

Inhaltsverzeichnis

Vorwort

Abstract

Kurzfassung

Inhaltsverzeichnis	ix
Symbole und Abkürzungen	xii
1 Einleitung	1
2 Motivation und Vorgehensweise	5
2.1 Beschreibung der Turbine	5
2.2 Energieumsetzung in Zentripetalturbinen	8
2.3 Stand des Wissens	16
2.3.1 Strömung in Laval-Düsen	16
2.3.2 Strömung in Überschalllaufrädern	22
2.3.3 'Unique Incidence'	29
2.3.4 Überschallturbinen	32
2.3.5 Zusammenfassung des Standes des Wissens	35
2.4 Problemstellung, Ziel und Vorgehensweise	38
3 Experimentelle Untersuchung der Turbine	41
3.1 Aufbau, Messstellen und Messgeräte	41
3.2 Auswertung der Messdaten	44
3.2.1 Erstellung stationärer Daten	44
3.2.2 Zustandsgleichung	46
3.2.3 Berechnung von Massenstrom, Leistung und Wirkungsgrad	49
3.2.3.1 Massenstrom	49

3.2.3.2	Leistung.....	49
3.2.3.3	Isentroper Wirkungsgrad.....	52
3.2.4	Unsicherheitsbetrachtung.....	52
3.2.4.1	Systematische Messabweichungen.....	53
3.2.4.2	Unsicherheiten.....	54
3.3	Ergebnisse der experimentellen Untersuchung	58
3.3.1	Turbinenkennfeld.....	58
3.3.2	Druckmessungen im Expansionspfad	62
3.3.3	Ablagerungen.....	63
3.4	Diskussion der Ergebnisse.....	64
4	Numerische Untersuchung und Effizienzsteigerung der Turbine.....	67
4.1	Beschreibung des numerischen Rechenverfahrens	67
4.1.1	Grundgleichungen	67
4.1.2	Turbulenzmodellierung	68
4.1.3	Diskretisierung und Lösungsverfahren.....	73
4.1.4	Erstellung des Netzes und Qualitätskriterien.....	74
4.1.5	Genauigkeit numerischer Strömungssimulationen	75
4.1.6	Einstellungen der Simulation und Auswertung	76
4.1.6.1	Einstellungen des Strömungslösers.....	76
4.1.6.2	Berechnung gemittelter Größen	78
4.1.7	Implementierung von Zustandsgleichungen realer Gase	79
4.2	Numerische Voruntersuchungen.....	80
4.2.1	Prandtl-Meyer-Expansion und schräger Verdichtungsstoß in einer Realgasströmung	80
4.2.2	Überschallanströmung und -abströmung von Schaufelprofilen	83
4.3	Untersuchungen der Turbinenströmung.....	91
4.3.1	Randbedingungen und Auswertungsalgorithmus.....	91
4.3.2	Qualitative Beschreibung der Strömung	94

4.3.3	Sensitivitätsstudien	97
4.3.3.1	Einzelsimulationen der Turbinenkomponenten.....	97
4.3.3.1.1	Laval-Düse	97
4.3.3.1.2	Laufgrad	99
4.3.3.1.3	Diffusor	100
4.3.3.2	Vergleich zwischen transienter und stationärer Simulation	102
4.3.3.3	Einfluss der Rechengenauigkeit	103
4.3.4	Vergleich mit experimentellen Ergebnissen	104
4.3.4.1	Auslegungspunkt	104
4.3.4.2	Einfluss der gewählten Randbedingungen	107
4.3.4.3	Teillastbereich.....	108
4.3.5	Auswertung der Ergebnisse	111
4.3.5.1	Verlustverteilung im Auslegungspunkt.....	111
4.3.5.2	Auswertung der Strömung in den einzelnen Komponenten	112
4.3.5.2.1	Laval-Düse	112
4.3.5.2.2	Laufgrad	118
4.3.5.2.3	Diffusor	125
4.4	Effizienzsteigerung der Turbine	127
4.5	Diskussion der Ergebnisse	134
5	Zusammenfassung.....	141
6	Ausblick.....	145
	Literaturverzeichnis.....	147
	Anhang.....	I
	Lebenslauf.....	IX