

# Systemtheorie von Hardware-in-the-Loop-Simulationen mit Anwendung auf einem Fahrzeugachsprüfstand mit parallelkinematischem Lastsimulator

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.1.1 Hardware-in-the-Loop-Simulation . . . . .	1
1.1.2 Anwendungsbeispiel Fahrzeugachsprüfstand . . . . .	2
1.1.3 Problemstellung . . . . .	4
1.2 Zielsetzung . . . . .	6
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	7
<b>2 Theoretische Grundlagen</b> . . . . .	<b>9</b>
2.1 Grundlagen der HiL-Methode . . . . .	9
2.2 Modellierung . . . . .	14
2.2.1 PKM am Beispiel eines Hexapoden . . . . .	14
2.2.2 Prüfling - MACPHERSON-Fahrzeugachse . . . . .	22
2.2.3 Umgebungsmodelle . . . . .	26
2.3 Regelungstechnische Grundlagen . . . . .	30
2.3.1 Stabilität nichtlinearer Systeme - Direkte und indirekte Methode nach Lyapunov . . . . .	30
2.3.2 Methode der harmonischen Balance . . . . .	32
2.3.3 Zustandsbeobachtung mit Sliding-Mode . . . . .	33
<b>3 Stand der Technik und Forschung</b> . . . . .	<b>39</b>
3.1 Regelungstechnische Entwurfs- und Analysemethoden für HiL-Systeme . . . . .	39
3.1.1 Substructuring-Methoden . . . . .	39
3.1.2 Optimale HiL-Synthese nach MACDIARMID . . . . .	44
3.1.3 Methoden im Robotik-Bereich . . . . .	47
3.1.4 Methoden im PHiL-Bereich . . . . .	49
3.1.5 Weitere Methoden zur Untersuchung der HiL-Simulationsgüte . . . . .	50
3.2 Vergleichbare Anwendungsbeispiele . . . . .	51
3.2.1 Automotive-Bereich . . . . .	52
3.2.2 Bauingenieurwesen . . . . .	53
3.2.3 Robotik-Bereich . . . . .	55
3.3 Regelungsverfahren für Parallelkinematiken . . . . .	56
3.3.1 Positionsregelungen und Zustandsbeobachter . . . . .	57

3.3.2	Direkte Kraftregelungen und hybride Strukturen . . . . .	61
3.3.3	Indirekte Kraftregelungen . . . . .	63
3.3.4	Analogie zwischen HiL-Simulationen und indirekten Kraftregelungen	67
3.4	Zusammenfassung und Handlungsbedarf . . . . .	68
3.5	Konkrete Zielsetzung und Forschungsbeitrag . . . . .	73
<b>4</b>	<b>Modellbasierter HiL-Entwurf - Teil I: Eindimensionales Ersatzsystem . .</b>	<b>75</b>
4.1	Konzipierung und Strukturierung . . . . .	75
4.1.1	Ausgangssituation und Problemstellung . . . . .	75
4.1.2	HiL-Konfigurationen und Regelungskonzepte . . . . .	77
4.2	Modellierung . . . . .	81
4.3	HiL-System mit Positionsregelung (Admittanzregelung) . . . . .	84
4.3.1	Entwurf . . . . .	84
4.3.2	Funktionsnachweis . . . . .	87
4.3.3	Stabilitätsanalysen . . . . .	88
4.3.4	Auslegung . . . . .	94
4.4	HiL-System mit indirekter Kraftregelung (Impedanzregelung) . . . . .	95
4.5	HiL-System mit direkter Kraftregelung (explizite Kraftregelung) . . . . .	97
4.5.1	Minimalbeispiel zur Realisierung eines HiL-DAE-Systems . . . . .	97
4.5.2	Entwurf für das Anwendungsbeispiel (DAE-System) . . . . .	99
4.5.3	Realisierung und Auslegung . . . . .	101
4.5.4	Modellierung der Aktordynamik . . . . .	102
4.5.5	Optimierungsbasierter Entwurf unter Berücksichtigung der System- dynamik . . . . .	103
4.6	HiL-Systemanalyse . . . . .	107
4.6.1	Einschwingverhalten der HiL-Systeme . . . . .	107
4.6.2	Aktordynamik . . . . .	110
4.6.3	Reibungseffekte . . . . .	121
4.6.4	Massebehafteter Prüfling / Split-Mass-Problem . . . . .	123
4.6.5	Simulationsbasierter Vergleich der HiL-Systeme . . . . .	130
4.7	Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	133
<b>5</b>	<b>Modellbasierter HiL-Entwurf - Teil II: Der mehrdimensionale Fall . . . . .</b>	<b>137</b>
5.1	Erweiterung der HiL-System- und Regelungsstruktur . . . . .	137
5.2	Positionsregelung für den Hexapoden . . . . .	138
5.3	Zustandsbeobachter . . . . .	139
5.3.1	Beobachtbarkeitsmatrix und Beobachtbarkeit . . . . .	140
5.3.2	Hierarchischer Sliding-Mode-Beobachter . . . . .	143
5.3.3	Super-Twisting-Sliding-Mode-Beobachter . . . . .	148
5.3.4	Nichtlinearer Luenberger-artiger Beobachter . . . . .	151
5.3.5	Simulationsbasierte Analyse der Beobachter . . . . .	152
5.4	Entwurf einer hybriden HiL-Regelung . . . . .	158
5.4.1	Entwurf der Kraftregelung . . . . .	158
5.4.2	Hybride HiL-Regelung . . . . .	161
5.5	Simulationsbasierte Analyse des HiL-Systems . . . . .	162
5.5.1	Simulationssetup . . . . .	163
5.5.2	Simulationsergebnisse - Regelgüte . . . . .	163

---

5.5.3 Auswahl des Referenzsystems . . . . .	165
5.5.4 Simulationsergebnisse - HiL-Güte . . . . .	165
5.6 Zusammenfassung und Diskussion . . . . .	170
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>171</b>
6.1 Zusammenfassung . . . . .	171
6.2 Ausblick . . . . .	172
<b>Literatur . . . . .</b>	<b>175</b>