

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen	xv
Tabellen	xvii
Nomenklatur	xix
Kurzzusammenfassung	xxvii
Abstract	xxix
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Gliederung der Arbeit	2
1.4 Anmerkungen	3
2 Grundlagen	5
2.1 Relevante Gleichungen	5
2.2 Chemische Kinetik und Reaktionsmechanismen	8
2.3 Die Wirbeltransportgleichung	10
2.3.1 Diskussion der Impulsgleichungen	10
2.3.2 Die Wirbelstärke	12
2.3.3 Entwicklung der Wirbeltransportgleichung	12
2.3.3.1 Dimensionslose Wirbeltransportgleichung	13
2.3.3.2 Diskussion der Terme der Wirbeltransportgleichung	14
2.3.3.3 Das Biot-Savart Gesetz	20
2.4 Das Flammenoberflächendichtemodell	21
2.4.1 Die Einführung der Flammenoberflächendichte	21
2.4.2 Die Reaktionsfortschrittsvariable - Beschreibung des Verbrennungsver- laufs	23
2.4.3 Der Mischungsbruch	26
2.4.4 Die Gleichung der Flammenoberflächendichte	27
2.4.4.1 Streckung und Krümmung	27

2.4.4.2	Gestreckte Flammenoberfläche	28
2.4.4.3	Transporttheorem einer vektoriellen Größe	30
2.4.4.4	Transporttheorem einer skalaren Größe	31
2.4.4.5	Definition der Flammenoberflächendichte	31
2.4.5	Die Flammenoberflächendichte auf Basis statistischer Beschreibung . .	33
2.4.5.1	Die PDF Transportgleichung	33
2.4.5.2	Kopplung von FSD und PDF Methode	35
2.4.5.3	Ableitung der FSD Transportgleichung	36
2.4.5.4	Vergleich von FSD mit PDF Transportgleichung	38
2.4.6	Abgrenzung des FSD-Modells zu alternativen Ansätzen	38
2.4.6.1	Level-Set-Methode (G-Gleichung)	38
2.4.6.2	Flammen-Faltungs-Modell	39
2.4.6.3	Das Wirbelzerfallsmodell	40
2.4.6.4	Algebraische Flammenoberflächendichtemodelle	44
2.4.6.5	Modelle auf Basis der turbulenten Flammengeschwindigkeit	46
2.5	Die Flammengeschwindigkeit	49
2.5.1	Kinematische Betrachtungsweise	51
2.5.2	Energiebilanz	51
2.5.3	Dimensionsanalytische Betrachtung	52
2.5.4	Ableitung der Flammengeschwindigkeit	53
2.5.5	Die Flammengeschwindigkeit unter dem Einfluss von Strömungsinhomogenitäten	58
2.5.5.1	Wirkungsweise der Strömungsinhomogenitäten	62
2.5.5.2	Bestimmung der Markstein Zahl	64
2.5.5.3	Die Streckungsrate als Feldgröße	65
3	Modellierung	69
3.1	Mittelungsvorschriften	69
3.2	Die gemittelten Bilanzgleichungen	72
3.3	Schließung der gemittelten Bilanzgleichungen	73
3.3.1	Das k,ϵ -Turbulenzmodell	74
3.3.2	Reynoldspannungsturbulenzmodell	75
3.3.3	Strömung entlang fester Wände	77
3.4	Verbrennungsmodellierung	78

3.4.1	Physikalische Motivation des Flammenoberflächenmodells	78
3.4.2	Gültigkeitsbereich des Verbrennungsmodells	81
3.4.3	Umfang des Verbrennungsmodells	83
3.4.4	Die modellierte Gleichung der Reaktionsfortschrittsvariablen	84
3.4.5	Die modellierte Gleichung der Flammenoberflächendichte	86
3.4.5.1	Die Konstanten des Flammenoberflächendichtemodells	97
3.4.5.2	Zusammenhang zwischen $\bar{\tau}$ und $\bar{c}$	98
3.4.5.3	Die Quellterme der FSD-Gleichung auf Basis von $\bar{c}$	98
3.4.5.4	Modellierung der Gleichung der Flammenoberflächendichte in Wandnähe	100
3.4.6	Integration in den Strömungslöser	102
3.4.6.1	Massegewichtete Flammenoberflächendichte	104
3.4.6.2	Quelltermlinearisierung	105
3.4.7	Bestimmung der Flammengeschwindigkeit	108
3.5	Validierung des Verbrennungsmodells	111
3.6	Schnittstelle zwischen Verbrennungsmodell und Strömungslöser	112
3.7	Der Lösungsalgorithmus	113
4	Verbrennungsinduziertes Wirbelaufplatzen: Konfiguration	117
4.1	Geometrie	117
4.2	Rechnennetz	118
4.3	Randbedingungen	120
4.4	Betriebsparameter	124
5	Ergebnisse und deren Interpretation	125
5.1	Ergebnisse der Flamelet Berechnungen	125
5.1.1	Eigenschaften laminar-stationär gestreckter Vormischflammen	125
5.1.2	Bestimmung modellrelevanter Größen	131
5.1.3	Flameletparameter	137
5.1.4	Einfluss stationärer Streckungsrate auf die Flammengeschwindigkeit	148
5.2	Isothermes Strömungsfeld der untersuchten Konfiguration	153
5.2.1	Die Mechanismen des isothermen Wirbelaufplatzens	159
5.2.2	Zusammenhang zwischen axialem Druckgradienten und azimuthaler Wir- belstärke	161

