1. Einleitung
2. Verwendete Abkürzungen
3. Grundlagen numerischer Strömungsberechnung
   1. NS – Gleichungen
   2. RANS – Gleichungen
   3. Turbulenzmodelle
   4. Feinstrukturmodelle
4. Verwendete Software
   1. Catia
   2. Ansys ICEM
   3. Ansys CFX
5. Used Hardware
6. Simulation des Wärmeübergangs mithilfe der RANS Modelle
7. Simulation des Wärmeübergangs mithilfe Large Eddys
   1. Mesh Generation in Ansys ICEM
   2. Simulation Setup in CFX-Pre 15.0
   3. Running Simulation with CFX-Solver Manager 15.0
   4. Post-Processing Results with CFD-Post 15.0
8. Vergleich der Ergebnisse
9. Diskusion

Abstract

List of Abbreviations

1. Introduction to Computational Flow
   1. Governing Equations
   2. RANS – Simulation
   3. Modelling Turbulence
2. Large Eddy Simulation
3. Methods
   1. Resources used
      1. Hardware
      2. Software
   2. Mesh Generation in Ansys ICEM

Abstract

Turbulence is a phenomenon that occurs more or less in almost every natural flow.

This leads to great ambitions in terms of calculating turbulent flows in order to predict their behavior.

The objective of this work is the investigation of the heat transfer on a NACA 0012 airfoil by means of the Large Eddy Simulation.

The LES Simulation has not yet become standard for industrial application, due to its high demand on resources.

Large Eddy Simulation, a subdomain of Computational Fluid Dynamics, is recently experiencing an increased attention, due to increasing capabilities of the necessary hardware, in detail CPU and memory. In most sectors it is not yet industrial standard, because of its high demand in terms of resources, but it will become an important tool for investigation of complex flow prob- lems in near future.

Therefore the aim of the Bachelor project is the execution of a high-resolution simula- tion of the heat transfer on a wing surface in three dimensions. The given geometry for this task is a NACA 0012 airfoil and the software used will be Ansys ICEM and Ansys CFX. Subsequent the achieved results shall be compared to results obtained from RANS- simulations, which are nowadays standard for industrial application.

Due to the complexity of the Large Eddy Simulation a majority of the work will be studying the theoretical basics as well as performing LES in practice in order to achieve the necessary skills.

Inhalt der Arbeit

Der Inhalt dieser Arbeit umfasst die Simulation des Wärmeübergangs an einer Flügeloberfläche mithilfe des sogenannten Large Eddy Turbulenzmodells. Im Gegensatz zu den standartmäßig verwendeten RANS (Reynoldsgemittelten Navier Stokes) Modellen erfordert dieses Verfahren einen erhöhten Resourcenaufwand was die Berechnung betrifft. Mit zunehmender Leistungsfähigkeit von Computern, was CPU Leistung und verfügbarer Speicher betrifft gewinnt dieses Verfahren jedoch, immer mehr an Bedeutung für die Untersuchung industriell bedeutsamer Strömungsprobleme.

Im Zuge der Arbeit wird die Anwendbarkeit und Akkuratät dieses Verfahrens anhand einer einfachen Modellkonfiguration, dem NACA 0012 Profil durchgeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse der Simulation mit den Ergebnissen der RANS Simulation an selbigem Modell verglichen. Ein Großteil der Projektarbeit bestand jedoch aus Aneignung der theoretischen Grundlagen, sowie Einarbeitung in die praktische Anwendung der Large Eddy Simulation.

2. Verwendete Abkürzungen

Da CFD ein Fachbereich mit zahlreichen Abkürzungen ist, sind hier die wichtigsten in dieser Arbeit verwendeten, mit ihrer Bedeutung aufgelistet.

|  |  |
| --- | --- |
| DNS | Direct Nummerical Simulation |
| LES | Large Eddy Simulation |
| VLES | Very Large Eddy Simulation |
| CFD | Computional Fluid Dynamics |
| CAD | Computer Aided Design |
| NS | Navier-Stokes |
| RANS | Raynoldsgemittelte Navier-Stokes Gleichungen |
| URANS | instationäre RANS |
| GS | Grobstruktur |
| FS | Feinstruktur |
| WR-LES | “wall-resoving LES” – wandauflösendes LES |
| DES | Detached Eddy Simulation |

Verwendete Software

Im Zuge des Projekts kam verschiedenste Software zum Einsatz. Die Erzeugung der Grundstruktur des Modells erfolgte mit der CAD Software Catia von Dassault Systems. Für die Vernetzung sowie die anschließende nummerische Berechnung kamen verschiedene Produkte der Ansys Familie zum Einsatz. Im Speziellen Ansys ICEM CFD und Ansys CFX.

