

# Inhaltsverzeichnis

## Symbolverzeichnis

IX

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeit . . . . .	3
1.3	Struktur der Arbeit . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Modellierung von Hochdruckverdichtern unter Unsicherheit</b>	<b>7</b>
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 streuender 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
<b>3</b>	<b>Beschreibung des Anwendungsfalls</b>	<b>37</b>
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
<b>4</b>	<b>Datenakquise</b>	<b>45</b>
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 Rotorreihe . . . . .	75
4.2.6	Geometriestreuung innerhalb mehrerer Blisken verschiedener Rotorreihen . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Validierung der Parametrik</b>	<b>81</b>
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
<b>6</b>	<b>Robustheitsbewertung eines gefrästen Rotors</b>	<b>91</b>
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
<b>7</b>	<b>Robustheitsbewertung eines Hochdruckverdichters</b>	<b>119</b>
7.1	Geometriestreuung im Mehrstufenverbund . . . . .	119
7.1.1	Radiale Parametrisierung im Mehrstufenverbund . . . . .	120

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
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>137</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>141</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>155</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>159</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>161</b>
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