

# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>iv</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Funktionen der Höhenflosse . . . . .	4
1.2 Stand der Wissenschaft und Technik . . . . .	7
1.2.1 Konventionelle Höhenflossenstellantriebe . . . . .	8
1.2.2 Problemstellung . . . . .	9
1.2.3 Literaturübersicht . . . . .	11
1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit . . . . .	14
<b>2 Prinzip des neuen Systemkonzeptes für Höhenflossenstellantriebe</b>	<b>17</b>
2.1 Systemarchitektur . . . . .	17
2.1.1 Grundlegendes theoretisches Konzept . . . . .	17
2.1.2 Mechanische Leistungsübertragung . . . . .	19
2.1.3 Realisierung . . . . .	25
2.2 Untersuchungen zur Lastsynchronisation . . . . .	27
2.3 Anforderungen an Regelung und Überwachung . . . . .	34
<b>3 Modellierung und systemtechnische Untersuchung des Stellsystems</b>	<b>43</b>
3.1 Nichtlineares Streckenmodell . . . . .	43
3.1.1 Grundelemente des mechanischen Teils der Modellbildung . . . . .	45
3.1.2 Hydromotor . . . . .	50
3.1.3 Differenzialgetriebe . . . . .	53
3.1.4 Spindelaktuator . . . . .	57
3.1.5 Höhenflosse . . . . .	58
3.2 Vollständiges nichtlineares Modell . . . . .	61
3.3 Linearisierung des Systemmodells . . . . .	65
3.4 Untersuchung der Stellsystemdynamik . . . . .	67
3.4.1 Lineares Modell . . . . .	67
3.4.2 Untersuchung der Synchronisationsgüte in Abhängigkeit der nichtlinearen Effekte . . . . .	70
<b>4 Experimentalsystem</b>	<b>75</b>
4.1 Systemaufbau . . . . .	75
4.1.1 Prüfumgebung . . . . .	75
4.1.2 Experimental THSA . . . . .	77
4.1.3 Messtechnik . . . . .	79
4.2 Belastungseinheit . . . . .	80

4.2.1	Drosselsteuerung des Linearaktuators . . . . .	81
4.2.2	Kraftregelung . . . . .	81
4.3	Versuchssteuerung . . . . .	83
4.3.1	Echtzeitsystem . . . . .	83
4.3.2	Steuerung des Experimentalsystems mithilfe von Zustands- automaten . . . . .	84
4.4	Versuche zur Parameteridentifikation . . . . .	85
4.4.1	Ermittlung des mechanischen Spiels . . . . .	86
4.4.2	Ermittlung der Reibparameter der mechanischen Kompo- nenten . . . . .	87
4.4.3	Frequenzganganalyse der Schwenkscheibenverstellung . . . .	93
<b>5</b>	<b>Reglersynthese und Systemdynamik</b>	<b>97</b>
5.1	Anforderungen an die Reglerstruktur . . . . .	98
5.1.1	Regelungsaufgabe . . . . .	100
5.1.2	Entwurfsmodelle und Auswahl der Reglerstruktur . . . . .	102
5.2	Reglersynthese am nominalen Modell . . . . .	109
5.2.1	Prinzipien der dezentralen und der Mehrgrößenregelung . .	110
5.2.2	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit . . . . .	117
5.2.3	Stabilität von Mehrgrößenregelkreisen . . . . .	120
5.2.4	Konventioneller dezentraler Kaskadenregler . . . . .	120
5.2.5	Mixed Sensitivity Mehrgrößenreglerentwurf . . . . .	130
5.2.6	$\mathcal{H}_\infty$ -Entwurf mit fester Reglerstruktur . . . . .	148
5.3	Systemdynamik und Vergleich der verschiedenen Regler . . . .	155
5.3.1	Systemdynamik des konventionellen Kaskadenreglerentwurfs	156
5.3.2	Systemdynamik der Mehrgrößenreglerentwürfe . . . . .	159
5.3.3	Vergleich Kaskadenregler und ausgewählte Mehrgrößenregler	162
5.3.4	Frequenzgangmessungen am Experimentalsystem . . . . .	168
5.4	Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse der Reglersynthese	169
5.4.1	Zusammenfassung . . . . .	170
5.4.2	Bewertung . . . . .	171
5.5	Robustheitsanalyse . . . . .	172
5.5.1	Modellunsicherheiten . . . . .	173
5.5.2	Robustheit der Mehrgrößenreglerentwürfe . . . . .	179
<b>6</b>	<b>Fehlerüberwachung und Untersuchung degradierter Systemzu- stände</b>	<b>183</b>
6.1	Fehlerfälle . . . . .	184
6.2	Systemüberwachung . . . . .	187
6.2.1	Sensorik . . . . .	188
6.2.2	Fehlererkennung . . . . .	189
6.2.3	Monitorentwurf . . . . .	191

6.2.4	Testroutine am Boden . . . . .	194
6.3	Simulationen und Messungen am Prüfstand mit induzierten Fehlern	197
6.3.1	Powered Runaway . . . . .	198
6.3.2	Wellenbruch . . . . .	200
6.3.3	Klemmen einer Kugelumlaufspindel . . . . .	202
6.3.4	Ausfall einer Hydraulikversorgung . . . . .	203
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>205</b>
<b>A</b>	<b>Technische Daten und Parameter des THSA</b>	<b>211</b>
<b>B</b>	<b>Lineare Teilmodelle</b>	<b>214</b>
B.1	Servoventil . . . . .	214
B.2	Hydromotor . . . . .	214
B.3	Wellenabschnitt . . . . .	215
B.4	Differenzialgetriebe . . . . .	216
B.5	Kugelumlaufspindel . . . . .	220
B.6	Höhenflosse . . . . .	221
<b>C</b>	<b>Numerische Entwurfsmodelle</b>	<b>222</b>
C.1	Entwurfsmodelle dezentrale Kaskadenregelung . . . . .	222
C.2	Entwurfsmodelle Mehrgrößenregelung . . . . .	224
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>227</b>