

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbole</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2 Wissenschaftlicher Kenntnisstand</b>	<b>7</b>
2.1 Numerischen Simulation von Sprayflammen . . . . .	7
2.1.1 Phänomenologie der Sprayflamme . . . . .	7
2.1.2 Methodenübersicht . . . . .	9
2.1.3 Der Euler-Lagrange-Ansatz . . . . .	10
2.1.4 Einfluss der Tropfenstartbedingungen auf die Verbrennung . . . . .	14
2.1.5 Tropfenstartbedingungen für Euler-Lagrange-Simulationen . . . . .	14
2.2 Luftgestützte Zerstäubung an Filmlegern . . . . .	18
2.2.1 Charakteristische Phänomene . . . . .	18
2.2.2 Einflussgrößen und Kennzahlen . . . . .	19
2.3 Aus Experimenten abgeleitete Korrelationen . . . . .	22
2.3.1 Charakteristische Mittelwerte . . . . .	22
2.3.2 Univariate Wahrscheinlichkeitsverteilungen . . . . .	25
2.3.3 Multivariate Wahrscheinlichkeitsverteilungen . . . . .	27
2.4 Numerische Simulation von Zerstäubungsprozessen . . . . .	29
2.4.1 Methodenübersicht . . . . .	29
2.4.2 Numerische Simulationen der luftgestützten Zerstäubung am Filmleger .	31
2.5 Zielsetzung und Vorgehensweise . . . . .	34
<b>3 Verwendete Methoden</b>	<b>37</b>
3.1 Gesamtkonzept der Arbeit . . . . .	37
3.2 Die Smoothed-Particle-Hydrodynamics-Methode . . . . .	39
3.3 Bisherige Ansätze zur statistischen Modellierung und Simulation von Sprays . .	42
3.3.1 Charakteristische Mittelwerte . . . . .	42
3.3.2 Wahrscheinlichkeitsverteilungen . . . . .	43
3.4 Methoden zur multivariaten statistischen Modellierung und Simulation . . . . .	49
3.4.1 Statistisch abhängige und unabhängige Zufallsvariablen . . . . .	49
3.4.2 Multivariate Modellierungsansätze . . . . .	50
3.4.3 Copulas und Copula-Konstruktionen . . . . .	52
<b>4 Simulation der Zerstäubung</b>	<b>61</b>
4.1 Untersuchte Betriebspunkte . . . . .	61
4.2 Zerstäubergeometrie, Rechengebiet und Randbedingungen . . . . .	63
4.3 Strömungsfeld der Luft . . . . .	65
4.4 Charakteristische Phänomene der Zerstäubung . . . . .	67
4.5 Charakteristische Größen und ihre Erfassung . . . . .	70
4.6 Primärzerfall: Das Zusammenspiel von Ligamenten und Tropfen . . . . .	71

<b>5</b>	<b>Statistische Analyse der Spraydaten</b>	<b>75</b>
5.1	Drei Betrachtungsweisen des Sprays . . . . .	75
5.2	Wirkung der Betrachtungsweise auf die Tropfenstatistik . . . . .	78
5.3	Einfluss der Betriebs- und Geometrieparameter auf die Tropfeneigenschaften . . . . .	80
5.4	Zusammenhänge zwischen den Tropfeneigenschaften . . . . .	87
5.5	Einfluss der Betriebsparameter und Geometrie . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Multivariate Statistische Modellbildung und Simulation</b>	<b>95</b>
6.1	Anforderungen . . . . .	95
6.2	Statistischer Ansatz: Copula-Konstruktion . . . . .	96
6.2.1	Copula-basierte Modellbildung: Copula-Konstruktion . . . . .	96
6.2.2	Copula-basierte Modellbildung: Randverteilungen . . . . .	100
6.2.3	Statistische Simulation . . . . .	105
6.3	Phänomenologisch-statistischer Ansatz . . . . .	106
6.3.1	Modellbildung . . . . .	106
6.3.2	Statistische Simulation . . . . .	113
6.4	Ergebnisse der statistischen Simulationen mit beiden Ansätzen . . . . .	113
6.5	Diskussion beider Ansätze . . . . .	118
<b>7</b>	<b>Abhängigkeit der Modellparameter von den Betriebsbedingungen und der Geometrie</b>	<b>121</b>
7.1	Vorüberlegungen . . . . .	121
7.2	Die optimalen Metamodelle . . . . .	122
7.3	Vergleich der simulierten Sprays . . . . .	127
7.4	Einfluss der Betriebsparameter in beiden Ansätzen . . . . .	129
<b>8</b>	<b>Validierung des MARTINI-Modells mittels Euler-Lagrange-Simulationen</b>	<b>135</b>
8.1	Das MARTINI-Modell und seine Implementierung . . . . .	135
8.2	Testfall ebener Filmleger . . . . .	138
8.2.1	Simulierte Betriebspunkte und verwendete Modelle . . . . .	139
8.2.2	Rechengebiet, Randbedingungen und Netze . . . . .	142
8.2.3	Strömungsfeld der Luft . . . . .	143
8.3	Einfluss der Randverteilungen auf die räumliche Verteilung der Kraftstoffmasse . . . . .	145
8.4	Einfluss der Copula-Konstruktion auf das Spray am Zerstäuber . . . . .	147
8.5	Vergleich einiger Euler-Lagrange-Simulationen mit PDA-Messungen . . . . .	152
8.6	Einfluss der Betriebsbedingungen des Zerstäubers . . . . .	155
8.7	Zusammenfassung der Beobachtungen . . . . .	155
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>157</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>
	<b>Eigene wissenschaftliche Publikationen</b>	<b>175</b>

<b>Betreute studentische Arbeiten</b>	<b>177</b>
<b>Anhang</b>	<b>181</b>
A.1 Gültigkeitsbereich der Korrelationen und Modelle zur filmlegenden luftgestütz- ten Zerstäubung . . . . .	181
A.2 Betriebsbedingungen in Triebwerksbrennkammern . . . . .	183
A.3 Weitere Details zu den SPH-Simulationen . . . . .	185
A.4 Abschätzung der turbulenten Skalen der SPH-Simulationen . . . . .	185
A.5 Geschwindigkeitsprofile an der Zerstäuberkannte in der SPH-Simulation und dem Experiment . . . . .	186
A.6 Einfluss der Dimensionalität auf den Zerfall . . . . .	187
A.7 Einfluss der Betrachtungsweise auf den Sauterdurchmesser . . . . .	189
A.8 Einfluss der drei Betrachtungsweisen auf die Verteilungen der Tropfengröße, der Tropfenposition und der Tropfengeschwindigkeit . . . . .	190
A.9 Definition ausgewählter Copula-Familien . . . . .	192
A.10 Modellparameter von Copula-Konstruktion CK 3 . . . . .	193
A.11 Weitere Ergebnisse der statistischen Simulation mit optimalen Modellparametern	194
A.12 Netz für die Euler-Lagrange-Simulationen . . . . .	195