

2. Bachelorarbeit

Numerische Simulation von Eisanlagerung am Beispiel eines Rückhaltegitters im Klimatisierungssystem eines Passagierflugzeuges

Vorgelegt von: Florian TROGER

Matrikelnummer: 10 105 87 035

Betreuer: FH-Prof. Priv.-Doz. Dr.rer.nat. Wolfgang Hassler

Datum der Abgabe: 04.12.2013

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides Statt, dass die vorliegende Diplomarbeit mit dem Thema

"Numerische Simulation von Eisanlagerung am Beispiel eines Rückhaltegitters im Klimatisierungssystem eines Passagierflugzeuges "

von mir selbständig verfasst wurde und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet wurden.

Graz, den 04.12.2013

Florian Troger

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde während des 6.Semester an der Fachhochschule FH JOANNEUM des Studienganges Luftfahrt/Aviation verfasst. Es handelt sich hierbei um die zweite Bachelorarbeit welche im Rahmen eines zwölfwöchigen Berufspraktikums bei dem britischen Unternehmen ICON Technology & Process Consulting Ltd. erarbeitet wurde. Das Praktikum ermöglichte mir wertvolle und lehrreiche Einsichten in das Berufsleben eines CFD- Ingenieurs und den Umgang mit der von ICON vertriebenen Software iconCFD. Das während des Studiums angeeignete Wissen konnte so in der Praxis erprobt und vertieft werden.

Zunächst möchte ich mich bei Herrn FH-Prof. Priv.-Doz. Dr.rer.nat. Wolfgang Hassler für die Unterstützung und Betreuung während meiner Arbeit bedanken und der geleisteten Hilfestellung bedanken.

Ein besonderer Danke gilt Herrn DI (FH) David Winkler der mir täglich mit Rat und Tat zur Seite stand und ständig ein Auge auf mich und meine Tätigkeit hatte. Eine wertvolle Freundschaft ging aus dieser Zusammenarbeit hervor und ich bedanke mich nochmals recht herzlich für die schöne Zeit.

Weiteres möchte ich mich bei J.Gines und allen andern ICON Mitarbeitern für das tolle Praktikum bedanken.

Schlussendlich gebührt ein großer Dank meiner Familie, die mich in jeder Lebenslage unterstützt und mir überhaupt erst dieses Studium ermöglichte.

Graz, 04.12.2013

Florian Troger

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	iv
Abstract	v
Abbildungsverzeichnis	vi
1. Einleitung	1
1.1. Projektbeschreibung Ice Grid	1
1.2. Inhalt der Arbeit	3
2. Methoden.....	4
2.1. Grundlagen numerische Berechnungsverfahren.....	4
2.1.1. Navier-Stokes-Gleichungen	5
2.1.2. Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen	8
2.1.3. Turbulenzmodelle.....	8
2.1.4. Inkompressibel Strömung.....	10
2.1.5. Das Ablagerungsgesetz	10
2.1.6. Reynolds-Zahl	15
2.1.7. Strouhal-Zahl.....	16
3. Simulation eines Drahtsegments	17
3.1. Geometrie	17
3.2. Vernetzung	19
3.2.1. Diskretisierung	19
3.2.2. Vernetzungutility FOAMpro Mesh.....	20
3.2.3. Zellgenerierung	23
3.2.4. Netzvalidierung	26
3.3. Simulations Set-Up.....	28
3.3.1. Steady State Simulation.....	28
3.4. Transiente Simulation mit Partikelinjektion.....	34
3.4.1. Lagrangian Partikel Modell.....	34
4. Ergebnisse	40
4.1. Simulation eines Drahtsegments	40
4.2. Simulation eines Drahtkreuzes	44
5. Diskussion	49
6. Zusammenfassung und Ausblick	50
Literatur	51

Kurzfassung

Im Rahmen des österreichischen Luftfahrttechnologieprogramms TAKE OFF wurde ein Projekt zur Untersuchung von Eisablagerung an einem in Passagierflugzeugen installierten Rückhaltegitter namens Ice Grid initialisiert. Auslöser dafür ist eine zukünftig neu eingesetzte Klimatisierungsmethode von Großraumflugzeugen mittels externen Kühlaggregaten, um eine effizientere und umweltschonendere Temperierung der am Boden befindlichen Flugzeuge zu gewährleisten. Zum Einsatz kommt dafür stark unterkühlte Umgebungsluft, welche auf bis zu -25°C gekühlt und über Schläuche über das flugzeugseitige Klimatisierungssystem an Bord verteilt wird.

