvorgangs bezüglich Umschaltperiode T_{period} und dem Umschaltzeitpunkt t_{switch} .

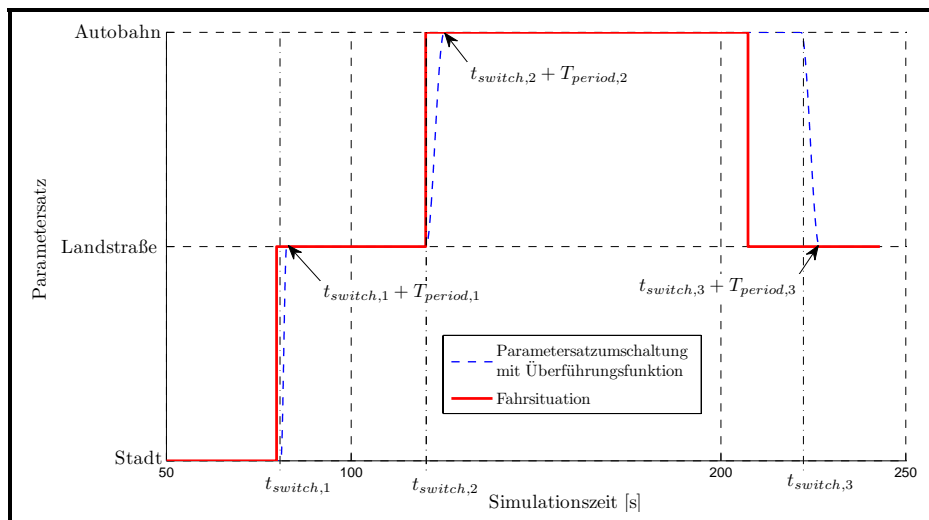


Abbildung 3.20: Darstellung der Parametersatzwechsel und der Fahrsituationen bei einer interaktiven Fahrt mit Umschaltzeitpunkten $t_{switch,n}$ und Umschaltperioden $T_{period,n}$

In Abbildung 3.21 sind die Diagramme der Bewegungsgrößen a_y , ω_x und ω_z zu den Umschaltzeitpunkten für den FTC und den zeitvarianten FTC dargestellt, die zu der in Abbildung 3.20 abgebildeten interaktiven Fahrt gehören. Es werden wiederum nur die Bewegungsgrößen betrachtet, die durch die Parameterumschaltung beeinflusst werden.

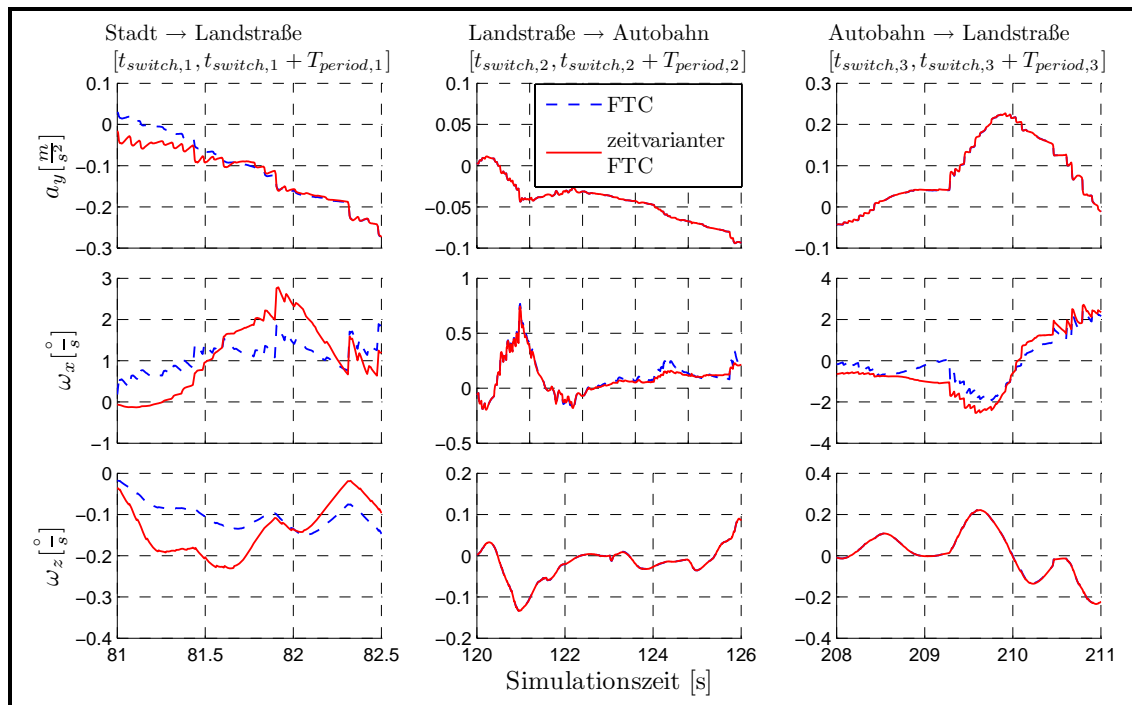


Abbildung 3.21: Darstellung der durch den Umschaltvorgang beeinflussten Bewegungsgrößen während des Schaltvorgangs

In den Diagrammen in Abbildung 3.21 ist zu erkennen, dass die Signalverläufe während des Umschaltvorgangs keinerlei durch das Umschalten verursachte Sprünge aufweisen. Der Signalverlauf des Ausgangssignals des zeitvarianten Motion-Cueing-Algorithmus ist stetig. Das Umschalten erfolgt innerhalb der definierten Grenzen und konnte während der Fahrt nicht wahrgenommen werden. Bei der hier präsentierten Versuchsfahrt mit dem zeitvarianten Algorithmus wurde nach den Regeln der StVO⁴ gefahren und auf Extremmanöver verzichtet. Als Fazit kann festgestellt werden, dass bei Verwendung des zeitvarianten Algorithmus für Simulationsfahrten nach der StVO die gewünschten Forderungen der fahrsituationsspezifischen Parameterumschaltung mit nicht wahrnehmbaren Schalthandlungen erfüllt werden kann. Im Anhang A.8 sind weitere speziell gewählte Testszenarien ohne die Restriktionen durch Beachtung der StVO dargestellt. Sie werden äquivalent zur eben verwendeten Darstellungsweise grafisch präsentiert. Die verwendeten Testszenarien sind das Detektieren einer Kreuzung bei der Fahrt auf einer Landstraße. Die daraus resultierenden Parametersatzwechsel sowie deren Einfluss auf das MCA-Ausgangssignal sind in den zugehörigen Diagrammen dargestellt. Ein weiteres Testszenario ist die Fahrt Abseits der Straße. Erhält die Simulation länger als die Zeitspanne T_{zoff} keine Fahrsituationsdaten oder befindet sich das Fahrzeug länger als die Zeitspanne neben der Straße, dann wird in den Parametersatz „Landstraße“ gewechselt. Abschließend ist als Testszenario das Umschalten vom Parametersatz „Landstraße“ zu einem Online vorgegebenen Parametersatz dargestellt.

⁴Strassenverkehrsordnung

Nach Untersuchung aller Szenarien kann geschlussfolgert werden, dass die Parametersatzumschaltung ohne Unstetigkeiten bzw. Artefakte im MCA-Ausgangssignal durchgeführt werden kann. Der Umschaltvorgang ist dabei für den Probanden nicht wahrnehmbar. Damit sind die Anforderungen an den zeitvarianten Algorithmus erfüllt.

Kapitel 4

Untersuchung der Dynamik des Fahrstimulators

4.1 Einführung

Ziel des Motion-Cueing ist es die realen Bewegungen eines Fahrzeugs im Fahrstimulator so genau wie möglich nachzubilden. Aufgrund der physikalischen Beschränkungen bezüglich des Arbeitsraumes ist dies grundsätzlich nur mit Einschränkungen möglich. Eine weitere bedeutende Einflussgröße ist die Trägheit des Fahrstimulators. Diese als Simulatordynamik bezeichnete nichtlineare Größe weist Tiefpasscharakter auf und sorgt somit für eine Amplitudendämpfung und eine erhebliche Zeitverzögerung zwischen den Soll-Positionsvorgaben des Motion-Cueing-Algorithmus und den tatsächlich dargestellten Ist-Positionen des Simulators. Im folgenden Kapitel wird eine Systemidentifikation dieser Simulatordynamik für Offline-Testzwecke durchgeführt. Im Anschluß erfolgt der Entwurf einer Kompensationsregelung um den Einfluss der Simulatordynamik zu minimieren. Der Aufbau der Simulatorsteuerung ist in Abbildung 4.1 als Wirkungsplan dargestellt. Darin wandelt der Motion-Cueing-Algorithmus die Fahrdynamikdaten in für den Simulator darstellbare Soll-Positionsvorgaben \underline{s} und $\underline{\beta}$ um. Diese werden an die Bewegungssteuerung des Simulators weitergeleitet und dort in Soll-Zylinderpositionen transformiert. Mittels einer Positionsregelung werden die Sollvorgaben der Zylinderpositionen angesteuert. Anschließend entstehen durch das geregelte Ein- und Ausfahren der 6 Hydraulikzylinder des Fahrstimulators die mit dem Einfluss der Simulatordynamik behafteten Ist-Zylinderpositionen. Auf die Bewegungssteuerung der Simulatorplattform zwischen Soll-Positionsvorgaben und Soll-Zylinderpositionen kann vom Nutzer kein Einfluss genommen werden, da diese vom Hersteller vorgegeben ist.

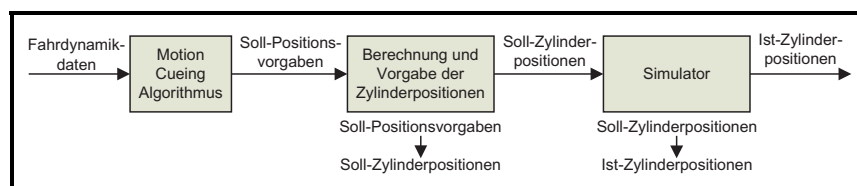


Abbildung 4.1: Wirkungsplan der Simulatorsteuerung

4.2 Grundlagen der Simulatorsteuerung

Wie eingangs bereits angesprochen wirkt sich die Simulordynamik bei Simulationsfahrten negativ auf die wahrnehmbaren Beschleunigungen aus. Aufgrund des starken Tiefpasscharakters (PT_2 -Verhalten) kommt es bei der Präsentation der Signale im Simulator zu erheblichen Dämpfungseffekten und Latenzzeiten zwischen den Soll-Positionsangaben und den im Simulator messbaren Signalen. Der Zeitverzug zwischen den Soll-Zylinderpositionen und den messbaren Ist-Zylinderpositionen des Simulators wurde in früheren Untersuchungen ermittelt und liegt bei etwa 300 – 500 ms. Der Einfluss der Simulordynamik ist bei der Darstellung der niederfrequenten Signalanteile über die Tilt-Coordination aufgrund der langen Verfahrwege des Simulators besonders stark ausgeprägt. Um den Einfluss der Simulordynamik auf die Soll-Vorgaben näher untersuchen zu können soll zur Durchführung von Offline-Tests eine simulative Nachbildung der Berechnung der Ist-Zylinderpositionen erfolgen. Ziel ist es eine Systemidentifikation durchzuführen deren Ergebnisse das Übertragungsverhalten der Simulordynamik so gut wie möglich nachbildet. Mit einer Kompensationsregelung sollen anschließend die negativen Einflüsse der Simulordynamik auf die wahrnehmbaren Beschleunigungen minimiert werden. In Abbildung 4.2 sind drei Ansätze dargestellt mit denen es möglich ist die Ist-Zylinderpositionen simulativ nachzubilden. Darin beschreibt der obere Pfad I. den realen Ablauf zur Ermittlung der Ist-Zylinderpositionen im Simulator.

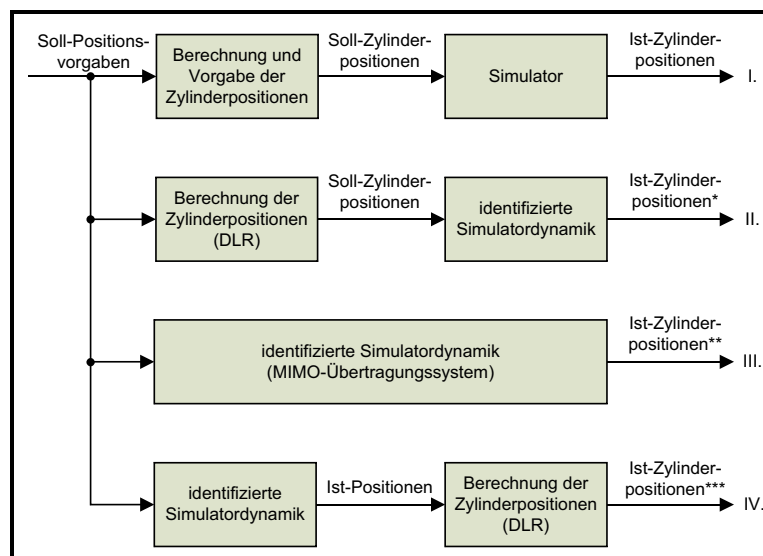


Abbildung 4.2: Wirkungsplandarstellung der realen Bestimmung der Ist-Zylinderpositionen und der drei Ansätze zur simulativen Bestimmung der Ist-Zylinderpositionen

In den verbleibenden drei Pfaden sind Anordnungen zur simulativen Ermittlung der Ist-Zylinderpositionen dargestellt. Der in Pfad II. dargestellte Berechnungsweg beinhaltet eine beim DLR Braunschweig implementierte Umrechnung der Soll-Positionsvorgaben in Soll-Zylinderpositionen und die bereits in früheren Untersuchungen des DLR Braunschweig ermittelte Übertragungsfunktion $G(s)$. Diese Übertragungsfunktion ist das in Gleichung 4.1 vorgestellte und für alle sechs Zylinder gültige PT_2 -Glied. Mit diesem Ansatz kann der Einfluss der Simulatordynamik bereits sehr gut nachgebildet werden. Trotzdem soll im Weiteren der in Pfad III. abgebildete Ansatz einer Übertragungsfunktionsmatrix der Dimension 6×6 zur Systemidentifikation bezüglich einer noch exakteren Nachbildung der Ist-Zylinderpositionen untersucht werden. Anschließend werden die Ergebnisse der Berechnungsmethoden der Ist-Zylinderpositionen nach Pfad II., Pfad III. und dem im Folgenden erläuterten Ansatz nach Pfad IV. verglichen.

$$G(s) = \frac{1}{0.02s^2 + 0.4s + 1} \quad (4.1)$$

Für den Entwurf einer Kompensationsregelung zur Minimierung des Einflusses der Simulatordynamik ist weder der Ansatz nach Pfad II. noch der Ansatz nach Pfad III. geeignet. Da auf die Bewegungssteuerung vom Nutzer kein Einfluss genommen werden kann muss die Kompensationsregelung im Wirkungsplan vor dem Übertragen der Daten (Soll-Positionsvorgaben) an die Bewegungssteuerung angeordnet sein. Aus diesem Grund benötigt die Kompensationsregelung als Führungs- und als Ausgangssignal ein Positionssignal \underline{s} oder $\underline{\beta}$. Zur Lösung dieses Problems wird der in Pfad IV. präsentierte Ansatz verwendet. Dazu wird im Wirkungsplan die Reihenfolge der Übertragungsfunktion $G(s)$ und der Transformation der Positionvorgaben in Zylinderpositionen im Vergleich zu Pfad II. vertauscht. Dies ist aufgrund des MIMO¹-Übertragungsverhaltens der Bewegungssteuerung (vgl. Abbildung 4.2 Pfad III.) zwar nicht korrekt, jedoch liefert es eine sehr gute Näherung der Ist-Zylinderpositionen.

¹multiple input multiple output

4.3 Systemidentifikation der Simulatordynamik

4.3.1 Einführung

Im Weiteren wird versucht die Simulatordynamik für Offline-Testversuche zu identifizieren. Wie in Abbildung 4.1 zu erkennen ist wirkt sich der Einfluss der Simulatordynamik zwischen den Soll-Zylinderpositionen und den Ist-Zylinderpositionen aus. Eine Systemidentifikation für diesen Übertragungsansatz erfolgte bereits in früheren Untersuchungen des DLR Braunschweig (vgl. Abbildung 4.2 Pfad II.). Dazu wurde beim DLR Braunschweig die Umrechnung der Soll-Positionsangaben des MCA in Soll-Zylinderpositionen implementiert. Die Ergebnisse dieses Übertragungsansatzes bilden die tatsächlichen Effekte der Simulatordynamik bereits sehr gut nach. Als Übertragungsfunktion zwischen den Soll- und Ist-Zylinderpositionen konnte für alle 6 Übertragungscharakteristika der Hydraulikzylinder das in Gleichung 4.2 dargestellte PT_2 -Glied ermittelt werden. Die Systemidentifikation erfolgte mit Trajektorien aus interaktiven Fahrversuchen. Der Gültigkeitsbereich dieser linearen Übertragungsfunktion liegt etwa bei $0 - 2 \text{ Hz}$. Um die Genauigkeit der Darstellung des Übertragungsverhaltens für Offline-Tests zu erhöhen soll ein weiterer Ansatz für ein Übertragungssystem untersucht werden. Dazu wird der in Gleichung 4.3 aufgezeigte Ansatz zur Ermittlung des Übertragungsverhaltens genutzt. Es wurde ein MIMO-Übertragungssystem der Dimension 6×6 aufgestellt, in dem der Einfluss jeder einzelnen Komponente der Soll-Positionsangaben auf jeden einzelnen Zylinder untersucht wird (vgl. Abbildung 4.2 Pfad III.). Die Bestimmung der Teilübertragungsfunktionen der Matrix $\underline{G}_{Pos}(s)$ wird im Folgenden erläutert.

$$G(s) = \frac{Cyl_n^{Ist}(s)}{Cyl_n^{Soll}(s)} = \frac{1}{0.02s^2 + 0.4s + 1} \rightarrow n \in \mathbb{N}; 1 \leq n \leq 6 \quad (4.2)$$

$$\underline{G}_{Pos}(s) = \begin{bmatrix} \frac{Cyl_1(s)}{Pos_\phi(s)} & \frac{Cyl_1(s)}{Pos_\theta(s)} & \frac{Cyl_1(s)}{Pos_\psi(s)} & \frac{Cyl_1(s)}{Pos_x(s)} & \frac{Cyl_1(s)}{Pos_y(s)} & \frac{Cyl_1(s)}{Pos_z(s)} \\ \frac{Cyl_2(s)}{Pos_\phi(s)} & \frac{Cyl_2(s)}{Pos_\theta(s)} & \frac{Cyl_2(s)}{Pos_\psi(s)} & \frac{Cyl_2(s)}{Pos_x(s)} & \frac{Cyl_2(s)}{Pos_y(s)} & \frac{Cyl_2(s)}{Pos_z(s)} \\ \frac{Cyl_3(s)}{Pos_\phi(s)} & \frac{Cyl_3(s)}{Pos_\theta(s)} & \frac{Cyl_3(s)}{Pos_\psi(s)} & \frac{Cyl_3(s)}{Pos_x(s)} & \frac{Cyl_3(s)}{Pos_y(s)} & \frac{Cyl_3(s)}{Pos_z(s)} \\ \frac{Cyl_4(s)}{Pos_\phi(s)} & \frac{Cyl_4(s)}{Pos_\theta(s)} & \frac{Cyl_4(s)}{Pos_\psi(s)} & \frac{Cyl_4(s)}{Pos_x(s)} & \frac{Cyl_4(s)}{Pos_y(s)} & \frac{Cyl_4(s)}{Pos_z(s)} \\ \frac{Cyl_5(s)}{Pos_\phi(s)} & \frac{Cyl_5(s)}{Pos_\theta(s)} & \frac{Cyl_5(s)}{Pos_\psi(s)} & \frac{Cyl_5(s)}{Pos_x(s)} & \frac{Cyl_5(s)}{Pos_y(s)} & \frac{Cyl_5(s)}{Pos_z(s)} \\ \frac{Cyl_6(s)}{Pos_\phi(s)} & \frac{Cyl_6(s)}{Pos_\theta(s)} & \frac{Cyl_6(s)}{Pos_\psi(s)} & \frac{Cyl_6(s)}{Pos_x(s)} & \frac{Cyl_6(s)}{Pos_y(s)} & \frac{Cyl_6(s)}{Pos_z(s)} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

4.3.2 Vorgehensweise zur Systemidentifikation

Zur Durchführung der Systemidentifikation wird das Verfahren der „Frequency Sweep Technique“ nach Galloway [Gal96] verwendet. Dabei fungieren als Soll-Positionsvorgaben sogenannte Sinus-Sweep Funktionen. Die zu messenden Ausgangsgrößen sind die aktuellen Ist- Zylinderpositionen. Eine Sinus-Sweep Funktion ist eine Sinusfunktion deren Frequenz sich zeitlich ändert. Die allgemeine Gleichung $g(t)$ einer Sinus-Sweep Funktion ist für eine lineare Frequenzänderung $f(t)$ mit $0 \leq f(t) \leq f_{max}$ und einer Amplitude von eins in Gleichung 4.4 dargestellt.

$$g(t) = \sin(2\pi f(t) \cdot t) , \text{ mit } f(t) = \frac{f_{max}}{T_{Sim}} \cdot t \quad (4.4)$$

Der Graph der verwendeten Sinus-Sweep Funktion ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die maximale Amplitude der Sweep-Funktion ist eins. Mit einem statischen Verstärkungsfaktor wurde die maximale Amplitude für die einzelnen Testfälle variiert. Der Frequenzbereich der Sweep-Funktion beginnt bei 0 Hz und endet bei 1 Hz. Es wurde jeweils ein Eingang der 6 Positionsvorgaben $[\phi, \theta, \psi, x, y, z]^T$ mit einem Sinus-Sweep angeregt und die restlichen Eingänge mit dem Wert Null belegt. Am Ausgang wurden die resultierenden Ist-Zylinderpositionen gemessen. Dies erfolgte für alle 6 Eingänge. Die verwendeten Amplituden der Sweep-Funktion sind für die translatorischen Komponenten x, y und z jeweils 0.2 m und für die rotatorischen Komponenten ϕ, θ und ψ jeweils 2° .

