

Inhalt

Kurzfassung	IX
Abstract	XI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangspunkt und Problemstellung	3
1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	4
2 Theoretische Grundlagen	7
2.1 Finite-Elemente-Methode	7
2.1.1 Bewegungsgleichung	8
2.1.2 Wärmeleitungsgleichung	11
2.1.3 Kopplungsmatrizen	12
2.1.4 Thermomechanische Bewegungsgleichung	13
2.1.5 Systemdynamische Darstellung elastischer Strukturen	14
2.2 Modellordnungsreduktion durch Projektion	16
2.2.1 Guyan-Kondensation	17
2.2.2 Modales Abschneiden	18
2.2.3 Moment-Matching mit Krylov-Unterraummethoden	20
2.2.4 Balanciertes Abschneiden	21
2.3 Experimentelle Modalanalyse	23
3 Thermomechanische Simulation	27
3.1 Aspekte der Implementierung der Finite-Elemente-Methode thermomechanischer Systeme	27
3.1.1 Elemente und Ansatzfunktionen	28

3.1.2	Transformation in globale Koordinaten	28
3.1.3	Numerische Integration mittels Gauß-Legendre-Quadratur	31
3.2	Berechnungsbeispiele - transiente thermomechanische Simulation	31
3.2.1	Validierung im eindimensionalen Fall	32
3.2.2	Aufheizvorgang einer Bremsscheibe	34
3.3	Transiente thermomechanische Simulation mit reduzierten Modellen	43
3.4	Diskussion	49
4	Interpolationsbasierte Modellordnungsreduktion in der Komplexen Eigenwertanalyse	51
4.1	Modellierung von Bremssystemen für die Komplexe Eigenwertanalyse und untersuchte Modelle	52
4.1.1	Akademisches Bremsenmodell	52
4.1.2	Industrielle Bremsenmodelle	53
4.1.3	Assemblieren von Bauteilen zu einem Gesamtmodell	55
4.2	Berechnungsprozedur der Komplexen Eigenwertanalyse	59
4.2.1	Ausgangssituation - Nichtlineare Bewegungsgleichung	59
4.2.2	Statische Kontaktanalyse	60
4.2.3	Quasistatische Analyse mit zentrifugaler Last	61
4.2.4	Reelle Eigenwertanalyse ohne Dämpfung	63
4.2.5	Komplexe Eigenwertanalyse des reduzierten Systems	64
4.2.6	Systemmatrizen des KEA-Systems und Schreibweise in PERMAS	67
4.2.7	Diskussion der etablierten Methode	69
4.3	Parametrische Modellordnungsreduktion in der Komplexen Eigenwertanalyse	71
4.3.1	Modellreduktion für lineare, parametrische Systeme	71
4.3.2	Interpolationsbasierte Verfahren für parametrische Systeme	73
4.3.3	Interpolationsbasiertes Verfahren in der Komplexen Eigenwertanalyse	74
4.3.4	Ergebnisse der Analysen im Vergleich	75
4.3.5	Berechnungsworkflow und Toolchain der Komplexen Eigenwertanalyse mit parametrischer Modellordnungsreduktion	90

5	Kopplung reduzierter Bauteile zur Erweiterung von substrukturierten Bremsenmodellen	95
5.1	Aufbau substrukturierter Bremsenmodelle	96
5.2	Kopplung substrukturierter Systeme	97
5.2.1	Kopplung mit Bindungsgleichungen	97
5.2.2	Kopplung auf Basis von Feder-Dämpfer-Elementen	101
5.3	Reduktionsverfahren für substrukturierte Systeme	102
5.3.1	CMS-Gram	103
5.3.2	Craig-Bampton-Verfahren	105
5.3.3	CMS-Krylov	105
5.4	Vergleich der reduzierten Modelle	106
5.4.1	Untersuchtes Modell	106
5.4.2	Vergleich der Simulationsergebnisse	109
5.5	Experimentelle Untersuchungen mittels Laser-Doppler-Vibrometer	116
5.5.1	Konstruktion des Versuchaufbaus	117
5.5.2	Modalanalyseverfahren	117
5.5.3	Ergebnisse der Modalanalyse	122
6	Zusammenfassung	129
	Literatur	133