

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Nomenklatur	ix
Inhaltsverzeichnis	xv
Abbildungsverzeichnis	xix
Tabellenverzeichnis	xxv
1 Einleitung	1
1.1 Stand der Technik	2
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
1.3 Das Forschungsprojekt KonRAT	6
2 Grundlagen der Turbopumpen	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
3 Berechnung und Entwurf von Turbopumpenkomponenten	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

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
4	Grundlagen der numerischen Strömungsberechnung	53
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
5	Kavitation und Kavitationsmodellierung	69
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
6	Der Vorsatzläufer: Auslegung und numerische Untersuchungen	89
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 kavitierenden Zustand	110
6.3	Zusammenfassung der Vorsatzläuferstudien	115
7	Das Radialrad: Auslegung und numerische Untersuchungen	117
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 Geo- metrieanpassungen	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 weiter- hin 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
8	Simulationen von Pumpen und Validierung der Numerik	155
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
9	Zusammenfassung und Ausblick	187
	Literaturverzeichnis	191
A	Anhang	203
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