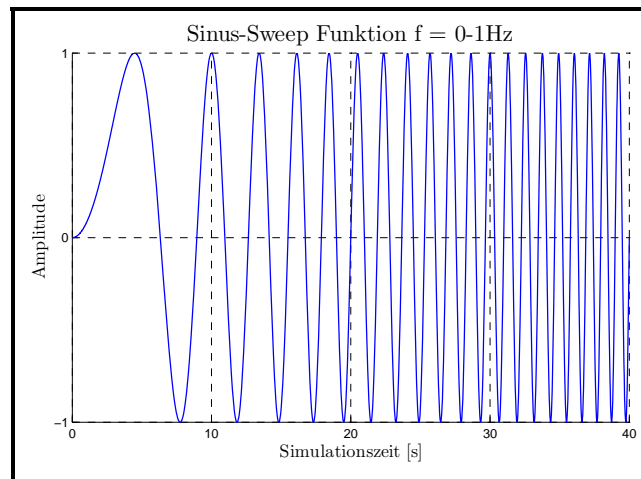


Abbildung 4.3: Darstellung der Sinus-Sweep Funktion mit linearer Änderung der Frequenz

4.3.3 Präsentation und Auswertung der Ergebnisse

Nach der Durchführung der Sinus-Sweep Tests werden im Folgenden die Ergebnisse vorgestellt. Dazu wurde zur Abschätzung der Qualität der Messergebnisse in [Gal96] die Kohärenz $C_{xy}^2(f)$ eingeführt. Sie ist im Anwendungsfall ein Maß für die lineare Abhängigkeit zwischen den Soll-Positionsvorgaben und den Ist-Zylinderpositionen. Sie berechnet sich nach der Gleichung 4.5. Im Zähler des Bruchs steht das Betragsquadrat der mittleren Kreuzleistungsdichte und im Nenner das Produkt aus der Autoleistungsdichte des Eingangssignals x (Soll-Positionsvorgaben) und der Autoleistungsdichte des Ausgangssignals y (Ist-Zylinderpositionen). Die Werte der Kohärenz liegen zwischen 0 und 1, wobei für $C_{xy}^2 = 0$ keine lineare Abhängigkeit zwischen den Signalen besteht und für $C_{xy}^2 = 1$ maximale lineare Abhängigkeit vorliegt. Für das Verfahren der „Frequency Sweep Technique“ wurde in [Gal96] festgelegt, dass für den Fall $C_{xy}^2 > 0.6$ eine ausreichende lineare Abhängigkeit zwischen Eingangs- und Ausgangssignal zur Bestimmung einer linearen Übertragungsfunktion vorliegt. Das Bode Diagramm mit Kohärenzdiagramm der experimentell ermittelten Daten ist in Abbildung 4.4 exemplarisch für den Fall $C_{xy}^2 > 0.6$ bei Soll-Positionsvorgabe Φ und Messung der Zylinderlänge des Zylinder 1 ($\frac{Cyl_1(s)}{Pos_\Phi(s)}$) dargestellt. In Abbildung 4.5 ist der Fall $C_{xy}^2 < 0.6$ für die Soll-Positionsvorgabe y und Messung der Zylinderlänge des Zylinder 1 ($\frac{Cyl_1(s)}{Pos_y(s)}$) dargestellt.

$$C_{xy}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|^2}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)} \tag{4.5}$$

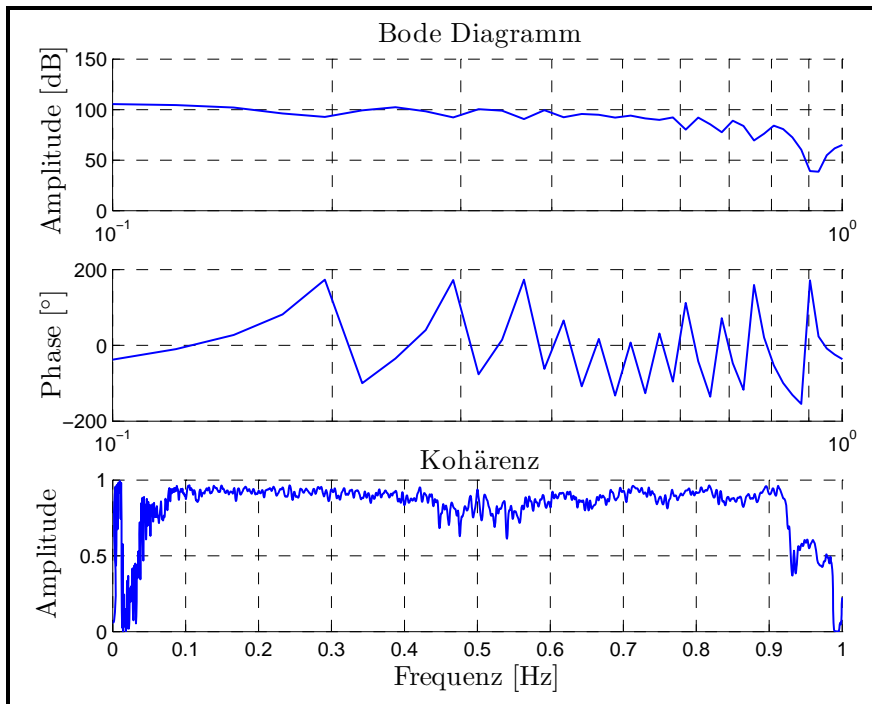
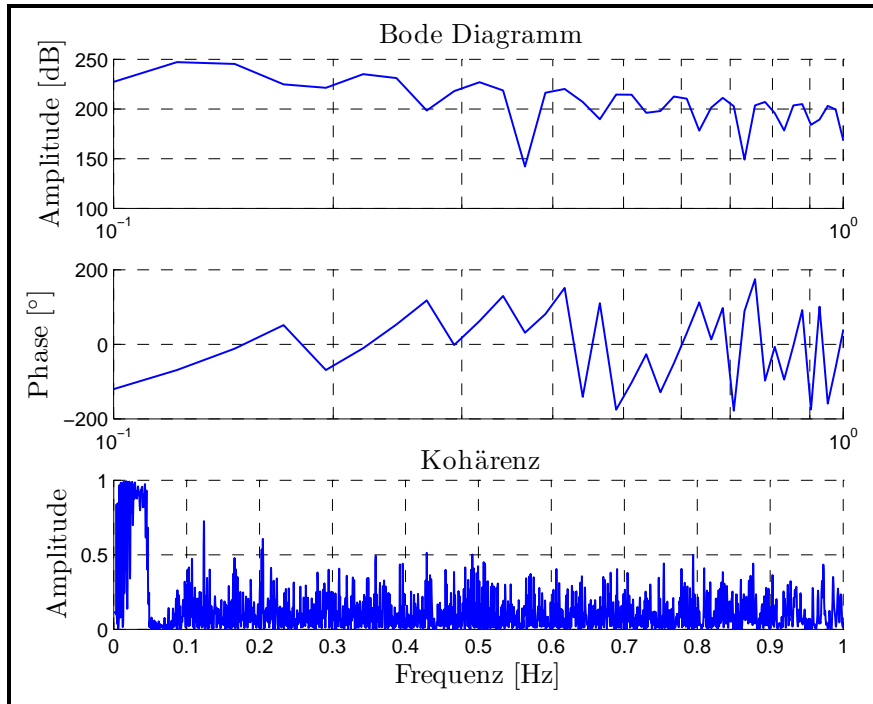


Abbildung 4.4: Bode Diagramm und Kohärenz für $(\frac{Cyl_1(s)}{Pos_\Phi(s)})$ mit $C_{xy}^2 > 0.6$


 Abbildung 4.5: Bode Diagramm und Kohärenz für $(\frac{Cyl_1(s)}{Pos_y(s)})$ mit $C_{xy}^2 < 0.6$

Im Bode Diagramm der Abbildung 4.4 mit $C_{xy}^2 > 0.6$ ist im Amplitudengang das näherungsweise lineare Übertragungsverhalten des Systems zu vermuten. Der Verlauf des Amplitudenganges lässt als vermutetes Übertragungsverhalten ein PT2-Glied zu. Dieser Ansatz für das Übertragungsverhalten wurde zur Parametrierung der 36 Übertragungsglieder des MIMO-Systems aus Gleichung 4.3 verwendet. Wie im Diagramm der Abbildung 4.5 dargestellt ist gilt nicht für alle der 36 experimentell ermittelten Übertragungsglieder, dass $C_{xy}^2 > 0.6$. Für einen Teil der translatorischen Positionsvorgaben $[x, y, z]^T$ gilt $C_{xy}^2 < 0.6$. Trotzdem wurde unter Nutzung des allgemeinen PT2-Gliedes in Gleichung 4.6, versucht die Übertragungsfunktionen der Matrix $\underline{G}_{Pos}(s)$ aus Gleichung 4.3 zu ermitteln.

$$G_{PT2}(s) = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} \quad (4.6)$$

4.3.4 Bestimmung der Koeffizienten der Übertragungsfunktionen und Test des Übertragungssystems

Die im vorigen Abschnitt in Gleichung 4.6 bestimmte Übertragungscharakteristik der Simulatordynamik als PT_2 -Glied dient nun als Ausgangspunkt zur Bestimmung der jeweiligen Koeffizienten $[b_0, a_2, a_1]$ der einzelnen Übertragungsfunktionen. Diese wurden wie in [Röb06] beschrieben mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate (MKQ) ermittelt. Dazu wurde die allgemeine Übertragungsfunktion des PT_2 -Gliedes aus Gleichung 4.6 in die Darstellung der allgemeinen Differentialgleichung unter der Annahme verschwindender Anfangsbedingungen überführt. Dabei entspricht das Eingangssignal $u(t)$ der jeweiligen Positionsvorgabe $pos_m(t)$ mit $m \in \{\Phi, \Theta, \Psi, x, y, z\}$ und das Ausgangssignal $y(t)$ entspricht der jeweiligen Zylinderposition $cyl_n(t)$ mit $1 \leq n \leq 6$.

$$y(t) = -a_1 \dot{y}(t) - a_2 \ddot{y}(t) + b_0 u(t)$$

Betrachtet man nun einen Testversuch mit N Messwerten so ergibt sich das in Gleichung 4.7 dargestellte lineare Gleichungssystem.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} y(t_0) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ y(t_{N-1}) \end{bmatrix}}_{\underline{y}} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\dot{y}(t_0) & -\ddot{y}(t_0) & u(t_0) \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ -\dot{y}(t_{N-1}) & -\ddot{y}(t_{N-1}) & u(t_{N-1}) \end{bmatrix}}_{\underline{M}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_0 \end{bmatrix}}_{\underline{p}} \quad (4.7)$$

Mit der Methode der kleinsten Quadrate (MKQ) kann dieses Gleichungssystem nun wie folgt gelöst werden und somit die Koeffizienten a_2 , a_1 und b_0 der Übertragungsfunktionen $G_{PT_2}(s)$ bestimmt werden.

$$\underline{p} = (\underline{M}^T \cdot \underline{M})^{-1} \cdot \underline{M}^T \cdot \underline{y}$$

Die so ermittelten Übertragungsfunktionen sind in Form eines MIMO-Übertragungssystems in Anhang B.1.1 Gleichung B.1 dargestellt. Im Anschluss wurden die Ergebnisse für die Ist-Zylinderpositionen, die unter Nutzung der Übertragungsfunktionsmatrix ermittelt wurden mit den Ergebnissen die mit der Übertragungsfunktion aus Gleichung 4.2 für die Anwendung auf die Soll-Positionsvorgaben und für die Anwendung auf die Soll-Zylinderpositionen ermittelt wurden, verglichen (vgl. Abbildung 4.2). Die Diagramme dieser Untersuchung sind in Abbildung 4.6 für alle 6 Zylinder dargestellt. Der in dieser Abbildung dargestellte Trajektorienabschnitt ist eine Vollbremsung.

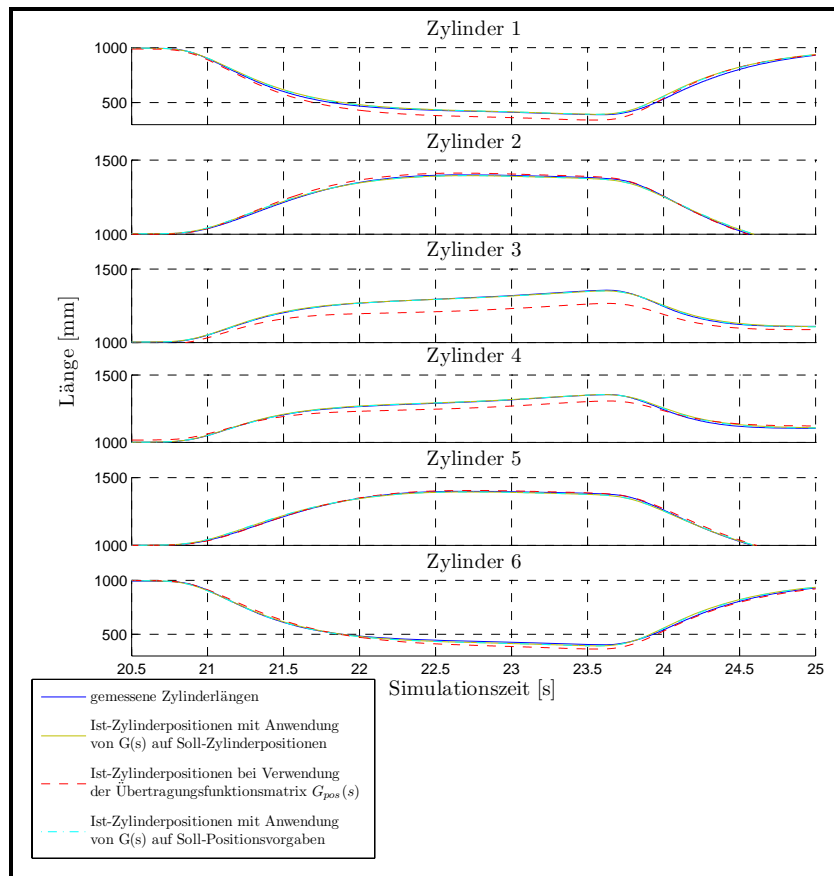


Abbildung 4.6: Vergleich der Zylinderlängen bei einem Bremsvorgang

Die in den 6 Diagrammen in Abbildung 4.6 dargestellten Zylinderlängen zeigen klare Unterschiede zwischen den Übertragungssystemansätzen auf. Am deutlichsten sind die Unterschiede für diese Trajektorie für die Zylinder 3 und 4. Dort weichen die mit dem Ansatz der Übertragungsfunktionsmatrix ermittelten Zylinderlängen erheblich von den tatsächlich gemessenen Zylinderlängen ab. Die Methode mit einer Übertragungsfunktion erweist sich, sowohl für den Ansatz der Anwendung der Übertragungsfunktion auf die Soll-Zylinderpositionen als auch für die Anwendung auf die Soll-Positionsvorgaben als wesentlich exakter in der Nachbildung der Signalverläufe der Ist-Zylinderpositionen. Die Abweichungen zwischen den beiden Ansätzen mit einer Übertragungsfunktion sind minimal und werden als vernachlässigbar angenommen. Da der Ansatz der Übertragungsfunktionsmatrix keine exaktere Beschreibung der Simulatordynamik ermöglicht, soll er im Folgenden nicht weiter berücksichtigt werden.

4.4 Entwurf einer Kompensationsregelung

4.4.1 Aufbau der Kompensationsregelung

Im nun folgenden Abschnitt soll der Entwurf und der Test einer Kompensationsregelung zur Minimierung der durch die Simulatordynamik verursachten negativen Effekte bei der Darstellung der wahrnehmbaren Beschleunigungen im Simulator erläutert werden. Die folgenden Betrachtungen zum Entwurf der Regelung werden für die Drehwinkel $\underline{\beta}$ durchgeführt und sind auf die Positionssignale \underline{s} äquivalent übertragbar. Wie im Abschnitt 4.2 bereits erwähnt kann auf die Bewegungssteuerung des Simulators vom Nutzer kein Einfluss genommen werden. Aus diesem Grund muss die Kompensationsregelung im Wirkungsplan vor dem Übermitteln der Soll-Positionsvorgaben an die Bewegungssteuerung angeordnet werden und benötigt somit als Führungs- und Ausgangssignal Positionssignale (vgl. Abbildung 4.2 Pfad IV.). Der daraus resultierende Aufbau der Simulatorsteuerung ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

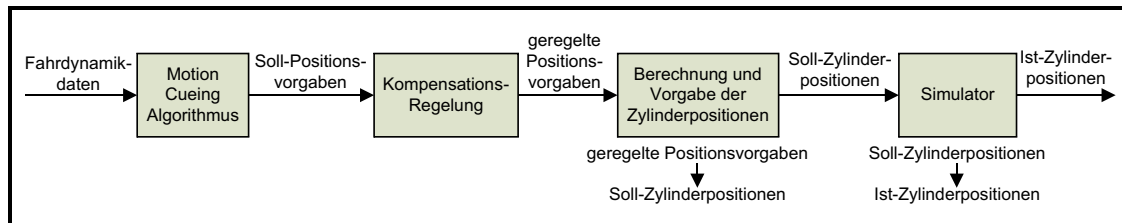


Abbildung 4.7: Simulatorsteuerung mit integrierter Kompensationsregelung

Auf der Basis der Anordnung des Kompensationsregelkreises hinter dem MCA im Wirkungsplan der Simulatorsteuerung wurde die in Abbildung 4.8 dargestellte Regelungsstruktur einer Vorsteuerung mit inversem Modell für die Kompensationsregelung gewählt. Der Vorteil dieser Regelungsstruktur besteht darin, dass der Vorsteuerpfad mit $G^{-1}(s)$ den Hauptteil der Regelungsaufgabe übernimmt. Der Regler hat dann nur noch die Aufgabe Störungen oder Streckenungenauigkeiten zu kompensieren. Auf die Stabilität des Regelkreises hat der Vorsteuerpfad keinen Einfluss, jedoch auf das Führungsverhalten (vgl. [Rei06a]). In der Kompensationsregelung treten die Soll-Positionsvorgabe β_{Soll} als Führungssignal, die genäherte Ist-Position β_{Ist}^* als Ausgangssignal, die Stellgröße β_{Stell} und die limitierte Stellgröße β_{Stell}^{Lim} als wichtigste Signale auf. Als Streckenübertragungsfunktion $G(s)$ fungiert das in Gleichung 4.1 dargestellte und in den vorigen Abschnitten bereits als Simulatordynamik eingeführte PT_2 -Glied. Die Stellgrößenbegrenzung ist eine Regelung mit nichtlinearen Übertragungsgliedern, die sowohl die Geschwindigkeit als auch die Beschleunigung des Stellsignals β_{Stell} auf die mit dem Simulator darstellbaren und in Tabelle 2.2 dargestellten physikalischen Limitierungen begrenzt. Das Ziel der Kompensationsregelung besteht darin die Simulatordynamik soweit wie möglich zu kompensieren und dabei die physikalischen Limitierungen des Simulators nicht zu überschreiten. Als Soll-Positionsvorgaben die an die Bewegungssteuerung gesendet werden soll das Stellsignal β_{Stell}^{Lim} fungieren. Da die Direkte Kinematik zur Umrechnung der messbaren, aktuellen Ist-Zylinderpositionen in Positionsvorgaben nicht trivial ist und den Rahmen der Arbeit

erheblich sprengen würde fungiert das in der Simulation berechnete Ausgangssignal β_{Ist}^* als Rückführgröße zur Bestimmung der Regeldifferenz e . Da Streckenungenauigkeiten und externe Störgrößen aufgrund dieser Regelkreisauslegung nicht berücksichtigt werden muss auch die Robustheit des Reglers gegenüber diesen Störgrößen nicht berücksichtigt werden. Als einzige interne Störgröße wirkt somit die Stellgrößenbegrenzung. Eine Möglichkeit zur Realisierung dieser Stellgrößenbegrenzung wird im folgenden Abschnitt präsentiert.

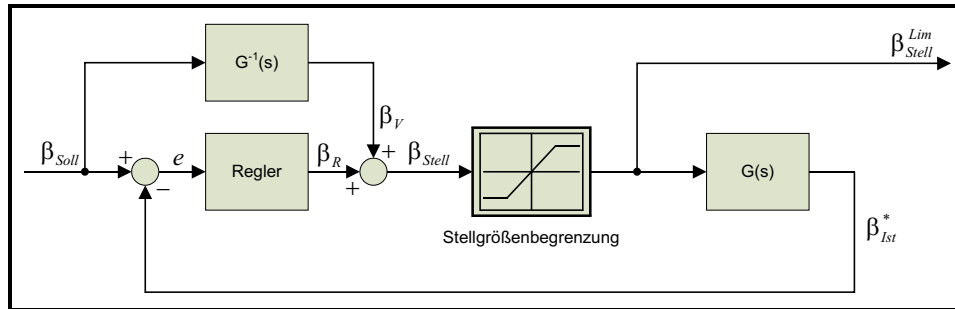


Abbildung 4.8: Prinzipieller Aufbau der Kompensationsregelung

4.4.2 Algorithmus zur Stellgrößenbegrenzung

Eine sehr wichtige Komponente der Kompensationsregelung stellt die Stellgrößenbegrenzung dar. Sie stellt sicher, dass die in Tabelle 2.2 präsentierten physikalischen Limitierungen des Fahrsimulators bezüglich Geschwindigkeit und Beschleunigung nicht überschritten werden. Werden diese Grenzen während einer Simulationsfahrt überschritten so wird die Simulation unterbrochen und der Simulator fährt in die Ausgangsposition zurück. Dieses Verhalten muss unbedingt vermieden werden. Als Problem bei der Stellgrößenlimitierung erweist sich die Integration der Bewegungsgrößen. Da als Führungssignal ein Positionssignal $\beta(t)$ verwendet wird, muss um eine Begrenzung der Geschwindigkeit $\dot{\beta}(t)$ zu ermöglichen einmal differenziert und um die Beschleunigung $\ddot{\beta}(t)$ zu limitieren sogar zweimal differenziert werden. Um am Ausgang des Stellgrößenbegrenzers wiederum ein Positionssignal $\beta^*(t)$ zu erhalten muss zweimal integriert werden, was zu Abweichungen im Ausgangssignal führt. Die Entstehung dieses abweichenden Ausgangssignals ist in der folgenden Herleitung beschrieben. Durch die zweifache Integration entsteht ein linearer Anteil $C_0 t$ mit $C_0 \neq 0$, was zu einer Überlagerung des realen Ausgangssignals mit einer linearen Funktion führt und somit das nicht gewünschte Ausgangssignal erzeugt.

$$\dot{\beta}(t) = \frac{d\beta}{dt}$$

$$\ddot{\beta}(t) = \frac{d^2\beta}{dt^2}$$

Mit der Stellgrößenbegrenzung wird die Geschwindigkeit $\dot{\beta}(t)$ und die Beschleunigung $\ddot{\beta}(t)$ auf die maximal zulässigen Werte $\pm\dot{\beta}_{max}$ und $\pm\ddot{\beta}_{max}$ limitiert.

$$\dot{\beta}_{Lim}(t) = \begin{cases} \dot{\beta}(t) & \text{für } |\dot{\beta}(t)| \leq \dot{\beta}_{max} \\ \dot{\beta}_{max} & \text{für } \dot{\beta} > \dot{\beta}_{max} \\ -\dot{\beta}_{max} & \text{für } \dot{\beta} < -\dot{\beta}_{max} \end{cases}$$

$$\ddot{\beta}_{Lim}(t) = \begin{cases} \ddot{\beta}(t) & \text{für } |\ddot{\beta}(t)| \leq \ddot{\beta}_{max} \\ \ddot{\beta}_{max} & \text{für } \ddot{\beta} > \ddot{\beta}_{max} \\ -\ddot{\beta}_{max} & \text{für } \ddot{\beta} < -\ddot{\beta}_{max} \end{cases}$$

Durch die nun folgende zweifache Intergration entsteht der lineare Signalanteil C_0t mit $C_0 \neq 0$ der sich mit dem realen Ausgangssignal überlagert und so das nicht gewünschte Ausgangssignal $\beta^*(t)$ erzeugt.

$$\dot{\beta}^*(t) = \int \ddot{\beta}_{Lim}(t) dt = \dot{\beta}_{Lim}(t) + C_0$$

$$\beta^*(t) = \int (\dot{\beta}_{Lim}(t) + C_0) dt = \beta_{Lim}(t) + C_0t + C_1$$

Zur Vermeidung dieser Integrationseffekte wurde im Folgenden ein von Hippe präsentierter Ansatz gewählt [Hip07]. Um für ein Positionssignal die Geschwindigkeit zu begrenzen wird bei dieser Methode ein PT_1 -Glied in Regelungsnormalform verwendet und ein nichtlineares Begrenzungsglied zur Limitierung der Geschwindigkeiten eingefügt. Dieser Ansatz wurde hier auf ein PT_2 -Glied erweitert um sowohl die Geschwindigkeit als auch die Beschleunigung begrenzen zu können. Die dabei entstehende Kaskadenregelung wird im Folgenden untersucht. Der Wirkungsplan dieser Regelung ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Der entstehende Kaskadenregelkreis enthält zwei nichtlineare Elemente in Form von Begrenzungsgliedern. Deshalb wird eine Betrachtung des Stellgrößenbegrenzers im linearen Bereich und im nichtlinearen Bereich durchgeführt. Der Definitionsbereich der beiden Arbeitsbereiche ist der Gleichung 4.8 zu entnehmen. Der lineare Bereich repräsentiert den Hauptarbeitsbereich des Stellgrößenzensors. Es ist jedoch möglich, dass bei extremen Fahrmanövern im Simulator sehr kurzzeitig Signale hoher Amplitude auftreten die ein Ansprechen der nichtlinearen Begrenzungsglieder verursachen können. Aus diesem Grund wird auch eine nichtlineare Betrachtung des Stellgrößenbegrenzers durchgeführt um eventuell durch die Nichtlinearitäten verursachte Dauerschwingungen auszuschliessen. Die Grenzwerte der nichtlinearen Begrenzungsglieder für die translatorischen und rotatorischen Geschwindigkeiten sowie Beschleunigungen sind der Tabelle 2.2 der physikalischen Limitierungen des Simulators entnommen und in den Gleichungen 4.9 nochmal explizit dargestellt.

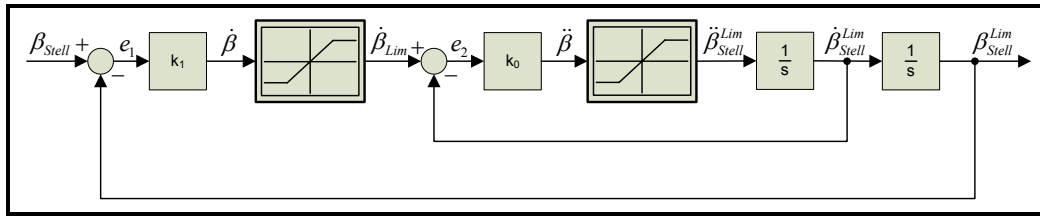


Abbildung 4.9: Wirkungsplandarstellung des Stellgrößenbegrenzers

$$\text{Arbeitsbereich} = \begin{cases} \text{linearer Bereich} & \begin{cases} \text{für } |\dot{\beta}(t)| \leq \dot{\beta}_{max} \\ \text{für } |\ddot{\beta}(t)| \leq \ddot{\beta}_{max} \end{cases} \\ \text{nichtlinearer Bereich} & \begin{cases} \text{für } |\dot{\beta}(t)| > \dot{\beta}_{max} \\ \text{für } |\ddot{\beta}(t)| > \ddot{\beta}_{max} \end{cases} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$\dot{s}_{max} = \left[-2 \frac{m}{s}, 2 \frac{m}{s}\right], \text{ gilt für Bewegungen in x- und y-Richtung}$$

$$\dot{s}_{max} = \left[-1 \frac{m}{s}, 1 \frac{m}{s}\right], \text{ gilt für Bewegungen in z-Richtung}$$

$$\ddot{s}_{max} = \left[-10 \frac{m}{s^2}, 10 \frac{m}{s^2}\right]$$

$$\dot{\beta}_{max} = \left[-50 \frac{\circ}{s}, 50 \frac{\circ}{s}\right]$$

$$\ddot{\beta}_{max} = \left[-250 \frac{\circ}{s^2}, 250 \frac{\circ}{s^2}\right] \quad (4.9)$$

Betrachtung des Stellgrößenbegrenzers im linearen Bereich

Betrachtet man den Stellgrößenbegrenzer im linearen Arbeitsbereich so wirkt er als reines PT_2 -Glied. Die sich daraus ergebende lineare Führungsübertragungsfunktion $G_{Lim}(s)$ ist in Gleichung 4.10 dargestellt. Da der Stellgrößenbegrenzer ein PT_2 -Glied und somit ein harmonischer Oszillator ist gibt es keine bleibende Regelabweichung bei Führungssignalsprüngen und die Stabilität ist für $k_0 > 0$ und $k_1 > 0$ im gesamten Frequenzbereich sichergestellt. Mit den Faktoren k_0 und k_1 kann das Übertragungsverhalten von $G_{Lim}(s)$ über den Dämpfungsfaktor δ und die Eigenfrequenz ω_0 beeinflusst werden. Die Übertragungsfunktion des allgemeinen harmonischen Oszillators $G_{Oszi}(s)$ ist in Gleichung 4.11 dargestellt.

$$G_{Lim}(s) = \frac{k_0 k_1}{s^2 + k_0 s + k_0 k_1} \quad (4.10)$$

$$G_{Oszi}(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\delta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (4.11)$$

Durch einen Koeffizientenvergleich der Übertragungsfunktionen in den Gleichungen 4.10 und 4.11 können der Dämpfungsfaktor δ und die Eigenfrequenz ω_0 bestimmt werden (vgl. Gleichungen 4.12). Bei Wahl eines festen Dämpfungsfaktors δ kann der Koeffizient k_0 in Abhängigkeit des Koeffizienten k_1 nach der Gleichung 4.13 bestimmt werden.

$$\begin{aligned} \omega_0^2 &= k_0 k_1 \\ \delta &= \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k_0}{k_1}} \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\implies k_0 = 4\delta^2 k_1 \quad (4.13)$$

Die Pole des Stellgrößenbegrenzers können durch Lösung der Gleichung 4.14 ermittelt werden und sind in der Gleichung 4.15 dargestellt.

$$s^2 + k_0 s + k_0 k_1 = 0 \quad (4.14)$$

$$s_{1,2}^\infty = -\frac{k_0}{2} \pm \sqrt{\frac{k_0(k_0 - 4k_1)}{4}} \quad (4.15)$$

Ziel ist es den Stellgrößenbegrenzer so zu dimensionieren, dass bei einem Führungssignalsprung kein Überschwingen im Ausgangssignal der Stellgrößenbegrenzung auftritt. Dies bedeutet, dass der Dämpfungsfaktor $\delta \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$ sein muss (vgl. [Lun04]). Weiterhin sollen Signalanteile bis zu einer Frequenz $f = 1.5 \text{ Hz}$ ohne Amplitudendämpfung präsentiert werden, da dies wie von Reymond et al. beschrieben den für Autofahrten relevanten Frequenzbereich repräsentiert (vgl. [Rey00]). Die mit diesen Anforderungen für den Stellgrößenbegrenzer ermittelten Parameter sind $k_0 = 64$ und $k_1 = 8$. Der Dämpfungsfaktor liegt in diesem Fall bei $\delta = \sqrt{2}$ und erfüllt die Bedingung $\delta \geq \frac{1}{\sqrt{2}}$. Die Pole des Systems werden mit der Gleichung 4.15 ermittelt und

ergeben sich zu $s_1^\infty = -9.373$ und $s_2^\infty = -54.627$. Der in der komplexen Ebene am weitesten rechts liegende Pol des Stellgrößenbegrenzers s_1^∞ entspricht der Frequenz ab der eine Amplitudendämpfung im Ausgangssignal β_{Stell}^{Lim} auftritt. Diese ergibt sich zu $f = \frac{9.373 \frac{rad}{s}}{2\pi} = 1.5 \text{ Hz}$ und entspricht somit dem geforderten Frequenzbereich. Im Folgenden wird das Verhalten der Stellgrößenbegrenzung im nichtlinearen Bereich betrachtet. Abschließend erfolgt ein Test des Algorithmus zur Stellgrößenbegrenzung.

