

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen</b>	<b>IX</b>
<b>Nomenklatur und Abkürzungen</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und allgemeine Problemstellung . . . . .	1
1.2 Stand der Forschung . . . . .	3
1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit . . . . .	9
<b>2 Querführung von Nutzfahrzeugkolonnen</b>	<b>11</b>
2.1 Analyse der Querführungsaufgabe in Fahrzeugkolonnen .	11
2.1.1 Hierarchisierung der Automatisierungsaufgaben . .	11
2.1.2 Kolonnenstabilität in der Querführung . . . . .	13
2.2 Art und Ausstattung der Kolonnenfahrzeuge . . . . .	14
2.2.1 Sensor- und Kommunikationsinfrastruktur . . . . .	14
2.2.2 Aktorausstattung der Kolonnenfahrzeuge . . . . .	16
2.3 Allgemeine Randbedingungen für die Querführung . . . . .	16
2.4 Zusammenfassende Darstellung des Querführungsproblems . . . . .	18
<b>3 Modellierung der Dynamik des Gesamtsystems</b>	<b>20</b>
3.1 Strukturierung des Gesamtsystems . . . . .	20
3.2 Dynamische Modellierung der Teilsysteme . . . . .	21
3.2.1 Modellierung der Sattelzugdynamik . . . . .	21
3.2.2 Modellierung der Ablagedynamik . . . . .	29
3.2.3 Modellierung der Lenksystemdynamik . . . . .	30
3.2.4 Zusammenfassende Darstellung des Gesamtsystemmodells . . . . .	33
3.3 Parametrierung und Vergleich mit Messdaten . . . . .	34
3.4 Vergleich mit Mehrkörpermodell . . . . .	39

<b>4</b>	<b>Konzeption und Umsetzung der Bahnführung</b>	<b>42</b>
4.1	Bahnführung und Informationsverarbeitung in der Fahrzeugkolonne . . . . .	42
4.2	Erfassung und Verarbeitung ortsfester Führungs- und Störgrößen . . . . .	43
4.2.1	Funktionsprinzip der Datenerfassung . . . . .	44
4.2.2	Signalverarbeitung mittels nichtparametrischer Regression . . . . .	47
4.2.3	Analyse von Fehlereinflüssen . . . . .	51
4.3	Bestimmung der Ausgangsgrößen . . . . .	55
4.3.1	Trajektorienberechnung . . . . .	55
4.3.2	Ableitungsschätzung . . . . .	55
4.4	Simulative Erprobung der Trajektorien- und Ableitungsermittlung . . . . .	57
4.4.1	Untersuchung der Trajektorienermittlung . . . . .	58
4.4.2	Untersuchung der Ableitungsermittlung . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Ansätze und Entwurfsverfahren zur Stabilisierung</b>	<b>66</b>
5.1	Konzept 1 - Modellgestützte Prädiktive Regelung . . . . .	67
5.1.1	Motivierende Betrachtung . . . . .	67
5.1.2	Modellgestützte Prädiktive Regelung mit Zustandsraummodellen . . . . .	68
5.1.3	Zustandsschätzung mittels Kalman-Filterung . . . . .	74
5.1.4	Strukturelle Erweiterung für stationäre Genauigkeit . . . . .	76
5.1.5	Struktur von Konzept 1 . . . . .	77
5.2	Konzept 2 - $\mathcal{H}_\infty$ -basierte Regelung . . . . .	79
5.2.1	Motivierende Betrachtung . . . . .	79
5.2.2	Grundlagen der $\mathcal{H}_\infty$ -basierten robusten Regelung . . . . .	80
5.2.3	Allgemeines $\mathcal{H}_\infty$ -Entwurfsproblem . . . . .	85
5.2.4	Struktur von Konzept 2 . . . . .	92
5.3	Konzept 3 - Open Loop Shaping . . . . .	94
5.3.1	Motivierende Betrachtung . . . . .	94

5.3.2	Allgemeine Entwurfsregeln für das Open Loop Shaping . . . . .	95
5.3.3	Entwurfsmethode Quantitative Feedback Design . .	101
5.3.4	Inversionsbasierter Vorsteuerungsentwurf . . . . .	104
5.3.5	Struktur von Konzept 3 . . . . .	107
<b>6</b>	<b>Regelungsentwurf und Erprobung in der Simulation</b>	<b>108</b>
6.1	Randbedingungen und Anforderungen . . . . .	108
6.1.1	Betriebsbereich, Regelfehler und Stellgrößenbeschränkung . . . . .	108
6.1.2	Dynamische Anforderungen . . . . .	109
6.1.3	Zulässige Stellgrößenbeanspruchung . . . . .	110
6.1.4	Strukturelle Anforderungen . . . . .	111
6.2	Ergebnis der Regelungsentwürfe . . . . .	112
6.2.1	Konzept 1 - MPR-Entwurf . . . . .	112
6.2.2	Konzept 2 - $\mathcal{H}_\infty$ -basierter Entwurf . . . . .	116
6.2.3	Konzept 3 - Entwurf mittels Open Loop Shaping . .	121
6.3	Erprobung der Regelungen in der Simulation . . . . .	126
6.3.1	Zielsetzung und Untersuchungskonzept . . . . .	126
6.3.2	Simulationsergebnisse . . . . .	129
6.3.3	Vergleichende Bewertung der Regelungsentwürfe .	132
<b>7</b>	<b>Simulationsbasierte Erprobung im Kolonnenbetrieb</b>	<b>135</b>
7.1	Zielsetzung der Untersuchung . . . . .	135
7.2	Untersuchungskonzept . . . . .	135
7.3	Simulationsergebnisse . . . . .	138
7.3.1	Ergebnis Szenario 1 . . . . .	138
7.3.2	Ergebnis Szenario 2 . . . . .	140
7.3.3	Ergebnis Szenario 3 . . . . .	141
<b>8</b>	<b>Erprobung im Fahrversuch</b>	<b>144</b>

8.1	Rahmenbedingungen im Projekt KONVOI und Fahrversuchskonzept . . . . .	144
8.2	Ergebnisse der experimentellen Erprobung . . . . .	146
8.2.1	Technische Ausrüstung und Anpassungen für den Fahrversuch . . . . .	146
8.2.2	Autonome Fahrspurhaltung . . . . .	147
8.2.3	Führungsgrößenfolge . . . . .	149
8.3	Bewertung der Fahrversuchsergebnisse . . . . .	153
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>155</b>
<b>A</b>	<b>Mathematisch-systemtheoretischer Anhang</b>	<b>159</b>
A.1	Signalnormen . . . . .	159
A.2	$\mathcal{H}_\infty$ -Systemnorm . . . . .	160
A.3	Skalierung einer Regelstrecke . . . . .	161
A.4	Bandbreite geschlossener Regelkreise . . . . .	162
<b>B</b>	<b>Anhang zur Modellierung des Gesamtfahrzeugsystems</b>	<b>163</b>
B.1	Abschätzung von verzögerungsbedingten Achslaständerungen . . . . .	163
B.2	Modell der Sattelzugdynamik . . . . .	165
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>169</b>