Naca Profil beschreiben

Verwendete Software

Ansys ICEM CFD

Ansys ICEM CFD ist eine leistungsfähige Software zur Vernetzung von CAD Geometrien und bietet auch zahlreiche Werkzeuge zur Reperatur und Verbesserung dieser. Es erlaubt Import von zahlreichen CAD Dateien, unter anderem auch Catia.

Des Weiteren wird Ansys ICEM CFD zur Untersuchung des Mesh und gegebenfalls zum Export für die weitere Bearbeitung mit Ansys CFX verwendet.

Berechnungsverfahren für turbulente Strömung

* LES gitter gröber als für DNS
* dreidimensionale, instationäre Rechnung auf relative feinem Gitter
* für statistische Mittelwerte entsprechend lange Simulation
* Bei RANS werden Gleichungen für die Mittelwerte diskretisiert -> keine nachträgliche Mittelung
* es gibt auch instationäre RANS Modelle -> URANS
* VLES – Very Large Eddy Simulation

Historische Entwicklung

Turbulenz in Wandnähe

* die moisten Strömugen werden durch das Vorhandensein von Wänden geprägt
* Auswirkungen auf die Strömung können insgesammt beträchtlich sein
* wandnahe Turbulenz wird als Modell repräsentiert
* Skalierung und universelles Wandgesetz
  + viskoser Bereich:
    - viscose Unterschicht (Bereich direkt an der Wand) – lineares Geschwindigkeitsprofil U = cy … Bereich von y+ = 0 … 5
    - Übergangsbereich ( y+ = 5 … 30 ) – Pufferzone, Reibungseffekte noch vorhandenn aber nicht mehr dominierend.
  + - y+ > 30 – logarithmisches Geschwindigkeitsprofil

DNS und RANS Modellierung

* Die NS-Gleichungen können mit entsprechenden Anfangs- und Randbedingungen gelöst werden, egal ob es sich um ein laminares oder turbulentes Strömungsfeld handelt. ( die 3d instationäre Wirbelbewegung wird direkt berechnet)
* Mittelwerte werden durch aufsummieren der instationären Lösung bestimmt.
* die diskretisierung in Raum und Zeit muss jedoch fein genug sein um auch die kleinstskaligen Anteile der Lösung aufzulösen.
* Der Diskretisierungsbedarf darf nicht als absolut gesehen werden sondern hängt von der Fragestellung ab.

Diskretisierungsbedarf (S. 45)

* Damit die kleinsten Strukturen auch in der Zeit gleichbleibend gut beschriben werden, muss der Zeitschritt proportional zum Ortsschritt verkleinert werden.
* Ni … Gitterpunkte in jede Raumrichtung - > Niˆ3 ~ ReLˆ(9/4)
* tCPU ~ ReLˆ3 … Rechenzeit

Aufgaben der DNS

* Wegen des hohen Diskretisierungsbedarfs kann DNS nur für Strömungen mit niedrigen Re verwendet werden.
* die enorme Detailinformation die DNS liefert ist fÜr die Entwicklung auch meist uninteressant.
* Vorteil DNS: Sämtliche Informationen über eine Strömung können gewonnen werden, ohne das eine Unsicherheit durch ein Turbulenzmodell auftritt.

Statistische Turbulenzmodellierung -> Wandfunktionen?

5. Methodische Ansätze für LES

Grundidee LES

* große Skalen -> individuell, stark geordnet, energiereich, feine Skalen -> universell, tragen wenig zur Gesamtenergie bei, erhalten ihre Energie durch Zerfall der großen Skalen und sind für den Großteil der Dissipation verantwortlich
* LES -> große Skalen explizit auflösen, während kleine modelliert werden (Feinstrukturmodell)
* Ausgangspunkt für LES -> Trennung in große und kleine Skalen (English: grid scale, sub-grid scale)

Filterung: Grobstruktur, Feinstruktur

Welche Resultate kann eine LES liefern?

* Ziel ist es die Evolution einer bestimmter Anfangsbedingung bei turbulenter Strömung zu berechnen.
* “Sensitivität bezüglich der Anfangsbedingungen” - > 2.2.1
* Fehler bei LES: Anfangsbedigungen, Nummerik (Rundung)
* restlose Auflösung turbulenter Strömung wegen der Sensitivität ist garnicht möglich und meist auch icht nötig
* für ingenieurstechnische Anwendung reicht eine qualitative Erfassung der zusammenhängenden Strukturen, woraus sich ein Verständnis der jeweiligen Strömung ergibt.
* Geometrie und Einströmbedingungen meist auch nur ungenau bekannt.