Betrachtung des Stellgrößenbegrenzers im nichtlinearen Bereich

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine Betrachtung der Stellgrößenbegrenzung unter Berücksichtigung der nichtlinearen Begrenzungsglieder. Die Untersuchung wird für die rotatorische Simulatorbewegung durchgeführt. Die so ermittelten Ergebnisse sind auf die translatorischen Simulatorbewegungen übertragbar, da sich die beiden Fälle ausschliesslich in den Grenzwerten der Begrenzungsglieder unterscheiden. Es wird gezeigt, dass bei Verwendung der im vorigen Abschnitt ermittelten Parameter $k_0 = 64$ und $k_1 = 8$ keine instabilen Dauerschwingungen im Ausgangssignal β_{Stell}^{Lim} der Stellgrößenbegrenzung auftreten. Zur nichtlinearen Untersuchung des Stellgrößenbegrenzers wird die Methode der Harmonischen Balance verwendet (vgl. [Rei06b]). Mit dieser Methode kann näherungsweise ermittelt werden, ob der in Abbildung 4.10 dargestellte nichtlineare Standard-Regelkreis mit $w(t) = 0$ zu Dauerschwingungen fähig ist oder nicht. Im nichtlinearen Standard-Regelkreis erfolgt eine Aufspaltung der Übertragungsglieder in einen nichtlinearen statischen und einen linearen dynamischen Teil $G(s)$. Der nichtlineare statische Teil $f(e, \dot{e})$ wird dabei näherungsweise durch einen statischen Verstärkungsfaktor in Form der Beschreibungsfunktion $N(A, \omega)$ beschrieben (vgl. Abbildung 4.10). Dauerschwingungen sind grundsätzlich dann möglich, wenn die in Gleichung der Harmonischen Balance

$$G(j\omega) = -\frac{1}{N(A, \omega)}$$

erfüllt ist. Im Folgenden soll diese Gleichung mit dem Zwei-Ortskurven-Verfahren gelöst werden. Besitzen die Ortskurven der negativ inversen Beschreibungsfunktion $-\frac{1}{N(A)}$ und der linearen Übertragungsfunktion $G(s)$ gemeinsame Schnittpunkte so sind Dauerschwingungen für $w(t) = 0$ möglich. Da die Methode der harmonischen Balance nur eine näherungsweise Betrachtung des nichtlinearen Regelkreises für $w(t) = 0$ liefert, werden zusätzlich die Zustandsverläufe für $w(t) \neq 0$ untersucht.

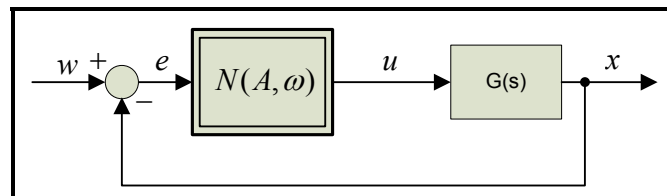


Abbildung 4.10: Nichtlinearer Standard-Regelkreis mit näherungsweise Beschreibung der Nichtlinearität durch die Beschreibungsfunktion $N(A, \omega)$

Zur Anwendung der Methode der Harmonischen Balance auf die Stellgrößenbegrenzung wird folgendes zu Grunde gelegt. Die beiden nichtlinearen Begrenzungsglieder des Stellgrößenbegrenzers sind nie gleichzeitig im nichtlinearen Bereich, da ein Begrenzungsglied die Geschwindigkeit begrenzt und das andere die Beschleunigung. Dies schliesst aus, dass beide Glieder gleichzeitig im nichtlinearen Bereich wirken. Ist das Begrenzungsglied der Geschwindigkeitskomponente im maximal zulässigen Stellgrößenbereich ist die Geschwindigkeit konstant und die Beschleunigung somit Null. Ist das Begrenzungsglied der Beschleunigung in der Begrenzung und die Geschwindigkeitsbegrenzung tritt ebenfalls in den nichtlinearen Bereich ein, so wird die Beschleunigung aufgrund der konstanten Geschwindigkeit zu Null und es arbeitet wiederum nur ein Begrenzungsglied in nichtlinearen Bereich. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 4.11 grafisch verdeutlicht.

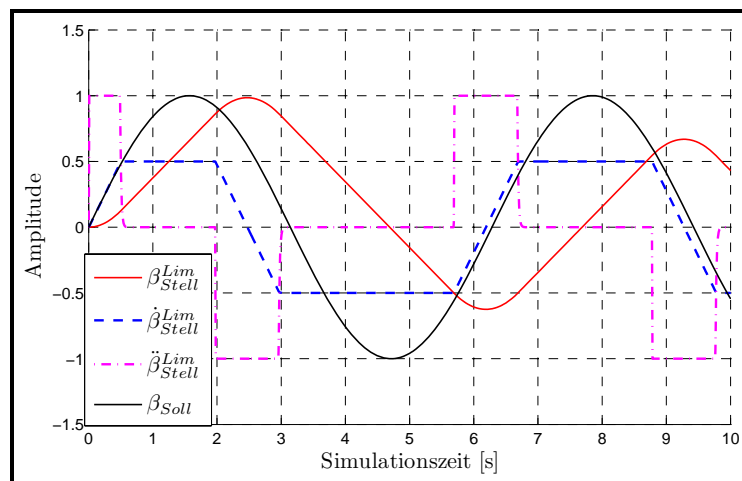


Abbildung 4.11: Verhalten der Nichtlinearitäten des Stellgrößenbegrenzers

Aufgrund des in Abbildung 4.11 aufgezeigten Verhaltens des Stellgrößenbegrenzers wird die Methode der Harmonischen Balance wie folgt durchgeführt. Zu Beginn wird der innere Regelkreis des in Abbildung 4.9 dargestellten Stellgrößenbegrenzers betrachtet und auf Dauerschwingungen untersucht. Dieser ist im nichtlinearen Bereich, wenn der Beschleunigungsbegrenzer aktiv ist. Ist der Geschwindigkeitsbegrenzer aktiv wird der innere Regelkreis als lineares PT_1 -Glied betrachtet. Der für die Harmonische Balance betrachtete Regelkreis bei Wirkung des Beschleunigungsbegrenzers ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Mit dem Zwei-Ortskurvenverfahren wird der Regelkreis auf Dauerschwingungen untersucht. Die Übertragungsfunktion $G_{Lin_1}(s)$ und die Beschreibungsfunktion der Nichtlinearität $N(A)$ sind in den Gleichungen 4.16 für die rotatorischen und translatorischen Geschwindigkeiten unter Berücksichtigung der in den Gleichungen 4.9 vorgestellten Maximalwerte aufgeführt. Die resultierenden Ortskurven sind in 4.13 dargestellt.

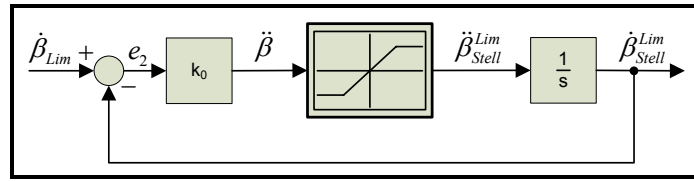


Abbildung 4.12: Innerer Regelkreis für Harmonische Balance

$$G_{Lin_1}(s) = \frac{1}{s}$$

$$N(A) = \begin{cases} 1 & \text{für } A \leq a \\ \frac{2}{\pi} \left(\arcsin \frac{a}{A} + \frac{a}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{a}{A}\right)^2} \right) & \text{für } A > a \end{cases} \quad (4.16)$$

$$a = \begin{cases} \ddot{\beta}_{max} & \text{bei Betrachtung der rotatorischen Simulatorbewegung} \\ \ddot{s}_{max} & \text{bei Betrachtung der translatorischen Simulatorbewegung} \end{cases}$$

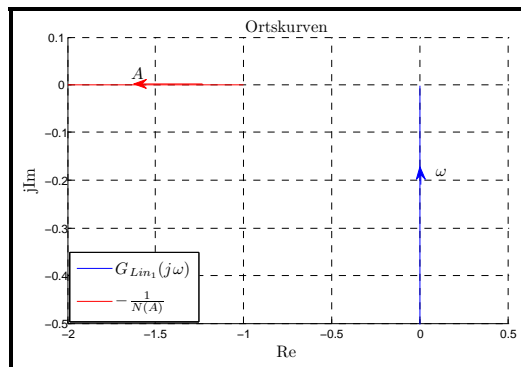


Abbildung 4.13: Zwei-Ortskurven-Verfahren für inneren Regelkreis

Da es zwischen den beiden in Abbildung 4.13 dargestellten Ortskurven keine Schnittpunkte gibt kann man hoffen, dass im Regelkreis keine Dauerschwingungen auftreten. Um instabile Dauerschwingungen bei einem Eingangssignal ungleich Null auszuschliessen sind in Anhang B.2.1 in den Abbildungen B.1 bis B.4 die Zustandsverläufe $\dot{\beta}_{Stell}^{Lim}$ und \dot{s}_{Stell}^{Lim} in Abhängigkeit der Simulationszeit für die Eingangssignale Sprungfunktion und Sinus-Sweep Funktion dargestellt. Die verwendeten maximalen Amplituden der Eingangssignale entsprechen den maximal zulässigen physikalischen Grenzwerten des Simulators nach Tabelle 2.2. Darin ist erkennbar, dass im inneren Regelkreis der Stellgrößenbegrenzung bei periodischem Eingangssignal keine instabilen Dauerschwingungen auftreten.

Erreicht nun der Geschwindigkeitsbegrenzer seine Limitierung ist sichergestellt, dass der innere Regelkreis im linearen Bereich arbeitet. Somit wird der Regelkreis nach Abbildung 4.14 mit dem Zwei-Ortskurven-Verfahren untersucht. Die aus der linearen Übertragungsfunktion $G_{Lin_2}(s)$ und der Beschreibungsfunktion $N(A)$ resultierenden Ortskurven sind in 4.15 dargestellt.

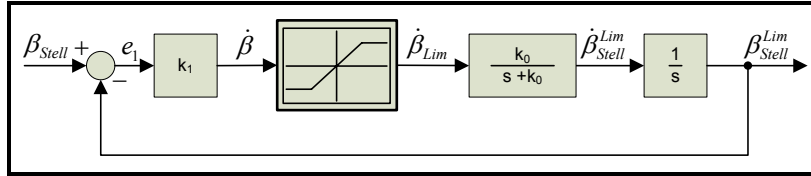


Abbildung 4.14: Äusserer Regelkreis für Harmonische Balance

$$G_{Lin_2}(s) = \frac{k_0}{s^2 + k_0 s} \tag{4.17}$$

$$a = \begin{cases} \dot{\beta}_{max} & \text{bei Betrachtung der rotatorischen Simulatorbewegung} \\ \dot{s}_{max} & \text{bei Betrachtung der translatorischen Simulatorbewegung} \end{cases}$$

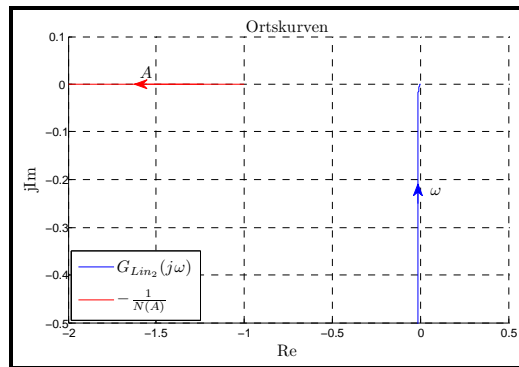


Abbildung 4.15: Äusserer Regelkreis für Harmonische Balance

Die Untersuchung des Stellgrößenbegrenzers bei Erreichen der Geschwindigkeitsbegrenzung mit dem Zwei-Ortskurven-Verfahren zeigt, dass keine Schnittpunkte zwischen den Ortskurven vorliegen (vgl. Abbildung 4.15). Somit kann vermutet werden, dass auch für den äusseren Regelkreis keine Dauerschwingungen auftreten. Auch hier werden zur Untersuchung auf instabile Dauerschwingungen bei einem von Null verschiedenen Eingangssignal die Zustandsverläufe untersucht. Da ein lineares System zweiter Ordnung vorliegt erfolgt die Betrachtung der Zustandsverläufe in der Phasenebene. Die zugehörigen Diagramme sind in Anhang B.2.1 in den Abbildungen B.5 bis B.8 dargestellt. In diesen Diagrammen ist erkennbar, dass bei periodischen Eingangssignalen ausschließlich stabile Dauerschwingungen entstehen. Somit können für den Algorithmus zur Stellgrößenbegrenzung instabile Dauerschwingungen im nichtlinearen Arbeitsbereich sowohl für die translatorische Begrenzung der Simulatorbewegung als auch für die rotatorische Simulatorbewegung ausgeschlossen werden.

Test der Stellgrößenbegrenzung

Nachdem in den vorigen Abschnitten die Stabilität der Stellgrößenbegrenzung im linearen und im nichtlinearen Bereich nachgewiesen wurde erfolgt nun ein Abschlusstest des Algorithmus. Dazu fungiert als Testsignal ein Positionssprung der Sprunghöhe eins. In Abbildung 4.16 sind die Diagramme der rotatorischen und translatorischen Positions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungskomponenten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die einzelnen Komponenten wie gefordert auf den jeweils vorgegebenen Maximalwert für Geschwindigkeit und Beschleunigung limitiert werden. Im Folgenden soll der Algorithmus der Stellgrößenbegrenzung in die Kompensationsregelung integriert werden und die Untersuchung sowie der Reglerentwurf für den Kompensationsalgorithmus durchgeführt werden.

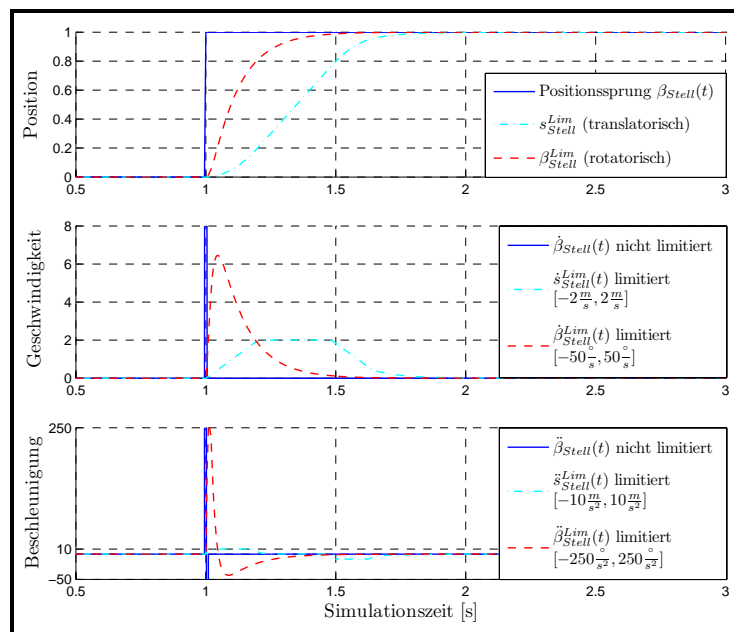


Abbildung 4.16: Test des Stellgrößenbegrenzers mit einem Positionssprung $\beta_{Stell}(t)$

4.4.3 Untersuchung und Auslegung der Kompensationsregelung

Im folgenden Abschnitt soll ein Regler für die Kompensationsregelung gefunden werden und der resultierende Regelkreis bezüglich Stabilität und stationärer Regelgenauigkeit gegenüber sprungförmigen Änderungen des Führungssignals untersucht werden. Im vorigen Abschnitt wurde gezeigt, dass der Algorithmus zur Stellgrößenbegrenzung in keinem Fall instabiles Verhalten aufweist. Deshalb kann bei Stabilität des Kompensationsregelkreises im linearen Arbeitsbereich auch die Stabilität bei Eintreten der Stellgrößenbegrenzungen in den nichtlinearen Arbeitsbereich sichergestellt werden. Der Hauptarbeitsbereich der Regelung ist der lineare Bereich. Bei Signalen mit kurzzeitig hoher Amplitude wie sie teilweise in der Simulatorsteuerung auftreten arbeiten die nichtlinearen Elemente der Stellgrößenbegrenzung nur sehr kurzzeitig im nichtlinearen Bereich. Deshalb wird der Regelkreis zur Kompensation der Simulatorendynamik ausschließlich im linearen Arbeitsbereich untersucht. Der Reglerentwurf des geschlossenen Kreises wird am Bode-Diagramm der offenen Kette durchgeführt. Der Wirkungsplan der offenen Kette der Kompensationsregelung ist in Abbildung 4.17 dargestellt. Der darin auftretende Regler $K_R(s)$ soll im folgenden ausgelegt werden.

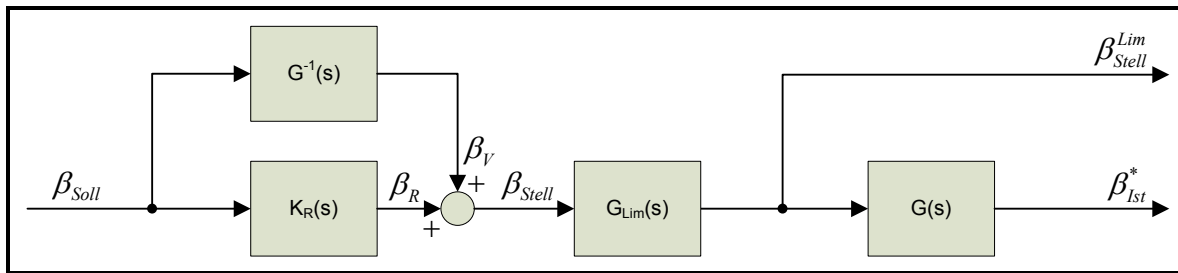


Abbildung 4.17: Wirkungsplandarstellung des offenen Kreises der Kompensationsregelung

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \frac{1}{0.02s^2 + 0.4s + 1} \\
 G^{-1}(s) &= 0.02s^2 + 0.4s + 1 \\
 G_{Lim}(s) &= \frac{1}{\frac{s^2}{512} + \frac{s}{8} + 1} \tag{4.18}
 \end{aligned}$$

Die Anforderungen an den geschlossenen Kreis der Kompensationsregelung sind gutes Folgerverhalten, BIBO²-Stabilität, keine bleibende Regelabweichung bei Führungssignalsprüngen sowie keinerlei Überschwingen des Ausgangssignals β_{Ist}^* . Weiterhin soll es möglich sein Signalfrequenzen bis ca. 1.5 Hz ohne Amplitudendämpfung mit dem Simulator zu präsentieren.

²bounded-input, bounded-output

Dies ist der von Reymond et al. ermittelte typische Frequenzbereich für Autofahrten (vgl. [Rey00]). Der Gültigkeitsbereich der linearen Übertragungsfunktion $G(s)$ zur Modellierung der Simulatorträgheit liegt zwischen $0 - 2 \text{ Hz}$. Es soll sichergestellt werden, dass Frequenzanteile ausserhalb dieses Bereichs ausreichend gedämpft dargestellt werden. Um dies für den Stellgrößenbegrenzer sicherzustellen wurden die Pole wie im vorigen Abschnitt bereits erläutert für einen Dämpfungsfaktor $\delta = \sqrt{2}$ ausgelegt. Für die Festlegung $k_0 = 64$ und $k_1 = 8$ entstehen zwei negative Reelle Polstellen und es ergibt sich die Übertragungsfunktion von $G_{Lim}(s)$ in Gleichung 4.18. Der Einfluss des linken der beiden Pole auf den niederen Frequenzbereich ist somit gering (vgl. Abbildung 4.18). Der Reglerentwurf am Bode Diagramm der offenen Kette erfolgt ohne Berücksichtigung des Inversen Modells $G^{-1}(s)$, da der Vorsteuerpfad keinen Einfluss auf die Stabilität sondern nur auf das Führungsverhalten des Regelkreises hat (vgl. [Rei06a]). Damit ergibt sich die Übertragungsfunktion der offenen Kette $G_{OL}(s)$ zu der in Gleichung 4.19 präsentierten Form. Die Polstellen der offenen Kette sind im Pol-Nullstellenplan in Abbildung 4.18 dargestellt. Das Bode-Diagramm des offenen Kreises ist in Abbildung 4.19 abgebildet.

$$\begin{aligned} \frac{\beta_{Ist}}{\beta_{Soll}} = G_{OL}(s) &= K_R(s) \cdot G_{Lim}(s) \cdot G(s) \\ &= \frac{K_R(s)}{3.906 \cdot 10^{-5} s^4 + 0.0033 s^3 + 0.072 s^2 + 0.525 s + 1} \\ &= \frac{K_R(s)}{(s + 2.929)(s + 9.373)(s + 17.071)(s + 54.627)} \end{aligned} \tag{4.19}$$

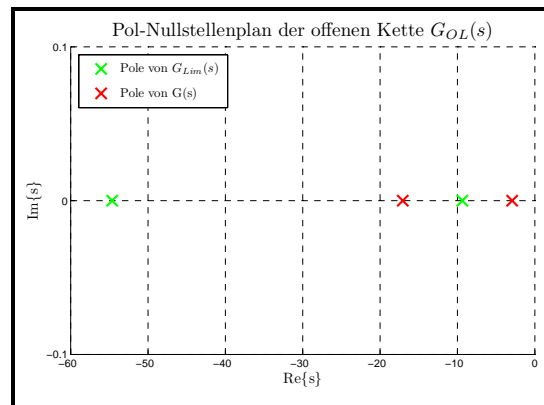


Abbildung 4.18: Pol-Nullstellenplan der offenen Kette

Im Bode-Diagramm der offenen Kette in Abbildung 4.19 wird die Vorgehensweise zur Reglerfindung grafisch erläutert. Es soll bewusst auf den Einsatz von I-Anteilen im Regler verzichtet werden. Dies führt wie später gezeigt zu einer statischen Regelabweichung. Mit dem Einsatz der Vorsteuerung wird diese Abweichung jedoch beseitigt. Der Vorteil des Reglers ohne I-Anteil liegt darin, dass die Dynamik des Regelkreises zunimmt. Das Ziel die Phasendrehung über den festen Frequenzbereich $0 - 1.5 \text{ Hz}$ so gering wie möglich zu halten wäre bei der

Verwendung eines I-Anteils nicht möglich, da an diesen eine Phasendrehung von -90° bereits bei 0 Hz gekoppelt ist. Für $K_R = 1$ kann man erkennen, dass die 3dB-Knickfrequenz im Bode Diagramm bei $\omega_1 = 2.93 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ liegt. Dies entspricht einer Frequenz von $f = 0.47\text{ Hz}$, was nicht der gewünschten Vorgabe von mindestens 1.5 Hz entspricht. Alle Signalanteile die oberhalb dieser Frequenz liegen werden mit gedämpfter Amplitude am Ausgang der offenen Kette dargestellt. Um die Knickfrequenz in höhere Frequenzbereiche zu verschieben wurde als Regler ein PD-Regler mit $K_R(s) = (1 + \frac{s}{2.93})$ zur Kompensation dieser Polstelle eingesetzt. Dadurch liegt die neue Knickfrequenz bei $\omega_2 = 9.37 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$, was etwa einer Frequenz von $f = 1.5\text{ Hz}$ entspricht und somit die Vorgaben erfüllt. Im folgenden Schritt wird die Stabilität untersucht. Betrachtet man die Phasenreserve Φ_{R1} der offenen Kette so kann man dem Bode Diagramm entnehmen, dass die Phasenreserve größer Null ist und damit wie von Lunze beschrieben Stabilität sichergestellt ist (vgl. [Lun04]). Allerdings muss die Phasenreserve $\Phi_R \geq 70^\circ$ sein um ein überschwingfreies Ausgangsverhalten des geschlossenen Kreises zu gewährleisten. Um dies sicherzustellen wurde der P-Anteil des PD-Reglers reduziert, so dass $K_R(s) = 0.7(1 + \frac{s}{2.93})$ gilt. Damit ergibt sich ein $\Phi_{R2} \approx 80^\circ$ und die Forderung nach Stabilität ohne Überschwingen des Ausgangssignals ist erfüllt. Da die Vorsteuerung auf die Stabilität des Regelkreises keinen Einfluss hat werden mit dem in Gleichung 4.20 präsentierten Regler abgesehen von der Forderung nach stationärer Genauigkeit bei Führungssignalsprüngen alle Forderungen an den geschlossenen Kreis erfüllt. Die Forderung nach stationärer Genauigkeit wird im Folgenden untersucht.

