

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Abbildungen</b>	<b>iv</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>Summary</b>	<b>x</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ziele der Entwicklung von Verbrennungssystemen in Gasturbinen . . . . .	1
1.2 Pilotierte drallstabilisierte magerer Vormischverbrennung . . . . .	3
1.3 Zielsetzung der Arbeit . . . . .	5
<b>2 Problemstellung und Kenntnisstand</b>	<b>7</b>
2.1 Beschreibung und Funktion mager vorgemischter Verbrennungssysteme . . . . .	7
2.1.1 Magere Vormischverbrennung . . . . .	8
2.1.2 Flammenstabilisierung durch aufgeplatzte Drallströmungen . . . . .	9
2.1.3 Pilotierung (gestufte Verbrennung) . . . . .	12
2.2 Veröffentlichungen zur Weiterentwicklung mager vorgemischter Verbrennungssysteme . . . . .	13
2.2.1 Flammenstabilisierung . . . . .	13
2.2.2 Pilotierte Verbrennung . . . . .	18
2.2.3 Thermoakustik . . . . .	20
2.2.4 Stickoxidemissionen teilweise vorgemischter Brenngase . . . . .	23
2.3 Vorgehensweise im Rahmen der vorliegenden Arbeit . . . . .	25
<b>3 Systematik zur Stabilisierung pilotierter Drallflammen</b>	<b>27</b>
3.1 Isotherme Drallströmungen . . . . .	28
3.1.1 Drall in Rohrströmungen . . . . .	28
3.1.2 Drallströmungen in Brennkammern . . . . .	29
3.1.3 Einflüsse der Brennkammergeometrie auf das Wirbelaufplatzen . . . . .	33
3.2 Flammenstabilisierung in Drallströmungen . . . . .	37
3.2.1 Systematik zur Flammenlage in Drallströmungen . . . . .	37
3.2.2 Rückwirkungen der Flamme auf das Wirbelaufplatzen . . . . .	39
3.2.3 Rückwirkungen der Flamme und ihrer Lage auf Flammenschwingungen	44
3.3 Brenneigenschaften relevanter Gasmische . . . . .	45
3.3.1 Stöchiometrie, Heizwert und Flammentemperatur . . . . .	46
3.3.2 Selbstzündzeit . . . . .	48
3.3.3 Laminare Brenngeschwindigkeit und Verlöschgrenze . . . . .	51
3.3.4 Turbulentes Zeitmaß der Verbrennung . . . . .	53
3.4 Auswirkung von Pilotgas . . . . .	56
3.5 Zusammenfassung und experimenteller Ansatz . . . . .	58

