

CFD-Programmier-Seminar

Übung 1: Numerische Simulation der Überschallumströmung eines Keilprofiles

1 Projektbeschreibung und Lehrziele

1.1 Projektbeschreibung

Im folgenden Anwendungsbeispiel soll ein Keilprofil in einer Überschallströmung mit einer Anströmmachzahl von $M_0 = 3.0$ bei einem Anstellwinkel von 5.0° mit dem am IAG entwickelten CFD-Code CFDFV berechnet werden. Die Strömung wird mittels eines Finite-Volumen-Verfahrens auf einem unstrukturierten Gitter berechnet. Das Rechengitter wird zur Verfügung gestellt.

Für dieses Beispiel ist es möglich, eine analytische Vergleichslösung anzugeben. Anhand von diesen Daten soll die numerische Lösung kritisch bewertet werden. Hierbei soll auch der Einfluss des Rechengitters auf die Lösung analysiert werden.

1.2 Lehrziele

- Verständnis der grundlegenden Phänomene einer Überschallströmung
- Anwendung eines bestehenden Finite-Volumen Codes auf unstrukturierten Gittern
- Verständnis des Einflusses des Rechengitters auf eine CFD-Rechnung
- Visualisierung von CFD-Daten

1.3 Benötigte Software

- CFDFV
- beliebiger Texteditor (z.B. *gedit*)
- Visit

2 Phänomene einer Überschallströmung

2.1 Der Verdichtungsstoß

Ein Verdichtungsstoß stellt eine unstetige Änderung von Zustandsgrößen dar: Werte von Druck, Dichte und Geschwindigkeit ändern sich hier auf engstem Raum schlagartig. Wie kann solch ein Phänomen zustande kommen? Hierzu können wir ein einfaches Gedankenexperiment durchführen: Stellen wir uns einen mit Luft gefüllten Zylinder vor, an dessen einem Ende sich eine Wand und am anderen Ende ein beweglicher Kolben befinden. Bewegen wir diesen Kolben nun ruckartig in den Zylinder hinein, so wird sich von ihm aus eine Druckstörung mit *endlicher* Geschwindigkeit in das Medium ausbreiten. Die Folge dieser Störung auf die Luft im Zylinder ist, daß sie sich leicht verdichtet und anschaulich hat sie nun plötzlich weniger Volumen zur Verfügung. Nun wiederholen wir aber die Bewegung des Kolbens in rascher Abfolge. Was passiert nun? Die nächste Druckstörung findet ein verändertes Medium, denn die erste Störung hat das Medium ja bereits verdichtet. Dies hat zur Folge, daß sie sich schneller ins Medium ausbreitet, so schnell, daß sie die erste Störung einholt. Dasselbe Phänomen betrachten wir für alle weiteren Druckstörungen, sie holen sich alle ein - ein Überholen ist allerdings unmöglich! So entsteht eine Wellenfront, über die sich die Zustandsgrößen über eine sehr kleine Wegstrecke hinweg um endliche Beträge ändern. Dieses Gedankenexperiment ist übertragbar auf alle weiteren Situationen. Der Flügel in diesem Projekt rast in ein ruhendes Medium und nimmt auf diese Art und Weise die Rolle des Kolbens ein, aber auch in einem Stoßrohr, wo ja kein Kolben im Spiel ist, können wir die anfängliche Druckdifferenz wie die Kraft interpretieren, die der Kolben bei der Bewegung auf das Medium ausübt. Solange diese Druckdifferenz nicht ausgeglichen ist, passiert genau das Gleiche, wie wenn ein Kolben in das Medium hineinbewegt werden würde.

Das Phänomen des Verdichtungsstoßes kann nur in kompressiblen Medien auftreten und auch nur bei Machzahlen größer als eins! In inkompressiblen Medien breiten sich alle Störungen unendlich schnell aus, weshalb es auch nicht zum Aufstauen der Störungen kommen kann. Eine Verdichtung des Mediums ist, wie es der Name schon sagt ebenfalls ausgeschlossen.

2.2 Die Kontaktunstetigkeit

In Fluidströmungen ist es möglich, daß die Dichte unstetig springt. Sind die anderen Strömungsgrößen konstant, spricht man von einer Kontaktunstetigkeit. Anders als beim Druck oder der Geschwindigkeit hat dies keinerlei Einfluss auf die Strömung. Eine stationäre Kontaktunstetigkeit in der Dichte wird in der exakten Lösung der Eulergleichungen so lange exakt erhalten bleiben bis eine Störung in Druck oder Geschwindigkeit eintritt. Ein anschauliches Beispiel wäre in diesem Zusammenhang ein abgeschlossener Zylinder, der links mit Luft und rechts mit Helium gefüllt ist. Ohne äußere Störung wird die Trennfläche zwischen Luft und Helium auf immer erhalten bleiben, da die Medien keine Veranlassung haben, miteinander zu interagieren, wenn man nur die phasikalischen Effekte, die durch die Eulergleichungen beschrieben werden berücksichtigt. Bei einem Stoßrohrproblem tritt auch eine Kontaktunstetigkeit auf, hier sogar beim gleichen Medium. Dies rührt daher, daß sich die Dichte nicht im gleichen Maße wie der Druck ausgleicht. Ist sie noch nicht ausgeglichen, der Druck und damit die Geschwindigkeit

aber schon, wird sie einfach erhalten und mit der bewegten Strömung mittransportiert.