6. Feinstrukturmodelle

Der Großteil der Forschung von Large Eddy Simulationen beschäftigt sich mit den sogenannten Feinstrukturmodellen. Diese repräsentieren sinnbildlich die Auswirkung der nicht aufgelösten Anteile der Strömung auf die aufgelösten Anteile, der Grobstruktur. Mit anderen Worten, ihre Aufgabe ist eine ausreichende Menge an Dissipation bereitzustellen, damit genausoviel Energie dissipiert wird, wie es bei einer DNS-Modellierung desselben Problems der Fall sein würde.

Die moisten heute verwendeten Feinstrukturmodelle sind deterministisch, was bedeutet, dass das FS-Modell von Geschwindigkeitsfeld abhängt und genau eine Lösung liefert.

Je feiner der Filter ist, desto mehr Wirbel werden nummerisch simuliert. Folglich kann auch das FS-Modell simpler sein. Wenn der Filter hyptothetisch unendlich verkleinert wird, verschwindet der (Navier-Stokes Anteil ? ) und der Grenzfall der Direct Nummerical Simulation tritt auf. Wenn die Grenzwellenzahl innerhalb der energiereichsten Strukturen liegt, spricht man auch von “Very Large Eddy Simulation” (VLES) [-> Kapitel Filter]

Dadurch ergeben sich zwei Möglichkeiten, wie die Simulation verbessert werden kann. Zum einen besteht die Möglichkeit das FS-Modell zu verbessern (was im Folgenden noch eingehend diskutiert wird), andererseits kann jedoch auch das Gitter verfeinert werden. In den moisten Fällen ist die Verbesserung des FS-Modells die bessere Wahl, da es erheblich günstiger für die Anforderungen an Speicher- und Rechenbedarf ist [wieviel besser?]

Abgesehen von dem erheblich höheren Ressourcenaufwand muss eine Verfeinerung des Gitters nicht immer eine Verbesserung des Ergebnisses zur Folge haben, da in der Praxis auch andere Effekt dominieren. Zum Beispiel muss der Diskretisierungsfehler einer nummerischen Differentialgleichung nicht monoton abnehmen.

Man sollte auch nicht außer Acht lassen, dass Genauigkeit von LES-Simulation auch stark von anderen Modellierungen abhängt. Insbesonderes von Einströmmodellen und Wandfunktionen.

WELCHES FS MODELL FÜR MEINE SIMULATION?

aus zahlreichen Variationen der Grundtypen, ergeben sich die hohe Anzahl von heute existierenden Feinstrukturmodellen.

Beschreiben meines Modells …

7. Rand- und Anfangsbedingungen

- Zu und Abläufe

- Randbedinungen bei turbulenter Strömung von besoderer Bedeutung, da neben dem Mittelwert der Geschwindigeit auch information über turbulenz (bei k-e modell zum beispiel Dissipationsrate e auf dem Einströmrand)

1. )Modellierung der wandnahen Strömung

siehe Abschnitt 2.5!

* in wandnähe sinkt die gröse der dominierenden Wirbel drastisch
* trotzdem dominieren diese strukturen das verhalten der wandnahen strömung
* wandmodellierung normalerweise deutlich komplexer als fs modellierung im gebietsinneren -> “Es muss nicht nur die Wandschubspannung sondern auch das richtige Maß an aufgelöster Flunktuationen generiert werden, um in der Nachbarschaft der Wand eine erfolgreiche LES durchführen zu können.”
* Arten von Wandmodellen
  + Wandfunktionen: Wandnächste Gitterpunkt liegt jenseits der viskosen Unterschicht, Wanschubspannung wird aus einer Beziehung der Geschwindigkeit in diesem Punkt gewonnen
  + Zweischichtenmodelle: Grenzschichtgleichungen in tangentialer Richtung liefern Wandschubspannung auf dem LES Gitter
  + DES – Detached Eddy Simulation: Gitter normal zur wand sehr fein, tangential grob, statische modellierung in wandnähe, LES – modellierung in wandfernen Bereichen
* Wandfunktionen: Bei RANS modellen schon früh eingesetzt, Form {Tw} = fRANS({u}1, y1, … ) -> stellt einen Zusammenhang zwischen mittlerer Wandschubspannung und mittlerer Geschwindigkeit in wanparaleller Richtung am wandnächsten gitterpunkt her.
* siehe logarithmisches Wandgesetz (kap 2)
* wandfunktionen liefern statische Informationen (bezüglich der Mittelwerte)
* In LES werden jedoch keine Mittelwerte sondern Momentanwerte berechnet -> entsprechende Randbedinungen für das momentane Geschwindigkeitsfeld werden benötigt ( vektorielle wandschubspannung und geschwindigkeit)

WELCHE WANDFUNKTION VERWENDEN?

