

2020-UN Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 8

Mess-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Dipl.-Ing. Günter César Keßler,
Mainz

Nr. 1215

**Querführung von
Nutzfahrzeugkolonnen
mit Fahrzeug-Fahrzeug-
Kommunikation**

BERICHTE AUS DEM
INSTITUT FÜR
REGELUNGSTECHNIK
RWTH AACHEN



Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	IX
Nomenklatur und Abkürzungen	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und allgemeine Problemstellung	1
1.2 Stand der Forschung	3
1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	9
2 Querführung von Nutzfahrzeugkolonnen	11
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 Querführungspro- blems	18
3 Modellierung der Dynamik des Gesamtsystems	20
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 Gesamtsystem- modells	33
3.3 Parametrierung und Vergleich mit Messdaten	34
3.4 Vergleich mit Mehrkörpermodell	39

4	Konzeption und Umsetzung der Bahnführung	42
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
5	Ansätze und Entwurfsverfahren zur Stabilisierung	66
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}_∞ -basierte Regelung	79
5.2.1	Motivierende Betrachtung	79
5.2.2	Grundlagen der \mathcal{H}_∞ -basierten robusten Regelung	80
5.2.3	Allgemeines \mathcal{H}_∞ -Entwurfproblem	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
6	Regelungsentwurf und Erprobung in der Simulation	108
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}_∞ -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
7	Simulationsbasierte Erprobung im Kolonnenbetrieb	135
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
8	Erprobung im Fahrversuch	144

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
9	Zusammenfassung und Ausblick	155
A	Mathematisch-systemtheoretischer Anhang	159
A.1	Signalnormen	159
A.2	\mathcal{H}_∞ -Systemnorm	160
A.3	Skalierung einer Regelstrecke	161
A.4	Bandbreite geschlossener Regelkreise	162
B	Anhang zur Modellierung des Gesamtfahrzeugsystems	163
B.1	Abschätzung von verzögerungsbedingten Achslaständerungen	163
B.2	Modell der Sattelzugdynamik	165
	Literaturverzeichnis	169