

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungen</b>	<b>iv</b>
<b>Tabellen</b>	<b>x</b>
<b>Symbole</b>	<b>xi</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
2.1 Phänomenologische Betrachtung von Tropfen unter aerodynamischer Last . . . . .	6
2.2 Beschreibung von Tropfen unter geringer aerodynamischer Last . . . . .	11
2.2.1 Tropfendeformation . . . . .	11
2.2.2 Tropfenschwingung . . . . .	15
2.2.2.1 Freie Formschwingungen von Tropfen . . . . .	15
2.2.2.2 Analytische Beschreibung der Formschwingungen von Tropfen	17
2.2.3 Bewegungsgleichung . . . . .	19
2.3 Numerische Untersuchungen aerodynamisch beaufschlagter Tropfen . . . . .	21
2.3.1 Methoden zur Simulation von Mehrphasenströmungen . . . . .	21
2.3.2 Numerische Studien zu aerodynamisch beaufschlagten Tropfen . . . . .	23
2.4 Untersuchungen von Mehrphasenströmungen mit der SPH-Methode . . . . .	28
2.5 Untersuchungen zur Zerstäubung von Emulsionen . . . . .	31
<b>3 Zielsetzung</b>	<b>35</b>
<b>4 Smoothed Particle Hydrodynamics</b>	<b>39</b>
4.1 Mathematische Beschreibung von Mehrphasenströmungen . . . . .	39
4.1.1 Erhaltungsgleichungen . . . . .	39
4.1.2 Numerische Verfahren für Mehrphasenströmungen . . . . .	40
4.2 Diskretisierung . . . . .	41
4.3 Erhaltungsgleichung in SPH-Form . . . . .	43
4.4 Inkompressibilität . . . . .	45
4.5 Randbedingungen . . . . .	46
4.5.1 Feste Begrenzungen . . . . .	47

4.5.2	Durchlässige Ränder . . . . .	48
4.6	Mehrphasenströmung in SPH . . . . .	49
4.6.1	Oberflächenspannung . . . . .	50
4.6.2	Beschreibung von Dreiphasengrenzflächen . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Modellentwicklung zur Beschreibung von Dreiphaseninteraktionen in SPH</b>	<b>55</b>
5.1	Umsetzung des Dreiphaseninteraktions-Modells . . . . .	55
5.2	Validierung des Fluid-Wand-Interaktionsmodells . . . . .	57
5.3	Validierung des Drei-Fluid-Interaktionsmodells . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Simulation der aerodynamischen Beaufschlagung von Tropfen</b>	<b>71</b>
6.1	Rechengebiet und Randbedingungen . . . . .	71
6.1.1	Simulationsablauf und Tropfeninitialisierung . . . . .	73
6.1.2	Diskussion der räumlichen Auflösung . . . . .	74
6.2	Simulationsübersicht . . . . .	76
<b>7</b>	<b>Monofluide Tropfen unter aerodynamischer Last</b>	<b>81</b>
7.1	Deformationsverhalten bei unterkritischer aerodynamischer Belastung . . . . .	81
7.1.1	Initiale Tropfendehnung . . . . .	83
7.1.2	Formschwingung . . . . .	88
7.2	Frequenz- und Dämpfungsverhalten von Tropfenschwingungen . . . . .	89
7.2.1	Analytische Betrachtung eines Feder-Masse-Dämpfer-Systems . . . . .	90
7.2.2	Schwingungsverhalten der monofluiden Einzeltropfen . . . . .	91
7.3	Tropfenbewegung bei unterkritischer aerodynamischer Last . . . . .	100
7.4	Vergleich der Vorhersage der SPH-Methode und des NLTAB3-Modells über das Verhalten monofluider Tropfen . . . . .	109
7.4.1	Einfluss des aerodynamischen Wirkungskoeffizienten . . . . .	110
7.4.2	Vorhersage der Querdeformation und des Schwingungsverhaltens . . . . .	112
7.4.3	Vorhersage der Tropfenbewegung . . . . .	121
7.5	Tropfendehnung und -aufbruch bei überkritischer aerodynamischer Belastung	124
<b>8</b>	<b>Bifluide Tropfen unter aerodynamischer Last</b>	<b>131</b>
8.1	Einfluss von Wasser auf das Deformationsverhalten von Kraftstofftropfen bei unterkritischer aerodynamischer Belastung . . . . .	131
8.2	Beeinflussung der Tropfenbewegung durch einen im Kraftstoff platzierten Wassertropfen . . . . .	142

---

8.3 Einfluss des Volumenanteils des Wassers und der Fluidanordnung auf das Verhalten von bifluiden Einzeltropfen . . . . .	144
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>151</b>
<b>Literatur</b>	<b>153</b>
<b>Studentische Arbeiten</b>	<b>171</b>
<b>Anhang</b>	<b>173</b>
A.1 Stoffwerte und Kontaktwinkel der n-Alkane zur Validierung des dynamisches Benetzungsverhaltens . . . . .	173
A.2 Fehlerabschätzung der mit SPH bestimmten statischen Kontaktwinkeln allgemeiner Drei-Fluid Interaktionen . . . . .	174
A.3 Einfluss der Ohnesorge Zahl auf die Trajektorie, Geschwindigkeit und Beschleunigung monofluider Einzeltropfen . . . . .	175
A.4 Frequenz- und Dämpfungsverhalten monofluider Einzeltropfen . . . . .	176
A.5 Vergleich der vorhergesagten Widerstandsbeiwerte mit Korrelationen aus der Literatur . . . . .	180
A.6 Vergleich der mit SPH und dem NLTAB3 Modell vorhergesagten Querausdehnung	182
A.7 Auswertung der Spannungsanteile eine mit der SPH Methode vorhergesagten Wassertropfens . . . . .	183
A.8 Vergleich der Tropfentrajektorie und -geschwindigkeit vorhergesagt mit SPH und dem NLTAB3 Modell . . . . .	184
A.9 Vergleich des mit SPH und dem NLTAB3 Modell vorhergesagten Tropfenwiderstands . . . . .	187
A.10 Zeitliche Entwicklung der Quer- und Längsausdehnung bifluder Einzeltropfen .	189
A.11 Gegenüberstellung des Verhaltens mono- und bifluider Einzeltropfen während der initialen Deformation . . . . .	190
A.12 Tropfenbahn und -geschwindigkeit bifluider Einzeltropfen . . . . .	193