Um das flugzeuginterne Klimatisierungssystem vor Beschädigungen durch ungewolltes Einbringen von Fremdkörper zu schützen, wurde an der Schnittstelle zwischen Flugzeug und Kühlaggregat flugzeugseitig ein Rückhaltegitter installiert. Aufgrund der herrschenden Temperaturen und enthaltenen Luftfeuchte bilden sich Schneepartikel, welche sich an besagtem Gitter ablagern und dadurch den Durchfluss stark einschränken können.

Die nachstehende Arbeit beschäftigt sich mit der computergestützten Simulation der Vereisung des Rückhaltegitters um ein besseres Verständnis von Vereisungsvorgängen zu erlangen. Dafür werden zwei Simulationsfälle betrachtet. Zum einem eine transiente Simulation eines einzelnen Drahtes, um das angewandte Ablagerungsgesetz zu validieren und zum anderem eine transiente Simulation eines Drahtkreuzes auf Basis dessen das Ablagerungsverhalten des gesamten Gitters rekonstruiert werden kann.

Dabei wird besonders auf die Vorgehensweise zur Aufsetzung der Simulationen wertgelegt und mathematische Hintergründe beschrieben.

Abstract

Within the Austrian aviation technology and research program TAKE OFF a project for the research of icing and de-icing behaviour of a lately installed restraining grid in the air-conditioning system of passenger aircraft was initialised under the name Ice Grid. Reason for that is the future intended use of external air condition units to provide an efficient air conditioning method of passenger aircraft on ground before the boarding process. To increase the efficiency of this method subfreezing air cooled down to -25°C is provided by either mobile pre-conditioned air units (PCA-units) or by in the vicinity of the apron fix installed conditioning units via flexible tubes to the aircraft. This leads to an efficient and fast air conditioning process and to a reduction of noise load and the carbon dioxide emission at airports.

To protect the intern aircraft conditioning system from undesired injected foreign objects a restraining grid at the interface between aircraft and flexible tube coming from the external PCA- unit was installed. Due to the low temperatures and humidity of the air a generation of snow particles occurs in the conditioning system which accumulate at the restraining grid. This leads to a blockage of the airflow.

