

<b>Kurzfassung</b>	<b>V</b>
<b>Abstract</b>	<b>VII</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
1.2 Ziele der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Stand der Wasserstrahltechnik</b>	<b>5</b>
2.1 Klassifizierung nach Pumpendruck . . . . .	6
2.2 Hochdruckwasserstrahldüsen . . . . .	7
2.2.1 Strömungsgleichrichter . . . . .	8
2.2.2 Dralleinsätze . . . . .	9
2.2.3 Strömungsformen in Hochdruckdüsen . . . . .	10
2.2.4 Literaturübersicht der Simulationsmethoden . . . . .	11
<b>3 Grundlagen der Strömungsmechanik von Hochdruckwasserstrahlen</b>	<b>13</b>
3.1 Grundlagen des Hochdruckwasserstrahls . . . . .	13
3.1.1 Theorie zum Wasserstrahlaufbruch . . . . .	15
3.1.2 Einfluss der Düsenströmung auf den Strahlzerfall . . . . .	17
3.1.3 Kavitation in Hochdruckdüsen . . . . .	20
3.1.4 Hydraulic-Flip Strömungszustand . . . . .	21
3.1.5 Einfluss des Turbulenzgrades auf den Strahlzerfall . . . . .	22
3.1.6 Charakterisierung der Drallströmung . . . . .	22
3.2 Verschleißerscheinungen in Hochdruckdüsen . . . . .	23
3.2.1 Düsenwerkstoffe . . . . .	23

<b>4 Theoretische Modelle für die Simulation der Düsenströmung und des turbulenten Wasserstrahlzerfalls</b>	<b>25</b>
4.1 Grundlagen der numerischen Strömungsmechanik . . . . .	25
4.1.1 Methode der Finiten Volumen . . . . .	26
4.1.2 Interpolationsmethoden . . . . .	28
4.1.3 Netzgenerierung . . . . .	29
4.1.4 Netzqualität . . . . .	29
4.2 Turbulenzmodellierung . . . . .	30
4.2.1 Statistische Auswertung von Strömungsgrößen . . . . .	31
4.2.2 RANS-Turbulenzmodelle . . . . .	33
4.2.3 Flüssigkeitsdynamische Grenzschicht . . . . .	34
4.2.4 Large Eddy Simulation . . . . .	36
4.2.5 Feinstruktur Modelle von LES . . . . .	37
4.2.6 Algorithmus für fluktuierende Geschwindigkeiten . . . . .	38
4.2.7 Mittelwert und Standardabweichung . . . . .	39
4.2.8 Netzaufteilung bei LES . . . . .	39
4.3 Simulation der Mehrphasenströmung . . . . .	41
4.3.1 Euler-Euler-Modelle . . . . .	41
4.3.2 Mischungsmodell . . . . .	41
4.3.3 Volume-of-Fluid Methode . . . . .	42
4.3.4 Level-Set Methode . . . . .	45
4.3.5 Modellierung der Oberflächenspannung . . . . .	46
4.3.6 Modellierung der Kavitation . . . . .	47
<b>5 Strömungsphänomene in Hochdruckwasserstrahldüsen</b>	<b>49</b>
5.1 Geometrie der Düsentypen . . . . .	49
5.2 Zweidimensionale Simulation . . . . .	50
5.2.1 Einfluss des Düsenradius auf Kavitation und Verschleiß . . . . .	52
5.2.2 Hydraulic-Flip Strömung in der Saphirdüse . . . . .	53
5.2.3 Strömung mit Kavitation in der Stahldüse . . . . .	56
5.3 Experimentelle Untersuchungen . . . . .	60
5.3.1 Aufnahmen vom Wasserstrahl mit Kurzzeitfotografie . . . . .	61
5.3.2 Untersuchung von Verschleißerscheinungen in Düsen . . . . .	64
5.4 Zusammenfassung zu den Strömungsphänomenen . . . . .	66
<b>6 Simulation der Düsenströmung und des Primärzerfalls mit dem Einfluss von Strömungseinsätzen</b>	<b>67</b>
6.1 Geometrie der untersuchten Wasserstrahldüse . . . . .	68

6.1.1	Düseneinsätze . . . . .	69
6.2	Bestimmung des Strahlwinkels . . . . .	70
6.3	Einfluss der Gleichrichter auf den Strahlzerfall . . . . .	71
6.3.1	CAD und Netzmodelle der Düsen mit Gleichrichtereinsätzen . . . . .	72
6.3.2	Parameter der RANS-Simulation . . . . .	74
6.3.3	Ergebnisse der RANS-Simulation . . . . .	75
6.3.4	Geschwindigkeitsfeld in der Düse und am Düsenaustritt . . . . .	77
6.3.5	Turbulenzfeld in der Düse und am Düsenaustritt . . . . .	82
6.3.6	Auswertung der integralen Längenskala . . . . .	86
6.4	Simulation des Strahlzerfalls . . . . .	87
6.4.1	Kopplung von RANS und LES-VOF Simulation . . . . .	89
6.4.2	Geschwindigkeitsfluktuationen am Düsenaustritt . . . . .	90
6.4.3	LES-VOF Simulation des Wasserstrahlzerfallen . . . . .	91
6.4.4	Die zeitliche Auswertung der Wasserstrahloberfläche . . . . .	94
6.4.5	Auswertung der Geschwindigkeitsprofile am Düsenaustritt . . . . .	95
6.4.6	Auswertung der Geschwindigkeitsfluktuationen im Strahlkern . . . . .	100
6.4.7	Experimentelle Ergebnisse der Düsen mit Gleichrichtern . . . . .	102
6.4.8	Mikroskopische Aufnahmen . . . . .	104
6.4.9	Düsenkennzahl . . . . .	105
6.4.10	Zusammenfassung der Untersuchungen mit Gleichrichtern . . . . .	107
6.5	Einfluss der Drallströmung auf den Strahlzerfall . . . . .	108
6.5.1	CAD und Netzmodelle von Düsen mit Dralleinsätzen . . . . .	109
6.5.2	Parameter der RANS-Simulation . . . . .	111
6.5.3	Untersuchung der Netznunabhängigkeit . . . . .	111
6.5.4	Ergebnisse der RANS-Simulation von Drall-Düsen . . . . .	112
6.5.5	Geschwindigkeitsfeld in den Drall-Düsen am Düsenaustritt . . . . .	112
6.5.6	Drallzahl am Düsenaustritt . . . . .	118
6.6	Simulation des Strahlzerfalls von Drall-Düsen . . . . .	119
6.6.1	Kopplung der RANS-Ergebnisse mit der SBES-VOF-Simulation . . . . .	120
6.6.2	Ergebnisse des drallinduzierten Wasserstrahlzerfalls . . . . .	122
6.6.3	Experimentelle Ergebnisse der Düsen mit Dralleinsätzen . . . . .	125
6.6.4	Düsenkennzahl der Dralldüsen . . . . .	128
6.6.5	Zusammenfassung der Simulation mit Dralleinsätzen . . . . .	129
7	Zusammenfassung, Fazit und Ausblick	131