

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
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
2 Theoretische Grundlagen	9
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
3 Stand der Technik und Forschung	39
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
4	Modellbasierter HiL-Entwurf - Teil I: Eindimensionales Ersatzsystem	75
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
5	Modellbasierter HiL-Entwurf - Teil II: Der mehrdimensionale Fall	137
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
6 Zusammenfassung und Ausblick	171
6.1 Zusammenfassung	171
6.2 Ausblick	172
Literatur	175