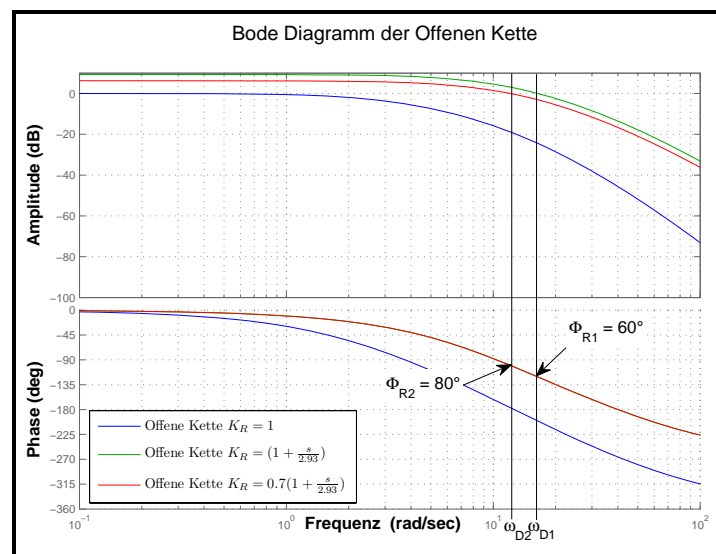


Abbildung 4.19: Bode-Diagramm der offenen Kette

$$K_R(s) = 0.7\left(1 + \frac{s}{2.93}\right) \quad (4.20)$$

Im Folgenden soll gezeigt werden, dass die Vorsteuerung bei Verwendung des Reglers nach Gleichung 4.20 eine wichtige Komponente zur Sicherstellung der stationären Genauigkeit bei Führungssignalsprüngen ist. Die Führungsübertragungsfunktionen des geschlossenen Kreises

ohne Berücksichtigung der Vorsteuerung $G_{CL}(s)$ und mit Berücksichtigung der Vorsteuerung $G_{CL,VS}(s)$ werden in den Gleichungen 4.21 und 4.22 präsentiert. Unter Nutzung dieser beiden Übertragungsfunktionen werden die stationären Endwerte s_{Ist_∞} nach einer sprunghöhenförmigen Änderung des Führungssignals mit der Sprunghöhe eins nach Gleichung 4.23 bestimmt.

$$G_{CL}(s) = \frac{0.239s + 0.7}{3.906 \cdot 10^{-5}s^4 + 0.0033s^3 + 0.042s^2 + 0.818s + 1.7} \quad (4.21)$$

$$G_{CL,VS}(s) = \frac{0.02s^2 + 0.639s + 1.7}{3.906 \cdot 10^{-5}s^4 + 0.0033s^3 + 0.042s^2 + 0.818s + 1.7} \quad (4.22)$$

$$s_{Ist_\infty} = \lim_{s \rightarrow 0} \left[s G_{CL,x}(s) \frac{1}{s} \right] = G_{CL,x}(0) \quad (4.23)$$

Verwendet man die Gleichung 4.23 ergeben sich die stationären Endwerte des geschlossenen Regelkreises ohne Vorsteuerung zu $G_{CL}(0) = 0.412$ und mit Vorsteuerung zu $G_{CL,VS}(0) = 1$. Das bedeutet, dass bei Verwendung der Kompensationsregelung mit dem ermittelten Regler $K_R(s)$ und ohne den Vorsteuerpfad eine bleibende Regelabweichung bei einem Führungssignalsprung auftritt. Setzt man zusätzlich zum Regler $K_R(s)$ die Vorsteuerung ein so ist die stationäre Genauigkeit der Regelung bei Führungssignalsprüngen gewährleistet. Damit ist mit der Vorsteuerung auch die letzte noch offene Forderung an den geschlossenen Regelkreis erfüllt. Das zur Übertragungsfunktion $G_{CL,VS}(s)$ gehörende Bode-Diagramm ist in Abbildung 4.21 dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass im Bereich zwischen $10 \frac{rad}{s}$ und $20 \frac{rad}{s}$ eine Resonanzüberhöhung auftritt deren Einfluss durch das Einführen eines Vorfilters abgeschwächt werden soll. Die Resonanzüberhöhung wird durch das konjugiert komplexe Polpaar im Pol-Nullstellenplan des geschlossenen Kreises in Abbildung 4.20 verursacht. Als Vorfilter wird ein Tiefpassfilter 1.Ordnung mit

$$F(s) = \frac{1}{\frac{s}{10} + 1}$$

eingesetzt. Dieser dämpft die hochfrequenten Signalanteile im Eingangssignal β_{Soll} ab. Er wurde so dimensioniert, dass seine Knickfrequenz etwa bei 1.5 Hz liegt. Im Bode-Diagramm in Abbildung 4.21 ist das Abschwächen der Resonanzüberhöhung bei der Verwendung des Vorfilters ersichtlich. Die Dämpfung der Resonanzüberhöhung durch den Vorfilter verursacht im Phasendiagramm des Bode-Diagramms eine Phasendrehung von -90° . Diese Phasendrehung ist zwar nicht wünschenswert, jedoch muss sie zur Vermeidung der durch die Resonanzüberhöhung verursachten negativen Effekte in Kauf genommen werden. Nach Abschluss der Auslegung der Kompensationsregelung befasst sich der folgende Abschnitt mit dem ausführlichen Test des Kompensationsalgorithmus.

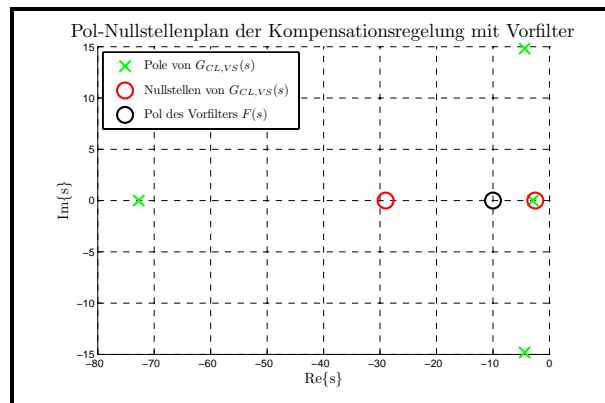


Abbildung 4.20: Pol-Nullstellenplan der Kompensationsregelung

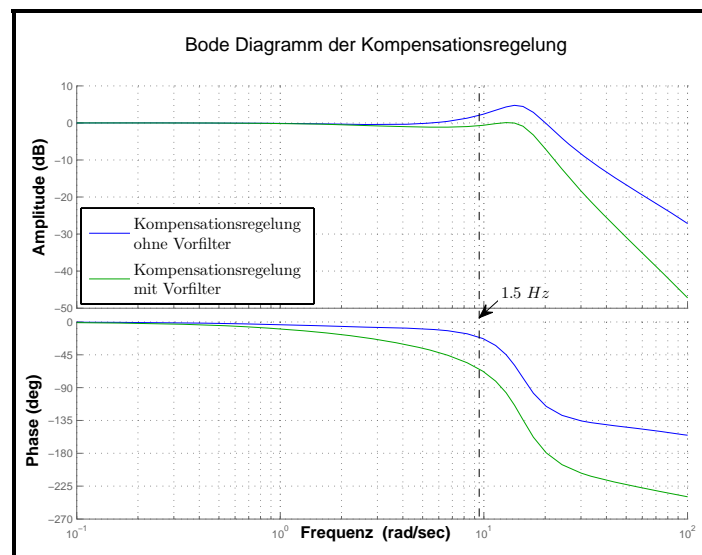


Abbildung 4.21: Bode-Diagramm der Kompensationsregelung

4.4.4 Test der Kompensationsregelung

Der abschließende Aufbau der Kompensationsregelung ist als Wirkungsplandarstellung in Abbildung 4.22 dargestellt. Um die Kompensationsregelung zu testen wurden zwei Testszenarien untersucht. Es wurden Offline-Tests der Regelung durchgeführt und Online-Tests im Fahr Simulator. Diese Verfahren werden im Weiteren erläutert. Die Testversuche wurden so durchgeführt, dass die Kompensationsregelung zu Beginn nur bezüglich eines Freiheitsgrades untersucht wird. Dabei werden als Testsignale der Einheitssprung, ein Sinussignal mit der Frequenz $f = 1 \text{ Hz}$ und die Positionsdaten einer im Fahr Simulator aufgezeichneten Beschleunigungstrajektorie verwendet. Die Versuche wurden einmal mit dem Stellgrößenbegrenzer für translatorische und einmal mit dem Stellgrößenbegrenzer für rotatorische Bewegungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind im Anhang B.2.2 in den Abbildungen B.9 bis B.14 dargestellt. Anschließend wird die Kompensationsregelung in den Motion-Cueing-Algorithmus integriert. Dazu werden alle 6 Freiheitsgrade $(x, y, z, \phi, \theta, \psi)$ am Ausgang des MCA mit einem Regelkreis versehen. Der Vergleich der Motion-Cueing-Algorithmen mit und ohne Kompensationsregelung ist im Folgenden für zwei mit dem Simulator nachgebildete Trajektorien dargestellt. Zum Vergleich werden die aktuell gemessenen Ist-Zylinderpositionen die bei Verwendung des jeweiligen MCA gemessen werden gegenübergestellt. Als erste Testtrajektorie fungiert eine Beschleunigungstrajektorie bei der das Fahrzeug aus dem Stand bis auf $80 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ beschleunigt und abschließend mit einer Vollbremsung wieder bis zum Stillstand abgebremst wird. Die zweite Trajektorie ist eine Kurvenstrecke. Dazu wird anfangs eine S-Kurve mit einem großen Radius durchfahren und abschließend eine hochfrequente Sinus-Sweep Funktion simuliert. Die Testergebnisse sind in den Diagrammen in Anhang B.2.2 in den Abbildungen B.15 und B.16 jeweils für alle 6 Zylinder dargestellt. Der zum Test verwendete MCA ist der FTC (vgl. Abbildung 2.3).

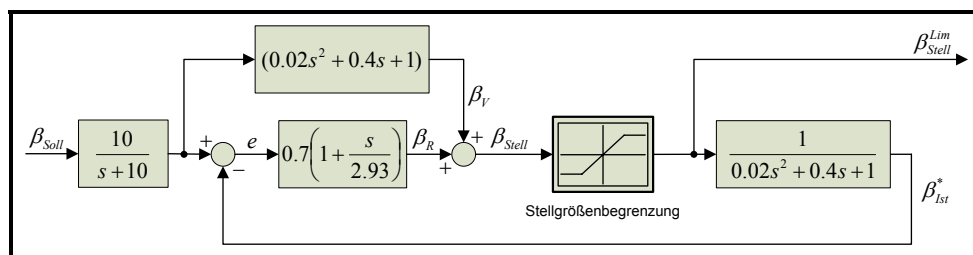


Abbildung 4.22: Wirkungsplandarstellung der Kompensationsregelung

Aus den Testergebnissen geht hervor, dass bei Einsatz der Kompensationsregelung der Einfluss der Simulardynamik erheblich minimiert werden kann. Die durch die Dynamik des Simulators verursachte Latenzzeit von $300 - 500 \text{ ms}$ konnte mit der Kompensationsregelung im Frequenzbereich bis 1.5 Hz um $100 - 250 \text{ ms}$ minimiert werden. Die ebenfalls durch die Trägheit des Simulators verursachte Amplitudendämpfung konnte ebenfalls erheblich minimiert werden. Um die positive Wirkung der Kompensationsregelung auf die Darstellung der Beschleunigungen im Fahr Simulator zu validieren sind zukünftig ausgiebige Probandentests erforderlich.

Kapitel 5

Objektive Bewertung der Güte von Motion-Cueing-Algorithmen

5.1 Einführung

Beim Motion-Cueing besteht das Ziel darin reale Fahrzeugbewegungen mit einem Fahrsimulator so genau wie möglich nachzubilden. Zur Nachbildung der realen Beschleunigungen wird ein Motion-Cueing-Algorithmus zur Umrechnung der realen Fahrzeugbewegungen in den Simulatorarbeitsraum verwendet. Um die Genauigkeit der Beschleunigungsnachbildung für verschiedene Motion-Cueing-Algorithmen einer objektiven Bewertung unterziehen zu können wird im Folgenden ein Bewertungskriterium vorgestellt. Dieses Kriterium soll es ermöglichen die Güte eines MCA bereits vor dem Einsatz in der Simulatorsteuerung in Offline-Testversuchen zu bewerten. Somit können weniger vielversprechende MCA-Konfigurationen bereits vor dem aufwendigen Test im Fahrsimulator verworfen werden. Ein Kriterium zur objektiven Bewertung der MCA-Performance wird im Weiteren präsentiert.

5.2 Vorstellung des Bewertungskriteriums

5.2.1 Bewertungskriterium von Pouliot et al.

Als Ausgangspunkt für das zu entwickelnde Bewertungskriterium wird ein von Pouliot et al. [Pou98] entwickeltes Bewertungskriterium verwendet. Darin wird eine detailliertere Betrachtung des Motion-Cueing-Fehlers $\underline{\epsilon}_{MC}$ vorgenommen (Vgl. Abbildung 5.1).

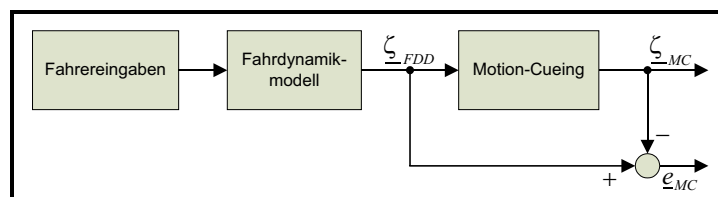


Abbildung 5.1: Wirkungsplandarstellung zur Bestimmung des Motion-Cueing-Fehlers

Dazu werden die Ausgangssignale des Fahrdynamikmodells $\underline{\zeta}_{FDD}$ und die in spezifische Kräfte und Winkelgeschwindigkeiten umgerechneten Ausgangssignale des MCA $\underline{\zeta}_{MC}$ mit $\underline{\zeta} = [f_x, f_y, f_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ miteinander verglichen. Zur objektiven Beschreibung der MCA-Güte wurden von Pouliot et al. zwei Güteindikatoren λ_1 und λ_2 eingeführt. Diese repräsentieren den Fehler bei der Darstellung der Beschleunigungen und der Winkelgeschwindigkeiten im Fahr Simulator λ_1 (Vgl. Gleichung 5.1). In Gleichung 5.2 wird der Fehler in den Ableitungen der beiden Bewegungsgrößen λ_2 durch den Ruck und die Winkelbeschleunigungen beschrieben.

$$\lambda_1 = \underbrace{\frac{100}{f_{norm}} \cdot \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N \sqrt{\Delta f_{x_j}^2 + \Delta f_{y_j}^2 + \Delta f_{z_j}^2}}_{\lambda_{1f}} + \underbrace{\frac{100}{\omega_{norm}} \cdot \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N \sqrt{\Delta \omega_{x_j}^2 + \Delta \omega_{y_j}^2 + \Delta \omega_{z_j}^2}}_{\lambda_{1\omega}} \quad (5.1)$$

mit $\Delta f_i = f_{FDD_i} - f_{MC_i} \mid_{i \in \{x,y,z\}}$ und $\Delta \omega_i = \omega_{FDD_i} - \omega_{MC_i} \mid_{i \in \{x,y,z\}}$

$$\lambda_2 = \underbrace{\frac{100}{\dot{f}_{norm}} \cdot \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \sqrt{\delta f_{x_j}^2 + \delta f_{y_j}^2 + \delta f_{z_j}^2}}_{\lambda_{2f}} + \underbrace{\frac{100}{\dot{\omega}_{norm}} \cdot \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N \sqrt{\delta \omega_{x_j}^2 + \delta \omega_{y_j}^2 + \delta \omega_{z_j}^2}}_{\lambda_{2\omega}} \quad (5.2)$$

mit $\delta f_i = \frac{df_{FDD_i}}{dt} - \frac{df_{MC_i}}{dt} \mid_{i \in \{x,y,z\}}$ und $\delta \omega_i = \frac{d\omega_{FDD_i}}{dt} - \frac{d\omega_{MC_i}}{dt} \mid_{i \in \{x,y,z\}}$

Bei der Verwendung dieses Kriteriums zeigen sich allerdings zwei Aspekte, die sich erschwerend auf die Fehlerbetrachtung auswirken. Durch den Vergleich der Ausgangsdaten des Fahrdynamikmodells $\underline{\zeta}_{FDD}$ mit den transformierten Daten des Motion-Cueing-Algorithmus $\underline{\zeta}_{MC}$ werden Bewegungsgrößen mit unterschiedlicher Skalierung miteinander verglichen. Bei der Umrechnung der Fahrdynamikdaten auf den beschränkten Simulatorarbeitsraum mit dem MCA werden die Fahrdynamikdaten skaliert. Das sorgt dafür, dass beim vorgestellten Kriterium der Fehler der durch diese Skalierung verursacht wird den Hauptanteil der Fehlergrößen repräsentiert und somit den wichtigen Vergleich der Signalverläufe zwischen $\underline{\zeta}_{FDD}$ und $\underline{\zeta}_{MC}$ verhindert. Dieser Sachverhalt wird in Abbildung 5.2 grafisch verdeutlicht.

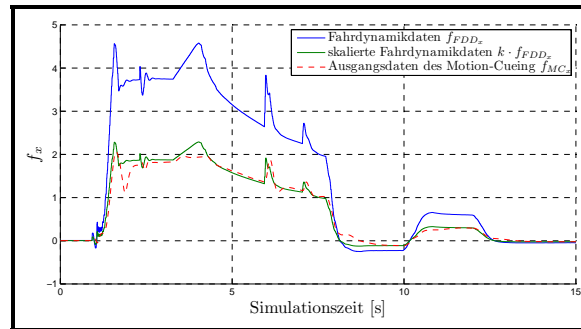


Abbildung 5.2: Gegenüberstellung der einzelnen Fehlerkomponenten

Da sich die durch die Skalierung verursachten Fehler und die Fehler in der Kurvenform der Signalverläufe additiv überlagern, kann eine Trennung dieser beiden Fehlerkomponenten vorgenommen werden. Diese Aufteilung wird im folgenden Abschnitt näher erläutert. Ein weiterer Aspekt des von Pouliot et al. präsentierten Kriteriums der sich erschwerend auf die Bewertung der Güte von Motion-Cueing-Algorithmen auswirkt ist die Art der Berechnung der Teilindikatoren λ_{1_f} , λ_{2_f} , λ_{1_ω} und λ_{2_ω} . Diese erfolgt durch eine Fehlerberechnung der Bewegungsgrößen zu jedem Zeitschritt mit anschließender vektorieller Betragsbildung der translatorischen und rotatorischen Bewegungsgrößen. Die mittleren Fehlergrößen zu jedem Simulationszeitschritt werden über die gesamte Simulationszeit aufsummiert. Als Normierungen f_{norm} , \dot{f}_{norm} , ω_{norm} und $\dot{\omega}_{norm}$ werden die maximal mit der verwendeten Bewegungsplattform darstellbaren Signalgrößen verwendet. Somit erfolgt eine von der jeweiligen Simulatorperformance abhängige Wichtung der Fehlergrößen. Der so ermittelte Fehler aus den translatorischen und rotatorischen Bewegungsgrößen repräsentiert den mittleren Fehler aus allen drei Bewegungsrichtungen (x, y, z) . Diese gemeinsame Betrachtung aller drei Bewegungsrichtungen (x, y, z) kann zu einer Abschwächung charakteristischer Effekte in einzelnen Freiheitsgraden führen und erschwert somit die objektive Betrachtung der Einzelfehler. Deshalb wird im folgenden Abschnitt eine Dekomposition dieser Fehlerbetrachtung zu einer getrennten Betrachtung der Fehler in den einzelnen Bewegungsrichtungen vorgenommen.

5.2.2 Erweiterung des Bewertungskriteriums von Pouliot et al.

Im Weiteren wird ein erweitertes Kriterium zur Bewertung der Güte von Motion-Cueing-Algorithmen vorgestellt. Die Änderungen beziehen sich auf die im vorigen Abschnitt vorgestellten negativen Aspekte bei der Fehlerberechnung von Pouliot et al. [Pou98]. Darin werden die Fahrdynamikdaten mit den skalierten Beschleunigungs- und Winkelgeschwindigkeitssignalen am Ausgang des MCA verglichen. Der durch die Skalierung der Fahrdynamikdaten verursachte Fehler ist so groß, dass der Einfluss des Fehlers beim Vergleich der Signalverläufe der skalierten Fahrdynamikdaten und der MCA-Ausgangsdaten auf den Gesamtfehler vernachlässigbar ist. Aus diesem Grund erfolgt eine Trennung der beiden Fehleranteile in Skalierungsfehler $\lambda_{m_n,sc}$ (scale error) und Signalverlaufsfehler $\lambda_{m_n,sh}$ (shape error) mit $(1 \leq m \leq 2)$, $m \in \mathbb{N}$ und $n \in \{f, \omega\}$ (Vgl. Gleichungen 5.3 und 5.4). Die exakte Nachbildung der Signalverläufe der Fahrdynamikdaten ist das Hauptziel bei der Präsentation der Beschleunigungen im Simulator. Die Bewertung der Güte dieser Signalverlaufsnachbildung erfolgt durch den Signalverlaufsfehler $\lambda_{m_n,sh}$. Um eine Vergleichbarkeit der Fehleranteile des Signalverlaufsfehlers zu gewährleisten wird die Konvention getroffen, dass alle Skalierungsfaktoren k_i gleich sein müssen ($k_i = k$).

$$\begin{aligned}
\lambda_{1f} &= \lambda_{1f,sc} + \lambda_{1f,sh} \\
\lambda_{1f,sc} &= \frac{100}{f_{norm}} \cdot \frac{1}{N} \left[\sum_{j=0}^N \sqrt{\Delta f_{x_j,sc}^2 + \Delta f_{y_j,sc}^2 + \Delta f_{z_j,sc}^2} \right] \\
\lambda_{1f,sh} &= \frac{100}{f_{norm}} \cdot \frac{1}{N} \left[\sum_{j=0}^N \sqrt{\Delta f_{x_j,sh}^2 + \Delta f_{y_j,sh}^2 + \Delta f_{z_j,sh}^2} \right]
\end{aligned} \tag{5.3}$$

mit $\Delta f_{i_{sc}} = f_{FDD_i} - k \cdot f_{FDD_i} = f_{FDD_i} \cdot (1 - k) \mid_{i \in \{x,y,z\}}$

und $\Delta f_{i_{sh}} = k \cdot f_{FDD_i} - f_{MC_i} \mid_{i \in \{x,y,z\}}$

$$\begin{aligned}
\lambda_{2f} &= \lambda_{2f,sc} + \lambda_{2f,sh} \\
\lambda_{2f,sc} &= \frac{100}{\dot{f}_{norm}} \cdot \frac{1}{N-1} \left[\sum_{j=1}^N \sqrt{\delta f_{x_j,sc}^2 + \delta f_{y_j,sc}^2 + \delta f_{z_j,sc}^2} \right] \\
\lambda_{2f,sh} &= \frac{100}{\dot{f}_{norm}} \cdot \frac{1}{N-1} \left[\sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\delta f_{x_j,sh}^2 + \delta f_{y_j,sh}^2 + \delta f_{z_j,sh}^2} \right]
\end{aligned} \tag{5.4}$$

mit $\delta f_{i_{sc}} = \frac{df_{FDD_i}}{dt} - k \cdot \frac{df_{FDD_i}}{dt} \mid_{i \in \{x,y,z\}}$

und $\delta f_{i_{sh}} = k \cdot \frac{df_{FDD_i}}{dt} - \frac{df_{MC_i}}{dt} \mid_{i \in \{x,y,z\}}$

Die Berechnung der Teilindikatoren λ_{1_ω} und λ_{2_ω} erfolgt entsprechend den Gleichungen 5.3 und 5.4 mit ω anstelle von f .