This bachelor thesis treats with the computer based simulation of the accretion process of ice particles at these restraining grids. Therefore two simulation setups are generated. At the one hand a transient simulation of a single wire is generated for evaluation reasons of the applied accretion law and at the other hand a transient case of a single wire cross is set up to regard the icing process of the whole restraining grid.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versenkbare Andockstelle und mobiles Kühlaggregat [Carvotec SA, 2013, keine Seite]	2
Abbildung 2: Rückhaltegitter vor und nach einem Klimatisierungstest ohne Enteisung [Airbus, 2013, keine Seite]	2
Abbildung 3: Schneeablagerung an Hochspannungsleitung [Florian Troger, 2013]	11
Abbildung 4: Schneeablagerung an Leitungsmasten [Florian Troger, 2013]	12
Abbildung 5: Schneeablagerung an Wegbegrenzer [Florian Troger, 2013]	12
Abbildung 6: Schneeablagerung an Wegbegrenzungspfosten 2 [Florian Troger, 2013]	13
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Sigma Gesetzes	14
Abbildung 8: Zylinderümströmung bei verschiedenen Reynoldszahlen [Eckelmann, 1975 [8]]	16
Abbildung 9: Geometriedaten des Simulationsabschnittes	18
Abbildung 10: Definition der Simulationsgeometrie	19
Abbildung 11: Einteilung der Diskretisierungsmethoden [Lechler S.,2011, S.41]	20
Abbildung 12: Definition der Komponenten eines Netzes [ICON FOAMpro User guide, 2013,[6]]	21
Abbildung 13: Vorgehensweise zur Netzerstellung mittels foamPROMesh [ICON, 2013]	22
Abbildung 14: Fertig erstelltes Rechnetz der Zylindersimulation	23
Abbildung 15: Faces der Zylindergeometrie	26
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Skewness einer Zelle	27
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Orthogonalität einer Zelle	28
Abbildung 18: Vergleich unterschiedlicher Turbulenzmodelle [ICON, 2013]	30
Abbildung 19: Residual-plot der Zylindersimulation	31
Abbildung 20: Residual-plot 2 der Zylindersimulation	32
Abbildung 21: Anfängliche Entwicklung des Strömungsfeldes bei $Re \sim 30$	33
Abbildung 22: Fortgeschrittene Entwicklung des Strömungsfeldes mit $90 < Re < 150$	33
Abbildung 23: Voll ausgebildetes Strömungsfeld der Zylindersimulation	33
Abbildung 24: Inerpolationsmethode cellPointFace	38
Abbildung 25: Geschwindigkeitsfeld mit stady-state Partikelsimulation.	40
Abbildung 26: Transiente Partikelsimulation	41
Abbildung 27: Periodisches Einschwingen der Partikelverteilung auf Strömungsfeld des Trägerfluides	42
Abbildung 28: Symetrie der Partikelverteilung im Einlassbereich	42
Abbildung 29: Zufallsbasierende Generierung der Partikelinjektion aus der Perspektive der Einlassebene	43
Abbildung 30: Abgelagerte Eisdicke pro Zelle nach 1 Sekunde ausgesetztem Partikelbeschuss	44
Abbildung 31: Eisablagerungssimulation mit Kármánscher-Wirbelstrasse im Nachlauf	44

Abbildung 32: Geometrie des Gitterkreuzes	45
Abbildung 33: Das generierte Netz der Drahtkreuzsimulation	46
Abbildung 34: Netz des Drahtkreuzes im Detail.....	46
Abbildung 35: Geschwindigkeitsfeld des transient simulierten Gitterkreuzes	47
Abbildung 36: Zeitabhängiges Strömungsfeld an den Enden des Gitterkreuzes	47
Abbildung 37: Angelagerte Eisdicke pro Zelle nach 1 Sekunden langem Beschuss	48
Abbildung 38: Abgelagerte Eismasse am Gitterkreuz	48

1. Einleitung

1.1. Projektbeschreibung Ice Grid

Im Rahmen des österreichischen Luftfahrttechnologieprogramms TAKE OFF wurde von Herrn FH-Prof. Priv.-Doz. Dr.rer.nat. Wolfgang Hassler und den Partnern Airbus Deutschland GmbH, AAC-Aerospace & Advanced Composites GmbH, ICON, Technische Universität TU Graz und Villinger GmbH das Projekt zur Untersuchung von Eisbildung auf Rückhaltegittern im Klimatisierungssystem von Luftfahrzeugen, auch kurz Ice Grid genannt, eingereicht und verwirklicht. Das vom Bundesministerium für Verkehr und Technologie (BMVIT) genehmigte und von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) finanzierte Projekt lief über einen Zeitraum von 24 Monaten, welches am 01.07.2011 initiiert wurde. In Zusammenarbeit mit den Projektpartnern sollte die Fachhochschule FH JOANNEUM eine Präventivmaßnahme auf wissenschaftlicher Basis zur Vermeidung von Eisablagerung an Rückhaltegittern im Klimatisierungssystem eines Luftfahrzeuges erarbeiten.

Das Ice Grid Projekt fundiert in den neuesten Klimatisierungsmethoden von sich am Boden befindenden Passagierflugzeugen um eine Verminderung der Lärmentwicklung und CO_2 -Ausstoß an modernen Flughäfen zu gewährleisten. Zur Klimatisierung des Kabinenbereichs vor dem Bordingprozess muss das interne Klimatisierungssystem aktiviert werden, welches auf herkömmliche Weise durch Zapfluß der Triebwerke, oder der APU betrieben wird. Am internationalen Flughafen von Manama in Bahrain wurde diesbezüglich ein Pilotprojekt realisiert, in dem die Klimatisierung der Kabine mittels einem von der Firma Carvotec entwickelten externen Kühlaggregaten erfolgt.