2.3 Der Verdünnungs- bzw. Expansionsfächer

Erinnern wir uns an das Gedankenexperiment mit dem Kolben - hier haben wir betrachtet, was auf der Seite passiert, in die der Kolben einfährt. Was aber passiert auf der anderen Seite des Kolbens mit dem Medium im Zylinder? Hier spielt sich ja genau das Gegenteil dessen ab, was auf der anderen Seite stattfindet: Das Medium hat plötzlich mehr Platz zur Verfügung. Auf der anderen Seite kam es zum Verdichtungsstoß, hier beobachten wir aber im Experiment eine stetige und keine sprunghafte Zustandsänderung. Es ist klar, daß das Medium expandieren muss, denn der durch die Kolbenbewegung frei werdende Raum muss gefüllt werden (es entsteht also kein lokales Vakuum auf diese Art und Weise). Das Fluid fängt also an, sich zu bewegen, es muss ja dem Kolben nachströmen, was mit einem Absinken der Dichte, und des Drucks verbunden ist. Die Begründung dafür, daß wir eine stetige Zustandsänderung haben, liegt in der Entropiebedingung. Die Entropie darf nicht absinken, sie kann nur ansteigen oder konstant bleiben. Ein „Verdünnungsstoß“ würde aber ganz genau diese Bedingung nicht erfüllen, da über ihn die Entropie sinkt, was physikalisch nicht zulässig ist!

2.4 Strömungsphänomene am Keilprofil

Die Umströmung des Keilprofils im vorliegenden Fall lässt sich schematisch folgendermaßen darstellen:

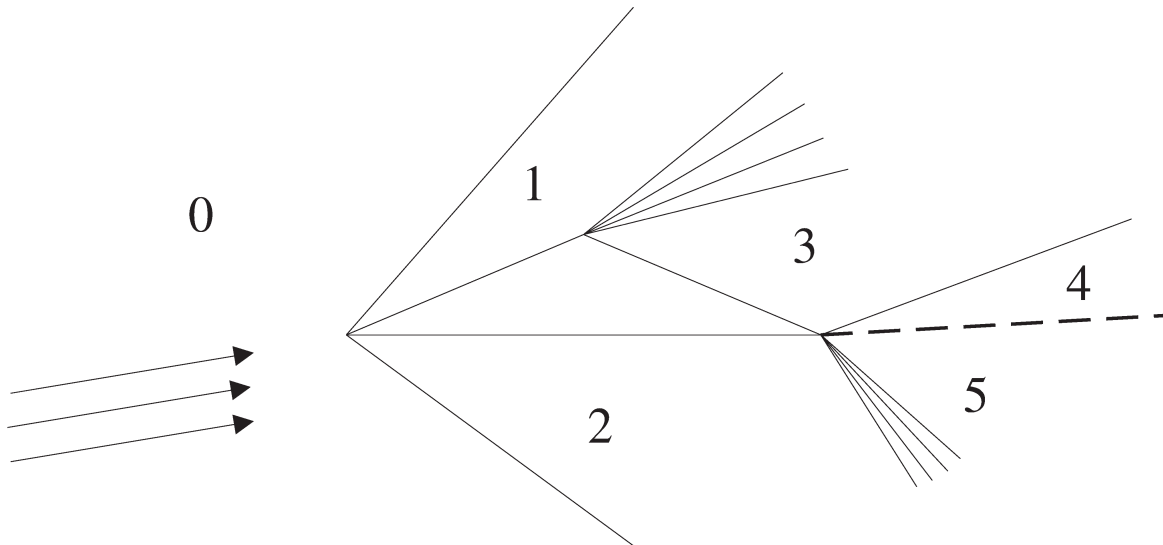


Abbildung 1: Umströmung des Keilprofils im vorliegenden Fall; einzelne durchgezogene Linien repräsentieren Stöße, Fächer sind Expansionsfächer und gestrichelte Linien sind Kontaktunstetigkeiten

