



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation und Forschungshypothese . . . . .	3
1.2. Stand der Forschung . . . . .	4
<b>2. Analyse aeroelastischer Systeme</b>	<b>7</b>
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
<b>3. Ansatz der Ersatzmodellierung</b>	<b>27</b>
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
<b>4. Anwendung auf einen 2D-Fall: NLR7301</b>	<b>63</b>
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



<b>5. Anwendung auf einen einfachen 3D-Fall: AGARD445.6</b>	<b>81</b>
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 super- sonischen Bereich . . . . .	91
5.5. Zusammenfassung . . . . .	94
<b>6. Anwendung auf einen realitätsnahen 3D-Fall: HIRENASD</b>	<b>95</b>
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 Anstellwin- keln . . . . .	130
6.8. Zusammenfassung . . . . .	132
<b>7. Ausblick: Vorhersage von Böen</b>	<b>133</b>
7.1. Böenvorhersage ohne Strukturkopplung . . . . .	133
7.2. Böenvorhersage mit Strukturkopplung . . . . .	135
7.3. Zusammenfassung . . . . .	137
<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>139</b>
<b>A. Allgemeiner Anhang</b>	<b>149</b>
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 Dekre- ments . . . . .	151
<b>B. Anhang zusätzlicher Ergebnisse zum AGARD445.6-Flügel</b>	<b>153</b>
B.1. Ersatzmodellidentifikation im transsonischen und unteren supersonischen Be- reich mit der Machzahl als Metaparameter . . . . .	153
B.2. Bestimmung der Flattergrenze mit variiertem Strukturmodell . . . . .	154



<b>C. Anhang zusätzlicher Ergebnisse zur HIRENASD-Konfiguration</b>	<b>157</b>
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