

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Hardware-in-the-Loop-Prüfstand für PKW-Achsen	1
1.2	Problemstellung	3
1.3	Zielsetzung	4
1.4	Aufbau der Arbeit	5
2	Stand von Technik und Forschung	7
2.1	Konventionelle Achsprüfung in Industrie und Forschung	7
2.1.1	Hintergrund und Ablauf der Achserprobung	9
2.1.2	Drive-File-Generierung	13
2.1.3	Maßnahmen zur Erhöhung der Konvergenzgeschwindigkeit	22
2.1.4	Weitere Maßnahmen zur Verbesserung des Prozesses	25
2.2	Kraft- und Interaktionsregelung und Anwendung bei Parallelkinematiken	26
2.2.1	Einführung	27
2.2.2	Indirekte Kraftregelungen	35
2.2.3	Direkte Kraftregelungen	38
2.2.4	Anwendungsbeispiele	58
2.3	Modellierung und Simulation von Achsprüfungen	65
2.3.1	Anwendungsbeispiele	66
2.3.2	Radaufhängung nach dem MacPherson-Prinzip	69
2.3.3	Elastomerlager	73
2.4	Zusammenfassung	77
2.5	Handlungsbedarf und Konkretisierung der Zielsetzung	80
3	Vorbetrachtung an zweidimensionaler Kontaktsituation	83
3.1	Kinematische Zwangsbedingung	84
3.2	Dynamische Umgebung	87
3.3	Zusammenfassung	89
4	Modellierung des Prüfstands	91
4.1	Simulationsmodell des betrachteten Prüfsystems	91
4.2	Starrkörper-Dynamikmodell des Hexapod	93
4.2.1	13-Starrkörper-Modell	96
4.2.2	1-Starrkörper-Modell	103

4.2.3	Resultierende Modellgleichungen	104
4.2.4	Parametrierung des 1-Starrkörper-Modells	106
4.2.5	Modellvalidierung anhand des MKS-Hexapodmodells	107
4.3	Starrkörper-Dynamikmodell der MacPherson-Radaufhängung	110
4.3.1	Herleitung der Bewegungsgleichungen	113
4.3.2	Resultierende Modellgleichungen	128
4.3.3	Modellvalidierung anhand des MKS-Radaufhängungsmodells	129
4.4	Kopplung der Teilmodelle zum Gesamtsystemmodell	135
4.4.1	Ideal starre Bindung von Endeffektor und Radnabe	136
4.4.2	Dynamische Bindung von Endeffektor und Radnabe	138
4.4.3	Modellvalidierung anhand des MKS-Prüfstandsmodells	140
4.5	Zusammenfassung	143
5	Synthese einer hybriden Kraft-/Positionsregelung für den Hexapod	145
5.1	Analytische Formulierung nach de Luca und Manes	147
5.1.1	Erweiterung: Selektionsmatrix S zur Wahl zwischen λ_a und y_d	148
5.1.2	Erweiterung: Einbeziehung der Aktordynamik	150
5.1.3	Regelung der Radaufhängung ohne Elastomerlager	155
5.1.4	Regelung der Radaufhängung mit Elastomerlagern	168
5.2	Entwurf mit exakter Ein-/Ausgangslinearisierung	180
5.2.1	Ideal starre Bindung von Endeffektor und Radnabe	180
5.2.2	Dynamische Bindung von Endeffektor und Radnabe	185
5.2.3	Vereinfachte Umgebungsmodelle	188
5.3	Entwürfe ohne Entkopplung der (Kraft-) Regelgrößen	189
5.3.1	Implizite Kraftregelung mit unterlagerter Positionsregelung	191
5.3.2	Weitere Ansätze	203
5.4	Entwurf ohne Umgebungsmodell	205
5.5	Kombination mit ILR für hohe Bandbreitenanforderung	209
5.6	Zusammenfassung	216
6	Zusammenfassung, wissenschaftlicher Beitrag und Ausblick	223
6.1	Zusammenfassung	223
6.2	Wissenschaftlicher Beitrag	227
6.3	Ausblick	228
	Literaturverzeichnis	233
	Literaturverzeichnis der studentischen Arbeiten	253

Anhang

A1 Grundlagen zu Mehrkörpersystemen	257
A1.1 Darstellung von MKS-Topologien	257
A1.2 Notation	257
A1.3 Elementardrehmatrizen	258
A1.4 XYZ-Kardanwinkel	259
A1.5 Eigenschaften von Drehmatrizen	259
A1.6 Kreuzproduktmatrix	260
A2 Aufstellen von Bewegungsgleichungen mithilfe des Prinzips von Jourdain	261
A3 Regelungsentwurf mit exakter Ein-/Ausgangslinearisierung	265
A4 Herleitung der Gleichungen nach de Luca und Manes mittels exakter Ein-/Ausgangslinearisierung	269
A5 Zweidimensionale Modelle	275
A5.1 Relativgeschwindigkeit und Moment in der Ebene	275
A5.2 Manipulator	276
A5.3 Umgebung „Stab mit nicht vernachlässigbarer Dynamik“	278
A5.4 Radaufhängung	280
A6 Lösung der Gleichung $a \cdot \cos x + b \cdot \sin x = c$	287
A7 Zusätzliche Abbildungen zu Kapitel 5	289
A7.1 Analytische Formulierung nach de Luca und Manes	289
A7.1.1 Regelung der Radaufhängung ohne Elastomerlager	289
A7.1.2 Regelung der Radaufhängung mit Elastomerlagern	296
A7.2 Entwurf mit exakter Ein-/Ausgangslinearisierung	308
A7.2.1 Ideal starre Bindung von Endeffektor und Radnabe	308
A7.3 Entwürfe ohne Entkopplung der (Kraft-) Regelgrößen	311
A7.3.1 Implizite Kraftregelung mit unterlagerter Positionsregelung	311
A7.3.2 Weitere Ansätze	314
A7.4 Kombination mit ILR für hohe Bandbreitenanforderung	317
A8 Übertragungsverhalten der Servoventile	321