

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xii
1 Einleitung	1
2 Wissenschaftlicher Kenntnisstand	4
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
3 Grundlagen der SPH-Methode	24
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
4 Strategie der Code-Gestaltung und Implementierung	42
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
5	Referenz-Experiment und numerisches Modell	92
5.1	Referenz-Experiment	92
5.2	Numerische Abstraktion	93
5.3	Annahmen und Einschränkungen	94
6	Validierung und Untersuchung der numerischen Leistungsfähigkeit	97
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
7	Simulation einer Kraftstoffdüse mit ebener Zerstäuberkannte	126
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
8	Zusammenfassung und Ausblick	164

Literatur	166
Betreute Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten	177