

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Motivation	2
1.3	Stand der Wissenschaft und Technik	5
1.4	Einordnung und Zielsetzung der Arbeit	8
2	Einführung in die Aeroelastik	10
2.1	Dynamische Aeroelastik in Axialverdichtern	11
2.1.1	Fremderregte Schaufelschwingungen	11
2.1.2	Selbsterregte Schaufelschwingungen	13
2.2	Aeroelastische Problemformulierung	15
2.2.1	Aerodynamische Kräfte und kinematische Zusammenhänge	15
2.2.2	Aeroelastische Bewegungsgleichungen	20
2.2.3	Analytische Lösung in Wanderwellenkoordinaten	21
2.3	Angewendete Methoden zur Berechnung aeroelastischer Parameter	23
2.3.1	Kopplungsprinzipien und Methodenstrukturierung	23
2.3.2	Energiemethode	28
2.3.3	Lösung im Frequenzbereich - Eigenwertmethode	36
2.3.4	Lösung im Zeitbereich - bidirektionale Kopplung	37
2.3.5	Lösung strukturdynamischer Gleichungen mittels FEM	42
2.3.6	Lösung strömungsmechanischer Gleichungen, FVM	45
3	Validierung der Kopplungsverfahren	56
3.1	Querangeströmte, elastische Platte	56
3.2	Verdichtergitter NACA3506	64
3.2.1	Konfiguration der Verdichterkaskade	66
3.2.2	Stationäre Lösungen	69
3.2.3	Instationäre Lösungen	72
3.2.4	Abschließende Bemerkungen	81
4	Engine 3E Hochdruckverdichter - Rotorstufe 6	82
4.1	Modellbildung	83
4.1.1	Strömungsmodelle	84
4.1.2	Strukturmodelle und ihre Einbindung in die aeroelastische Simulation	89
4.2	Aeroelastische Ergebnisse	92
4.2.1	Unidirektionale Kopplung, Lösung im Zeitbereich	93
4.2.2	Unidirektionale Kopplung, Lösung im Frequenzbereich	106

4.2.3	Bidirektionale Kopplung im Zeitbereich	111
4.2.4	Methodenvergleich	122
4.3	Anmerkungen zur Verifizierung äquivalenter aerodynamischer Elemente . . .	125
5	Zusammenfassung und Ausblick	128
	Literaturverzeichnis	131
A	NACA3506	141
A.1	Rechengitter für reibungsfreie Simulationen	141
A.2	Vergleich unterschiedlicher Berechnungsverfahren konvektiver Flüsse	142
A.3	Stationäre Lösungen	144
A.4	Harmonische Analyse von Druckbeiwerten	145
A.5	Aerodynamische Dämpfung in Abhängigkeit der Zuströmnachzahl	146
B	Engine 3E Hochdruckverdichter - Rotorstufe 6	147
B.1	Aeroelastische Untersuchungen	147
B.1.1	Unidirektionale Kopplung im Zeitbereich	147