

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeit	3
1.3 Struktur der Arbeit	4
2 Modellierung von Hochdruckverdichtern unter Unsicherheit	7
2.1 Benennung der Triebwerksebenen	7
2.2 Geometrische Beschreibungsansätze für Schaufeln	8
2.2.1 Profilgestaltung durch parametrische Bézier-Kurven	8
2.2.2 NACA-Parametrisierung	11
2.2.3 Anwendungsfälle und Studien zu Geometriestreuung in der Literatur	12
2.3 Vermessung realer Schaufeln	14
2.3.1 Taktile Vermessung	14
2.3.2 Optische Vermessung	15
2.4 Aerodynamische Charakterisierung von Hochdruckverdichtern	16
2.4.1 Arbeitsumsetzung und Verlustbeiwert von Verdichterschaufeln	16
2.4.2 Auswirkungen streuernder Betriebsbedingungen	18
2.4.3 Numerische Strömungssimulation	21
2.5 Aeroelastische Charakterisierung von Hochdruckverdichtern	21
2.5.1 Schwingungsfähige Systeme	22
2.5.2 Selbsterregte Schwingungen von Verdichterschaufeln bei instationären Druckstörungen (Flattern)	23
2.6 Probabilistische Methoden in der Verdichterauslegung	25
2.6.1 Stochastische Variablen	25
2.6.2 Statistische Maße von stochastischen Variablen	26
2.6.3 Anpassungstests	26
2.6.4 Beschreibung von Verteilungen mit Histogramm und Kernel-Density-Estimation	28
2.6.5 Probabilistische Bewertungsverfahren	29
2.6.6 Metamodelle	31
2.6.7 Bestimmung von Sensitivitäten	33
2.6.8 Einsatz von probabilistischen Methoden in der Auslegung von Turbomaschinen	34
2.7 Zusammenfassung	35
3 Beschreibung des Anwendungsfalls	37
3.1 Geometrische Modifikationen der Simulationsmodelle innerhalb der Studien	37
3.1.1 Erstellung der Schaufelgeometrien	38
3.1.2 Anpassung der Leitschaufelstellung	38

3.2	Numerische Modelle	39
3.2.1	Strömungsmechanisches Modell	39
3.2.2	Methodik zur Aufprägung von Änderungen in den Randbedingungen	41
3.2.3	Strukturmechanisches und aeroelastisches Modell	42
3.3	Propagierung der Unsicherheiten	43
4	Datenakquise	45
4.1	Streuung der Betriebsbedingungen	45
4.1.1	Monte-Carlo-Simulation des Triebwerkes	45
4.1.2	Korrelationsanalyse der Randbedingungen	46
4.2	Geometrische Fertigungsstreuung	48
4.2.1	Beschreibung des Analyseprozess	48
4.2.2	Profilparametrik und Mapping taktiler Messdaten	50
4.2.3	Geometriestreuung innerhalb einer Blisk	54
4.2.4	Fehlerabschätzung von Mapping und Parameterreduktion	70
4.2.5	Geometriestreuung innerhalb mehrerer Blisken einer Rotoreihe	75
4.2.6	Geometriestreuung innerhalb mehrerer Blisken verschiedener Rotoreihen	78
5	Validierung der Parametrik	81
5.1	Synthese gefräster Bauteile	81
5.1.1	Geometrische Güte der Synthese	83
5.1.2	Vergleich der aerodynamischen Kennwerte	84
5.1.3	Vergleich der strukturmechanischen sowie aeroelastischen Kennwerte	85
5.2	Synthese geschmiedeter Bauteile	87
5.2.1	Geometrische Güte der Synthese	87
5.2.2	Vergleich der aerodynamischen Kennwerte	88
6	Robustheitsbewertung eines gefrästen Rotors	91
6.1	Aerodynamische Robustheit eines Rotors	91
6.1.1	Prozessübersicht Aerodynamik	91
6.1.2	Abstraktionsmöglichkeiten des Modells und Übersicht der Studien	93
6.1.3	Einfluss der vorgegebenen WahrscheinlichkeitsdichteVerteilung	96
6.1.4	Einfluss der radialen Parametrisierung	102
6.1.5	Vergleich mit den Auswirkungen der zulässigen Toleranzen	105
6.2	Aeroelastische Robustheit gegenüber Flattern	109
6.2.1	Prozessübersicht Aeroelastik	110
6.2.2	Aeroelastik Prozessstudie	112
7	Robustheitsbewertung eines Hochdruckverdichters	119
7.1	Geometriestreuung im Mehrstuifenverbund	119
7.1.1	Radiale Parametrisierung im Mehrstuifenverbund	120

Inhaltsverzeichnis

7.1.2	Aerodynamische Auswirkungen generischer Geometriestreuung innerhalb der Bauteiltoleranzen	123
7.2	Streuung der Betriebsbedingungen	128
7.3	Streubreite im Vergleich zum deterministisch ausgelegten Betriebsbereich	131
8	Zusammenfassung und Ausblick	137
Literaturverzeichnis		141
Abbildungsverzeichnis		155
Tabellenverzeichnis		159
A Anhang		161
A.1	Ergänzende Informationen zur Datenerhebung	161
A.2	Vervollständigende Ergebnisse der Aerodynamik-Studien	161
A.2.1	Erklärung des negativen Korrelationskoeffizienten zwischen den Streuungen von Staffelungswinkel und Umlenkung	162
A.2.2	Einfluss der radialen Parametrisierung im Mehrstufenverbund	164
A.2.3	Einfluss der Toleranzen und Fertigungsstreuung im Mehrstufenverbund	166
A.2.4	Einordnung der Verlustpolaren von Stator 1 und 2	167