

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	17
2	Analyse und Zielsetzung	21
2.1	Der hybride Antriebsstrang	22
2.1.1	Ersatzmodell 11-Massen-Schwinger	23
2.1.2	Modalanalyse des Antriebsstrangs	25
2.1.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	28
2.2	Analyse der Stellgrößen	30
2.2.1	Dynamik des Verbrennungsmotors	30
2.2.2	Dynamik der E-Maschine	35
2.2.3	Dynamik der Kupplung	37
2.2.4	Auftreten von Beschränkungen in den Stellgrößen	38
2.3	Ziele und Bewertungskriterien	42
2.4	Stand der Technik	45
3	Reglerauswahl und -synthese	49
3.1	Totzeiten und Stabilität	54
3.2	Optimale Regelung	62
3.3	Control Allocation	63
3.3.1	Control Allocation mit L_1 -Optimalität	64
3.3.2	Control Allocation mit L_2 -Optimalität	66
3.3.3	Pseudo-Inverse	67
3.3.4	Redistributed Pseudo-Inverse	67
3.3.5	Control Allocation mit Sequential-Least-Squares (SLS)	68
3.3.6	Control Allocation mit Weighted-Least-Squares (WLS)	69
3.3.7	Optimale Regelung mit Control Allocation	70
3.3.8	Robustheit und Stabilität	72
3.4	Modellprädiktive Regelung	75
3.4.1	Idee der modellprädiktiven Regelung	76
3.4.2	Regelgesetz	76
3.4.3	Streckenmodell mit Totzeit	79

3.4.4	Erweiterung und Optimierung des Regelgesetzes . .	81
4	Numerische Optimierung	85
4.1	Aktive Mengenstrategie	86
4.2	Befehl quadprog in Matlab	88
4.3	Ellipsoid-Iterationsverfahren	91
4.4	Verfahren der Schnittpunkt-Berechnung	94
4.5	Verfahren unter Ausnutzen der Systemkenntnisse	96
4.6	Multi-Parametric Programming und Toolbox	98
5	Modellbildung mit Modelica	101
5.1	Zylinderbasiertes Motormodell	101
5.1.1	Modell mit thermodynamischen Zustandsgleichungen	103
5.1.2	Kurbeltrieb	105
5.1.3	Ersatzverlaufsmodell	107
5.2	Antriebsstrang	110
5.3	Validierung	114
5.4	Modellreduktion	118
5.5	Validierung des reduzierten Modells	120
6	Implementierung	123
6.1	Regelstrecke	125
6.2	Control Allocation	127
6.3	Modellprädiktive Regelung	128
6.3.1	Berechnung der Referenztrajektorie	129
6.3.2	Filterung der Signale, Kalmanfilter	131
6.4	Simulationskonfiguration und Fahrmanöver	132
7	Verifikation und Bewertung	135
7.1	Optimale Regelung	135
7.2	Control Allocation	138
7.2.1	Nominales Streckenmodell	139
7.2.2	Prädiktion im Mehrgrößenfall	140
7.2.3	Schleppstart mit komplexem Streckenmodell	141
7.3	Modellprädiktive Regelung	143
7.3.1	Nominales Streckenmodell	143
7.3.2	Schleppstart mit komplexem Streckenmodell	150
7.4	Bewertung und Vergleich der Verfahren	153
8	Zusammenfassung und Ausblick	157

A	Formelzeichen und Abkürzungen	169
B	Anhang	175
B.1	Herleitung Optimale Regelung	175
B.2	Herleitung Pseudo-Inverse	177
B.3	Kalmanfilter	178
B.4	Implementierung der modellprädiktiven Regelung	180
B.5	Gleichungen	182
B.6	Tabellen	184
B.7	Abbildungen	188