

Forschungsbericht 2017-42

Modellierung der Treibstrahl-Wechselwirkung von Kleintriebwerken unter Hochvakuumbedingungen

Martin Grabe

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Aerodynamik und
Strömungstechnik
Göttingen

117 Seiten
38 Bilder
5 Tabellen
108 Literaturstellen

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen	v
Kurzfassung	ix
Abstract	xi
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielstellung	4
1.3. Aufbau der Arbeit	5
2. Stand der Forschung	7
2.1. Strahlexpansion in Hochvakuum	7
2.2. Treibstrahl-Wechselwirkung	11
2.3. Experimentelle Datenbasis	15
2.4. Modellierung wechselwirkender Treibstrahlen	17
3. Direct Simulation Monte Carlo (DSMC)	21
3.1. Diskretisierung	22
3.2. Randbedingungen	23
3.2.1. Offene Ränder	23
3.2.2. Gas-Oberflächen-Wechselwirkung	24
3.3. Bewegung der Partikel im Simulationsgebiet	26
3.4. Partikelkollisionen	27
3.5. Mittelwertbildung	31
3.6. Implementierung der DSMC-Methode	32
3.6.1. Validierung	34
3.6.2. Verifikation	36
4. Berechnung der Strahlexpansion	39
4.1. Vorgehen	39
4.1.1. Randbedingungen für die Düsenströmung	40
4.1.2. Stoffdaten	41
4.1.3. Lokale Nichtgleichgewichtsparameter	42
4.1.4. Bestimmung des Grenzschichtrandes	44

4.1.5. Randbedingungen für DSMC	45
4.2. Freie Strahlexpansion	47
4.3. Treibstrahl-Wechselwirkung	48
5. Vergleich mit Messungen	51
5.1. Die Patterson-Sonde	52
5.2. Freimolekulare Anströmung	53
5.3. Gaskinetischer Übergangsbereich	56
5.3.1. Gasdynamischer Grenzfall	57
5.3.2. Interpolation im Übergangsbereich	57
5.4. Vergleich vermessener und berechneter Strömungsfelder	59
5.5. Fehlerabschätzung	59
5.5.1. Experiment	60
5.5.2. DSMC	61
6. Ergebnisse	65
6.1. Treibstrahlexpansion ins Vakuum	65
6.1.1. Nahfeld	65
6.1.2. Fernfeld	69
6.2. Wechselwirkung zweier Treibstrahlen	71
6.2.1. Vergleich mit gemessenen Profilen	74
6.2.2. Auswirkung stromab des Düsenaustritts	76
6.2.3. Auswirkung stromauf des Düsenaustritts	80
7. Kritische Diskussion	84
7.1. Berechnung stark expandierender Treibstrahlen	84
7.2. Mechanismus der Wechselwirkung	87
7.3. Gleichwertigkeit von Messung und Rechnung	88
8. Zusammenfassung	92
Literatur	96
A. Teilchenflussbilanz	107
A.1. Maxwell-Verteilung	107
A.2. Chapman-Enskog-Verteilung	108
B. Freimolekulare Durchströmung eines langen Spaltes	110
B.1. Teilchenfluss der Anströmung	111
B.2. Teilchenfluss durch den Schlitzkanal	111
B.3. Durchtrittswahrscheinlichkeit	116