

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
1.1 Dauerfeste Auslegung von Radialturbinenrotoren	2
1.2 Vorgehen und Zielsetzung der Arbeit	4
2 Grundlagen zu Schaufelschwingungen in Turbomaschinen	7
2.1 Eigenschwingverhalten idealer Rotoren	8
2.1.1 Schaufel- und Scheibenschwingungsformen	9
2.1.2 Gekoppelte Schwingungsformen zyklisch-rotationssymmetrischer Strukturen .	11
2.2 Eigenschaften realer verstimmtter Rotoren	16
2.2.1 Ursachen der Verstimmung	16
2.2.2 Auswirkung der Verstimmung auf das dynamische Verhalten	18
2.3 Erzwungene Schwingungen und Resonanzzustände im Betrieb	22
2.3.1 Bedingungen für Resonanzzustände	23
2.3.2 Aerodynamische Anregung von Schaufelschwingungen	28
2.3.3 Dämpfung	33
2.4 Kenntnisstand zu Schaufelschwingungen in Radialturbinen	39
2.4.1 Dauerfeste Schaufelauslegung in Turboladern	41
2.4.2 Methoden zur Analyse von Schaufelschwingungen	44
2.4.3 Forschungsarbeiten zur numerischen Analyse der Schwingungsanregung	49
2.5 Wissenschaftliche Fragestellungen und Forschungsansatz	52
3 Dynamische Eigenschaften der untersuchten Radialturbine	55
3.1 MTU ZR140 Turbinenrotor	55
3.1.1 Beschreibung des Turbinenrotors	55
3.1.2 Ideales Strukturmodell des Turbinenrotors	57
3.2 Charakterisierung des Eigenschwingverhaltens	59
3.2.1 Numerische Modalanalyse des idealen Strukturmodells	59
3.2.2 Experimentelle Modalanalyse mit Hilfe der Laser-Doppler-Vibrometrie	61
3.2.3 Verstimmtte Strukturmodelle des realen Rotors	64
3.3 Resonante Schwingungen im Betrieb der Turbine mit Leitgittern	67
3.3.1 Versuchsturbine, Versuchsaufbau und Messtechnik	67
3.3.2 Ergebnisse der Schwingungsmessung	70
3.4 Schaufelbelastung in Resonanz unter Betriebsbedingungen	75
3.5 Auswahl der Resonanzstellen für numerische Untersuchungen	79

4 Dämpfungseigenschaften der Radialturbine	83
4.1 Dämpfungsbestimmung	83
4.2 Dämpfungswerte	85
4.2.1 Dämpfungswerte unter Betriebsbedingungen.....	85
4.2.2 Dämpfungswerte im Stillstand bei Umgebungsbedingungen.....	85
5 Numerische Studie der aerodynamischen Anregung	89
5.1 Strömungsmechanisches Modell der Turbine	89
5.1.1 Geometrie-, Gitter- und Strömungsmodelle	89
5.1.2 Randbedingungen	91
5.1.3 Validierung der Simulationsergebnisse	91
5.1.4 Anforderungen an das Berechnungsmodell	92
5.2 Anregungsmechanismen	95
5.2.1 Potentialtheoretischer Effekt und Nachlaufströmung	95
5.2.2 Saugseitiger instationärer Wirbel am Rotoreintritt	99
5.3 Anregungskräfte	100
5.4 Anregungsfunktionen	108
6 Anregung von Schwingungsformen	113
6.1 Anregbarkeit von Schaufelmoden	113
6.2 Anregungsordnung und Anregung von Rotorschwingungsformen	120
7 Simulation resonanter Schaufelschwingungen im Betrieb	123
7.1 Simulationsmethode zur Fluid-Struktur-Interaktion	123
7.2 Validierung der Simulationsmethode mit gemessenen Schwingungsamplituden ...	126
7.2.1 Schwingungsantworten des idealen Strukturmodells	126
7.2.2 Abbildung der Verstimmungseffekte in Strukturmodellen	130
8 Zusammenfassung und Ausblick	139
8.1 Zentrale Ergebnisse und Anwendung	139
8.2 Offene Fragestellungen und Forschungsansätze	142
Literaturverzeichnis	145
Anhang	153