

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Verstimmungsforschung	4
1.2	Vorgehensweise und Ziel der Arbeit	8
2	Schwingungsverhalten integraler Verdichterlaufräder	11
2.1	Eigenschwingungsverhalten eines vereinfachten Rotormodells	11
2.1.1	Stehende Eigenformen	12
2.1.2	Drehende Eigenformen	17
2.2	Eigenschwingungsverhalten unverstimmter Blisks	20
2.2.1	Sektormodell unter eingespannten Randbedingungen	21
2.2.2	Sektormodell unter zyklisch-rotationssymmetrischen Randbedingungen	22
2.2.3	Knotendurchmesserliniendiagramm	25
2.2.4	Familienzuordnung von Eigenformen	26
2.3	Charakteristische Eigenschaften schaufeldominierter Modenfamilien	33
2.4	Eigenschwingungsverhalten verstimmter Blisks	35
2.4.1	Kenngrößen der Abweichung vom unverstimmten System	36
2.4.2	Eigenschwingungsformen des unverstimmten und verstimmten Systems	39
2.5	Erzwungene Schwingungen	40
2.5.1	Campbell-Diagramm	52
2.5.2	ZZENF-Diagramm	52
3	Schaufelindividuelle Schwingungsmessungen und FE-Modellanpassung	57
3.1	Einführung	57

3.2	Messung der Verstimmungsverteilungen schaufeldominierter Modenfamilien	58
3.2.1	Eigenschaften gemessener Vergrößerungsfunktionen	60
3.2.2	Zusätzliche Massenverstimmung	62
3.2.3	Ergebnisse der Parametermessungen	65
3.3	Modellabgleich	72
3.3.1	Anpassung des schaufelindividuellen Elastizitätsmoduls	74
3.3.2	Anpassung der schaufelindividuellen Dämpfung	76
3.3.3	Verifizierung des Modellabgleichs	77
3.3.4	Anmerkungen zum Abgleichprozess	78
4	3D-Geometrievermessung und FE-Modellerstellung	81
4.1	Übersicht zu 3D-Messverfahren	83
4.2	Verwendetes Messverfahren	87
4.3	Schaufeldickenanalyse	88
4.4	Messaufbau und Durchführung	91
4.5	Soll-Ist-Vergleich	92
4.6	FE-Modellerstellung aus Geometrievermessungsdaten	93
4.7	Berechnungsergebnis	95
5	Berechnung erzwungener Schwingungen unter drehender Erregung	101
5.1	Schaufelresonanzfrequenzen	101
5.2	Amplitudenüberhöhung	111
5.2.1	Einfluss verschiedener Dämpfungsmaße	111
5.2.2	Einfluss von Dämpfung und Elastizität	113
6	Erregung und Messung von Umlaufwellen	117
6.1	Literaturübersicht	117
6.2	Unterscheidungskriterium für drehende und stehende Wellen	118
6.2.1	Definition der Amplituden-Streuung	118
6.2.2	Definition der Phasendifferenzwinkel-Streuung	120
6.3	Experimentelle Erregung und Messung von Umlaufwellen	120
6.3.1	Erregung von Umlaufwellen	120

6.3.2	Messung von Umlaufwellen	122
6.4	Numerische Simulation von Umlaufwellen am FE-Vollmodell	122
6.4.1	Verhalten des unverstimmten Systems	124
6.4.2	Verhalten des verstimmten Systems	127
6.5	Vergleich Berechnung und Messung unter <i>EO 2</i>	131
6.6	Gesplittete Moden in der Rotordynamik	133
6.7	Vergleich der Schwingungsantworten unter <i>EO 2</i> und <i>EO 27</i>	137
6.8	Ergänzende Untersuchung des gesplitteten Doppelmoden <i>MCSM 2</i>	139
7	Frequency-Veering	151
7.1	Literaturübersicht	151
7.2	Frequency-Veering des E3E/1-R1	155
7.3	Versuchsaufbau und Durchführung	156
7.4	Ergebnis und Diskussion	160
8	Zusammenfassung und Ausblick	163
A	Systematik der Eigenvektoren zyklisch-rotationssymmetrischer Systeme	167
B	KDL-Diagramme und Verzerrungsenergie der Testrotoren 1-5	169
C	Schaufeleigenformen E3E/1-R1 unter verschiedenen Randbedingungen	175
D	Einfluss von Schaufeldicke und Elastizität auf die Eigenkreisfrequenz	183
E	Lehr'sches Dämpfungsmaß und Rayleigh-Dämpfung	187
	Literaturverzeichnis	189