

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Ziele . . . . .	3
1.3 Lösungsweg . . . . .	3
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>6</b>
2.1 Strömungssimulation von Pumpen kleiner spezifischer Drehzahl . . . . .	6
2.2 Dominante Verluste in Pumpen kleiner spezifischer Drehzahl . . . . .	9
2.3 Modellierung der Wandgrenzschichtströmung . . . . .	12
2.3.1 Modellierung des Rauheitseinflusses . . . . .	14
2.3.2 Modellierung von Strömungsablösung . . . . .	17
2.4 Experimentelle Bestimmung der Wandschubspannung . . . . .	18
2.5 Modelle der relevanten Pumpenströmungen und deren Verluste . . . . .	20
2.5.1 Spiralgehäuse . . . . .	20
2.5.2 Radseitenraumströmung . . . . .	25
2.5.3 Dichtspaltströmung . . . . .	29
2.6 Zusammenfassung . . . . .	34
<b>3 Grundlagen der Strömungssimulation</b>	<b>35</b>
3.1 Strömungsmechanische Grundlagen . . . . .	35
3.2 Simulation turbulenter Strömungen . . . . .	36
3.2.1 Reynolds-Mittelung . . . . .	37
3.2.2 Turbulenzmodellierung . . . . .	38
3.3 Numerische Strömungsmechanik . . . . .	41
3.3.1 Räumliche Diskretisierung . . . . .	41
3.3.2 Diskretisierung der Transportgleichungen . . . . .	42

3.3.3	Wandbehandlung . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Verwendete Methoden</b>	<b>48</b>
4.1	Experimentelle Methoden . . . . .	48
4.1.1	Versuchspumpe . . . . .	48
4.1.2	Erzeugung rauer Wände . . . . .	49
4.1.3	Messgrößen und -orte . . . . .	50
4.1.4	Herkömmliche Messtechnik . . . . .	52
4.1.5	Wandschubspannungsmessung . . . . .	53
4.1.6	Abgeleitete Größen . . . . .	58
4.1.7	Messunsicherheit . . . . .	58
4.2	Numerische Methoden . . . . .	59
4.2.1	Gittererstellung . . . . .	59
4.2.2	Solvereinstellungen . . . . .	61
4.2.3	Rand- und Anfangsbedingungen . . . . .	61
4.2.4	Betrachtung der Unsicherheit von Strömungssimulationen . . . . .	62
4.2.5	Abschätzung des Diskretisierungsfehlers . . . . .	63
4.2.6	Methode zur Abschätzung des Modellierungsfehlers des logarithmischen Wandgesetzes . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Numerische Untersuchungen</b>	<b>66</b>
5.1	Validierung des numerischen Modells anhand hydraulischer Kenndaten . . . . .	66
5.2	Modellierungsfehler des logarithmischen Wandgesetzes . . . . .	68
5.2.1	Lokale Verteilung des Modellierungsfehlers . . . . .	69
5.2.2	Modellierungsfehler im Spiralgehäuse . . . . .	71
5.2.3	Modellierungsfehler im vorderen Radseitenraum . . . . .	72
5.2.4	Modellierungsfehler im Dichtspalt . . . . .	73
5.3	Verlustanalyse . . . . .	74
5.4	Methodik zur verbesserten Simulation von Pumpen kleiner spezifischer Drehzahl . . . . .	76
5.5	Fazit . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Strömungsuntersuchung in den verlustreichen Regionen</b>	<b>79</b>
6.1	Strömung im Spiralgehäuse . . . . .	79
6.1.1	Umströmung der Spiralzunge . . . . .	79
6.1.2	Wechselwirkung der Strömung . . . . .	81
6.1.3	Druckverteilung . . . . .	85
6.2	Strömung in den Radseitenräumen . . . . .	86
6.2.1	Umfangsgemittelte Strömung . . . . .	87

6.2.2	Kopplung der Strömung . . . . .	88
6.2.3	Strömung in Umfangsrichtung und Druckverteilung . . . . .	89
6.2.4	Strömung in Radialrichtung und Grenzschichtströmung . . . . .	91
6.2.5	Charakterisierung der Wandschubspannung durch direkte Messung . . . . .	94
6.3	Strömung im Dichtspalt . . . . .	95
6.3.1	Beschreibung Strömungsfeld . . . . .	97
6.3.2	Einfluss auf Strömung im Saugmund . . . . .	100
6.4	Fazit . . . . .	103
<b>7</b>	<b>Untersuchung des Rauheitseinflusses</b>	<b>104</b>
7.1	Rauheitsregime . . . . .	104
7.2	Hydraulische Pumpenkennwerte und Verluste . . . . .	107
7.3	Strömung im Spiralgehäuse . . . . .	108
7.3.1	Verluste . . . . .	108
7.3.2	Strömungsfeld . . . . .	110
7.3.3	Kopplung der Strömung . . . . .	112
7.4	Strömung im vorderen Radseitenraum . . . . .	114
7.4.1	Umfangsgemittelte Strömung . . . . .	114
7.4.2	Strömung in Umfangsrichtung und Druckverteilung . . . . .	115
7.4.3	Strömung in Radialrichtung . . . . .	116
7.5	Strömung im Dichtspalt . . . . .	118
7.6	Fazit . . . . .	120
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und offene Forschungsfragen</b>	<b>121</b>