Diese können entweder als fix verbaute Einheiten nahe der Abstellfläche, oder als mobile Einheiten, dem so genannten PCAir caddy, realisiert werden. Besonders in heißen Klimaregionen mit hoher Luftfeuchtigkeit stellt die Klimatisierung Großraumflugzeuge eine besondere Herausforderung dar. Komprimierte und bis zu $-25^{\circ}C$ unterkühlte Luft wird von den Aggregaten über ein Schlauchsystem zum Flugzeug geführt und dort in das interne Klimatisierungssystem und somit in den Kabinenbereich geleitet. Der Hersteller verspricht durch dieses System eine Reduzierung von 60% an CO_2 -Emissionen der herkömmlichen Klimatisierungsmethode. Der Verlauf der Schläuche kann sowohl unterirdisch geführt werden

und durch im Boden versenkbare Anschlussstationen bereitgestellt, oder für das mobile System direkt auf der Abstellfläche verlegt werden. Beispiele dafür sind in Abbildung 1 gezeigt.



Abbildung 1: Versenkbare Andockstelle und mobiles Kühlaggregat [Carvotec SA, 2013, keine Seite]

Um das empfindliche flugzeuginterne Klimatisierungssystem vor versehentlichem Einbringen von Fremdkörpern und vor Verunreinigungen zu schützen, wurde ein Rückhaltegitter an der Schnittstelle zum Flugzeug angebracht. Ein Problem besteht jedoch darin, dass durch die Versorgung mit unterkühlter Luft sich feine Schneepartikel aus der Restfeuchtigkeit der zuvor dehydrierten Luft bilden und sich an diversen Objekten anlagert. Unter anderem auch an besagtem Rückhaltegitter, welches nach kürzester Zeit gänzlich mit Schnee bedeckt und somit einen Durchfluss der Luft gänzlich unterbindet (Abbildung 2).



Abbildung 2: Rückhaltegitter vor und nach einem Klimatisierungstest ohne Enteisung [Airbus, 2013, keine Seite]

Zielsetzung des IceGrid Projektes ist eine genaue Untersuchung des Eisablagerungsverhaltens mittels computergestützten Strömungssimulationen und deren Validierung mit Versuchen im Eiskanal der FH JOANNEUM. Weiteres dient das Projekt als Motivation zur Weiterentwicklung von CFD-Codes, wie z.B. der von der FH JOANNEUM entwickelten 2D-Eiscode ICEAC2D. Da Vereisung nach wie vor eine große Rolle im Betrieb von Luftfahrzeugen darstellt und nur mit erhöhten Aufwand Tests unter realen Bedingungen durchgeführt werden können, bedarf es adäquater Simulationsmodelle. Diese Aufgabe hat sich auch der von Airbus strategische Partner ICON gewidmet. Sind genaue Daten des Ablagerungsverhaltens bekannt, so können konkrete Lösungen für eine wirtschaftliche Enteisung gefunden werden. Im Falle des Rückhaltegitters werden so Versuche mit speziellen Beschichtungen, oder zyklischen Enteisungsintervallen durch das Anlegen elektrischer Spannung durchgeführt und getestet.

1.2. Inhalt der Arbeit

Da die Arbeit im Zuge eines zwölfwöchigen Praktikums bei ICON erarbeitet wurde, befasst sie sich mit der Herangehensweise und Aufsetzung einer CFD-Simulation von Eisablagerung an besagtem Rückhaltegitter. Hierfür wird ein physikalisches Gesetz des Ablageverhaltens, welches aus Untersuchungen des Zentrums für angewandte industrielle Mathematik an der Universität von Hull in England an Überlandleitungen hervorhing, in den Simulationscode eingebunden. Für Validierungszwecke dieses Ablagerungsgesetzes mit Eiskanaltests findet zunächst eine adäquate Simulation eines einzelnen Drahtsegments statt. Hauptaugenmerk ist dabei die Vorgehensweise zur Simulationsaufsetzung und Beschreibung des mathematischen Hintergrunds. Um das Ablagerungsverhalten von Schneepartikel am Rückhaltegitter zu simulieren wird das gewonnene Simulationsmodell auf ein einzelnes Gitterkreuzsegment bestehend aus sich zwei intersectierenden Zylindern angewandt.

