

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Verwendete Formelzeichen	xi
1 Einleitung	1
1.1 <i>Scramjet</i> -Antriebe	2
1.2 Zielsetzung der Arbeit	4
2 Grundlagen der Mischung	7
2.1 Inkompressible Scherschichten	9
2.2 Kompressible Scherschichten	10
2.3 Wachstum von Mischungsschichten	13
2.4 Einfluß von Verbrennung	13
2.5 Methoden zur Intensivierung der Mischung	14
3 Physikalisches Modell	17
3.1 Bilanzgleichungen kompressibler Strömungen	17
3.1.1 Zustandsgrößen und Transportkoeffizienten	19
3.2 Turbulenzmodellierung	20
3.2.1 Reynolds-gemittelte Bilanzgleichungen	21

3.2.2	Schließungsansatz für turbulente Strömungen	23
3.2.3	$k - \epsilon$ – Turbulenzmodell	25
3.2.4	Rotationsanomalie	26
3.2.5	Kompressibilitätskorrektur	27
3.3	Modellierung turbulenter Diffusionsflammen	28
3.3.1	Skalare Erhaltungsgröße	32
3.3.2	Der Lagrange <i>IEM</i> – Ansatz	35
3.3.3	Das 'Probabilistic Euler Lagrangian' – Verbrennungsmodell	35
3.4	Anfangs- und Randbedingungen	41
3.5	Zusammenfassung des Modells	47
4	Numerisches Verfahren	49
4.1	Finite-Elemente Approximation	50
4.2	Methode der gewichteten Residuen	53
4.3	Integrationsverfahren	56
4.3.1	Galerkin – Runge-Kutta Verfahren	57
4.3.2	Taylor – Galerkin Verfahren	57
4.4	Berechnung des chemischen Quellterms	59
4.5	Zeitschrittbestimmung	60
4.6	Numerische Dämpfung	61
4.7	Implementierung der Randbedingungen	62
4.8	Netzgenerierung	63
5	Validierung	67
5.1	Turbulente Scherschicht	68
5.1.1	Kompressibilitätseinfluss	69
5.2	Ebene Diffusionsflamme bei Überschall	71
5.3	Axialsymmetrische Diffusionsflamme	76
6	Untersuchung kompressibler Mischungsschichten	85
6.1	Numerische Simulation	87
6.2	Berechnungsergebnisse	88

7 Scramjet-Brennkammern	93
7.1 Das Forschungsprojekt JAPHAR	93
7.2 DLR-Versuchsbrennkammern M11	95
7.2.1 Strömung ohne Wasserstoffeinblasung	97
7.2.2 Nicht-reaktive Strömung mit Wasserstoffeinblasung	100
7.2.3 Reaktive Strömung	104
7.3 ONERA-Prüfstand LAERTE	109
7.3.1 Qualitativer Vergleich der numerischen Ergebnisse	110
7.3.2 Quantitativer Vergleich der numerischen Ergebnisse	112
8 Zusammenfassung und Ausblick	119
A Bilanzgleichungen in Koordinatendarstellung	123
A.1 Mathematische Notation	123
A.2 Kartesische Koordinaten	124
A.3 Axialsymmetrische Koordinaten	126
B Reaktionsrate der H₂ – O₂ Verbrennung	129
C Bestimmung des Pitot-Druckes	131
Literaturverzeichnis	133
Lebenslauf	142