Durch die im obigen Abschnitt getroffene Konvention, dass alle Skalierungsfaktoren k_i gleich sein sollen ($k_i = k$) sind auch alle Skalierungsfehler $\lambda_{m_n,sc}$ mit ($1 \leq m \leq 2$) und $n \in \{f, \omega\}$ gleich groß und werden im Weiteren für das Bewertungskriterium nicht mehr berücksichtigt. Der verbleibende Fehleranteil $\lambda_{m_n,sh}$ ist ein Maß für die Genauigkeit der Nachbildung des Signalverlaufes der Fahrdynamikdaten im Simulator. Die Bestimmung des Fehlers im Signalverlauf $\lambda_{m_n,sh}$, der im Weiteren nur noch mit λ_{m_n} bezeichnet wird, wird nun erläutert. Die Teilindikatoren λ_{1_f} , λ_{2_f} , λ_{1_ω} und λ_{2_ω} werden beim Verfahren nach Pouliot et al. nach den Gleichungen 5.1 und 5.2 ermittelt. Dabei ist erkennbar, dass die Teilindikatoren durch eine Mittelwertbildung aus allen drei Komponenten (x, y, z) der Bewegungsgrößen zu einem Indikator zusammengefasst werden. Dies ermöglicht allerdings keine Aussage über den jeweiligen Fehleranteil in einem bestimmten Freiheitsgrad. Um auch eine Aussage bezüglich dieser Einzelfehleranteile treffen zu können wurde das im vorigen Abschnitt vorgestellte Bewertungskriterium von Pouliot et al. erweitert und statt der spezifischen Kräfte nur noch Beschleunigungen betrachtet. Die Verwendung der Beschleunigungen anstelle der spezifischen Kräfte gewährleistet vergleichbare Wertebereiche der drei Beschleunigungskomponenten $[a_x, a_y, a_z]^T$. Dazu wurden die Teilindikatoren λ_{1_a} , λ_{2_a} , λ_{1_ω} und λ_{2_ω} nochmals aufgeteilt, so dass für jeden Freiheitsgrad ein Teilindikator bestimmt wird. Die Berechnung der jeweiligen Teilindikatoren ist für die translatorischen Beschleunigungen in Gleichung 5.5 und für den Ruck in Gleichung 5.6 dargestellt.

$$\lambda_{1_a} = \underbrace{\left[\frac{1}{a_{norm}} \cdot \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N |\Delta a_{x_j}| \right]}_{\lambda_{1_{ax}}} + \underbrace{\left[\frac{1}{a_{norm}} \cdot \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N |\Delta a_{y_j}| \right]}_{\lambda_{1_{ay}}} + \underbrace{\left[\frac{1}{a_{norm}} \cdot \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N |\Delta a_{z_j}| \right]}_{\lambda_{1_{az}}} \quad (5.5)$$

mit $\Delta a_i = k \cdot a_{FDD_i} - a_{MC_i} \mid_{i \in \{x,y,z\}}$

$$\lambda_{2_a} = \underbrace{\left[\frac{1}{\dot{a}_{norm}} \cdot \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N |\delta a_{x_j}| \right]}_{\lambda_{2_{ax}}} + \underbrace{\left[\frac{1}{\dot{a}_{norm}} \cdot \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N |\delta a_{y_j}| \right]}_{\lambda_{2_{ay}}} + \underbrace{\left[\frac{1}{\dot{a}_{norm}} \cdot \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N |\delta a_{z_j}| \right]}_{\lambda_{2_{az}}} \quad (5.6)$$

mit $\delta a_i = k \cdot \frac{da_{FDD_i}}{dt} - \frac{da_{MC_i}}{dt} \mid_{i \in \{x,y,z\}}$

Die Berechnung der Teilindikatoren λ_{1_ω} und λ_{2_ω} erfolgt entsprechend den Gleichungen 5.5 und 5.6 mit ω anstelle von a . Die Berechnung der Güteindikatoren λ_1 und λ_2 erfolgt nach Gleichung 5.7.

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda_{1_a} + \lambda_{1_\omega} \\ \lambda_2 &= \lambda_{2_a} + \lambda_{2_\omega} \end{aligned} \quad (5.7)$$

Die in den Gleichungen vorkommenden Normierungsfaktoren a_{norm} , \dot{a}_{norm} , ω_{norm} und $\dot{\omega}_{norm}$ repräsentieren bei Betrachtung der gesamten Simulationszeit die maximal in den skalierten Fahrdynamikdaten vorkommenden Bewegungsgrößen. Dies ermöglicht im Vergleich zur Berechnung nach Pouliot et al. eine trajektorienspezifische Normierung der Fehlergrößen und stellt die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicher. Dazu werden die Güteindikatoren λ_1 und λ_2 auf Werte zwischen 0 und 1 begrenzt, wobei ein Fehler von 0 die bestmögliche Performance repräsentiert. Bei den Normierungsfaktoren für die Beschleunigungen und für den Ruck entspricht dies genau dem aus allen a_x , a_y und a_z entnehmbaren Maximalwert (Vgl. Gleichungen 5.8).

$$\begin{aligned} a_{norm} &= \max\{|k \cdot a_{FDDx_j}|, |k \cdot a_{FDDy_j}|, |k \cdot a_{FDDz_j}|\} \\ \dot{a}_{norm} &= \max\{|k \cdot \dot{a}_{FDDx_j}|, |k \cdot \dot{a}_{FDDy_j}|, |k \cdot \dot{a}_{FDDz_j}|\} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Für die Winkelgeschwindigkeiten entsprechen die Normierungsfaktoren ω_{norm} und $\dot{\omega}_{norm}$ dem Maximalwert der Summe aus den Winkelgeschwindigkeiten bzw. Winkelbeschleunigungen der Fahrdynamikdaten und den mit der Tilt Coordination in Winkelgeschwindigkeiten bzw. Winkelbeschleunigungen transformierten translatorischen Beschleunigungen der Fahrdynamikdaten (Vgl. Gleichungen 5.9).

$$\begin{aligned} \omega_{norm} &= \max\{|k \cdot \omega_{FDDx_j} + \dot{\Phi}_{TC,j}|, |k \cdot \omega_{FDDy_j} + \dot{\Theta}_{TC,j}|, |k \cdot \omega_{FDDz_j}|\} \\ \dot{\omega}_{norm} &= \max\{|k \cdot \dot{\omega}_{FDDx_j} + \ddot{\Phi}_{TC,j}|, |k \cdot \dot{\omega}_{FDDy_j} + \ddot{\Theta}_{TC,j}|, |k \cdot \dot{\omega}_{FDDz_j}|\} \end{aligned} \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } \Phi_{TC,j} &= -\arctan\left(\frac{k \cdot a_{FDDy_j}}{g}\right) \\ \text{und } \Theta_{TC,j} &= \arctan\left(\left(\cos \Phi_{TC}\right) \cdot \frac{k \cdot a_{FDDx_j}}{g}\right) \end{aligned}$$

Nach der Einführung des erweiterten Bewertungskriteriums wird im Folgenden die Anwendbarkeit dieses Kriteriums zur Offline-Bewertung am Beispiel des FTC gezeigt.

5.3 Anwendung des erweiterten Bewertungskriteriums

Bewertung der Güte des Motion-Cueing-Algorithmus FTC

Unter Nutzung des im vorigen Abschnitt vorgestellten erweiterten Bewertungskriteriums wird am Beispiel des FTC gezeigt, dass sich die Performance eines Motion-Cueing-Algorithmus bei Verwendung der im vorigen Kapitel entworfenen Kompensationsregelung gegenüber der Verwendung eines MCA ohne Kompensationsalgorithmus erheblich verbessern lässt. Dazu wurden zu Beginn fünf verschiedene Datensätze aus interaktiven Fahrversuchen ausgewertet. Als Trajektorien fungieren dabei eine Beschleunigungstrajektorie mit anschließender Vollbremsung, eine Fahrt durch einen Kreisverkehr, eine Stadtfahrt mit $50 \frac{km}{h}$, sowie zwei Überlandfahrten einmal mit $80 \frac{km}{h}$ und einmal mit $120 \frac{km}{h}$. Als Motion-Cueing-Algorithmus wird der FTC ohne Kompensationsregelung FTC und mit Kompensationsregelung FTC_{Reg} mit dem in Anhang C.1, Tabelle C.1 dargestellten Parametersatz verwendet. Die Ergebnisse der Gegenüberstellung der beiden Güteindikatoren λ_1 und λ_2 sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

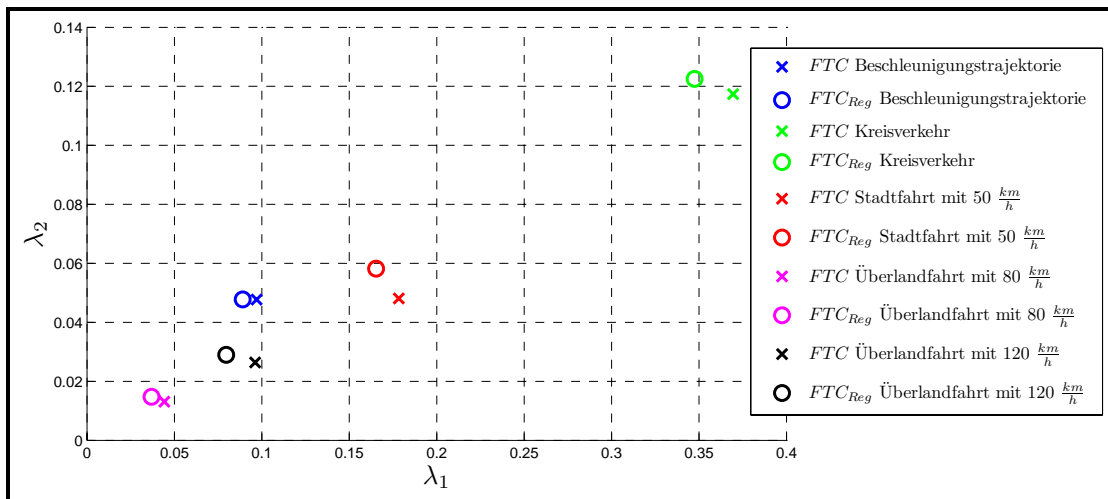


Abbildung 5.3: Gegenüberstellung der beiden Güteindikatoren λ_1 und λ_2 für verschiedene Trajektorien

Aus dem Diagramm in Abbildung 5.3 geht hervor, dass der FTC bei Verwendung der Kompensationsregelung für alle Trajektorien eine kleineren Fehler in der Präsentation der Winkelgeschwindigkeiten und Beschleunigungen λ_1 aufweist als der FTC ohne den Kompensationsalgorithmus. Diese Verringerung des Güteindicators λ_1 hat eine Vergrößerung des Fehlers in der Änderungsrate der Winkelgeschwindigkeiten und der Beschleunigungen λ_2 zur Folge. Allerdings nimmt λ_2 langsamer zu als λ_1 abnimmt. Grundsätzlich kann man sagen, dass die Nachbildung des Signalverlaufs der realen translatorischen Beschleunigungen mit dem FTC mit Kompensationsregelung exakter möglich ist. Zur genaueren Untersuchung der Auswirkungen der Kompensationsregelung auf die Performance des FTC werden im Folgenden die Teilindikatoren $\lambda_{1_{m_i}}$, mit $m \in \{a, \omega\}$ und $i \in \{x, y, z\}$ betrachtet. Da die wichtigste Forderung

in der exakten Nachbildung der translatorischen Beschleunigungen im Simulator besteht, wird auf die Betrachtung der Teilindikatoren der Änderungsrate der Winkelgeschwindigkeiten und Beschleunigungen λ_{2m_i} , mit $m \in \{a, \omega\}$ und $i \in \{x, y, z\}$ verzichtet. In den Abbildungen 5.4 und 5.5 sind exemplarisch die Teilindikatoren für die Fahrt durch den Kreisverkehr und die Überlandfahrt mit $120 \frac{km}{h}$ dargestellt. Die Teilindikatoren der restlichen drei in Abbildung 5.3 verwendeten Trajektorien sind in Anhang C.1 in den Abbildungen C.1 bis C.3 dargestellt.

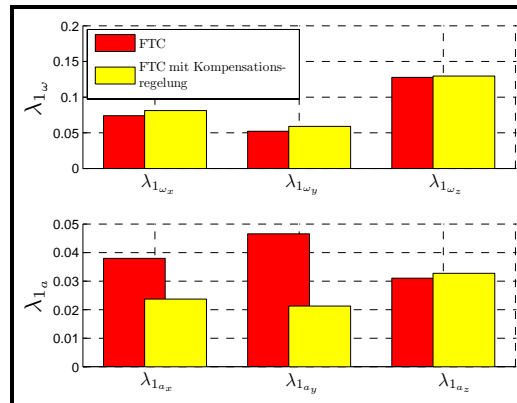


Abbildung 5.4: Darstellung der Teilindikatoren von λ_1 für eine Fahrt durch einen Kreisverkehr mit $a_{norm} = 4.602 \frac{m}{s^2}$, $\omega_{norm} = 364.775 \frac{\circ}{s}$ und $N = 5601$

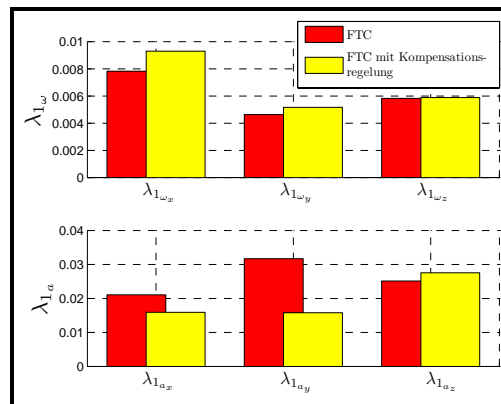


Abbildung 5.5: Darstellung der Teilindikatoren von λ_1 für eine Überlandfahrt mit $120 \frac{km}{h}$ und $a_{norm} = 3.536 \frac{m}{s^2}$, $\omega_{norm} = 250.664 \frac{\circ}{s}$, $N = 13901$

Aus den obigen Abbildungen geht hervor, dass bei Verwendung des FTC mit Kompensationsregelung eine bessere Nachbildung des Signalverlaufs der translatorischen Beschleunigungen der Fahrdynamikdaten möglich ist. Die für die Bewertung der Güte der Nachbildung der realen Beschleunigungen wichtigen Beträge der Teilindikatoren λ_{1a_x} und λ_{1a_y} können mit dem Kompensationsalgorithmus minimiert werden. Allerdings hat dies eine Vergrößerung des Fehlers der Teilindikatoren $\lambda_{1\omega_x}$ und $\lambda_{1\omega_y}$ zur Folge. Diese Vergrößerung ist darauf zurückzuführen, dass für eine genauere Nachbildung der translatorischen Beschleunigungen größere Winkelgeschwindigkeiten bei der Darstellung der Beschleunigungen mit der Tilt-Coordination nötig

sind. Man muß also um eine bessere Nachbildung der realen translatorischen Beschleunigungen im Simulator zu gewährleisten schnellere Drehbewegungen ausführen. Wie schnell diese Drehbewegung sein darf bis sie vom Probanden als unangenehm empfunden wird kann nur mit Probandentests untersucht werden. Betrachtet man die Ergebnisse des erweiterten Bewertungskriteriums bezüglich der Genauigkeit der Darstellung der realen Beschleunigungen im Fahrsimulator so kann geschlussfolgert werden, dass mit der Kompensationsregelung eine erhebliche Verbesserung der Güte des Motion-Cueing-Algorithmus erzielt werden kann.

Um eine Bewertung der Stärke des Einflusses der Einzelfehlerkomponenten λ_{1m_i} auf den Gesamtfehler λ_1 vorzunehmen wurde versucht Wichtungsfaktoren w_i mit $w_i \geq 0$, $w \in \mathbb{R}$ für die Einzelfehlerkomponenten zu ermitteln. Dazu wurden Ergebnisse aus Fachlaborversuchen beim DLR Braunschweig verwendet, bei denen die Performance von vier verschiedenen Motion-Cueing-Algorithmen P_{MCA_i} mit $1 \leq i \leq 4$ auf einer Skala zwischen 0 und 1 bewertet wurde. Dabei repräsentiert 0 die exakte Nachbildung der realen Fahrzeugbewegungen im Simulator. Aus diesen Größen wurde das in 5.10 dargestellte Gleichungssystem aufgestellt. Mit einem Optimierungsalgorithmus wurde nach Wichtungsfaktoren gesucht, die die Bewertungen der MCA-Performance aus den Fachlaborversuchen mit einem minimalen Fehler nachbilden.

$$\begin{bmatrix} P_{MCA_1} \\ P_{MCA_2} \\ P_{MCA_3} \\ P_{MCA_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{1a_{x1}} & \lambda_{1a_{y1}} & \lambda_{1a_{z1}} & \lambda_{1w_{x1}} & \lambda_{1w_{y1}} & \lambda_{1w_{z1}} \\ \lambda_{1a_{x2}} & \lambda_{1a_{y2}} & \lambda_{1a_{z2}} & \lambda_{1w_{x2}} & \lambda_{1w_{y2}} & \lambda_{1w_{z2}} \\ \lambda_{1a_{x3}} & \lambda_{1a_{y3}} & \lambda_{1a_{z3}} & \lambda_{1w_{x3}} & \lambda_{1w_{y3}} & \lambda_{1w_{z3}} \\ \lambda_{1a_{x4}} & \lambda_{1a_{y4}} & \lambda_{1a_{z4}} & \lambda_{1w_{x4}} & \lambda_{1w_{y4}} & \lambda_{1w_{z4}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \\ w_5 \\ w_6 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Bei der Untersuchung dieses Ansatzes konnten keine Wichtungsfaktoren ermittelt werden, die die Bewertungen aus dem Fachlabor mit minimalem Fehler repräsentiert. Dies ist darauf zurück zu führen, dass mit dem verwendeten Optimierungsalgorithmus und den fehlenden Anfangswerten w_{i_0} kein absolutes Minimum erreicht werden konnte. Die weitere Untersuchung dieses Ansatz wird aufgrund der Komplexität des Themengebietes in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet und kann als Ausgangspunkt für zukünftige wissenschaftliche Arbeiten auf diesem Gebiet verwendet werden.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Verbesserung der Darstellung von realen Beschleunigungen im dynamischen Fahr Simulator des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig. Zu Beginn wurden die Grundlagen des Fachgebietes des Motion-Cueing erläutert. Im Weiteren wurde ein zeitvarianter Motion-Cueing-Algorithmus entworfen der es ermöglicht die Performance des Simulators durch Änderung der Filtereckfrequenzen und Skalierungsfaktoren des MCA an die aktuelle Fahrsituation anzupassen. Zur Bestimmung der jeweiligen Fahrsituation wurde ein Zustandsautomat entworfen der zwischen den drei Fahrsituationen Stadtfahrt, Überlandfahrt und Fahrt auf einer Autobahn unterscheiden kann. Da die Umschaltung der Parameter des Motion-Cueing-Algorithmus während der Fahrt so durchgeführt werden muss, dass sie vom Probanden nicht wahrgenommen wird wurden zwei Möglichkeiten zur Umsetzung dieser Anforderungen untersucht. Nach Abschluss des Entwurfs des zeitvarianten Algorithmus wurde im nächsten Themengebiet die Dynamik des Fahr Simulators näher betrachtet.

Aufgrund der großen Masse der Simulatorplattform weist diese eine erhebliche Trägheit auf was zu einem Zeitverzug und einer Amplitudendämpfung zwischen den kommandierten Soll-Positionen und den im Simulator präsentierten Ist-Positionen führt. Um diesen Effekt zu minimieren wurde eine Kompensationsregelung entworfen. Diese weist die Regelungsstruktur einer Vorsteuerung mit inversem Modell auf. Als Übertragungsfunktion der Simulatorendynamik wurde in früheren Untersuchungen bereits ein PT_2 -Glieder identifiziert. Da der Simulator physikalische Limitierungen bezüglich der darstellbaren rotatorischen und translatorischen Bewegungsgrößen besitzt musste mit einem Algorithmus zur Stellgrößenbegrenzung innerhalb der Regelungsstruktur sichergestellt werden, dass diese Limitierungen eingehalten werden. Mit der Kompensationsregelung konnte der negative Einfluss der Simulatorendynamik erheblich minimiert werden. Durch den Einsatz der Kompensationsregelung in der Simulatorsteuerung ist es nun möglich Signalanteile höherer Frequenzbereiche bis $f = 1.5 \text{ Hz}$ ohne eine Amplitudendämpfung zu präsentieren.

Mit der Zustandsmaschine zur Bestimmung der aktuellen Fahrsituation und dem Kompensationsalgorithmus wäre es z.B. möglich eine fahrsituationsabhängige Straßenrauigkeit zu simulieren. Da bei der Präsentation von Straßenrauigkeit höherfrequente Anteile im Simulator mit möglichst geringer Amplitudendämpfung präsentiert werden müssen kann dies nun mit der

Kompensationsregelung realisiert werden.

Da durch den Einsatz der Kompensationregelung die Amplitudendämpfung zwischen den Soll- und Ist-Positionen minimiert wurde vergrößert sich der Bewegungsraum des Simulators. Um den Bewegungsraum des Fahrsimulators besser auszunutzen könnte in zukünftigen Arbeiten eine Vorpositionierung der Simulatorplattform näher untersucht werden.

Abschließend wurde ein Bewertungskriterium zur objektiven Bewertung der Güte von Motion-Cueing-Algorithmen vorgestellt. Mit diesem Kriterium wurde die Verbesserung der Güte von Motion-Cueing-Algorithmen bei Verwendung der Kompensationsregelung am Beispiel des FTC gezeigt. Das Ergebnis dieser Betrachtungen ist, dass zur exakteren Nachbildung von realen Beschleunigungen im Simulator höhere Winkelgeschwindigkeiten aufgebracht werden müssen. Das bedeutet, je kleiner der Fehler in der Darstellung der translatorischen Beschleunigungen ist umso größer ist der Fehler in der Präsentation der Winkelgeschwindigkeiten. Diese Ergebnisse gelten vor allem für Fahrsimulatoren mit Hexapod-Strukturen. Allerdings kann mit diesem Kriterium nicht geklärt werden, wie stark der Einfluss der Vergrößerung des Fehlers in der Präsentation der Winkelgeschwindigkeiten sich auf den subjektiven Gesamtfehler auswirkt. Dazu wäre in weiteren Arbeiten eine nähere Untersuchung der Zusammenhänge zwischen den Fehlern aus objektiven Bewertungskriterien und subjektiven Bewertungen durch Probanden erforderlich. Auf diesem Weg wäre es vielleicht möglich Wichtungsfaktoren für die einzelnen Fehleranteile zu ermitteln. Eine weitere Möglichkeit wäre die Anwendung des objektiven Bewertungskriteriums unter Nutzung eines menschlichen Wahrnehmungsmodells.

