

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	iii
<b>Kurzfassung</b>	v
<b>Abstract</b>	vii
<b>Nomenklatur</b>	ix
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	xv
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	xix
<b>Tabellenverzeichnis</b>	xxv
<b>1 Einleitung</b>	1
1.1 Stand der Technik . . . . .	2
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise . . . . .	4
1.3 Das Forschungsprojekt KonRAT . . . . .	6
<b>2 Grundlagen der Turbopumpen</b>	9
2.1 Einfluss des Triebwerkszyklus . . . . .	9
2.2 Aufbau einer Turbopumpe . . . . .	10
2.2.1 Pumpen . . . . .	11
2.2.2 Turbinen . . . . .	14
2.2.3 Rotierende Einheit und Gehäuse . . . . .	15
2.2.4 Lager und Dichtungen . . . . .	16
<b>3 Berechnung und Entwurf von Turbopumpenkomponenten</b>	17
3.1 Programmarchitektur und Definitionen . . . . .	17
3.1.1 Geschwindigkeitskomponenten und Winkeldefinition . . . . .	20
3.2 Leistungsdaten und Kennzahlen . . . . .	22
3.2.1 Spezifische Förderarbeit und Förderhöhe . . . . .	22
3.2.2 Leistung und Wirkungsgrad . . . . .	23
3.2.3 Haltedruckhöhe NPSH und spezifische Saugzahl . . . . .	24
3.2.4 Dimensionslose Kennzahlen . . . . .	25
3.3 Das Radialrad . . . . .	26
3.3.1 Bestimmung der Hauptabmessungen . . . . .	26
3.3.2 Entwurfsvariablen des Meridianschnitts . . . . .	30
3.3.3 Schaufelgeometrie . . . . .	32
3.3.3.1 Entwurfsvariablen der Schaufelgeometrie . . . . .	32
3.3.3.2 Dreidimensionale Schaufelgestaltung . . . . .	33

xv

## Inhaltsverzeichnis

3.4	Der Vorsatzläufer . . . . .	34
3.4.1	Berechnung der Hauptabmessungen . . . . .	35
3.4.2	Dreidimensionaler Schaufelentwurf . . . . .	36
3.4.2.1	Entwurfsvariablen der Schaufel . . . . .	36
3.4.2.2	Vorgehen der Schaufelgestaltung in TUMPA . . . . .	39
3.5	Die Leitvorrichtung . . . . .	40
3.5.1	Entwurf der Leitvorrichtung . . . . .	42
3.6	TUMPA Anwendungsfall: Die KonRAT LOX Pumpe . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung</b>	<b>53</b>
4.1	Beschreibung turbulenter Strömungen . . . . .	53
4.1.1	Navier-Stokes Gleichungen . . . . .	54
4.1.2	Ansätze zur Turbulenzmodellierung . . . . .	54
4.1.2.1	Direkte Numerische Simulation - DNS . . . . .	55
4.1.2.2	Large Eddy Simulation - LES . . . . .	56
4.1.2.3	<i>Reynolds-Averaged-Navier-Stokes</i> Simulation - RANS . . . . .	56
4.1.3	Wirbelviskositätsmodelle . . . . .	57
4.1.4	Wandbehandlung . . . . .	59
4.2	Numerisches Lösungsverfahren . . . . .	62
4.2.1	Diskretisierungsverfahren . . . . .	62
4.2.2	Konvergenzkriterien . . . . .	64
4.2.3	Randbedingungen . . . . .	64
4.3	Fehler bei CFD-Berechnungen . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Kavitation und Kavitationsmodellierung</b>	<b>69</b>
5.1	Physikalische Grundlagen . . . . .	69
5.1.1	Kavitationsparameter und Saugkurve . . . . .	70
5.2	Blasendynamik: Die Rayleigh-Plesset-Gleichung . . . . .	71
5.2.1	Thermische Effekte in der Blasendynamik . . . . .	72
5.3	Skalierung der Pumpenleistung unter Berücksichtigung der Thermaleffekte . . . . .	74
5.4	Kavitationsmodellierung . . . . .	77
5.4.1	Implementierung des Thermaleffekts in der RPG . . . . .	79
5.4.1.1	TCM1 - „The full thermal cavitation model“ . . . . .	79
5.4.1.2	TCM2 - „The Taylor approximation cavitation modell“ . . . . .	79
5.4.2	Implementierung des Turbulenzeffekts in der RPG . . . . .	80
5.5	Validierung und Kalibrierung des Kavitationsmodells in ANSYS CFX . . . . .	80
5.5.1	Validierung mit dem Simulationsfluid <i>Wasser</i> . . . . .	81
5.5.2	Validierung mit dem kryogenen Simulationsfluid <i>Stickstoff (LN2)</i> . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Der Vorsatzläufer: Auslegung und numerische Untersuchungen</b>	<b>89</b>
6.1	Variation des Schaufeleintrittswinkels . . . . .	90
6.1.1	Untersuchungsobjekte . . . . .	90
6.1.2	Numerisches Modell . . . . .	92
6.1.3	Pumpenkennlinien . . . . .	94
6.1.4	Saugkurven und Strömungsverhalten unter kavitierenden Bedingungen . . . . .	97
6.2	Variation des Blattspitzenspaltes . . . . .	102
6.2.1	Untersuchungsobjekte . . . . .	103
6.2.2	Numerisches Modell . . . . .	104
6.2.3	Pumpenkennlinie und Strömungsanalyse im nicht-kavitierenden Zustand . . . . .	104

