

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und Wissenschaft .....</b>	<b>3</b>
2.1	Terminologie .....	3
2.2	Elektromechanische Linearantriebe .....	6
2.2.1	Unterscheidungsmerkmale elektromechanischer Linearantriebssysteme .....	7
2.2.2	Spindelhubantriebe .....	9
2.2.3	Spindelhubantriebe mit Trapezgewindespindel (SHTR) .....	14
2.3	Schwingungsursachen in SHTR .....	18
2.3.1	Schwingungen in Trapezgewindespindeln .....	20
2.3.2	Schwingungen in Schraubrad- und Schneckengetrieben .....	26
2.3.3	Schwingungen in den Anschlussgliedern .....	31
2.4	Modellbildung und Simulation .....	36
2.4.1	Mehrkörpersysteme .....	37
2.4.2	Methodische Modellbildung von Mehrkörpersystemen .....	39
2.5	Modelle zur Bewertung des dynamischen Betriebsverhaltens von elektromechanischen Linearantrieben .....	42
2.5.1	Elektromechanische Linearantriebssysteme .....	43
2.5.2	Trapezgewindespindeln .....	44
2.5.3	Schnecken- und Schraubradgetriebe .....	46
2.5.4	Anschlussglieder .....	47
2.6	Zusammenfassung und Handlungsbedarf .....	48
<b>3</b>	<b>Zielsetzung und weitere Vorgehensweise .....</b>	<b>51</b>
3.1	Zielsetzung .....	51
3.2	Weitere Vorgehensweise .....	51
<b>4</b>	<b>Definition des Untersuchungsgegenstands .....</b>	<b>55</b>

<b>5</b>	<b>Systemanalyse und Modellerstellung .....</b>	<b>57</b>
5.1	Anforderungen an das Simulationsmodell .....	57
5.1.1	Generelle Anforderungen .....	57
5.1.2	Spezifische Anforderungen .....	58
5.1.3	Vereinfachungen und Annahmen .....	58
5.2	Wahl der Simulationsumgebung .....	60
5.3	Definition von Teilsystemen und der räumlichen Freiheitsgrade .....	62
5.4	Modellbildung der Getriebe (Kontaktbereiche) .....	63
5.4.1	Analogiebetrachtung .....	64
5.4.1.1	Schneckengetriebe .....	64
5.4.1.2	Voruntersuchung: Zeitlich veränderliche Zahnsteifigkeit .....	66
5.4.1.3	Spindelgetriebe .....	72
5.4.1.4	Steigungsrichtung und Betriebszustände .....	74
5.4.2	Kinematik und Kräfte des Keilgetriebes .....	76
5.4.3	Systemreibung .....	80
5.4.4	Schwingungstechnische Bewertung des Keilgetriebes .....	82
5.4.5	Modellverifizierung und Systemverhalten .....	90
5.4.5.1	Flatterschwingungen .....	92
5.4.5.2	Ratterschwingungen .....	99
5.4.5.3	Stick-Slip-Schwingungen durch negative Dämpfung .....	104
5.4.5.4	Unterscheidungsmerkmale der Schwingphänomene .....	111
5.5	Modellbildung des Asynchronmotors .....	112
5.6	Modellbildung des Regelkreises .....	114
5.7	Modellbildung weiterer Übertragungsglieder .....	117
5.7.1	Diskretisierung von Wellen und des Teleskoprohrs .....	117
5.7.2	Veränderliche Steifigkeit der Spindel .....	120
5.7.3	Berücksichtigung von Lagerungen .....	121
5.7.4	Mechanische Anschläge .....	122
5.8	Ersatzschaltbild des Antriebssystems .....	124
<b>6</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>127</b>
6.1	Prüfstand .....	127
6.2	Überprüfung des Prüfstandkonzepts .....	131

6.2.1	Versuchsdurchführung .....	132
6.2.2	Ergebnisse: Verluste und Prozesskennwerte .....	133
6.2.3	Ergebnisse: Schwingungsverhalten .....	138
6.2.4	Fazit .....	143
6.3	Ermittlung von notwendigen Systemparametern .....	144
6.3.1	Reibwertermittlung .....	145
6.3.2	Zahnsteifigkeit des Schneckengetriebes .....	152
6.3.3	Flankensteifigkeit des Spindelgetriebes .....	155
<b>7</b>	<b>Modellvalidierung für den stabilen Betrieb.....</b>	<b>159</b>
7.1	Modifikation des Systemmodells .....	159
7.2	Durchführung der Validierung .....	160
7.3	Ergebnisse der Validierung .....	166
7.3.1	Quantitative Bewertung .....	166
7.3.2	Qualitative Bewertung .....	174
7.4	Fazit .....	177
<b>8</b>	<b>Modellvalidierung für den instabilen Betrieb .....</b>	<b>181</b>
8.1	Bewertung von Antriebssystem 1 .....	181
8.1.1	Bewertung der Eintrittsmöglichkeit von Eigenschwingungen .....	181
8.1.2	Bewertung der Eintrittsmöglichkeit für Stick-Slip-Schwingungen .....	184
8.1.3	Bewertung der Eintrittsmöglichkeit für Ratterschwingungen .....	190
8.1.4	Bewertung der Eintrittsmöglichkeit für Flatterschwingungen .....	192
8.1.5	Fazit .....	195
8.2	Bewertung von Antriebssystem 2 .....	196
8.2.1	Bewertung der Eintrittsmöglichkeit von Eigenschwingungen .....	196
8.2.2	Bewertung der Eintrittsmöglichkeit für Stick-Slip-Schwingungen .....	197
8.2.3	Bewertung der Eintrittsmöglichkeit für Ratterschwingungen .....	199
8.2.4	Bewertung der Eintrittsmöglichkeit für Flatterschwingungen .....	200
8.2.5	Fazit .....	202
<b>9</b>	<b>Parameterstudie zur Schwingungsbeeinflussung .....</b>	<b>205</b>
9.1	Einfluss des Steifigkeitsverhältnisses .....	207
9.2	Einfluss des Massenverhältnisses .....	209

---

9.3	Einfluss des Reibkoeffizienten .....	212
9.4	Einfluss der Dämpfung .....	214
9.5	Einfluss der mechanischen Umgebungsstruktur .....	217
9.5.1	Einfluss der Steifigkeit der Anwendung .....	218
9.5.2	Einfluss der Dämpfung der Anwendung .....	219
9.5.3	Einfluss von Übersetzungen .....	220
9.5.4	Einfluss der äußeren Last und der Beschleunigung .....	221
9.6	Fazit und Hinweise zur schwingungsvermeidenden Gestaltung von SHTR .....	223
9.7	Bedeutung der Ergebnisse für das Antriebssystem 2 .....	226
<b>10</b>	<b>Optimierung von Antriebssystem 2 .....</b>	<b>229</b>
10.1	Gezielte Anpassung der Systemparameter .....	229
10.2	Experimentelle Überprüfung .....	234
10.3	Fazit .....	238
<b>11</b>	<b>Interpretation der Ergebnisse .....</b>	<b>239</b>
<b>12</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>241</b>
12.1	Zusammenfassung .....	241
12.2	Ausblick .....	243
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>245</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>256</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>265</b>
	<b>Verwendete Formelzeichen .....</b>	<b>267</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>276</b>