

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Grundlegende Bemerkungen	1
1.2	Hyperschall-Schubdüsen	6
1.3	Numerische Berechnung	9
2	Mathematische Modelle	12
2.1	Navier-Stokes-Gleichungen	12
2.2	Normierung	15
2.3	Kartesishe 2D-Formulierung	18
2.3.1	Euler-Gleichungen	18
2.3.2	Navier-Stokes Gleichungen, laminar	19
3	Reaktions-Modelle	21
3.1	Einführende Bemerkungen	21
3.2	Mechanismus der Wasserstoff/Luft-Verbrennung	22
3.3	Berechnung der Umsatzterme	25
3.4	Anpassen des Modells	26
3.5	Globales Fünf-Komponenten-Modell	29

3.6	Neun-Komponenten-Modell	31
3.6.1	Zündverzugsimulation	32
4	Stoffdaten	34
4.1	Viskosität und Wärmeleitfähigkeit	34
4.2	Modelle für das kalorische Verhalten	39
4.2.1	Gemisch kalorisch idealer Gase	41
4.2.2	Gemisch thermisch idealer Gase	41
4.2.3	Einfrierlinie für Bray-Modell	43
5	Numerische Verfahren	45
5.1	Räumliche Diskretisierung	46
5.2	Gleichungs-Diskretisierung	48
5.2.1	Explizites Prädiktor-Korrektor-Verfahren	49
5.2.2	Dämpfungsschema	52
5.2.3	Flux Corrected Transport	53
5.2.4	Runge-Kutta-Verfahren	54
5.2.5	Semi-Implizites Runge-Kutta-Verfahren	57
5.2.6	Stabilität	61
5.2.7	Randbedingungen	62
5.3	Turbulenzmodell	63
5.4	Netzgenerierung	68
6	SERN-Düsen	70
6.1	SÄNGER-Schubdüse	70

6.2	Windkanalheckteilmodell	82
6.3	Raumflugzeug beim Start	97
7	Reagierende Strömungen	106
7.1	Stoßinduzierte Verbrennung	106
7.2	Zündverzugs-Simulation	112
7.3	Reagierende Düsenströmung	115
7.4	Stufenströmung	120
8	Zusammenfassung und Ausblick	126
	Literatur	130
	Anhang	139
A	Jacobi-Matrix des Quelltermvektors	139
B	Transportkoeffizienten	141
B.1	Viskosität	141
B.2	Wärmeleitfähigkeit	142