

<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</b>	<b>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	Fluidodynamische 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	Netzauflösung 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</b>	<b>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</b>	<b>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 Wasserstrahlzerfalles . . . . .	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 Netzunabhängigkeit . . . . .	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
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung, Fazit und Ausblick</b>	<b>131</b>