

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
Nomenklatur	IX
1. Einleitung	1
2. Entwicklung des Strömungslösers SHOCK (Direkte Numerische Simulation)	4
2.1. Erhaltungsgleichungen	8
2.1.1. Entdimensionierung	10
2.1.2. Koordinatentransformation	12
2.2. Diskretisierung	15
2.2.1. WENO	17
2.2.2. Zentrale-Differenzen-Verfahren (ZD)	20
2.2.3. Runge-Kutta	21
2.2.4. Standard-Anfangsbedingungen	23
2.2.5. Randbedingungen und Interfaces	23
2.2.5.1. Einströmung	24
2.2.5.2. Ausströmung	26
2.2.5.3. Profilwand	27
2.2.5.4. Periodisches und Nachlauf-Interface	28
2.2.6. Immersed Boundary Method	30
2.2.7. Implementierung akustischer Quellen	31
2.3. Parallelisierung	33
2.4. Ein-/Ausgabe	38
2.5. Verifizierung	39
2.5.1. Standard-Tests	42
2.5.1.1. Doppel-Mach-Reflexion (Double Mach Reflection)	42
2.5.1.2. Shu-Osher Problem	46
2.5.2. Manufactured Solutions	49
2.5.3. NACA-0012 Profilumströmung	58
2.5.4. <i>Tonal Noise</i>	62
3. Auswertung (MaPP)	64
3.1. Mittelungs- und Schwankungsgrößen	65
3.2. Zeitliche Druckschriebe	65
3.3. Aerodynamische Koeffizienten	66
3.4. Grenzschichtdicken	66
3.5. Turbulenz	67
3.6. Statistische Auswertemethoden	68
3.7. Visuelle Auswerteverfahren	69

3.8. Auswertung mittels linearer Stabilitätstheorie	69
4. Gitterstudie für das NACA 0012 Profil	74
4.1. Profilgeometrie des NACA 0012	74
4.2. Anfangsbedingungen für die dreidimensionale Profilumströmung	75
4.3. Konfiguration	75
4.4. Zeitliche Konvergenz	78
4.5. Hauptströmungsmerkmale	80
4.6. Druckwellen	82
4.7. Turbulente Grenzschicht	86
4.8. Einfluss der Gitterauflösung auf unterschiedliche Strömungsgrößen	93
4.9. Fazit	94
5. Direkte Numerische Simulation der transsonischen Profilumströmung	96
5.1. Konfigurationen (Simulationsbedingungen)	96
5.2. Zeitliche Konvergenz für instationäre Auswertung	97
5.3. Hauptströmungsmerkmale	99
5.4. Eigenschaften der lokalen Überschallgebiete	106
5.5. Detaillierte Analyse der stromauf laufenden Druckwellen	110
5.5.1. Nichtlineare Aufsteilung	112
5.5.2. Einfluss des inhomogenen Strömungsfeldes	115
5.5.3. Wellenfrontbildung: Selbstorganisation und Vereinigung	116
5.5.4. Quellen der stromauf laufenden Druckwellen	124
5.5.4.1. LST-Analyse für das <i>Tonal Noise</i> Phänomen	131
5.5.4.2. Analyse der Ablöseoszillation	134
6. Zusammenfassung	141
Literaturverzeichnis	156
A. Anhang: Formeln und Tabellen	157
A.1. Erhaltungsgleichungen	157
A.1.1. In Vektor-Schreibweise	157
A.1.2. Einführung von dimensionslosen Größen	157
A.1.3. Koordinatentransformation $x, y, z \rightarrow \xi, \eta, \zeta$	159
A.1.4. Einführung der transformierten Flüsse F, G, H	161
A.1.5. Erhaltungsgrößen	161
A.1.6. Viskose Flüsse [ZD]	161
A.1.7. Konvektive Flüsse [WENO]	163
A.1.7.1. Flussvektor F	163
A.1.7.2. Flussvektor G	163
A.1.7.3. Flussvektor H	164
A.1.8. Erhaltungsgleichungen für 2D-rotationssymmetrische Strömung	165
A.2. Diskretisierung	165
A.2.1. WENO inkl. Flux Vector Splitting	165
A.2.1.1. WENO5 ($r_s = 3$)	166
A.2.1.2. WENO9 ($r_s = 5$)	166
A.2.1.3. Eigenvektoren für F, G und H	169

A.2.1.4. Eigenwertbestimmung λ_{max}	171
A.3. Sonstiges	172
A.3.1. Koeffizienten für Manufactured Solutions	172
A.3.2. MaPP	174