Literaturverzeichnis

- [Bar01] *Bartsch, H.J.*; „Taschenbuch Mathematischer Formeln“; *Fachbuchverlag Leipzig 19.Auflage*; 2001; ISBN: 3-446-21792-4
- [Ben89a] *Benson, A.J.; Spencer, M.B.; Stott, J.R.*; „Thresholds for the detection of the direction of whole-body, linear movement in the horizontal plane“; *Aviation, Space and Environmental Medicine Bd. 57*; S.1088-1096; 1989
- [Ben89b] *Benson, A.J.; Hutt, E.C.; Brown, S.F.*; „Thresholds for the Perception of Whole Body Angular“; *Aviation, Space and Environmental Medicine Bd. 60*; S.205-213; 1989
- [Buc05] *Buchholz, J.J.; von Grünhagen, W.*; „Inversion dynamischer Systeme in Matlab“; *Vorschungsschrift; Hochschule Bremen, DLR Braunschweig*; 2005; Online verfügbar unter <http://buchholz.hs-bremen.de/inversion/inversion.htm>, zuletzt geprüft am 07.08.2008
- [Gal96] *Galloway, R.Th.; Smith, R.B.*; „Simulator Cue Validation using Frequency Response Techniques“; *Naval Air Warfare Center Training Systems Division, Orlando Florida*; AIAA-96-3528-CP; 1996
- [Gra95] *Grant, P.*; „The Development of Tuning Paradigm for Flight Simulator Motion Drive Algorithms“; *University of Toronto, Graduate Department of Aerospace Science and Engineering*; 1995
- [Gut04] *Gutridge, C.J.*; „Three Degree-of-Freedom Simulator Motion Cueing“; *Master thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University; Blacksburg, Virginia*; 2004
- [Hip07] *Hippe, P.*; „Eine systematische Vermeidung der durch Stellbegrenzungen ausgelösten Probleme“; *at-Automatisierungstechnik Bd. 55 Oldenburg Wissenschaftsverlag*; 2007
- [Jan05] *Janschek, K.*; „Vorlesung Steuerung diskreter Prozesse I“; *TU Dresden*; WS 2005/2006
- [Lun04] *Lunze, J.*; „Regelungstechnik I“; *Springer-Verlag 4.Auflage*; 2003; ISBN: 3-540-20742-2

- [Nah90] Nahon, M.A.; Reid, L.D.; „Simulator Motion-Drive Algorithms: A Designer’s Perspective“; *Journal of Guidance Bd. 13, Nr.2* ; März-April 1990
- [Nah85] Nahon, M.A.; Reid, L.D.; „Flight Simulation Motion-Base Drive Algorithms: Part1 - Developing and Testing the Equations “; *UTIAS Report No.296, University of Toronto*; 1985
- [Pou98] Pouliot, N.A.; Gosselin, C.M.; Nahon, M.A.; „Motion Simulation Capabilities of Three-Degree-of-Freedom Flight Simulators“; *Journal of Aircraft Bd. 35, Nr.1* ; Januar-Februar 1998
- [Rei06a] Reinschke, K.; „Lineare Regelungs- und Steuerungstheorie“; *Springer-Verlag 1. Auflage*; ISBN: 3-540-21886-6; 2006
- [Rei06b] Reinschke, K.; „Skript zur Lehrveranstaltung Nichtlineare Regelungssysteme“; *TU Dresden*; WS 2006/2007
- [Rey00] Reymond, G.; Kemeny, A.; „Motion Cueing in the Renault Driving Simulator“; *Vehicle System Dynamics Bd. 34, S.249-259* ; 2000
- [Röb06] Röbenack, K.; „Vorlesung Prozessidentifikation I“; *TU Dresden*; SS 2006
- [Taj06] Tajima, J.; Maruyama, K.; Yuhara, N.; „Driving Task adaptive Motion Cueing for Driving Simulator“; *Driving Simulator Conference (DSC) Asia/Pacific*; 2006
- [Wei06a] Weiß, C.; „Time-Variant Motion Cueing Algorithms and Prepositioning“; *Diplomarbeit DLR Braunschweig*; 2006
- [Wei06b] Weiß, C.; „Dynamic Characteristics of Motion Simulation Systems“; *DLR Braunschweig*; 2006

Abbildungsverzeichnis

2.1	Wirkungsplandarstellung des klassischen MCA; grün: Skalierungsfaktoren; rot: Hoch- und Tiefpassfilter; gelb: Tilt Coordination; weiß: Koordinatentransformation	15
2.2	Grafische Darstellung zur Illustration der Bestimmung des Drehwinkels $\Theta_{TC}^{(I)}$ für $\Phi_{TC}^{(I)} = 0^\circ$	16
2.3	Wirkungsplandarstellung des FTC	18
2.4	Dynamischer Fahrsimulator des DLR Braunschweig	20
3.1	Aufbau der zeitvarianten Steuerung	21
3.2	Wirkungsplan des zeitvarianten MCA	22
3.3	Darstellung eines Umschaltvorgangs der Filtereckfrequenz für einen Hochpassfilter 1. Ordnung	27
3.4	Überföhrungsfunktion $A_{sc}(t)$ für $a_0(t) = 2.5 \rightarrow 0.75$	30
3.5	Umschaltvorgang des Filterkoeffizienten $a_0(t)$ mit Überföhrungsfunktion	31
3.6	Grundprinzip des Umschaltens des Filterkoeffizienten mit Zustandsanpassung	32
3.7	Umschaltung des Filterkoeffizienten $a_0(t)$ mit Zustandsanpassung	33
3.8	$a_{y,Sim}$ und $\omega_{x,Sim}$ bei MCA-Parametersatzumschaltung „Landstraße“ \rightarrow „Stadt“; blau: skaliertes MCA-Eingangssignal; rot: MCA-Ausgangssignal mit Überföhrungsfunktion; schwarz: MCA-Ausgangssignal mit Zustandsanpassung	35
3.9	Aufbau und Ablauf der Funktion zur Parametersatzbestimmung	37
3.10	Ausgangspunkt für den Automatenentwurf	42
3.11	Symbolik des Zustandsautomaten	42
3.12	Zustandsautomat nach 1.Dekompositionsschritt	43
3.13	Dekomposition des Teilautomaten I „Autobahn“	44
3.14	Dekomposition des Teilautomaten II „Landstraße“	44
3.15	Dekomposition des Teilautomaten III „off the Road“	45
3.16	Dekomposition des Teilautomaten IV „Stadt“	45
3.17	Dekomposition des Teilautomaten V „Kreuzung“	46
3.18	vollständiger Zustandsautomat	47
3.19	Bestimmung der Zustände des DEA zur Ermittlung der aktuellen Fahrsituation	48
3.20	Darstellung der Parametersatzwechsel und der Fahrsituationen bei einer interaktiven Fahrt mit Umschaltzeitpunkten $t_{switch,n}$ und Umschaltperioden $T_{period,n}$	56

3.21	Darstellung der durch den Umschaltvorgang beeinflussten Bewegungsgrößen während des Schaltvorgangs	57
4.1	Wirkungsplan der Simulatorsteuerung	59
4.2	Wirkungsplandarstellung der realen Bestimmung der Ist-Zylinderpositionen und der drei Ansätze zur simulativen Bestimmung der Ist-Zylinderpositionen	60
4.3	Darstellung der Sinus-Sweep Funktion mit linearer Änderung der Frequenz	63
4.4	Bode Diagramm und Kohärenz für $(\frac{Cyl_1(s)}{Pos_\Phi(s)})$ mit $C_{xy}^2 > 0.6$	64
4.5	Bode Diagramm und Kohärenz für $(\frac{Cyl_1(s)}{Pos_y(s)})$ mit $C_{xy}^2 < 0.6$	65
4.6	Vergleich der Zylinderlängen bei einem Bremsvorgang	67
4.7	Simulatorsteuerung mit intergrierter Kompensationsregelung	68
4.8	Prinzipieller Aufbau der Kompensationsregelung	69
4.9	Wirkungsplandarstellung des Stellgrößenbegrenzers	71
4.10	Nichtlinearer Standard-Regelkreis mit näherungsweise Beschreibung der Nichtlinearität durch die Beschreibungsfunktion $N(A, \omega)$	73
4.11	Verhalten der Nichtlinearitäten des Stellgrößenbegrenzers	74
4.12	Innerer Regelkreis für Harmonische Balance	75
4.13	Zwei-Ortskurven-Verfahren für inneren Regelkreis	75
4.14	Äusserer Regelkreis für Harmonische Balance	76
4.15	Äusserer Regelkreis für Harmonische Balance	76
4.16	Test des Stellgrößenbegrenzers mit einem Positionssprung $\beta_{Stell}(t)$	77
4.17	Wirkungsplandarstellung des offenen Kreises der Kompensationsregelung	78
4.18	Pol-Nullstellenplan der offenen Kette	79
4.19	Bode-Diagramm der offenen Kette	80
4.20	Pol-Nullstellenplan der Kompensationsregelung	82
4.21	Bode-Diagramm der Kompensationsregelung	82
4.22	Wirkungsplandarstellung der Kompensationsregelung	83
5.1	Wirkungsplandarstellung zur Bestimmung des Motion-Cueing-Fehlers	84
5.2	Gegenüberstellung der einzelnen Fehlerkomponenten	85
5.3	Gegenüberstellung der beiden Güteindikatoren λ_1 und λ_2 für verschiedene Trajektorien	90
5.4	Darstellung der Teilindikatoren von λ_1 für eine Fahrt durch einen Kreisverkehr mit $a_{norm} = 4.602 \frac{m}{s^2}$, $\omega_{norm} = 364.775 \frac{\circ}{s}$ und $N = 5601$	91
5.5	Darstellung der Teilindikatoren von λ_1 für eine Überlandfahrt mit $120 \frac{km}{h}$ und $a_{norm} = 3.536 \frac{m}{s^2}$, $\omega_{norm} = 250.664 \frac{\circ}{s}$, $N = 13901$	91

Tabellenverzeichnis

2.1	Menschliche Wahrnehmungsschwellen [Ben89a], [Ben89b]	19
2.2	Physikalische Grenzen des DLR-Fahrsimulators	20
3.1	Auswirkungen der zeitvarianten Koeffizienten auf das Ausgangssignal $y(t)$	25
3.2	Variablendefinition für die Übertragungsfunktion $A_{sc}(t)$	29
3.3	Definition der Indikatorwerte und der zugehörigen Parametersätze	36
3.4	Definition der Teilprozesse der Parametersatzbestimmung	38
3.5	Definition der Ereignissignale des Petrinetzes	38
3.6	Definition der Ein- und Ausgangssignale zur dynamischen Fahrsituationsbestimmung	41
3.7	Definition der Ein- und Ausgangssignale des Prozesses „prüfe Parameterwechsel“	51

Anhang A

Entwurf eines zeitvarianten Motion-Cueing-Algorithmus

A.1 Parameter des Motion-Cueing-Algorithmus

	<i>Einheit</i>	Stadt	Landstraße	Autobahn
k_x	-	0.3	0.3	0.3
k_y	-	0.7	0.3	0.3
k_z	-	0.3	0.3	0.3
k_ϕ	-	0.7	0.3	0.3
k_Θ	-	0.3	0.3	0.3
k_Ψ	-	0.7	0.3	0.3
k_{pitch}	-	1.0	1.0	1.0
k_{roll}	-	0	1.0	1.0
ω_{HPx}	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	2.7	2.7	2.7
ω_{HPy}	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	0.75	2.5	1.0
ω_{HPz}	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	6.0	6.0	6.0
ω_{WOx}	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	1.0	1.0	1.0
ω_{WOy}	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	2.0	1.0	0.3
ω_{WOz}	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	1.0	1.0	1.0
$\omega_{HP\phi}$	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	2.5	2.5	2.5
$\omega_{HP\Theta}$	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	2.5	2.5	2.5
$\omega_{HP\Psi}$	$\left[\frac{rad}{s}\right]$	2.5	2.5	2.5

Tabelle A.1: MCA-Parameter der drei a priori festgelegten Parametersätze

A.2 Online-Parametersatz

$$\underline{u}_{online} = [k_x, k_y, k_z, \omega_{HPx}, \omega_{HPy}, \omega_{HPz}, \omega_{WOx}, \omega_{WOy}, \omega_{WOz}, k_\phi, k_\Theta, k_\psi, \omega_{HP\phi}, \omega_{HP\Theta}, \omega_{HP\Psi}, k_{roll}, k_{pitch}] \quad (\text{A.1})$$

A.3 Datenpakete

A.3.1 Fahrdynamikmodelldaten

Bewegungsgröße	Einheit	Beschreibung
ω_x	$[\frac{rad}{s}]$	Winkelgeschwindigkeit um die x-Achse
ω_y	$[\frac{rad}{s}]$	Winkelgeschwindigkeit um die y-Achse
ω_z	$[\frac{rad}{s}]$	Winkelgeschwindigkeit um die z-Achse
a_x	$[\frac{m}{s^2}]$	translatorische Beschleunigung in x-Richtung
a_y	$[\frac{m}{s^2}]$	translatorische Beschleunigung in y-Richtung
a_z	$[\frac{m}{s^2}]$	translatorische Beschleunigung in z-Richtung
v	$[\frac{m}{s}]$	Geschwindigkeit des Fahrzeugs in Bewegungsrichtung

Tabelle A.2: Beschreibung der Daten des Fahrdynamikmodells

A.3.2 DED-Datenpaket

Bezeichnung	Einheit	Definition
OnRoad	-	0 \Rightarrow das Fahrzeug ist auf der Straße 1 \Rightarrow das Fahrzeug ist neben der Straße
MaxVelocity	$[\frac{km}{h}]$	Höchstgeschwindigkeit der Fahrspur -9999 \Rightarrow keine Informationen (default) 50 \Rightarrow Stadt (City) 100 \Rightarrow Landstraße (Rural) 130 \Rightarrow Autobahn (Highway), Auf-, Ausfahrt
LaneType	-	aktuelle Straßenart -1 \Rightarrow keine Informationen (default) 1 \Rightarrow Kreuzung 2 \Rightarrow Auffahrt 3 \Rightarrow Ausfahrt 4 \Rightarrow Gerade 5 \Rightarrow Linkskurve 6 \Rightarrow Rechtskurve
LaneIndex	-	aktuelle Fahrspur auf der Fahrbahn -1 \Rightarrow keine Informationen (default) 0 \Rightarrow rechte Fahrspur 1 \Rightarrow links neben der rechten Fahrspur
Indicator	-	aktueller Status des Blinkers -1 \Rightarrow keine Informationen (default) 0 \Rightarrow Blinker AUS 1 \Rightarrow rechter Blinker 2 \Rightarrow linker Blinker 3 \Rightarrow Warnblinker
CurveRadius	$[m]$	aktueller Kurvenradius -1 \Rightarrow keine Informationen (default) > 0 \Rightarrow Kurvenradius
DisToLaneTypeChange	$[m]$	-1 \Rightarrow keine Informationen (default) ≥ 0 \Rightarrow Distanz bis zur nächsten Straßenartsänderung

Bezeichnung	Einheit	Definition
LaneTypeAtChange	-	-1 \Rightarrow keine Informationen (default) 1 \Rightarrow Kreuzung 2 \Rightarrow Auffahrt 3 \Rightarrow Ausfahrt 4 \Rightarrow Gerade 5 \Rightarrow Linkskurve 6 \Rightarrow Rechtskurve
DisToMaxVelChange	[m]	-1 \Rightarrow keine Informationen (default) $\geq 0 \Rightarrow$ Distanz bis zur nächsten Änderung der Höchstgeschwindigkeit
MaxVelAtChange	$[\frac{km}{h}]$	-9999 \Rightarrow keine Informationen (default) 50 \Rightarrow Stadt (City) 100 \Rightarrow Landstraße (Rural) 130 \Rightarrow Autobahn (Highway), Auf-, Ausfahrt

Tabelle A.3: Beschreibung der Daten des DED-Datenpakets

A.4 Schaltfunktionen des Zustandsautomaten

Eingangssignale	Bezeichnung
OnRoad	u_1
MaxVelocity	u_2
LaneType	u_3
Indicator	u_4
LaneIndex	u_5
DisToLaneTypeChange	u_6
LaneTypeAtChange	u_7
DisToMaxVelChange	u_8
MaxVelAtChange	u_9
Ausgangssignal	Bezeichnung
fahrsituationsabhängiger Parametersatz	w

Tabelle A.4: Definition der Ein- und Ausgangssignale zur dynamischen Fahrsituationsbestimmung

$$v_1 = \overline{v_2} \wedge \overline{v_3} \wedge \overline{v_4} \wedge \overline{v_5}$$

$$v_2 = (u_1 == 0) \vee \left[(u_1 == 1) \wedge (u_2 \geq -9999) \wedge (u_3 \neq 1) \wedge (u_4 \geq -1) \wedge (u_5 \geq -1) \right] \wedge \\ \left[[(u_7 == -1) \wedge (u_8 == -1)] \vee [(u_9 == -9999) \wedge (u_6 == -1)] \vee \right. \\ \left. [(u_7 == -1) \wedge (u_9 == -9999)] \vee [(u_6 == -1) \wedge (u_8 == -1)] \right]$$

$$v_3 = \left[(u_1 == 1) \wedge (u_2 \geq -9999) \wedge (u_3 \geq -1) \wedge (u_4 \geq -1) \wedge (u_5 \geq -1) \wedge \right. \\ \left. (u_6 \geq -1) \wedge (u_7 \geq -1) \wedge (0 \leq u_8 \leq 100) \wedge (u_9 == 100) \right] \vee \\ \left[(u_1 == 1) \wedge (u_2 == 100) \wedge [(u_3 \neq 1) \wedge (u_3 \neq 2) \wedge (u_3 \neq 3)] \wedge (u_4 \geq -1) \wedge \right. \\ \left. (u_5 \geq -1) \wedge ([(u_6 > 100) \wedge (u_7 \geq 1)] \vee [(u_8 > 100) \wedge (u_9 \geq -9999)]) \right]$$

$$v_4 = (u_1 == 1) \wedge (u_2 \geq -9999) \wedge ((u_3 == 1) \vee [(0 \leq u_6 \leq 100) \wedge (u_7 == 1)])$$

$$v_5 = \left[(u_1 == 1) \wedge (u_2 \geq -9999) \wedge (u_3 \geq -1) \wedge (u_4 \geq -1) \wedge (u_5 \geq -1) \wedge \right. \\ \left. [(0 \leq u_6 \leq 100) \wedge (u_7 == 2)] \vee [(0 \leq u_8 \leq 100) \wedge (u_9 == 130)] \right] \vee \\ \left[(u_1 == 1) \wedge (u_2 == 130) \wedge (4 \leq u_3 \leq 6) \wedge (u_4 \geq -1) \wedge (u_5 \geq 0) \wedge \right. \\ \left. (u_6 \geq 0) \wedge (4 \leq u_7 \leq 6) \wedge (u_8 \geq -1) \wedge (u_9 \geq -9999) \right]$$

$$v_6 = \bar{v}_2 \wedge \bar{v}_4 \wedge \bar{v}_5 \wedge \bar{v}_7$$

$$v_7 = \left[(u_1 == 1) \wedge (u_2 \geq -9999) \wedge (u_3 \geq -1) \wedge (u_4 \geq -1) \wedge (u_5 \geq -1) \wedge \right. \\ \left. (u_6 \geq -1) \wedge (u_7 \geq -1) \wedge (0 \leq u_8 \leq 100) \wedge (u_9 == 50) \right] \vee \\ \left[(u_1 == 1) \wedge (u_2 == 50) \wedge [(u_3 \neq 1) \wedge (u_3 \neq 2) \wedge (u_3 \neq 3)] \wedge (u_4 \geq -1) \wedge \right. \\ \left. (u_5 \geq -1) \wedge [(u_6 > 100) \wedge (u_7 \geq 1)] \vee [(u_8 > 100) \wedge (u_9 \geq -9999)] \right]$$

$$v_8 = \bar{v}_2 \wedge \bar{v}_9$$

$$v_9 = \left[(u_1 == 1) \wedge (u_2 \geq 130) \wedge (u_3 \geq -1) \wedge (u_4 == 1) \wedge (u_5 == 0) \wedge \right. \\ \left. (0 \leq u_6 \leq 100) \wedge (u_7 == 3) \wedge (u_8 \geq 1) \wedge (u_9 \geq -9999) \right] \vee \\ \left[(u_1 == 1) \wedge (u_2 == 130) \wedge (u_3 == 3) \wedge (u_4 \geq -1) \wedge (u_5 == 0) \wedge \right. \\ \left. [(0 \leq u_6 \leq 100) \wedge (4 \leq u_7 \leq 6)] \vee [(0 \leq u_8 \leq 100) \wedge (u_9 < 130)] \right]$$

$$v_{10} = \bar{v}_2 \wedge \bar{v}_3 \wedge \bar{v}_5 \wedge \bar{v}_7$$

$$v_{11} = \bar{v}_2 \wedge \bar{v}_3 \wedge \bar{v}_7$$

$$v_{12} = \bar{v}_3 \wedge \bar{v}_4 \wedge \bar{v}_5 \wedge \bar{v}_7 \wedge \bar{v}_9$$

A.5 Bestimmung des Initialzustandes

$$\begin{aligned}
 z_{Off} : v_{i1} &= (u_1 == 0) \vee \\
 &\quad \left[(u_1 == 1) \wedge (u_2 == -9999) \wedge (u_3 \neq 1) \wedge (u_3 \neq 2) \wedge (u_3 \neq 3) \right] \vee \\
 &\quad \left[\overline{v_{i2}} \wedge \overline{v_{i3}} \wedge \overline{v_{i4}} \wedge \overline{v_{i5}} \wedge \overline{v_{i6}} \wedge \overline{v_{i7}} \right] \\
 y &= 2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 z_{City} : v_{i2} &= (u_1 == 1) \wedge (u_2 == 50) \wedge [(u_3 == 4) \vee (u_3 == 5) \vee (u_3 == 6)] \\
 y &= 1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 z_{Rural} : v_{i3} &= (u_1 == 1) \wedge (u_2 == 100) \wedge [(u_3 == 4) \vee (u_3 == 5) \vee (u_3 == 6)] \\
 y &= 2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 z_{HW} : v_{i4} &= \left[(u_1 == 1) \wedge (u_2 == 130) \wedge [(u_3 == 4) \vee (u_3 == 5) \vee (u_3 == 6)] \right] \vee \\
 &\quad \left[(u_1 == 1) \wedge (u_2 \geq -9999) \wedge (u_3 == 2) \right] \\
 y &= 3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 z_{HW,exit} : v_{i5} &= (u_1 == 1) \wedge (u_2 \geq -9999) \wedge (u_3 == 3) \\
 y &= 3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 z_{inter} : v_{i6} &= (u_1 == 1) \wedge (u_2 \geq -9999) \wedge (u_3 == 1) \\
 y &= 1
 \end{aligned}$$

(A.2)

A.6 Automatenabelle des Mealy-Automaten

$z[k-1]$	$v[k]$	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
z_{off}		X	X	$z_{Rural}, 2$	$z_{inter}, 1$	$z_{HW}, 3$	X
z_{City}		$z_{City}, 1$	$z_{off}, 1$	$z_{Rural}, 2$	$z_{inter}, 1$	$z_{HW}, 3$	X
z_{Rural}		X	$z_{off}, 2$	X	$z_{inter}, 1$	$z_{HW}, 3$	$z_{Rural}, 2$
z_{HW}		X	$z_{off}, 3$	X	X	X	X
$z_{HW,exit}$		X	$z_{off}, 3$	$z_{Rural}, 2$	X	$z_{HW}, 3$	X
z_{inter}		X	$z_{off}, 1$	$z_{Rural}, 2$	X	X	X

$z[k-1]$	$v[k]$	v_7	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}	v_{12}
z_{off}		$z_{City}, 1$	X	$z_{HW,exit}, 3$	X	X	$z_{off}, y[k-1]$
z_{City}		X	X	X	X	X	X
z_{Rural}		$z_{City}, 1$	X	X	X	X	X
z_{HW}		X	$z_{HW}, 3$	$z_{HW,exit}, 3$	X	X	X
$z_{HW,exit}$		$z_{City}, 1$	X	X	$z_{HW,exit}, 3$	X	X
z_{inter}		$z_{City}, 1$	X	X	X	$z_{inter}, 1$	X

Tabelle A.5: Automatenabelle des DEA

A.7 Konventionen zur Bestimmung der Distanz bis zum Fahr-situationswechsel

$$d_{switch} = \mathbf{0}$$

$$v_{d_1} = (DisToLaneTypeChange < 0) \wedge (DisToMaxVelChange < 0)$$

$$d_{switch} = \mathbf{DisToLaneTypeChange}$$

$$v_{d_2} = \begin{aligned} & [(DisToLaneTypeChange > DisToMaxVelChange) \wedge \\ & (DisToLaneTypeChange \geq 0) \wedge (DisToMaxVelChange < 0)] \\ & \vee \\ & [(DisToLaneTypeChange == DisToMaxVelChange) \wedge \\ & (DisToLaneTypeChange \geq 0) \wedge (DisToMaxVelChange \geq 0)] \\ & \vee \\ & [(DisToLaneTypeChange < DisToMaxVelChange) \wedge \\ & (DisToLaneTypeChange \geq 0) \wedge (DisToMaxVelChange \geq 0)] \end{aligned}$$

$$d_{switch} = \mathbf{DisToMaxVelChange}$$

$$v_{d_3} = \begin{aligned} & [(DisToLaneTypeChange > DisToMaxVelChange) \wedge \\ & (DisToLaneTypeChange \geq 0) \wedge (DisToMaxVelChange \geq 0)] \\ & \vee \\ & [(DisToLaneTypeChange < DisToMaxVelChange) \wedge \\ & (DisToLaneTypeChange < 0) \wedge (DisToMaxVelChange \geq 0)] \end{aligned}$$

A.8 Test des zeitvarianten Motion-Cueing-Algorithmus mit Online-Parametersatzbestimmung

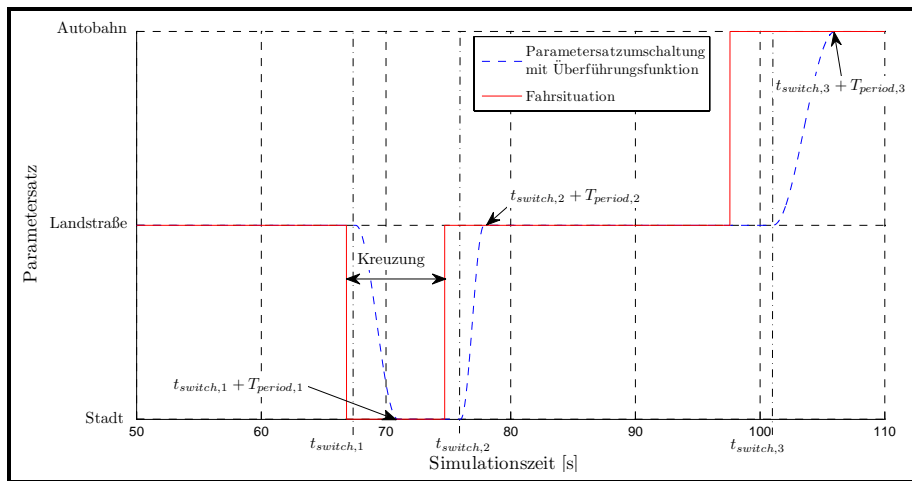


Abbildung A.1: Parametersatzwechsel und Fahrsituation bei Fahrt auf einer Landstraße mit Detektion einer Kreuzung

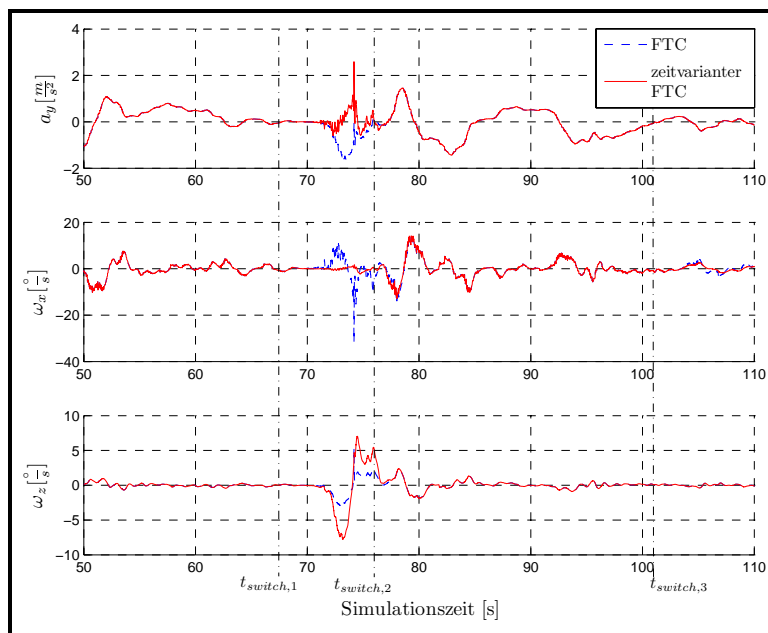


Abbildung A.2: Bewegungsgrößen bei Fahrt auf einer Landstraße mit Detektion einer Kreuzung