5.3	Verbrennung - stationärer Zustand	164
5.4	Verbrennung - instationärer Zustand	166
5.4.1	Ablauf der numerischen Simulationen	166
5.4.2	Generalisierte Beschreibung des numerisch simulierten Vorgangs des verbrennungsinduzierten Wirbelaufplatzens	166
5.4.3	Einfluss der Flamelet Modellierung	168
5.4.4	Einordnung der untersuchten Konfiguration	179
5.4.5	Charakteristika des verbrennungsinduzierten Wirbelaufplatzens	182
5.4.6	Flammenoberflächendichte und deren Quellterme während eines nume- risch simulierten Flammenrückschlags	186
5.4.7	Relative Lage von Reaktion zu Rezirkulationsblase	195
5.4.8	Zeitfolge der stromauf Propagation	201
5.4.9	Mechanismen zur Initialisierung des Flammenrückschlags	201
5.4.10	Mechanismen während des Flammenrückschlags	221
5.4.11	Wirbelstärke: Induzierte Beschleunigung	231
5.4.12	Numerisch simulierter Vorgang des verbrennungsinduzierten Wirbelaufplatzens: Initialisierung und Ablauf	234
5.4.13	Druckfeld und Drallzahl	236
5.4.14	Interpretation der wirbeldynamischen Abläufe	241
5.4.15	Schlussfolgerungen und kritische Betrachtung	244
6	Zusammenfassung	247
	Literaturverzeichnis	263
	Anhang	265
A.1	Vektor- und Tensoroperationen	265
A.2	Differentialoperatoren in Zylinderkoordinaten	267
A.3	Kalorische Zustandsgleichung eines idealen Gases	271
A.4	Die Gleichung der Enthalpie	272
A.5	Ableitung der Wirbeltransportgleichung	274
A.5.1	Die Terme molekularer Reibung der Wirbeltransportgleichung bei ho- her Reynolds Zahl	278
A.5.2	Die Wirbeltransportgleichung in Zylinderkoordinaten	279
A.6	Das totale Differential	282

A.7 Die Reaktionsfortschrittsvariable auf Basis der Temperatur	282
A.8 Krümmung der Flammenoberfläche	283
A.9 Interpretation der als Vektorprodukt notierten Streckungsrate	284
A.10 Transporttheorem einer vektoriellen Größe - Rechenoperation	285
A.11 Die Flammenoberflächendichte als Funktion differentieller Flächen und Volumina	287
A.12 Die Terme zur Herleitung der Flammenoberflächendichte auf Basis der Analogie zu der PDF Methode	288
A.13 Die Varianz des Reaktionsfortschritts	291
A.14 Die Transportgleichung der Verteilungsfunktion $c(1 - c)$	293
A.15 Dimensionslose Gleichung der Reaktionsfortschrittsvariablen	294
A.16 Transportgleichung der Regressionsvariablen	295
A.17 Zusammenhang der Mittelungsvorschriften	295
A.18 Modellierung des turbulenten Transports - Gleichung (3.49)	296
A.19 Betrachtung zur turbulenten Streckungsrate	296
A.20 Laminare Flammengeschwindigkeit - Korrelationsvorschrift	296
A.21 Rechnernetz	298
A.22 Ergänzende Eigenschaften laminarer, stationärer Flamelets	299
A.23 Entdimensionierte Kenngrößen laminarer, stationärer Flamelets	302
A.24 Flammengeschwindigkeit stationär gestreckter, laminarer Flamelets	304
A.25 Einfacher Flamelet Ansatz - Stabilitätsdiagramm	305
A.26 Zustandswechsel von t_1 nach t_2	305
A.27 Radiale Profile von Dichte-, Druckgradienten und baroklinem Moment	307
A.28 Überlagerung wirbeldynamischer Einzelgrößen	308
A.29 Reaktionsmechanismus	310