

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Forschungshypothese	3
1.2. Stand der Forschung	4
2. Analyse aeroelastischer Systeme	7
2.1. Lösung des Strömungsproblems	7
2.1.1. Analytischer Ansatz für ein zweidimensionales Profil	8
2.1.2. Numerisches Verfahren: Computational Fluid Dynamics (CFD)	11
2.2. Lösung des Strukturproblems	15
2.2.1. Stationäre Strukturberechnung	16
2.2.2. Instationäre Strukturberechnung	16
2.2.3. Finite Elemente Methode (FEM)	18
2.3. Partitionierter Lösungsansatz zur Analyse aeroelastischer Systeme	20
2.3.1. Instationäre Kopplungsschemata	22
2.3.2. Einbindung des Ersatzmodells in den partitionierten Ansatz	24
3. Ansatz der Ersatzmodellierung	27
3.1. Proper Orthogonal Decomposition	28
3.2. Markov-Ketten-Ansatz	31
3.2.1. ARMA-Modell	31
3.2.2. NARMA-Modell	32
3.2.3. Modellierung instationärer Aerodynamik mittels Markov-Ketten	32
3.2.4. Modellierung einer diskreten Böe mit der Markov-Kette	34
3.3. Nichtlineare Abbildungsmethoden	35
3.3.1. Polynomiale Abbildung	36
3.3.2. Neuronale Netze mit radialen Basisfunktionen	36
3.3.3. Weitere Abbildungsverfahren	49
3.3.4. Vergleichsstudie der Verfahren	53
3.4. Training des Gesamtmodells	58
3.5. Einbinden von Metaparametern	60
4. Anwendung auf einen 2D-Fall: NLR7301	63
4.1. Strukturmodell	63
4.2. Fluidmodell	64
4.3. Identifikation des Ersatzmodells	67
4.3.1. Trainingsdaten	67
4.3.2. Parameterdefinition	69
4.4. Stationäre Analyse	72
4.5. Instationäre Analyse: Limit Cycle Oscillations	74
4.6. Variation der Strömungsparameter	78
4.7. Zusammenfassung	80

Inhaltsverzeichnis

5. Anwendung auf einen einfachen 3D-Fall: AGARD445.6	81
5.1. Strukturmodell	81
5.2. Fluidmodell	83
5.3. Bestimmung der Flattergrenze bei $Ma=0,901$	84
5.3.1. Modellidentifikation	84
5.3.2. Flatteruntersuchung	86
5.4. Einbinden zusätzlicher Parameter: Machzahl	90
5.4.1. Modellidentifikation	91
5.4.2. Bestimmung der Flattergrenze im transsonischen und unteren supersonischen Bereich	91
5.5. Zusammenfassung	94
6. Anwendung auf einen realitätsnahen 3D-Fall: HIRENASD	95
6.1. Strukturmodell	95
6.2. Fluidmodell	98
6.3. Balkeninterpolation	101
6.3.1. Überschneidungs- und Klaffungszonen bei Knicken im Balkenverlauf	102
6.4. Validation des aeroelastischen Modells anhand des Testfalls 132	105
6.5. Untersuchung bei höheren Anstellwinkeln	107
6.5.1. Identifikation des Ersatzmodells	112
6.5.2. Stationäre Analyse	115
6.5.3. Instationäre Analyse	118
6.6. Variation des Strukturmodells	121
6.6.1. Stationäre Analyse	122
6.6.2. Instationäre Analyse	125
6.7. Einbinden zusätzlicher Parameter: Anstellwinkel	127
6.7.1. Untersuchung der stationären Analyse anhand des Testfalls 132	127
6.7.2. Untersuchung der instationären Analyse bei interpolierten Anstellwinkeln	130
6.8. Zusammenfassung	132
7. Ausblick: Vorhersage von Böen	133
7.1. Böenvorhersage ohne Strukturmkopplung	133
7.2. Böenvorhersage mit Strukturmkopplung	135
7.3. Zusammenfassung	137
8. Zusammenfassung und Ausblick	139
A. Allgemeiner Anhang	149
A.1. Kombination zweier POD-Basen	149
A.2. Bestimmung ellipsoider Funktionsformen mittels SVD	149
A.3. Strömungsbedingungen in reibungsfreier Strömung	150
A.4. Strömungsbedingungen in reibungsbehafteter Strömung: Sutherland-Modell	150
A.5. Iterative Bestimmung der Flattergrenze mit Hilfe des logarithmischen Dekrements	151
B. Anhang zusätzlicher Ergebnisse zum AGARD445.6-Flügel	153
B.1. Ersatzmodellidentifikation im transsonischen und unteren supersonischen Bereich mit der Machzahl als Metaparameter	153
B.2. Bestimmung der Flattergrenze mit variiertem Strukturmodell	154

C. Anhang zusätzlicher Ergebnisse zur HIRENASD-Konfiguration	157
C.1. Aerodynamische Kurven und Druckverteilungen des starren Flügels beim Testfall 132	157
C.2. Stationäre Analyse bei höheren Anstellwinkel mit dem Ersatzmodell	159
C.3. Stationäre Analyse mit variierten Strukturmodellen	161
C.4. Ersatzmodellidentifikation mit dem Anstellwinkel als Metaparameter	163
C.5. Ersatzmodell-Untersuchung des Testfalls 132	165
C.6. Transiente Analyse mit interpoliertem Anstellwinkel und Strukturvariation . .	167
C.7. Transiente Analyse mit Anstellwinkel-, Struktur- und Strömungsvariation . .	169