

<b>Zusammenfassung</b>	V
<b>Abstract</b>	VI
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	X
<b>Tabellenverzeichnis</b>	XIII
<b>1. Einleitung</b>	1
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Stand der Technik . . . . .	3
1.2.1. Aerodynamische Bedeutung der Vorderkanten von Verdichterschaufeln . . . . .	3
1.2.2. Geometrieänderungen infolge von Erosion an Verdichterschaufeln . . . . .	4
1.2.3. Experimentelle Untersuchung und Simulation von Erosionsphänomenen an Verdichterschaufeln . . . . .	6
1.2.4. Numerische Untersuchungen zum Einfluss der Realgeometrieefekte von Verdichterbeschauflungen auf deren Leistungsfähigkeit . . . . .	7
1.3. Zielstellung und Aufbau der Arbeit . . . . .	9
<b>2. Ausgewählte Grundlagen</b>	11
2.1. Digitalisierung von Hochdruckverdichterschaufeln . . . . .	11
2.1.1. Taktile Messverfahren . . . . .	12
2.1.2. Optische Messverfahren . . . . .	12
2.1.3. Prozessablauf . . . . .	13
2.2. Strömungsmechanische Simulation von Axialverdichtern . . . . .	16
2.2.1. Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung . . . . .	16
2.2.2. Simulation turbulenter Strömungen . . . . .	17
2.2.3. Verwendete Strömungslöser . . . . .	20
2.2.4. Modellierung von Partikelerosion in Turbomaschinen . . . . .	21
2.3. Probabilistische Grundlagen . . . . .	25
2.3.1. Zufallsvariablen . . . . .	25
2.3.2. Anpassungstest der Verteilung . . . . .	27
2.3.3. Monte-Carlo-Simulation . . . . .	28

2.3.4. Samplingverfahren . . . . .	29
2.3.5. Ersatzmodelle . . . . .	31
2.3.6. Ausgewählte Methoden der Sensitivitätsanalyse . . . . .	34
<b>3. Parametrisierung der Variabilität von Hochdruckverdichterschaufeln</b>	<b>37</b>
3.1. Extraktion zweidimensionaler Profilschnitte . . . . .	37
3.2. NACA-Parametrisierung . . . . .	39
3.3. Vorderkantenparametrisierung . . . . .	44
3.4. Parametrische Schaufelsynthese . . . . .	47
3.4.1. Zweidimensionaler Profilaufbau . . . . .	47
3.4.2. Radiale Schaufelsynthese . . . . .	50
<b>4. Analyse der Schaufelgeometrien und Bewertung der parametrischen Schaufelsynthese</b>	<b>53</b>
4.1. Untersuchungsobjekt . . . . .	53
4.2. Bewertung der Mess- und Parametrisierungsunsicherheit . . . . .	55
4.2.1. Unsicherheit des Messsystems . . . . .	55
4.2.2. Unsicherheit des Messprozesses . . . . .	57
4.2.3. Unsicherheit des Parametrisierungsprozesses . . . . .	58
4.3. Analyse charakteristischer Verteilungsformen und Parameterverläufe . . . . .	61
4.3.1. Analyse der Sehnenlänge . . . . .	61
4.3.2. Analyse der Vorderkantendicke . . . . .	63
4.3.3. Analyse der Vorderkantenparameter und Differenzkurvencharakteristik . . . . .	63
4.3.4. Fazit der Analyse charakteristischer Verteilungsformen und Parameterverläufe . . . . .	66
4.4. Geometrische Bewertung der parametrischen Schaufelsynthese . . . . .	67
4.5. Geometrische Bewertung der Vorderkantenparametrisierung . . . . .	71
4.6. Aerodynamische Bewertung der Vorderkantenparametrisierung . . . . .	73
4.6.1. Numerisches 2D Modell . . . . .	73
4.6.2. Aerodynamische Bewertung der Vorderkantenvariabilität . . . . .	74
4.6.3. Aerodynamische Bewertung der parametrischen Vorderkantsynthese . . . . .	76
4.7. Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	77
<b>5. Probabilistische Performanceuntersuchungen zur Bedeutung der Schaufelvorderkantenvariation im Hochdruckverdichter</b>	<b>79</b>
5.1. Deterministisches Modell . . . . .	80
5.1.1. Modellaufbau . . . . .	80
5.1.2. Deterministisches Strömungsfeld . . . . .	81
5.2. Probabilistisches Modell . . . . .	81
5.3. Probabilistische Ergebnisse . . . . .	84
5.3.1. Kennlinien und Ergebnisgrößenstreuung . . . . .	84
5.3.2. Sensitivitätsanalyse . . . . .	85
5.3.3. Einfluss der Realisierungsanzahl auf die probabilistischen Ergebnisse . . . . .	88
5.3.4. Einfluss der Eingangsgrößenstreuungen auf lokale Ergebnisgrößen	91
5.3.5. Einfluss der triebwerksspezifischen geometrischen Charakteristiken auf die probabilistischen Ergebnisse . . . . .	95

5.4. Einfluss der geometrischen Variabilität der Statoren auf die probabilistischen Ergebnisse . . . . .	98
5.4.1. Änderungen am deterministischen Modell . . . . .	98
5.4.2. Änderungen am probabilistischen Modell . . . . .	99
5.4.3. Probabilistische Ergebnisse . . . . .	101
5.5. Zusammenfassung und Einordnung der Ergebnisse . . . . .	102
<b>6. Erosionsvorgänge im Kontext der beobachteten Realgeometrieffekte</b>	<b>105</b>
6.1. Modellaufbau . . . . .	106
6.1.1. Entwicklung der Einschlagsverteilung und der Partikeltrajektorien im Hochdruckverdichter . . . . .	106
6.1.2. Berechnung von erodierten Schaufelgeometrien . . . . .	110
6.1.3. Verwendete Partikelkonfigurationen . . . . .	111
6.2. Auswirkungen der numerisch ermittelten Erosion auf die Schaufelgeometrie . . . . .	112
6.2.1. Auswirkungen auf die Vorderkantengeometrie . . . . .	112
6.2.2. Auswirkungen auf ausgewählte NACA-Parameter . . . . .	115
6.3. Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	116
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>117</b>
7.1. Zusammenfassung . . . . .	117
7.2. Ausblick . . . . .	118
<b>A. Anlagen</b>	<b>128</b>
A.1. Erweiterung der Vorderkantenparametrisierung zur Berücksichtigung des triebwerksspezifischen Krümmungsverhaltens der Differenzkurven	128
A.2. Ergebnisgrößenstreuung des Totaldruckverlustbeiwerts bei Berücksichtigung des Transitionsmodells . . . . .	129
A.3. Vergleich von Shapley-Werten und modifiziertem Wichtigkeitsmaß zum Wichtigkeitsmaß . . . . .	130
A.4. Verlauf des Wichtigkeitsmaßes über die Drehzahllinien von $TW_B$ . . . . .	131
A.5. Vorderkantenformen numerisch erodierter Schaufeln . . . . .	132