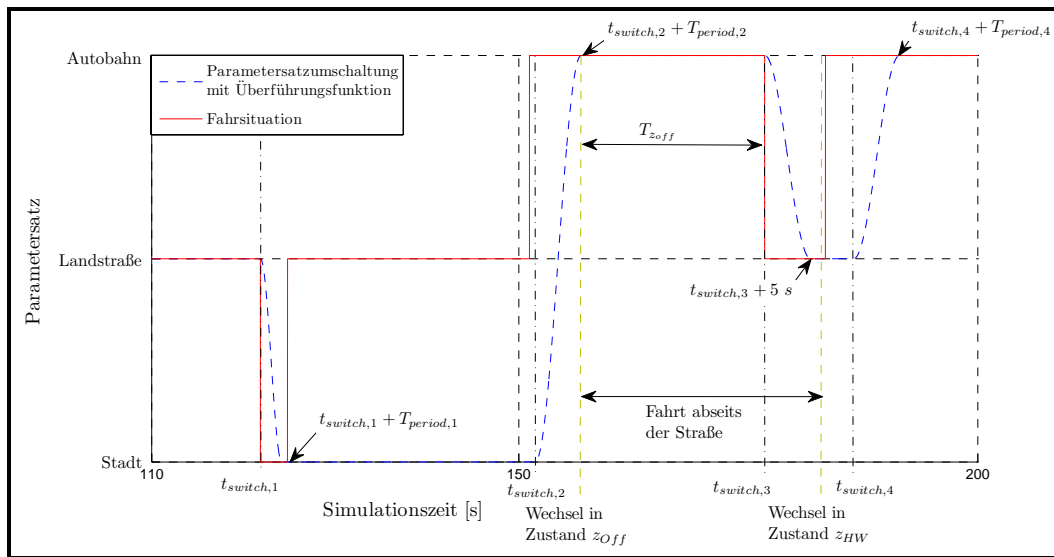


Abbildung A.3: Parametersatzwechsel und Fahrsituation bei Fahrt abseits der Straße länger als T_{zoff}

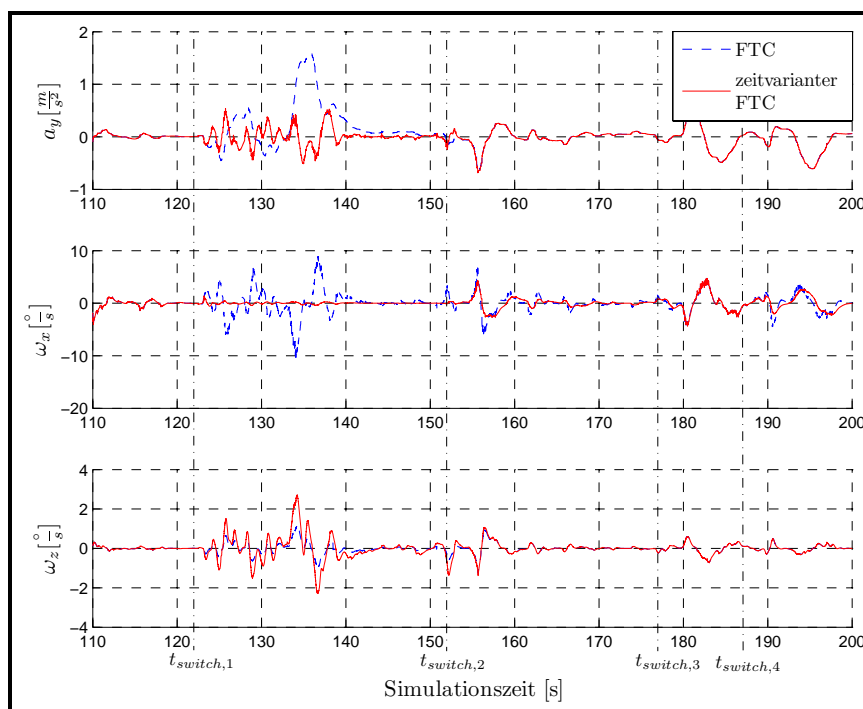


Abbildung A.4: Bewegungsgrößen bei Fahrt abseits der Straße länger als T_{zoff}

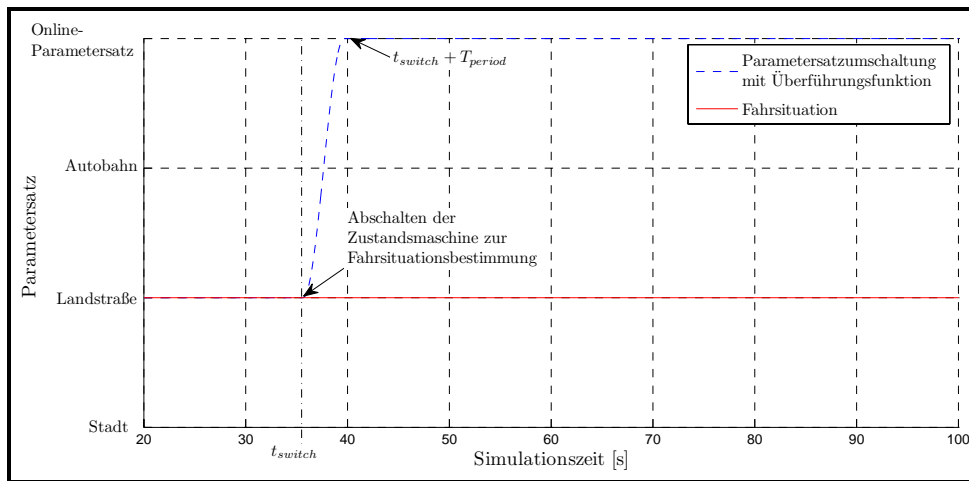


Abbildung A.5: Parametersatzwechsel und Fahrsituation beim Umschalten zu einem Online vorgegebenen Parametersatz

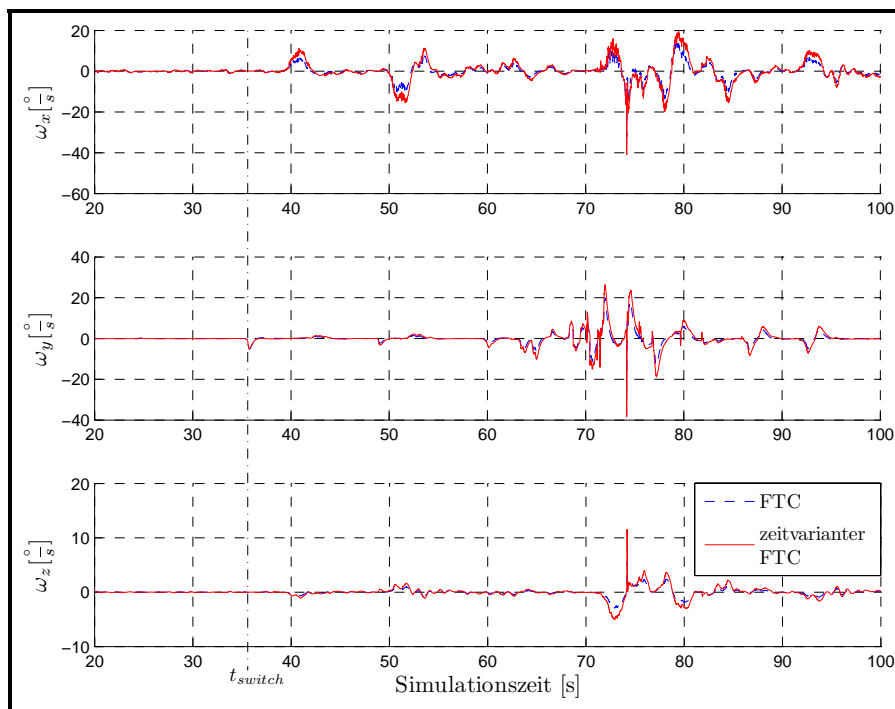


Abbildung A.6: Winkelgeschwindigkeiten beim Umschalten zu einem Online vorgegebenen Parametersatz

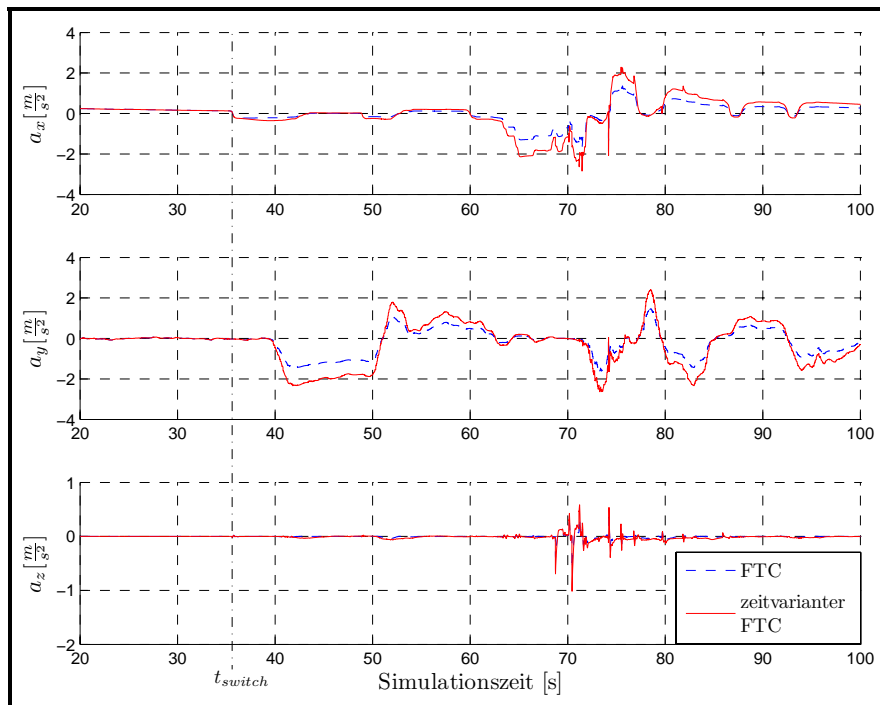


Abbildung A.7: Beschleunigungen beim Umschalten zu einem Online vorgegebenen Parametersatz

$$\underline{u}_{online} = [0.5, 0.5, 0.5, 2.7, 2.5, 6.0, 0.5, 0.5, 1, 0.5, 0.5, 0.5, 2.51, 2.51, 2.51, 1, 1]$$

Anhang B

Untersuchung der Dynamik des Fahrsimulators

B.1 Systemidentifikation der Simulatordynamik

B.1.1 Bestimmung der Koeffizienten der Übertragungsfunktionen und Test des Übertragungssystems

$$\begin{bmatrix} Cyl_1 \\ Cyl_2 \\ Cyl_3 \\ Cyl_4 \\ Cyl_5 \\ Cyl_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-6.365}{0.01s^2+0.377s+1} & \frac{49.761}{0.021s^2+0.349s+1} & \frac{-46.338}{0.021s^2+0.349s+1} & \frac{63.533}{0.019s^2+0.322s+1} & \frac{-665.907}{0.026s^2+0.344s+1} & \frac{-737.694}{0.019s^2+0.368s+1} \\ \frac{-47.253}{0.019s^2+0.370s+1} & \frac{-19.605}{0.022s^2+0.380s+1} & \frac{47.166}{0.022s^2+0.366s+1} & \frac{-632.914}{0.021s^2+0.361s+1} & \frac{-281.001}{0.023s^2+0.365s+1} & \frac{-745.356}{0.019s^2+0.378s+1} \\ \frac{-39.856}{0.02s^2+0.364s+1} & \frac{-29.432}{0.019s^2+0.365s+1} & \frac{-45.992}{0.023s^2+0.361s+1} & \frac{569.019}{0.023s^2+0.368s+1} & \frac{388.985}{0.028s^2+0.350s+1} & \frac{-735.061}{0.02s^2+0.379s+1} \\ \frac{39.925}{0.019s^2+0.358s+1} & \frac{-29.794}{0.02s^2+0.364s+1} & \frac{46.314}{0.021s^2+0.357s+1} & \frac{565.017}{0.02s^2+0.360s+1} & \frac{-384.659}{0.025s^2+0.345s+1} & \frac{-740.051}{0.019s^2+0.374s+1} \\ \frac{46.849}{0.02s^2+0.400s+1} & \frac{-18.933}{0.023s^2+0.422s+1} & \frac{-46.275}{0.024s^2+0.388s+1} & \frac{-623.922}{0.024s^2+0.374s+1} & \frac{-287.151}{0.023s^2+0.420s+1} & \frac{-734.289}{0.021s^2+0.394s+1} \\ \frac{5.857}{0.019s^2+0.490s+1} & \frac{48.011}{0.024s^2+0.395s+1} & \frac{45.714}{0.023s^2+0.411s+1} & \frac{60.010}{0.028s^2+0.300s+1} & \frac{675.618}{0.03s^2+0.386s+1} & \frac{-720.196}{0.022s^2+0.397s+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Pos_\phi \\ Pos_\theta \\ Pos_\psi \\ Pos_x \\ Pos_y \\ Pos_z \end{bmatrix}$$

(B.1)

B.2 Entwurf einer Kompensationregelung

B.2.1 Algorithmus zur Stellgrößenbegrenzung

Betrachtung des Stellgrößenbegrenzers im nichtlinearen Bereich

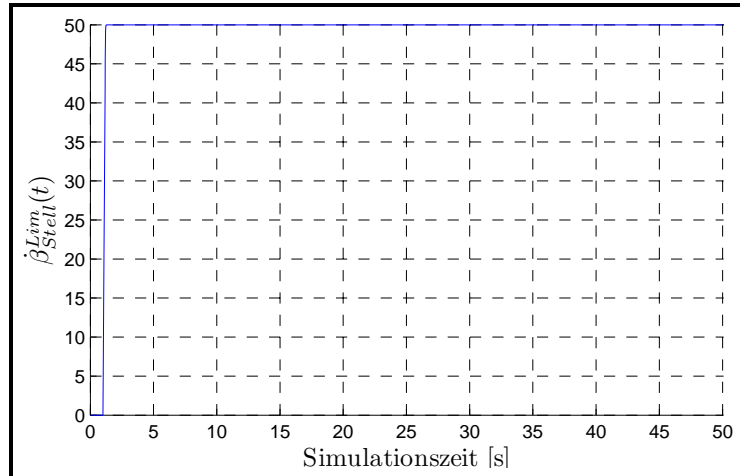


Abbildung B.1: Zustandsverlauf $\dot{\beta}_{Stell}^{Lim}$ des inneren Regelkreises bei einem Eingangssignalsprung $\dot{\beta}_{Lim} = 50 \frac{\circ}{s}$ [$\dot{\beta}_{Stell}^{Lim}(0) = 0$, $\ddot{\beta}_{Stell}^{Lim}(0) = 0$]

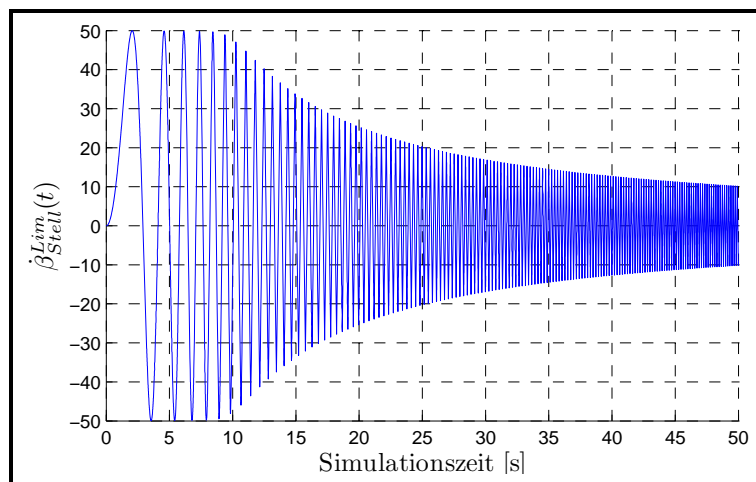


Abbildung B.2: Zustandsverlauf $\dot{\beta}_{Stell}^{Lim}$ des inneren Regelkreises bei Sinus-Sweep Funktion als Eingangssignal mit $A = 50 \frac{\circ}{s}$ und $f = 0$ bis 6 Hz [$\dot{\beta}_{Stell}^{Lim}(0) = 0$, $\ddot{\beta}_{Stell}^{Lim}(0) = 0$]

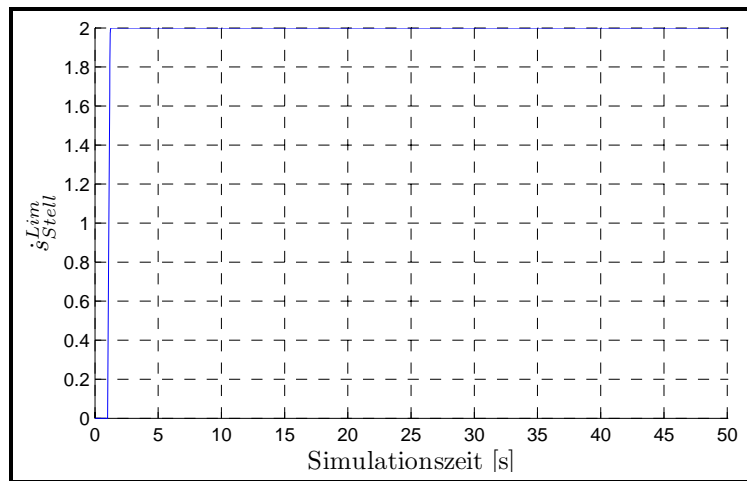


Abbildung B.3: Zustandsverlauf \dot{s}_{Stell}^{Lim} des inneren Regelkreises bei einem Eingangssignalsprung $\dot{s}_{Lim} = 2 \frac{m}{s}$ [$\dot{s}_{Stell}^{Lim}(0) = 0$, $\ddot{s}_{Stell}^{Lim}(0) = 0$]

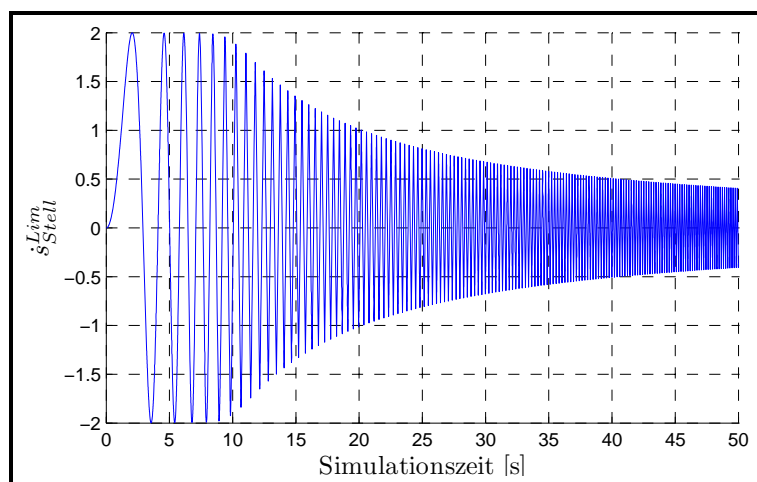


Abbildung B.4: Zustandsverlauf \dot{s}_{Stell}^{Lim} des inneren Regelkreises bei Sinus-Sweep Funktion als Eingangssignal mit $A = 2 \frac{m}{s}$ und $f = 0$ bis 6 Hz [$\dot{s}_{Stell}^{Lim}(0) = 0$, $\ddot{s}_{Stell}^{Lim}(0) = 0$]

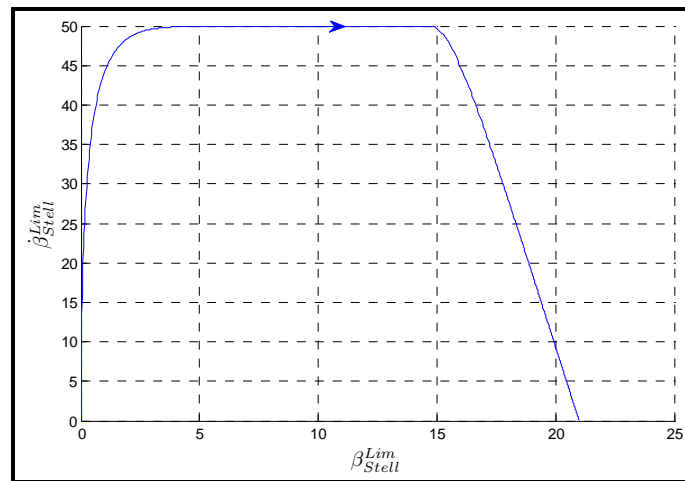


Abbildung B.5: Darstellung der Phasenebene für die Zustände des äusseren Regelkreises bei Eingangssignalsprung mit $\beta_{Stell} = 20^\circ$
 $[\beta_{Stell}^{Lim}(0) = 0, \dot{\beta}_{Stell}^{Lim}(0) = 0, \ddot{\beta}_{Stell}^{Lim}(0) = 0]$

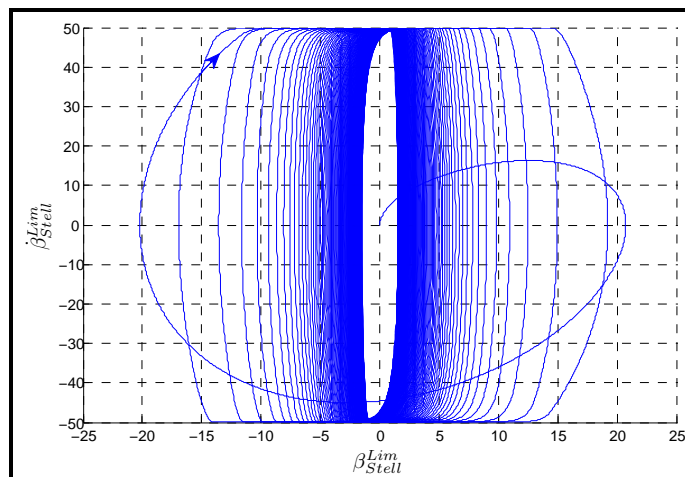


Abbildung B.6: Darstellung der Phasenebene für die Zustände des äusseren Regelkreises bei Sinus-Sweep Funktion als Eingangssignal mit $A = 20^\circ$ und $f = 0$ bis 6 Hz
 $[\beta_{Stell}^{Lim}(0) = 0, \dot{\beta}_{Stell}^{Lim}(0) = 0, \ddot{\beta}_{Stell}^{Lim}(0) = 0]$

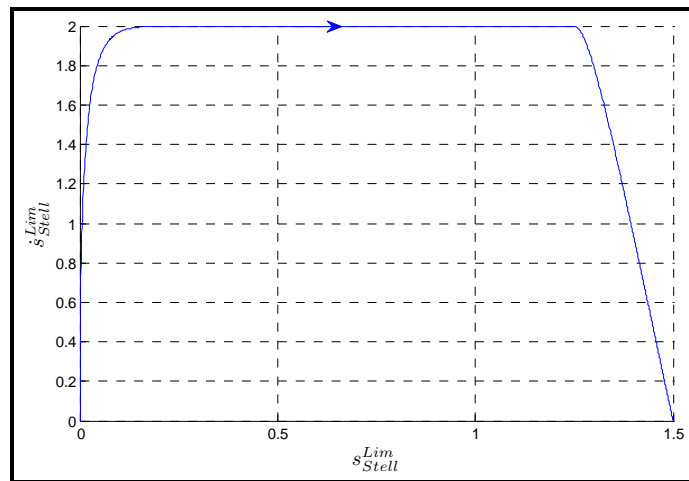


Abbildung B.7: Darstellung der Phasenebene für die Zustände des äusseren Regelkreises bei Eingangssignalsprung mit $s_{Stell} = 1.5 \text{ m}$ [$s_{Stell}^{Lim}(0) = 0$, $\dot{s}_{Stell}^{Lim}(0) = 0$, $\ddot{s}_{Stell}^{Lim}(0) = 0$]

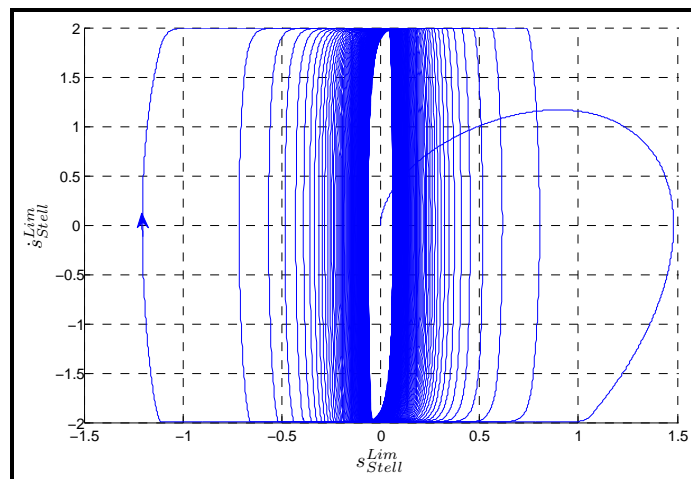


Abbildung B.8: Darstellung der Phasenebene für die Zustände des äusseren Regelkreises bei Sinus-Sweep Funktion als Eingangssignal mit $A = 1.5 \text{ m}$ und $f = 0$ bis 6 Hz [$s_{Stell}^{Lim}(0) = 0$, $\dot{s}_{Stell}^{Lim}(0) = 0$, $\ddot{s}_{Stell}^{Lim}(0) = 0$]

