

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

## Abstract

## Kurzfassung

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>ix</b>
<b>Symbole und Abkürzungen .....</b>	<b>xii</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Motivation und Vorgehensweise .....</b>	<b>5</b>
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 Überschallaufrädern .....	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
<b>3 Experimentelle Untersuchung der Turbine .....</b>	<b>41</b>
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
<b>4 Numerische Untersuchung und Effizienzsteigerung der Turbine .....</b>	<b>67</b>
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 Laufrad.....	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 Laufrad .....	118
4.3.5.2.3 Diffusor .....	125
4.4 Effizienzsteigerung der Turbine .....	127
4.5 Diskussion der Ergebnisse .....	134
<b>5 Zusammenfassung.....</b>	<b>141</b>
<b>6 Ausblick.....</b>	<b>145</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>147</b>
<b>Anhang.....</b>	<b>I</b>
<b>Lebenslauf.....</b>	<b>IX</b>