6.2.4	Saugkurve und Strömungsanalyse im kaviterenden Zustand . . . . .	110
6.3	Zusammenfassung der Vorsatzläufstudien . . . . .	115
<b>7</b>	<b>Das Radialrad: Auslegung und numerische Untersuchungen</b>	<b>117</b>
7.1	Strömungsvorgänge im Schaufelkanal . . . . .	118
7.1.1	Strömungsvorgänge im rotierenden Schaufelkanal (Wirkung der Rotation)	119
7.1.2	Wirkung der Meridiankrümmung . . . . .	121
7.1.3	Wirkung der Schaufelkräfte . . . . .	121
7.1.4	Zusammenwirken der verschiedenen Mechanismen . . . . .	122
7.2	Geometrieauslegung und -optimierung von geschlossenen Radialrädern . . . . .	122
7.2.1	Numerisches Modell . . . . .	123
7.2.2	Analyse der <i>Referenzgeometrie</i> . . . . .	124
7.2.2.1	Geometriebeschreibung . . . . .	124
7.2.2.2	Eindimensionale Auswertung und Vergleich mit den analytischen Auslegungsdaten . . . . .	127
7.2.2.3	Analyse des dreidimensionalen Strömungsfeldes . . . . .	128
7.2.2.4	Vorhandene Probleme und Identifikation der notwendigen Geometrieanpassungen . . . . .	132
7.2.3	Analyse der optimierten Geometrie <i>Shrouded REM17</i> . . . . .	133
7.2.3.1	Geometrieoptimierung . . . . .	133
7.2.3.2	Eindimensionale Auswertung und Vergleich mit den analytischen Auslegungsdaten und der Referenzgeometrie . . . . .	135
7.2.3.3	Analyse des dreidimensionalen Strömungsfeldes . . . . .	137
7.2.3.4	Fazit der Geometrieoptimierung und Identifizierung von weiterhin vorhandenen Problemen . . . . .	141
7.2.4	Analyse der optimierten Geometrie <i>Shrouded M19</i> . . . . .	142
7.2.4.1	Geometrieoptimierung . . . . .	142
7.2.4.2	Zusammengefasste Ergebnisse für Shrouded M19 . . . . .	144
7.3	Untersuchung von halboffenen Radialrädern . . . . .	144
7.3.1	Das Radialrad <i>Unshrouded REM17</i> . . . . .	145
7.3.2	Numerisches Modell . . . . .	145
7.3.3	Vergleich der Leistung und des Strömungsfeldes von geschlossenen und offenen Radialläufern . . . . .	147
<b>8</b>	<b>Simulationen von Pumpen und Validierung der Numerik</b>	<b>155</b>
8.1	Pumpenkonfigurationen . . . . .	156
8.1.1	<i>Versuchspumpe AR1</i> . . . . .	156
8.1.2	<i>LOX Pumpe AR03</i> . . . . .	159
8.2	Versuchsaufbau für die experimentellen Untersuchungen . . . . .	161
8.2.1	Prüfstandsbeschreibung . . . . .	161
8.2.2	Versuchsdurchführung . . . . .	162
8.3	Numerisches Modell der Pumpe . . . . .	163
8.3.1	Modellbildung der Pumpe . . . . .	163
8.3.2	Netzgenerierung . . . . .	165
8.3.3	Berechnungsansatz . . . . .	166
8.3.4	Methodik zur Auswertung der numerischen Ergebnisse . . . . .	168
8.4	Validierung der Simulationsmethodik anhand experimenteller Daten . . . . .	169
8.4.1	Leistungskennlinie der Pumpe unter skalierten und realen Bedingungen . . . . .	169
8.4.2	Druckaufbau entlang der Pumpe . . . . .	172

## *Inhaltsverzeichnis*

8.5 Vergleich verschiedener Spiralgehäusegeometrien . . . . .	172
8.5.1 Pumpencharakteristiken mit unterschiedlichen Leitvorrichtungen . . . . .	173
8.5.2 Evaluierung der Strömungsgrößen innerhalb der Pumpe . . . . .	174
8.6 Unterschiede zwischen Komponenten- und Pumpensimulationen . . . . .	178
8.6.1 Validierung der Komponentensimulationen des Vorsatzläufers . . . . .	178
8.6.2 Validierung der Komponentensimulationen des Radialrads . . . . .	181
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>187</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>191</b>
<b>A Anhang</b>	<b>203</b>
A.1 Auslegung . . . . .	203
A.2 Numerik . . . . .	204
A.3 Kavitation . . . . .	205
A.4 Inducer . . . . .	207
A.5 Impeller . . . . .	209
A.5.1 Shrouded M19 . . . . .	212
A.6 Pumpe . . . . .	218