

# Modellbasierte Synthese einer hybriden Kraft-/Positionsregelung für einen Fahrzeugachsprüfstand mit hydraulischem Hexapod

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
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
<b>2</b>	<b>Stand von Technik und Forschung</b>	<b>7</b>
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
<b>3</b>	<b>Vorbetrachtung an zweidimensionaler Kontaktsituation</b>	<b>83</b>
3.1	Kinematische Zwangsbedingung	84
3.2	Dynamische Umgebung	87
3.3	Zusammenfassung	89
<b>4</b>	<b>Modellierung des Prüfstands</b>	<b>91</b>
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
<b>5</b>	<b>Synthese einer hybriden Kraft-/Positionsregelung für den Hexapod . . . . .</b>	<b>145</b>
5.1	Analytische Formulierung nach de Luca und Manes . . . . .	147
5.1.1	Erweiterung: Selektionsmatrix $S$ zur Wahl zwischen $\lambda_a$ 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-/Ausganglinearisierung . . . . .	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
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung, wissenschaftlicher Beitrag und Ausblick . . . . .</b>	<b>223</b>
6.1	Zusammenfassung . . . . .	223
6.2	Wissenschaftlicher Beitrag . . . . .	227
6.3	Ausblick . . . . .	228
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>233</b>
	<b>Literaturverzeichnis der studentischen Arbeiten . . . . .</b>	<b>253</b>

## Anhang

<b>A1 Grundlagen zu Mehrkörpersystemen</b> . . . . .	<b>257</b>
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
<b>A2 Aufstellen von Bewegungsgleichungen mithilfe des Prinzips von Jourdain</b> . . . . .	<b>261</b>
<b>A3 Regelungsentwurf mit exakter Ein-/Ausgangslinearisierung</b> . . . . .	<b>265</b>
<b>A4 Herleitung der Gleichungen nach de Luca und Manes mittels exakter Ein-/Ausgangslinearisierung</b> . . . . .	<b>269</b>
<b>A5 Zweidimensionale Modelle</b> . . . . .	<b>275</b>
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
<b>A6 Lösung der Gleichung <math>a \cdot \cos x + b \cdot \sin x = c</math></b> . . . . .	<b>287</b>
<b>A7 Zusätzliche Abbildungen zu Kapitel 5</b> . . . . .	<b>289</b>
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
<b>A8 Übertragungsverhalten der Servoventile</b> . . . . .	<b>321</b>