

Inhaltsverzeichnis

Symbole	v
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	4
2.1 Grundlagen der Stickoxidbildung	4
2.2 Grundlagen der Sprayverbrennung	6
2.2.1 Regime der Sprayverbrennung	6
2.2.2 Grundlagen der Einzeltropfenverbrennung	9
2.2.3 Einzeltropfenverbrennung bei veränderlicher Tropfenrelativgeschwindigkeit	11
2.2.4 Stickoxidbildung in Einzeltropfenflammen	14
2.3 Stickoxidbildung in mageren Sprayflammen	15
2.4 Zielsetzung	16
3 Experimenteller Aufbau	18
3.1 Konzept des Verbrennungssystems	18
3.2 Geometrie und Flammenstabilisierung	19
3.3 Beurteilung der Methode zur Variation des Vorverdunstungsgrades	21
3.4 Betriebsbedingungen	23
3.5 Sprayeigenschaften	24
4 Messtechnik	27
4.1 Charakterisierung von Zweiphasenströmungen mit dem Phasen-Doppler-Verfahren	27
4.1.1 Fehlerabschätzung für das Phasen-Doppler-Verfahren	29
4.2 Messung der Gasttemperatur in der Reaktionszone	30
4.3 Messung der Stickoxidemissionen des Verbrennungssystems	33
4.4 Identifikation von Flammenstrukturen mit laserinduzierter Fluoreszenz	35
4.4.1 Physikalisches Grundprinzip der Laserinduzierten Fluoreszenz	36
4.4.2 Applikation des Messverfahrens	37
4.4.3 Interpretation der LIF-Signalintensität	38

4.4.4	Abschätzung der Detektionsgrenze von CH-LIF	41
4.4.5	Auftreten der Zielspezies in einfachen Flammen	42
4.5	Analyse von Flammenstrukturen mit zeitaufgelösten Chemolumineszenzaufnahmen	45
4.6	Ausblick	46
5	Methodik der numerischen Untersuchung	48
5.1	Modellbildung	48
5.1.1	Annahmen	49
5.1.2	Gasphase	51
5.1.3	Flüssigphase	53
5.1.4	Phasengrenze	53
5.1.5	Stoffeigenschaften	54
5.2	Numerische Methoden	55
5.3	Diskretisierung des Lösungsgebietes	55
5.4	Validierung der numerischen Simulationen	58
5.5	Globale Parameter zur Charakterisierung von Einzeltropfenflammen	64
5.6	Ausblick	65
6	Numerische Analyse der Einzeltropfenverbrennung	66
6.1	Numerische Analyse der stationären Einzeltropfenverbrennung	66
6.1.1	Randbedingungen für die Untersuchung der Einzeltropfenverbrennung	66
6.1.2	Einfluss der Relativgeschwindigkeit auf die Struktur von Tropfenflammen	67
6.1.3	Einfluss der Tropfenrelativgeschwindigkeit und Umgebungstemperatur auf die NO-Bildung von Einzeltropfenflammen	72
6.1.4	Effekt des Tropfendurchmessers auf die Einzeltropfenverbrennung . .	77
6.1.5	Einfluss des Umgebungsdrucks auf die NO-Bildung von Einzeltropfenflammen	80
6.1.6	Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung bei stationären Bedingungen	83
6.2	Numerische Analyse der Einzeltropfenverbrennung bei transienten Bedingungen	84
6.2.1	Numerische Untersuchung des Tropfenfolgeverhaltens	85
6.2.2	Analyse der Tropfenverbrennung mit fluktuierender Relativgeschwindigkeit bei konstantem Tropfendurchmesser	87

6.2.3	Analyse der Tropfenverbrennung mit fluktuierender Relativgeschwindigkeit und variablem Tropfendurchmesser	95
6.3	Zusammenfassung der numerischen Untersuchung der Einzeltropfenverbrennung	99
7	Experimentelle Analyse der makroskopischen Flammenstruktur	100
7.1	Statistische Charakterisierung der Zweiphasenströmung	100
7.2	Tropfendurchmesserabhängigkeit der Tropfenrelativgeschwindigkeit	104
7.3	Fluktuation der Tropfenrelativgeschwindigkeit	106
7.4	Experimentelle Bestimmung des Temperaturfeldes im Brennraum	108
7.5	Untersuchung der makroskopischen Flammenstruktur mit OH-PLIF	111
7.6	Untersuchung der makroskopischen Flammenstruktur mit CH-PLIF	113
7.7	Einfluss des Flüssigbrennstoffanteils auf die NO-Bildung	116
7.8	Zusammenfassung der experimentellen Ergebnisse	117
8	Vergleich experimenteller und numerischer Ergebnisse	120
8.1	Randbedingungen der Einzeltropfenverbrennung in der generischen Sprayflamme	120
8.2	Räumliche Verteilung der CH-Konzentration in Einzeltropfenflammen - numerische Ergebnisse	122
8.3	Analyse der Einzeltropfenverbrennung mit CH-PLIF	126
8.4	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von Einzeltropfenflammen	130
9	Globalmodelle für die Einzeltropfenverbrennung zur Einbettung in CFD	135
9.1	Prinzipien der Modellierung	135
9.2	Modellierung des Phasenübergangs in Einzeltropfenflammen	137
9.3	Methode zur Bestimmung der Modellkonstanten	139
9.4	Modellierung der Bewegung der Tropfenflamme relativ zum Tropfen	140
9.4.1	Bestimmung der Modellparameter	141
9.4.2	Erweiterung und Validierung des Modells für reale Tropfenflammen .	142
9.5	Modellierung der Verlöschung in Tropfenflammen	146
9.5.1	Bestimmung der Modellparameter	148
9.5.2	Erweiterung und Validierung des Modells für reale Tropfenflammen .	149
9.6	Modellierung der NO-Bildung in Tropfenflammen	152
9.6.1	Bestimmung der Modellparameter	153
9.6.2	Validierung des Modells	155

10 Anwendung der Ergebnisse zur Auslegung schadstoffarmer Flugtriebwerksbrennkammern	158
11 Zusammenfassung	162
Literatur	165
Anhang	173
A.1 Numerische Analyse der Limitierung der Vorverdunstung durch Selbstzündung	173
A.2 Daten für die Bestimmung der Detektionsgrenze von CH-LIF	174
A.3 Analytische Beschreibung der Einzeltropfenverbrennung	174
A.4 Bestimmung der Zeitskala von Tropfenflammen für die Randbedingungen in der generischen Sprayflamme	175
A.5 Einfluss des Flüssigbrennstoffanteils auf das Strömungsfeld des generischen Drallbrenners	176