

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>17</b>
<b>2 Analyse und Zielsetzung</b>	<b>21</b>
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
<b>3 Reglerauswahl und -synthese</b>	<b>49</b>
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
<b>4</b>	<b>Numerische Optimierung</b>	<b>85</b>
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
<b>5</b>	<b>Modellbildung mit Modelica</b>	<b>101</b>
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
<b>6</b>	<b>Implementierung</b>	<b>123</b>
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
<b>7</b>	<b>Verifikation und Bewertung</b>	<b>135</b>
7.1	Optimale Regelung . . . . .	135
7.2	Control Allocation . . . . .	138
7.2.1	Nominelles 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	Nominelles Streckenmodell . . . . .	143
7.3.2	Schleppstart mit komplexem Streckenmodell . . . . .	150
7.4	Bewertung und Vergleich der Verfahren . . . . .	153
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>157</b>

<b>A</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>169</b>
<b>B</b>	<b>Anhang</b>	<b>175</b>
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