

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Wissenschaftlicher Kenntnisstand</b>	<b>4</b>
2.1 Luftgestützte Zerstäubung von Kraftstoff . . . . .	5
2.2 Experimentelle Untersuchungen zum Primärzerfall . . . . .	9
2.3 Numerische Untersuchungen zum Primärzerfall . . . . .	12
2.3.1 Numerische Verfahren zur Berechnung von Zerstäubungsvorgängen	12
2.3.2 Untersuchungen zum Strahlzerfall . . . . .	14
2.3.3 Untersuchungen zur Kantenzerstäubung . . . . .	17
2.4 Mehrphasensimulationen mit SPH . . . . .	18
2.5 Zielsetzung, Vorgehensweise und eigener wissenschaftlicher Beitrag . . . . .	21
<b>3 Grundlagen der SPH-Methode</b>	<b>24</b>
3.1 Mathematische Beschreibung von Strömungen . . . . .	24
3.1.1 Massenerhaltung . . . . .	24
3.1.2 Impulstransport . . . . .	25
3.1.3 Energieerhaltung . . . . .	25
3.1.4 Räumliche und zeitliche Diskretisierung . . . . .	26
3.2 Numerische Methoden der Mehrphasen-Simulation . . . . .	26
3.3 Grundlagen der SPH-Methode . . . . .	27
3.4 Erhaltungsgleichungen in SPH-Form . . . . .	28
3.4.1 Massenerhaltung . . . . .	28
3.4.2 Impulstransport . . . . .	29
3.4.3 Energieerhaltung . . . . .	30
3.5 Modellierung kompressibler und inkompressibler Medien . . . . .	30
3.6 Diskretisierung in der Zeit . . . . .	32
3.7 Randbedingungen . . . . .	34
3.7.1 Wände . . . . .	34
3.7.2 Periodische Randbedingungen . . . . .	36
3.7.3 Einlass- und Auslassrandbedingungen . . . . .	36
3.8 Modellierung von Oberflächenspannung und Benetzung . . . . .	39
<b>4 Strategie der Code-Gestaltung und Implementierung</b>	<b>42</b>
4.1 Spezielle simulative Anforderungen des Primärzerfalls . . . . .	42
4.2 Aspekte des Hochleistungsrechnens . . . . .	44
4.2.1 Parallelisierung . . . . .	45
4.2.2 Hardwaregerechte Programmierung . . . . .	48
4.2.3 Bewertung der Leistungsfähigkeit . . . . .	51

## Inhaltsverzeichnis

4.3	Implementierungsdetails . . . . .	54
4.3.1	Beschreibung des Programmpakets <code>super_sph</code> . . . . .	55
4.3.2	Programmstruktur . . . . .	58
4.3.3	Datenstrukturen . . . . .	62
4.3.4	Nachbarsuche . . . . .	65
4.3.5	Parallelisierungsstrategie . . . . .	68
4.3.6	Randbedingungen . . . . .	73
4.4	Datenaufbereitung und Auswertung . . . . .	83
4.4.1	Handhabung großer Datensätze . . . . .	83
4.4.2	Zielgrößen des Postprocessings . . . . .	85
4.4.3	Analyse der Sprayeigenschaften . . . . .	86
4.4.4	Visualisierung . . . . .	88
<b>5</b>	<b>Referenz-Experiment und numerisches Modell</b>	<b>92</b>
5.1	Referenz-Experiment . . . . .	92
5.2	Numerische Abstraktion . . . . .	93
5.3	Annahmen und Einschränkungen . . . . .	94
<b>6</b>	<b>Validierung und Untersuchung der numerischen Leistungsfähigkeit</b>	<b>97</b>
6.1	Vorbereitende generischer Testfälle und Validierung . . . . .	97
6.1.1	Einfluss der Diskretisierung bei der Simulation von Flüssigkeitstropfen . . . . .	97
6.1.2	Konvergenz bei Zerfallsprozessen . . . . .	103
6.1.3	Vergleich mit anderen CFD-Methoden . . . . .	110
6.2	Bewertung der numerischen Leistungsfähigkeit . . . . .	117
6.2.1	Untersuchung der Skalierbarkeit . . . . .	118
6.2.2	Vergleich mit Leistungsdaten anderer numerischer Verfahren . . . . .	120
<b>7</b>	<b>Simulation einer Kraftstoffdüse mit ebener Zerstäuberkante</b>	<b>126</b>
7.1	Simulationsdetails . . . . .	126
7.2	Phänomenologische Betrachtung . . . . .	128
7.2.1	Dreidimensionaler Einlaufvorgang . . . . .	128
7.2.2	Akkumulation und transversale Schwingungen . . . . .	131
7.2.3	Exposition . . . . .	133
7.2.4	Rayleigh-Zerfall und Abschnürvorgänge . . . . .	136
7.2.5	Blasenzerfall . . . . .	138
7.2.6	Luftströmung . . . . .	145
7.3	Quantitativer Vergleich mit experimentellen Ergebnissen . . . . .	152
7.3.1	Einfluss der Tropfenerfassung auf quantitative Ergebnisse . . . . .	152
7.3.2	Einfluss der Bildrate . . . . .	155
7.3.3	Wahl der Zerfallsereignisse . . . . .	156
7.3.4	Analyse und Vergleich der Sprayeigenschaften . . . . .	161
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>164</b>

<b>Literatur</b>	<b>166</b>
<b>Betreute Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten</b>	<b>177</b>