

Analyse aeroelastischer Systeme mit Spektralen Stochastischen Finite-Element-Methoden

Von der

Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Michael Löhr
aus Hörter

Eingereicht am

8. Juli 2005

Mündliche Prüfung am

9. Juni 2006

Berichter

Prof. Dr.-Ing. Dieter Dinkler

Prof. Hermann Matthies, Ph.D.

Prüfer

Prof. Dr.rer.nat. Heinz Antes

Braunschweig 2006

Inhalt

Bezeichnungen	vii
1. Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Zum Inhalt der Arbeit	3
2. Analyse aeroelastischer Systeme	5
2.1 Aeroelastische Phänomene	6
2.1.1 Fremderregung von Tragwerken	6
2.1.2 Selbsterregung von Tragwerken	7
2.2 Modellierung der Struktur	9
2.2.1 Arbeitsgleichung	9
2.2.2 Balken- und Plattenmodelle	10
2.3 Finite-Element-Methode	11
2.4 Modellierung der Strömung	12
2.4.1 Strömungsmechanische Kennzahlen und Modellgleichungen .	12
2.4.2 Virtuelle Arbeiten der aerodynamischen Lasten	16
2.5 Numerische Analyse aeroelastischer Systeme	17
2.5.1 Analyse böenerregter Strukturen	17
2.5.2 Analyse wirbelerregter Strukturen	18
2.5.3 Stabilitätsanalysen von aeroelastischen Systemen	19
3. Diskretisierung stochastischer Prozesse	23
3.1 Beschreibung und Charakterisierung von Zufallsprozessen	24
3.1.1 Grundlagen	24
3.1.2 Darstellung von Zufallsfeldern	26
3.2 Karhunen-Loève-Entwicklung	28
3.2.1 Herleitung und Eigenschaften	28
3.2.2 Lösung der FREDHOLM-Integralgleichung	30
3.2.3 Konvergenzuntersuchungen	32
3.3 Entwicklung in Polynomiales Chaos	36
3.3.1 Grundlagen der Hermite-Polynome	36

3.3.2	Erwartungwertbildung für Polynomiales Chaos	38
3.3.3	Fraktile der Polynomialen Chaos-Entwicklung	39
3.3.4	Approximation lognormalverteilter Zufallsprozesse	39
3.3.5	Approximation von Zufallsprozessen für gegebene statistische Momente	45
3.3.6	Gram-Charlier- und Edgeworth-Reihenentwicklungen	48
4.	Stochastische Finite-Element-Methoden	51
4.1	Monte-Carlo-Simulation	52
4.2	Störmethode	52
4.3	Spektrale Stochastische Finite-Element-Methoden	56
4.3.1	Anwendung auf lineare Systeme	57
4.3.2	Konvergenzbetrachtungen	60
4.3.3	Numerische Lösungsverfahren	63
4.3.4	Anwendungsbeispiel	65
4.3.5	Anwendung auf dynamische Systeme	71
4.3.6	Anwendung auf nichtlineare Systeme	78
5.	Eigenwertprobleme mit stochastischen Koeffizienten	79
5.1	Eigenwertformulierung für Spektrale Stochastische FE-Methoden . .	80
5.2	Lösungsalgorithmen	81
5.2.1	Analytische Lösungen der charakteristischen Gleichung	81
5.2.2	Berechnungsverfahren für Finite-Element-Modelle	83
5.3	Anwendungsbeispiel	85
6.	Probabilistische Analysen aeroelastischer Systeme	87
6.1	Stabilitätsanalyse einer Tragfläche	87
6.1.1	Torsionsdivergenz bei statischem Antwortverhalten	88
6.1.2	Torsionsdivergenz bei dynamischem Antwortverhalten	93
6.2	Galloping-Instabilität eines Brückenquerschnittes	95
6.3	Wirbelerregte Schwingungen	97
6.3.1	Versuchsauswertung und stochastische Diskretisierung	97
6.3.2	Numerische Analyse eines wirbelerregten Mastes	102
6.4	Zusammenfassende Bewertung	105
7.	Zusammenfassung	107
	Summary	109
	Literatur	111