<b>4</b>	<b>Prüfstand: Aufbau und Betrieb</b>	<b>61</b>
4.1	Gestaltung des Prüfstands als Modellsystem für die magere Gasturbinenverbrennung . . . . .	61
4.2	Brenner . . . . .	65
4.3	Brennkammer . . . . .	67
4.4	Geometrie- und Betriebsparameter . . . . .	69
4.5	Instrumentierung und experimentelle Zugänge . . . . .	71
4.5.1	Überwachung des Betriebszustands . . . . .	71
4.5.2	Sondenmessungen im Brennraum . . . . .	72
4.5.3	Optischer Zugang für Punktmessungen (LDA) . . . . .	73
4.5.4	Extraktive Emissionsmessung . . . . .	74
4.5.5	Flächiger Zugang für Fotografie und Chemilumineszenz-Aufnahmen . . . . .	74
4.6	Unsicherheiten der Betriebsgrößen . . . . .	75
4.6.1	Unsicherheit und zeitliche Schwankung der Mess- und Regelgrößen . . . . .	76
4.6.2	Variabilität der Eigenschaften der Edukte . . . . .	77
4.6.3	Unsicherheit der chemischen Zeitmaße . . . . .	82
<b>5</b>	<b>Messtechnik</b>	<b>83</b>
5.1	Chemilumineszenz - Abbildung . . . . .	83
5.1.1	Optische Abbildung . . . . .	83
5.1.2	Interpretation von Chemilumineszenz-Aufnahmen . . . . .	85
5.2	Laser-Doppler-Anemometrie . . . . .	87
5.2.1	LDA in Brennkammern . . . . .	88
5.2.2	Eigenschaften des verwendeten Messsystems . . . . .	88
5.3	Temperaturmessung . . . . .	91
5.3.1	Thermoelementsonde und Messwerterfassung . . . . .	91
5.3.2	Bestimmung der Gastemperatur und Quereinflüsse . . . . .	93
5.3.3	Diskussion des Korrekturverfahrens und der Messfehler . . . . .	96
5.4	Emissionsmesstechnik . . . . .	98
5.5	Eignung und Einsatz der Messtechnik . . . . .	99
<b>6</b>	<b>Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>101</b>
6.1	Vergleich isothermer mit reagierender Strömung im Auslegungsfall . . . . .	101
6.1.1	Kohärente Strukturen . . . . .	104
6.1.2	Flammenposition im Auslegungsfall . . . . .	104
6.2	Vormischverbrennung mit und ohne Pilotgas . . . . .	107
6.2.1	Fälle mit Leckageluft: Detektion zweier Strömungsfelder . . . . .	107
6.2.2	Betriebszustände mit zwei Strömungsformen . . . . .	109
6.2.3	Übergänge und Flammenposition . . . . .	111
6.3	Dynamische Stabilität in den beiden Strömungsfeldern . . . . .	114
6.4	Schadstoffemissionen . . . . .	116
6.5	Auswirkungen auf die Wandbelastung und die Verbrennung im Eckwirbel . . . . .	117
6.5.1	Thermische Belastung der Brennkammerwand . . . . .	117

---

6.5.2	Messtechnik: indirekte Detektion der Strömungsform . . . . .	119
6.5.3	Wärmefreisetzung in der äußeren Scherzone . . . . .	120
6.6	Transition zwischen weiter und enger Strömungsform . . . . .	121
6.6.1	Transition bei Änderung des Äquivalenzverhältnisses . . . . .	122
6.6.2	Enges Strömungsfeld trotz Pilotierung . . . . .	122
6.7	Untersuchungen mit wasserstoffhaltigem Brennstoff . . . . .	124
6.7.1	Verbrennungseigenschaften wasserstoffhaltiger Brenngase . . . . .	125
6.7.2	Flammenstabilisierung bei variiertem chemischem Zeitmaß . . . . .	129
<b>7</b>	<b>Überlegungen zur Verbesserung pilotierter Verbrennungssysteme</b>	<b>135</b>
7.1	Einfluss der Pilotierung auf die statische Stabilität . . . . .	135
7.2	Einmischung des Pilotgases . . . . .	136
7.3	Zielkonflikt bei der Auslegung von magereren Verbrennungssystemen . . . . .	137
7.4	Vorhersagbarkeit, numerische Strömungssimulation . . . . .	137
7.5	Einfluss der Wandkühlung auf die Flammenstabilisierung . . . . .	138
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>139</b>
<b>Anhang</b>		<b>141</b>
A.1	Kenngrößen zur Beschreibung magerer Vormischflammen . . . . .	141
A.1.1	Isotherme Drallströmung . . . . .	141
A.1.2	Verbrennung . . . . .	142
A.2	Laser-Doppler-Anemometrie in Brennkammern . . . . .	144
A.2.1	LDA bei hohen Fluidtemperaturen . . . . .	144
A.2.2	Partikel . . . . .	145
A.2.3	Signalauswertung und zeitabhängige Informationen . . . . .	146
A.3	Kompakte Darstellung der Geschwindigkeits- und Temperaturfelder . . . . .	149
<b>Literatur</b>		<b>152</b>