

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen	iv
Symbolverzeichnis	vi
Summary	x
1 Einleitung	1
1.1 Ziele der Entwicklung von Verbrennungssystemen in Gasturbinen	1
1.2 Pilotierte drallstabilisierte magere Vormischverbrennung	3
1.3 Zielsetzung der Arbeit	5
2 Problemstellung und Kenntnisstand	7
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
3 Systematik zur Stabilisierung pilotierter Drallflammen	27
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 Gasgemische	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

4 Prüfstand: Aufbau und Betrieb	61
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
5 Messtechnik	83
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
6 Experimentelle Ergebnisse	101
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
7	Überlegungen zur Verbesserung pilotierter Verbrennungssysteme	135
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
8	Zusammenfassung	139
Anhang		141
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
Literatur		152