B.2.2 Test der Kompensationsregelung

Test des Kompensationsalgorithmus für rotatorische Simulatorbewegungen

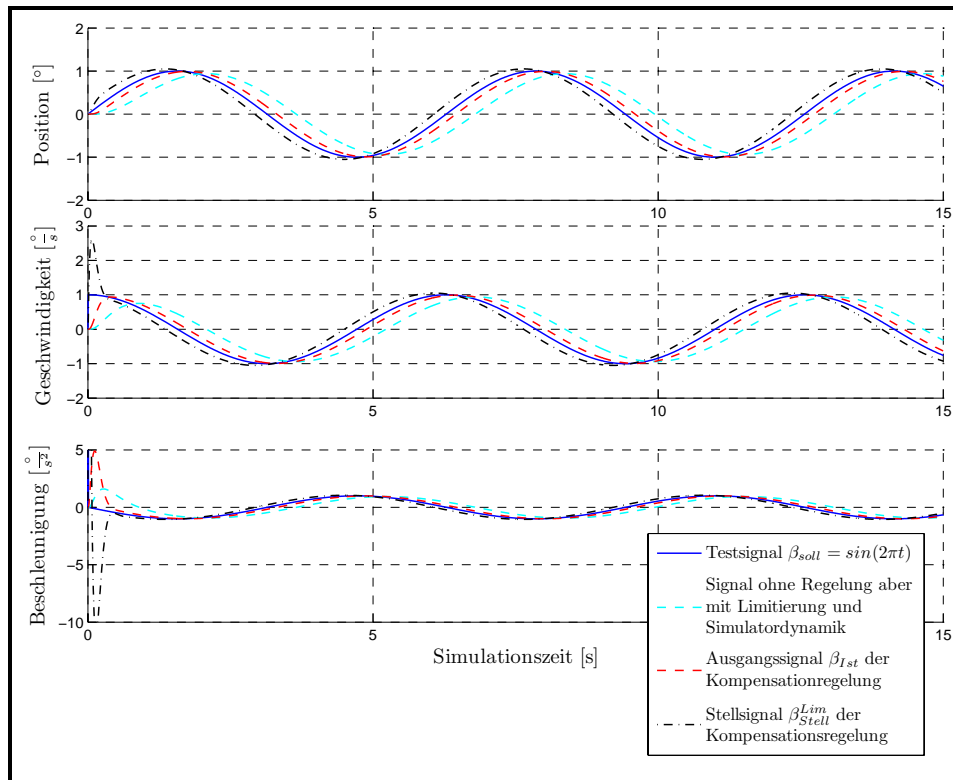


Abbildung B.9: Test der Kompensationsregelung für rotatorische Simulatorbewegungen mit $\beta_{Soll} = \sin(2\pi t)$

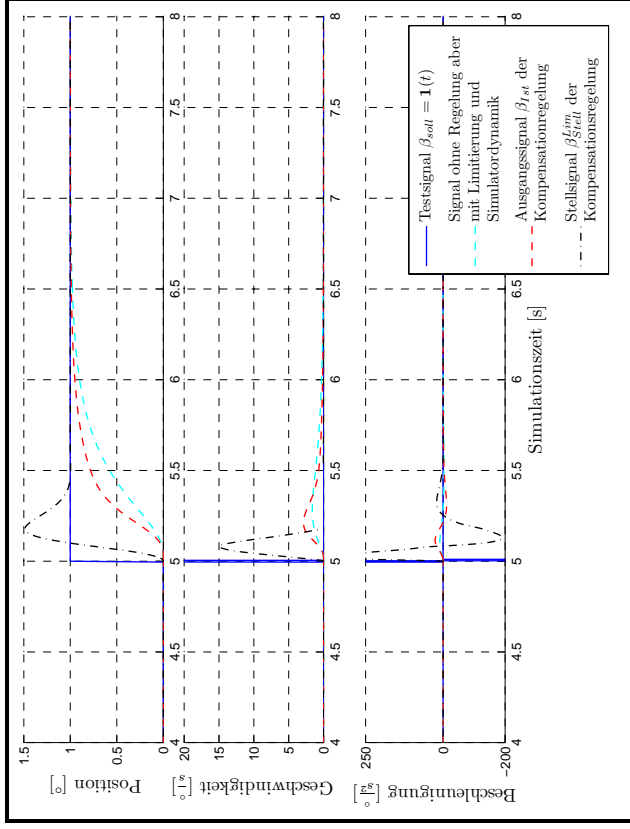


Abbildung B.10: Test der Kompensationsregelung für rotatorische Simulatorbewegungen mit $\beta_{soll} = \mathbf{1}(t)$

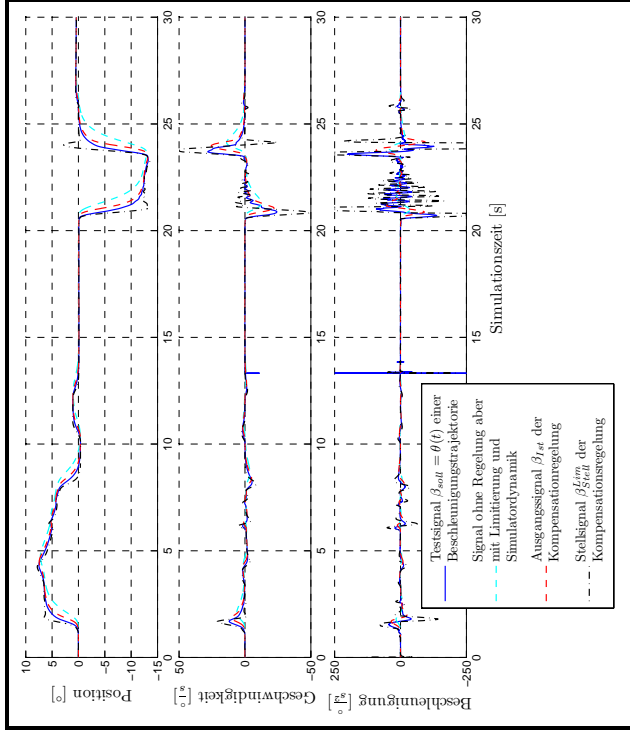


Abbildung B.11: Test der Kompensationsregelung für rotatorische Simulatorbewegungen mit $\beta_{soll} = \theta(t)$ einer Beschleunigungsrajaektorie

Test des Kompensationsalgorithmus für translatorische Simulatorbewegungen

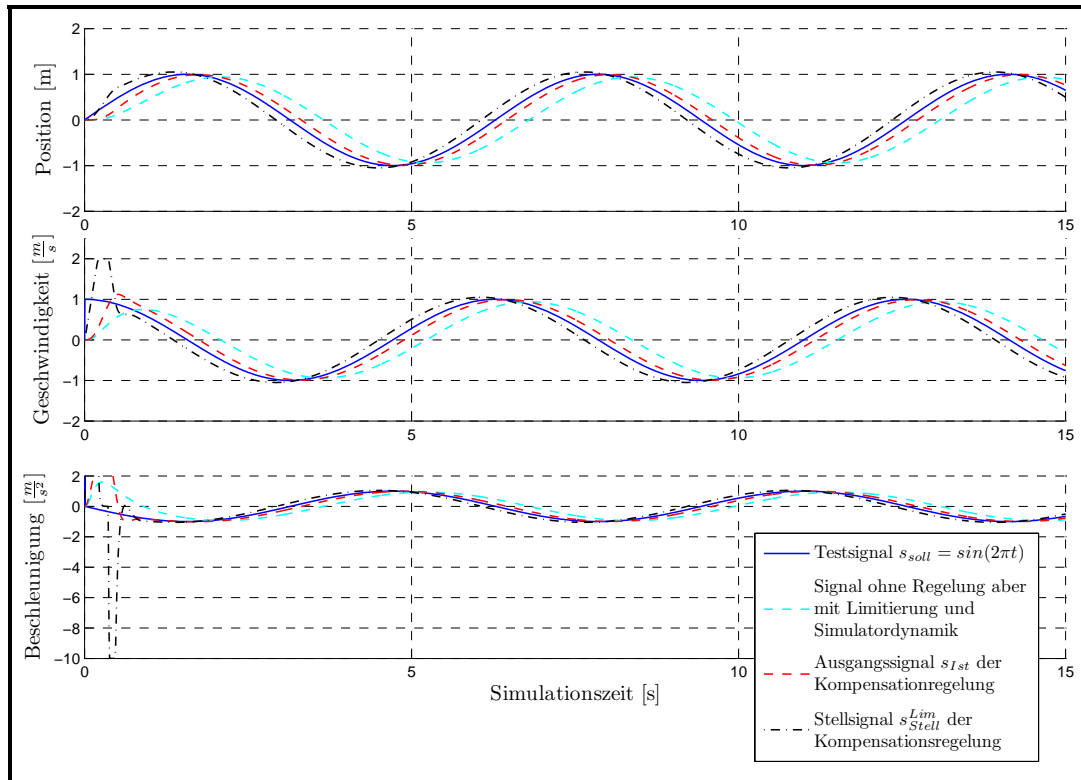


Abbildung B.12: Test der Kompensationsregelung für translatorische Simulatorbewegungen mit $s_{Soll} = \sin(2\pi t)$

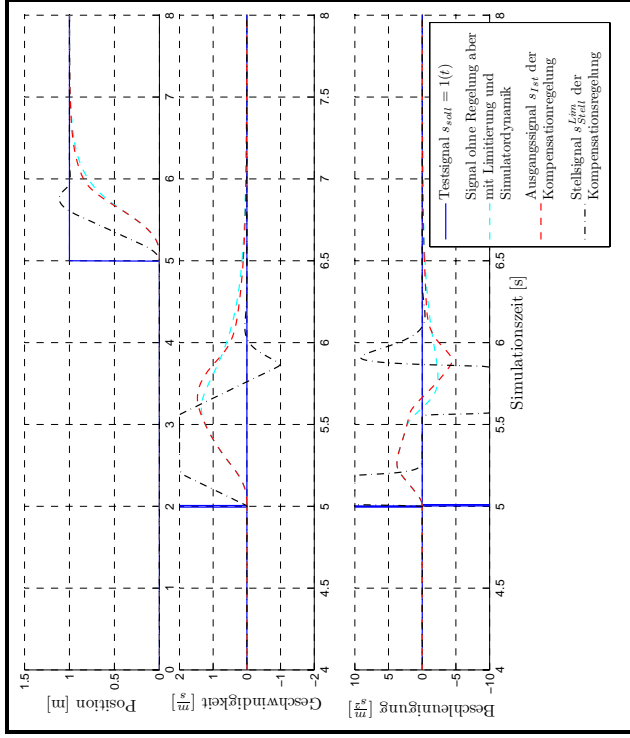


Abbildung B.13: Test der Kompensationsregelung für translatorische Simulatorbewegungen mit $s_{Soll} = \mathbf{1}(t)$

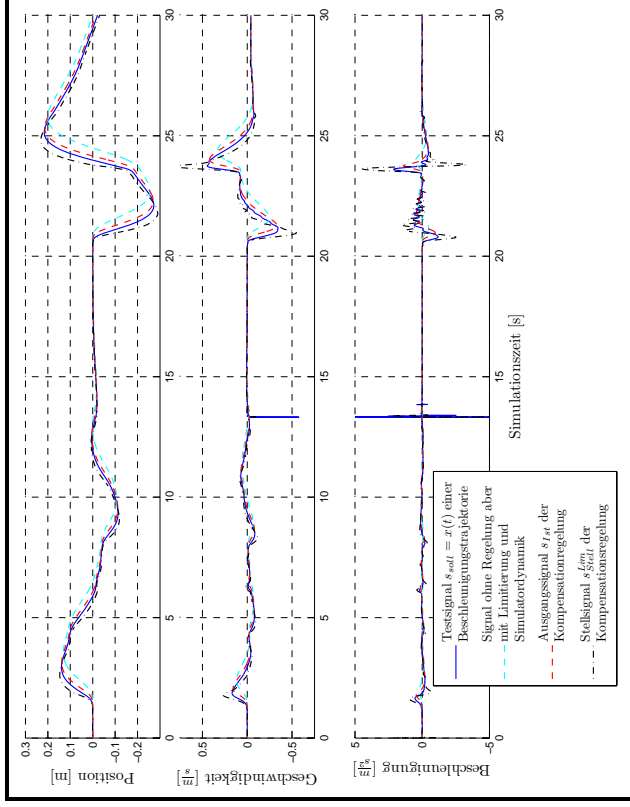


Abbildung B.14: Test der Kompensationsregelung für translatorische Simulatorbewegungen mit $s_{Soll} = x(t)$ einer Beschleunigungstrajektorie

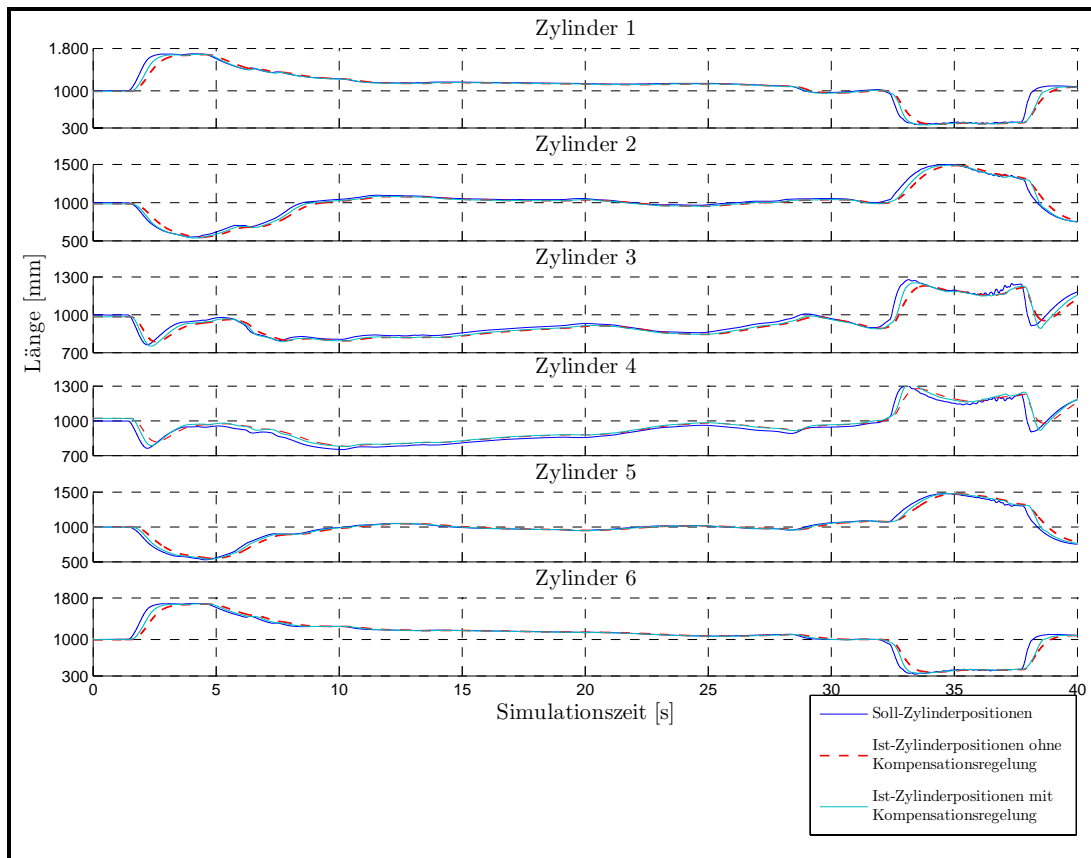


Abbildung B.15: Abschlusstest der Kompensationsregelung bei Untersuchung einer Beschleunigungstrajektorie

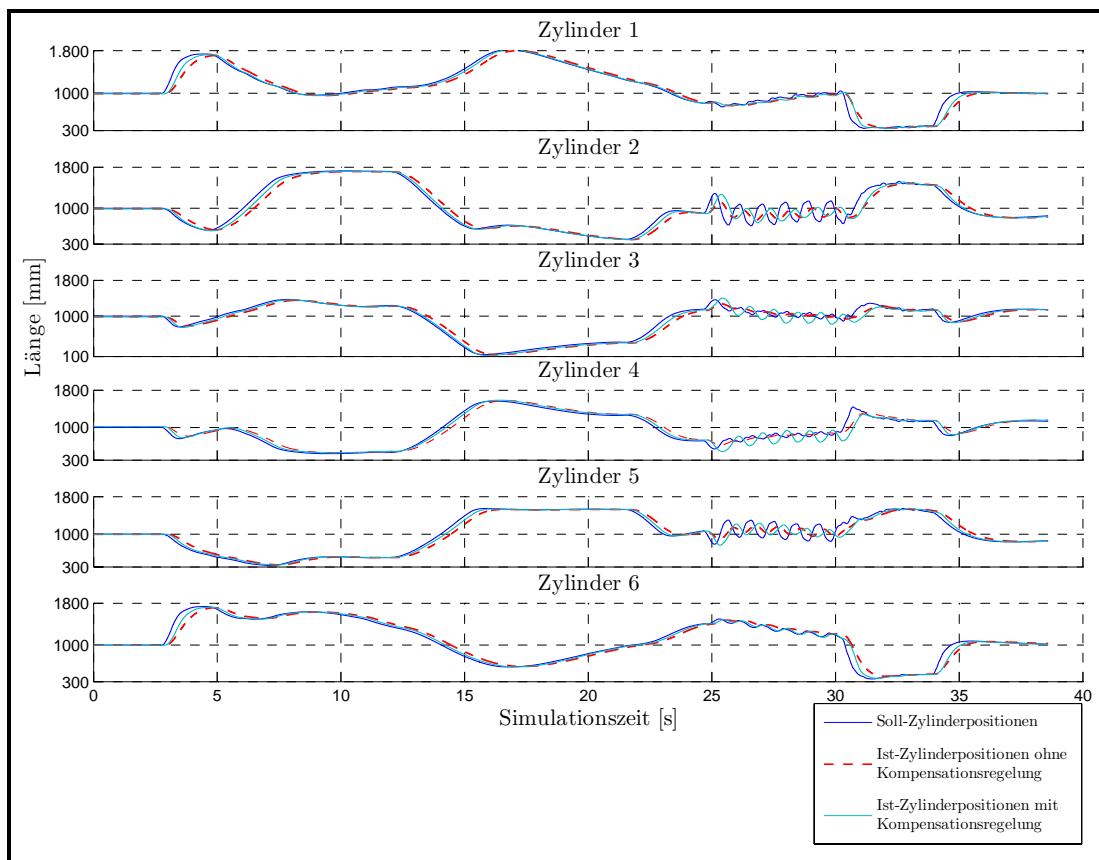


Abbildung B.16: Abschlusstest der Kompensationsregelung bei Untersuchung einer Kurvenfahrt

Anhang C

Objektive Bewertung der Güte von Motion-Cueing-Algorithmen

C.1 Anwendung des erweiterten Bewertungskriteriums

Bewertung der Güte des Motion-Cueing-Algorithmus FTC

	<i>Einheit</i>	Parameterwert
k_x	-	0.5
k_y	-	0.5
k_z	-	0.5
k_ϕ	-	0.5
k_Θ	-	0.5
k_Ψ	-	0.5
k_{pitch}	-	1.0
k_{roll}	-	1.0
ω_{HPx}	$[\frac{rad}{s}]$	2.7
ω_{HPy}	$[\frac{rad}{s}]$	2.5
ω_{HPz}	$[\frac{rad}{s}]$	6.0
ω_{WOx}	$[\frac{rad}{s}]$	0.5
ω_{WOy}	$[\frac{rad}{s}]$	0.5
ω_{WOz}	$[\frac{rad}{s}]$	1.0
$\omega_{HP\phi}$	$[\frac{rad}{s}]$	2.5
$\omega_{HP\Theta}$	$[\frac{rad}{s}]$	2.5
$\omega_{HP\Psi}$	$[\frac{rad}{s}]$	2.5

Tabelle C.1: Parametersatz des FTC für Performance-Bewertung

Trajektorie	a_{norm}	ω_{norm}	N
Stadtfahrt mit $50 \frac{km}{h}$	$1.846 \frac{m}{s^2}$	$35.121 \frac{^\circ}{s}$	21800
Überlandfahrt mit $80 \frac{km}{h}$	$3.609 \frac{m}{s^2}$	$236.737 \frac{^\circ}{s}$	19601
Beschleunigungstrajektorie	$4.602 \frac{m}{s^2}$	$364.775 \frac{^\circ}{s}$	5601

Tabelle C.2: Übersicht der zur Berechnung der Teilindikatoren von λ_1 verwendeten Normierungsfaktoren

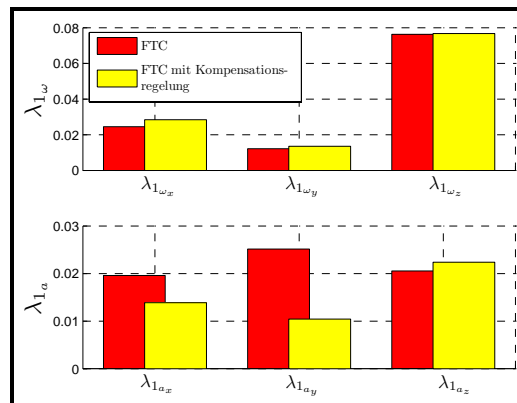


Abbildung C.1: Darstellung der Teilindikatoren von λ_1 für eine Stadtfahrt mit $50 \frac{km}{h}$

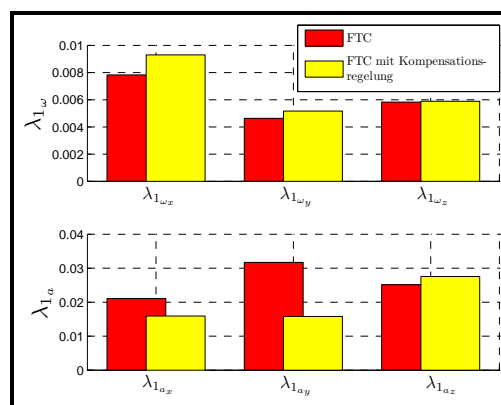


Abbildung C.2: Darstellung der Teilindikatoren von λ_1 für eine Überlandfahrt mit $80 \frac{km}{h}$

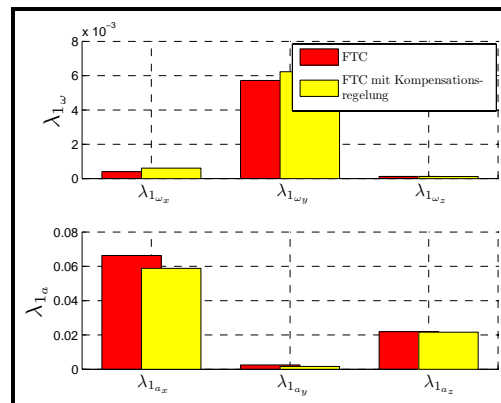


Abbildung C.3: Darstellung der Teilindikatoren von λ_1 für eine Beschleunigungstrajektorie mit anschließender Vollbremsung

Technische Universität Dresden
Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie

Thesen zur Diplomarbeit

Thema: Implementierung, Test und Bewertung eines zeitvarianten Algorithmus zur Ansteuerung einer Bewegungsplattform

Tag der Einreichung: 18.08.2008

Verfasser: Tobias Lorenz

In modernen Kraftfahrzeugen gewinnen Fahrerassistenzsysteme zum Schutz von Fahrzeuginsassen und anderen Verkehrsteilnehmern immer mehr an Bedeutung. Um den Nutzen und die Wirkung neuer Assistenzsysteme einfach und kostengünstig untersuchen zu können kommen Fahrsimulatoren zum Einsatz. Dabei ist es wichtig, dass die Bewegung des realen Fahrzeugs mit dem Simulator so genau wie möglich dargestellt wird. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin einen fahrsituationsabhängigen, zeitvarianten Steueralgorithmus zur Abbildung der realen Fahrzeugbewegung in den Simulatorarbeitsraum zu entwerfen. Aufgrund der Masse der Simulatorplattform weist diese eine erhebliche Trägheit auf, deren Einfluss mit einem Kompensationsalgorithmus minimiert werden soll. Abschließend werden die so entstehenden Steueralgorithmen mit einem Bewertungskriterium bezüglich der Simulatorperformance bewertet.

1. Beim Motion-Cueing ist es das Ziel die Bewegung eines realen Fahrzeugs in einer räumlich beschränkten simulativen Umgebung so gut wie möglich nachzubilden.
2. Die durch ein hartes Umschalten der Parameter des Motion-Cueing-Algorithmus verursachten Ausgangssignalsprünge müssen mit einem sanften Umschaltvorgang beseitigt werden, damit der Proband die Umschaltvorgänge nicht wahrnimmt.
3. In der Arbeit wurden zwei Ansätze zur Umschaltung der Parameter des Motion-Cueing-Algorithmus untersucht, wobei sich der Ansatz des Umschaltens der MCA-Parameter mit Überföhrungsfunktion als geeigneter erwies.
4. Zur dynamischen Bestimmung des aktuell zu verwendenden Parametersatzes des Motion-Cueing-Algorithmus wird ein sequentieller Automat genutzt.
5. Die Bedingungen für die Initialisierung eines Umschaltvorgangs des MCA-Parametersatzes orientieren sich an den menschlichen Wahrnehmungsschwellen und der aktuell vorliegenden Fahrsituation.
6. Für die Systemidentifikation der Simulatordynamik als Mehrgrößensystem wurde die in [Gal96] vorgestellte Frequency-Sweep Technique verwendet.

7. Die Systemidentifikation der Simulatordynamik als Mehrgrößensystem führt nicht zu einer exakteren simulativen Nachbildung der Ist-Zylinderpositionen.
8. Der negative Einfluss des Tiefpasscharakters der Simulatorplattform auf die Simulatorperformance wurde mit einer Regelungsstruktur bestehend aus einem Regelkreis mit Vorsteuerung sowie einer Stellgrößenbegrenzung minimiert.
9. Zur Realisierung der Stellgrößenbegrenzung wurde eine PT_2 -Glieder mit Begrenzungsgliedern für die Geschwindigkeits- und Beschleunigungssignale verwendet.
10. Die Untersuchung des Verhaltens des Stellgrößenbegrenzers im nichtlinearen Bereich erfolgte mit der Methode der Harmonischen Balance und einer Betrachtung der Zustandsverläufe für bestimmte Testsignale.
11. Um Phasenverschiebungen im unteren Frequenzbereich zu minimieren wurde als Reglerstruktur ein PD-Regler verwendet.
12. Aufgrund der durch das komplexe Polpaar verursachten Resonanzüberhöhung ist ein Vorfilter zur Abschwächung dieser Effekte nötig.
13. Zur objektiven Bewertung der Güte von Motion-Cueing-Algorithmen wurden die Fehler in jedem Freiheitsgrad durch die Einführung von Güteindikatoren einzeln betrachtet.