

Zusammenfassung	V
Abstract	VI
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XIII
1. Einleitung	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 Realgeometrieeffekte von Verdichterbeschaufelungen auf deren Leistungsfähigkeit	7
1.3. Zielstellung und Aufbau der Arbeit	9
2. Ausgewählte Grundlagen	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
3.	Parametrisierung der Variabilität von Hochdruckverdichterschaufeln	37
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
4.	Analyse der Schaufelgeometrien und Bewertung der parametrischen Schaufelsynthese	53
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 Vorderkanten-synthese	76
4.7.	Zusammenfassung der Ergebnisse	77
5.	Probabilistische Performanceuntersuchungen zur Bedeutung der Schaufelvorderkantenvariation im Hochdruckverdichter	79
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
6.	Erosionsvorgänge im Kontext der beobachteten Realgeometrieeffekte	105
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 Vorderkanten geometrie	112
6.2.2.	Auswirkungen auf ausgewählte NACA-Parameter	115
6.3.	Zusammenfassung der Ergebnisse	116
7.	Zusammenfassung und Ausblick	117
7.1.	Zusammenfassung	117
7.2.	Ausblick	118
A.	Anlagen	128
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