

Dipl.-Ing. Peter Leidner, Annweiler am Trifels

Numerische Untersuchung transsonischer Strömungen realer Gase

Reihe **7**: Strömungstechnik

Nr. **288**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Literaturübersicht	2
1.3	Zielsetzung	6
2	Theorie	7
2.1	Erhaltungsgleichungen	7
2.2	Zustandsgleichungen	7
2.2.1	Zustandsgleichung von van der Waals	9
2.2.2	Zustandsgleichung von Redlich und Kwong	11
2.2.3	Zustandsgleichung von Martin und Hou	13
2.3	Eindimensionale Theorie	14
2.4	Der senkrechte Stoß	20
2.5	Transsonische Strömungen	22
2.5.1	Senkrechter Stoß an einer gekrümmten Wand	24
2.5.2	Stabilität schiefer Stöße	25
2.5.3	Polynomlösung für die Lavaldüse	27
2.5.4	Guderleyschnabel	31
2.5.5	Kopfwellenabstand	33
3	Numerisches Verfahren	34
3.1	Finite-Volumen-Methode	34
3.1.1	Verfahren von Jameson	36
3.1.2	Andere Verfahren	37
3.1.2.1	Verfahren von van Leer	37

3.1.2.2	Verfahren von Roe	37
3.1.2.3	Verfahren von Harten, Lax und van Leer	38
3.1.3	Zeitintegration	38
3.1.4	Konvergenzbeschleunigung	38
3.1.4.1	Lokaler Zeitschritt	38
3.1.4.2	Mehrgittermethode und Mehrebenenmethode	39
3.1.4.3	Residuenmittelung	39
3.1.5	Anfangsbedingung	40
3.1.6	Randbedingungen	40
3.1.6.1	Feste Wand	40
3.1.6.2	Eintritt	40
3.1.6.3	Austritt	40
3.1.6.4	Freifeldrand	41
3.1.6.5	Vor- und Nachlauf bei Gitterströmungen	42
3.2	Rechengitter	42
3.3	Programmbeschreibung	44
3.3.1	Implementierung und Programmablauf	44
3.3.2	Verifikation und numerischer Fehler	44
3.3.2.1	Profilumströmung: NACA-0012 Profil	44
3.3.2.2	Senkrechter Stoß: Vergleich Theorie — Numerik	47
3.3.2.3	Relativer Fehler der Totalenthalpie	47
4	Ergebnisse	49
4.1	Düsenströmung	49
4.1.1	Düsenströmung mit Ruhezustand 01, <i>a</i>	49
4.1.2	Düsenströmung mit Ruhezustand 01, <i>c</i>	51
4.1.3	Düsenströmung mit Ruhezustand 01, <i>d</i>	57
4.1.4	Düsenströmung mit Ruhezustand zwischen 01, <i>c</i> und 01, <i>d</i>	63
4.1.5	Düsenströmung mit Ruhezustand 01, <i>f</i>	65
4.2	Profilumströmung	66
4.2.1	Profilumströmung mit Ruhezustand 01, <i>a</i>	66
4.2.2	Profilumströmung mit Ruhezustand 01, <i>d</i>	71

4.2.3	Profilumströmung mit Ruhezustand 01, f	77
4.2.4	Druckwiderstand	80
4.3	Gitterströmung	82
4.3.1	Nichtklassisches Verhalten an der Schaufelhinterkante	83
4.3.2	Variation der Geometrie bei Unterschallanströmung	85
4.3.3	Nichtklassisches Verhalten an der Schaufelvorderkante	87
4.3.4	Variation der Geometrie und des Anströmzustandes bei Überschallanströmung	87
4.3.5	Umströmung einer Turbinenschaufel — VKI Profil	92
5	Zusammenfassung und Ausblick	94
5.1	Zusammenfassung	94
5.2	Ausblick	95
	Literatur	95