Was sehen wir hier? Auf der Oberseite liegt an der Spitze des Profils ein Verdichtungsstoß an. Dies muss so sein, da die zunächst ungestörte Strömung auf das Keilprofil trifft und von diesem

so abgelenkt wird, daß sie weniger Platz hat als vorher - sie muß also komprimiert werden. Auf der Unterseite ist die Situation analog - das Fluid wird verdrängt, was zu einem Verdichtungsstoß führt. Der obere Stoß ist hierbei deutlich stärker als der untere, da der Umlenkwinkel größer ist. An der oberen Spitze des Profils sehen wir hingegen einen Verdünnungsfächer. Dies ist auch sehr leicht zu begründen, da die Strömung an dieser Stelle eine Querschnittserweiterung erfährt. Der durch den Knick des Profils entstehende zusätzliche Raum muß ausgefüllt werden, was durch eine Expansion geschieht. Am Endpunkt des Profils ist es jedoch sehr schwer, eine direkte Aussage über die auftretenden Phänomene zu treffen, da man nicht ohne komplizierte Rechnungen angeben kann, unter welchem Winkel das Fluid vom Profil abströmt. Hier ist der Abströmwinkel aber so, daß oben ein Verdichtungsstoß und unten eine Verdünnung vorliegen. Da die Strömung oben durch zwei Verdichtungsstöße und einen Expansionsfächer läuft, unten hingegen durch nur einen Verdichtungsstoß und eine Verdünnung tritt das Phänomen auf, dass die Strömung oben eine andere Entropie hat als die unter dem Profil abströmende. Die Dichten sind ebenfalls nicht gleich, lediglich Druck und Geschwindigkeit stimmen überein. Dies entspricht aber genau unserer Definition einer Kontaktunstetigkeit und genau dies ist hier auch zu sehen.

2.5 Analytische Lösung

Folgende Daten sind gegeben:

- Machzahl $M_0 = 3.0$
- $p_0 = 1.0$, $\rho_0 = 1.0$, $\gamma = 1.4$
- Anstellwinkel $\alpha = 5.0^\circ$
- Abmessungen $l = 2.0$, $h = 0.2$
- Öffnungswinkel $\theta = \arctan \frac{2h}{l} = 11.31^\circ$

Hiermit ergeben sich folgende aerodynamische Beiwerte:

$$\begin{aligned} c_A &= 0.08317422824 \\ c_W &= 0.02895106319 \end{aligned}$$

3 Numerische Berechnung der Profilmströmung

Zunächst soll eine 2D-CFD-Rechnung mit dem Programm *CFDFV* mit einem vorgegebenen Netz durchgeführt werden. Gehen Sie hierzu folgendermaßen vor:

- Öffnen Sie eine Konsole

- Öffnen Sie das Projektverzeichnis `Keilprofil/emc2`. Sie finden dort verschiedene Gitterdateien sowie eine Konfigurationsdatei namens `keil.ini`.
- Öffnen Sie die Datei `keil.ini`: Relevant sind für uns momentan zwei Stellen:

```
Mesh:
  0                ! Mesh type 0=UNStructured, 1=CARTesian      !
.mesh             ! UNST: Mesh Format (.mesh )                !
  keil_coarse     ! UNST: Name of Mesh File (w/o .mesh)              !
```

Hier ist der letzte Eintrag der Name der Gitterdatei, die wir verwenden wollen. Die zweite Stelle ist:

```
FileIO:
keil_coarse       ! Filename for data output                                !
```

Hier wird der Ausgabedateiname eingestellt. Dieser sollte immer entsprechend verändert werden, wenn eine Rechnung mit verändertem Gitter bzw. veränderten Parametern gestartet wird.

Schließen Sie nun die Datei wieder.

- Führen Sie nun eine Rechnung durch. Geben Sie hierzu folgendes ein:

```
cfdfv_□keil_coarse.ini
```

Die Rechnung wird nach kurzer Zeit abgeschlossen sein. Notieren Sie sich die Rechenzeit und die Werte für c_A (c_l) und c_W (c_d). Starten Sie nun das Visualisierungsprogramm und visualisieren Sie die Ergebnisse:

```
visit_□&
```

- Versuchen Sie nun, die erwarteten Phänomene zu identifizieren. Können Sie eindeutig die Stöße, Verdünnungen und die Kontaktunstetigkeit ausmachen?
- Lassen Sie sich das von *CFDFV* verwendete Rechengitter anzeigen. Überlegen Sie, welchen Einfluss das Gitter auf die Auflösung der Phänomene haben könnte.
- Wiederholen Sie die Rechnungen mit den anderen vorbereiteten ini-Dateien: 1.) `keil_intermediate.ini` 2.) `keil_fine.ini` und 3.) `keil_ultrafine.ini`.
Vergleichen Sie dabei die Rechenzeit, die errechneten aerodynamischen Beiwerte, sowie das optische Ergebnis. Welche (an sich trivialen) Zusammenhänge stellen Sie fest?
- Betrachten und interpretieren Sie den Verlauf der berechneten aerodynamischen Beiwerte:

```
gnuplot_□<Eingestellter_□Name_□der_□Ausgabedatei>_ClCd.dem
```

Vergleichen Sie dies auch mit dem Residuenverlauf:

```
gnuplot_□<Eingestellter_□Name_□der_□Ausgabedatei>_residuals.dem
```