Setting up Mesh with Ansys ICEM

Pre-Processing with Ansys CFX

* Used Domain, Fluid properties
* Boundary Conditions
* initial conditions

3.b Mesh generation in Ansys ICEM

The meshed NACA 0012 airfoil was provided as 2D mesh by Dr. Wolfgang Hassler with a total of 219.000 elements. It is meshed with hexahedral elements and features a total of 219.000 elements. The domain shows physical meassurements of 7m by 5m while the wing profile inside the domain shows a chord length of 1m due to the nature of the profile a maximum thickness of 12%, which would therefore be 0,12m in total values. On the left side is located the inlet, on the right the outlet and the upper and lower border are defined as walls, as you can see in figure xxx.

Due to the three dimensional characteristics of the Large Eddies this two dimensional mesh is not sufficient, but has to be extended in a third direction, in order to be capable of providing convincing results. This was achieved by simply extending the given mesh in the third direction by 30 elements. This leads to a total of 6.570.000 elements. The properties of the final mesh, as it was exported from Ansys ICEM can be seen in table xxx.

|  |  |
| --- | --- |
| Domain length | 7m |
| domain height | 5m |
| domain width |  |
| profile chord length | 1m |
| profile maximum thickness | 0,12m |

3.c Simulation Setup in Ansys CFX-Pre

The for this project consists of two simulations, linked together with the Simulation Control of Asys-Pre. First of all a static simulation which is responsible for finding a fully developed flow field. This serves as initial condition for the second simulation, which is the actual Large Eddy Simulation and starts when the first simulation is finished.

3.c.1 Static Simulation

3.c.1.a Domain

The used fluid is air at 25 C with a reference pressure 101325 [Pa], which matches the surface pressure in a ISA atmosphere. For turbulence modeling the k-Epsilon model has been applied.

3.c.1.b Boundary Conditions

Unlike it is the case with most CFD simulations the outlet was not defined as “Outlet”, but as “Opening”, because due to the generated eddies it is likely that there is fluid streaming back into the domain.

The inlet on the left handside is provided with an inlet velocity in x-direction of 66,8 m/s. The top and the bottom walls are adiabatic free slip wall in order to disturbe the vortex generation on the profile as less as possible.

The profile surface, the most critical part of the domain was defined as no slip wall with logarithmic wall function.

3.c.2. Transient

3.c.2.a. Domain

The fluid model for the transient simulation remains the same, apart from the turbulence model. For the transient simulation the LES Smagorinsky model has been appliend, which is capable of dealing with Large Eddy Turbulences.

3.c.2.b Boundary Conditions

The Boundary Conditions are the same as for the static simulation and are specified in 3.c.1.b.

3.c.2.c Initial Conditions

For a transient simulation it is necessary to provide certain initial value in order to enable a satisfying solving. In my case the initial velocity component in x-direction is set to 66.8 [m sˆ-1] which equals the velocity at the inlet. The relative pressure at the beginning was set to 0 [Pa], so that the pressure preceeding is equal to the sourounding pressure of 101325 [Pa]. Furthermore the transient simulation has been initialized with the initialized with the results obtained from the static simulation in order to provide an already “ausgebildetes Strömungsfeld”.

3.d. Solution with Ansys CFX-Sovler-Manager 15.0

The solution was done with the Ansys CFX-Solver Manager in “Intel MPI Distributed Parallel” Run Mode. This allowed the distribution of the calculation on six different machines, each providing six cores what makes a total of 36 cores. For the needed high accurency the run was executed with double precision.

Nevertheless, due to the demanded high precision of 10e-8 and the high number of coefficient loops it took about three minutes to calculate one timestep, what makes a total of xx hours for the whole calculation. The properties … table xx.

|  |  |
| --- | --- |
| Number of elements |  |
| Total averaged CPU time (36CPUs) |  |
| Total wall clock time |  |
| Computed timesteps |  |
| Coefficient loops per timestep |  |
| Max. Residuum |  |