

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
1.1	Schwingungsanalyse linearer und nichtlinearer Systeme . . . . .	1
1.2	Ziel der Arbeit . . . . .	3
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>8</b>
2.1	Grundlagen der Schwingungsanalyse . . . . .	8
2.1.1	Frequenzübertragungsverhalten von Strukturen . . . . .	9
2.1.2	Lineares vs. nichtlineares Übertragungsverhalten . . . . .	13
2.1.3	Betrachtete Nichtlinearitäten . . . . .	16
2.2	Vorgehen bei der Schwingungsanalyse . . . . .	18
2.2.1	Topologie, typischer Messaufbau . . . . .	18
2.2.2	Klassen von Anregungssignalen . . . . .	19
2.2.3	Ursachen nichtlinearer Verzerrungen der Schwinganregung . . . . .	22
2.2.4	Input Notching . . . . .	23
2.2.5	Kommerzielle Schwingungs-Mess-Systeme . . . . .	24
2.3	Thematisch verwandte Ansätze und Methoden . . . . .	25
2.4	Fazit . . . . .	29
<b>3</b>	<b>Ein neues Konzept für die Schwingungsanalyse</b>	<b>30</b>
3.1	Zielsetzung und Ausgangspunkt . . . . .	30
3.2	Überblick . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Messung des Frequenzübertragungsverhaltens</b>	<b>35</b>
4.1	Ausgangspunkt für die Bestimmung des Frequenzübertragungsverhaltens . . . . .	35
4.2	Das Konzept der Best Linear Approximation . . . . .	36
4.2.1	Herleitung der Best Linear Approximation . . . . .	36
4.2.2	Eigenschaften der Best Linear Approximation . . . . .	38
4.3	Bestimmung der Best Linear Approximation . . . . .	39
4.3.1	Multisinus-Anregungssignale . . . . .	39
4.3.2	Die robuste Methode . . . . .	45
4.3.3	Die schnelle Methode . . . . .	50
4.3.4	Vergleich der Methoden und Auswahl . . . . .	53
4.4	Anmerkungen zur Umsetzung . . . . .	54
4.4.1	Praktische Umsetzung der Messmethode anhand eines Beispiels . . . . .	54
4.4.2	Rauscherkennung und Filterung der Messdaten . . . . .	56
4.4.3	Iterative Erzeugung von Multisinus-Signalen für die Verwendung mit elektromechanischen Schwinganregern . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Identifikation des Peak Bending-Verhaltens</b>	<b>60</b>
5.1	Vorbemerkung . . . . .	60

5.2	Erkennung von Resonanzstellen . . . . .	62
5.3	Bestimmung der Peak Bending Curve . . . . .	63
5.4	Vorhersage der Peak Bending Curve mit wenigen Stützstellen . . . . .	67
5.4.1	Grundlegende Annahmen und Kernidee . . . . .	67
5.4.2	Einfache Extrapolation . . . . .	69
5.4.3	Autoregressive Modelle . . . . .	70
5.4.4	Partikelfilter . . . . .	72
5.4.5	Vergleich der Methoden und Auswahl . . . . .	75
<b>6</b>	<b>Implementierung und Experimentelle Validierung</b>	<b>78</b>
6.1	Realisierung des Mess-Systems . . . . .	79
6.1.1	Implementierung der Software . . . . .	79
6.1.2	Implementierung auf Echtzeithardware . . . . .	79
6.1.3	Graphische Benutzeroberfläche für die Bedienung des Systems . . . . .	81
6.2	Simulative und Experimentelle Validierung . . . . .	83
6.2.1	Vorbemerkungen zur Bewertung von Abweichungen . . . . .	85
6.2.2	Simulation . . . . .	87
6.2.3	Studie zur Genauigkeit der Vorhersage . . . . .	91
6.2.4	Studie zu Sprungphänomenen . . . . .	95
6.2.5	Hardware-in-the-Loop . . . . .	98
6.2.6	Schwingleisten-Demonstrator . . . . .	103
6.3	Einfluss des Verlaufs realer Peak Bending Curves auf Vorhersagefehler des Identifikationsverfahrens . . . . .	109
6.4	Fazit . . . . .	111
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>115</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>118</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>127</b>
A.1	Anbieter kommerzieller Schwingungsanalyse-Systeme . . . . .	127
A.2	Konstruktion des künstlichen Testdatensatzes . . . . .	128
A.3	Konfiguration der verwendeten Echtzeithardware . . . . .	129
A.4	Blockschaltbild des Echtzeitcodes . . . . .	130
A.5	Modell des Duffing-Schwingers . . . . .	131
A.6	Schwingleisten-Prüfstand . . . . .	132