2. Methoden

Im folgenden Kapitel wird die Herangehensweise und Durchführung einer Eisablagerungssimulation mithilfe von Lagrangian Partikeln mittels ICON FOAMpro gezeigt. Um das angewandte Ablagerungsgesetz validieren zu können, wird zuerst ein einzelnes Drahtsegment und in Folge dessen ein Drahtkreuz, bestehend aus zwei sich intersectierenden Zylindern, simuliert. Die dafür verwendeten Disziplinen aus dem Bereich numerischer Berechnungsverfahren werden schrittweise erläutert und die Umsetzung in dem von ICON entwickelter Software ICON FOAMpro gezeigt.

2.1. Grundlagen numerische Berechnungsverfahren

Grundlage jeder CFD-Simulation ist das Lösen der verschiedenen Erhaltungsgleichungen der physikalischen Größen wie Masse, Impuls und Energie. Erhaltungsgleichungen deshalb, da sich diese Größen nur in andere Formen umwandeln lassen, jedoch nicht verschwinden können. Mit Hilfe dieser Gleichungen lassen sich physikalische Eigenschaften eines allgemein strömenden Fluides erfassen und beschreiben. Kern jeder Strömungsberechnung stellen die fünf Gleichungen zu Erhaltung von **Masse** (eine Gleichung), **Impuls** (eine Gleichung pro Raumkoordinate = drei Gleichungen) und **Energie** (eine Gleichung) dar, welche jeweils für ein durchströmtes Kontrollvolumen gelten und gelöst werden.

Auf eine detaillierte Herleitung jener Gleichungen wird in dieser Arbeit verzichtet und auf einschlägige Literatur, wie zum Beispiel [1], verwiesen. Grundlage zur Aufstellung der Erhaltungsgleichungen ist die Betrachtung eines Kontrollvolumens (KV), über dessen Grenzen ein Fluid ein und hinaus fließt und sich so eine mathematische Beziehung ableiten lässt. Dabei ist es wichtig zu wissen, dass es zweierlei Darstellungsformen der Erhaltungsgleichungen gibt, nämlich die **Integralform** und **Differentialform**.

Die wesentlichen Unterschiede beider bestehen in der Definition der Kontrollvolumina. In der Integralform wird ein endliches Kontrollvolumen V mit endlichen Grenzen betrachtet. Dies dient vor allem der physikalischen Anschaulichkeit. Die Differentialform basiert hingegen auf der mathematischen Herangehensweise in der ein infinitesimal kleines Kontrollvolumen zum

Einsatz kommt. Die Vorteile, die die Differentialform mit sich bringt sind, dass auf eine Beschreibung mittels Integrale verzichtet werden kann. Je nach Zweck und Anschaulichkeit eignet sich diesbezüglich die Integralform, oder Differentialform besser. Häufig wird in CFD Programmen jedoch die Integralform, auch als Finite-Volumen-Diskretisierung bezeichnet, angewandt, da Unstetigkeiten innerhalb eines KV zugelassen und somit z.B. Verdichtungsstöße erfasst werden können.

Die Erhaltungsgleichungen stellen Differentialgleichungen (DGL) dar und fundieren auf physikalischen Grundlagen. Für die Massenerhaltung z.B. gilt, dass einströmende und ausströmende Masse über den Seitenwänden eines KVs zueinander äquivalent sein müssen, solange keine Quelle oder Senke im KV existiert. Für die Impulserhaltung kommt das zweite Gesetz von Newton

$$F_i = m * a_i \quad (2.1)$$

in sämtlichen Raumrichtungen zur Anwendung. So erhält man jene drei Gleichungen, welche im kartesischen Raum die Impulserhaltung in x-, y- und z- Richtung beschreiben. Die letzte und fünfte Gleichung beschreibt den Erhalt von Energie jeglicher Form in einem KV. Sie kann aus dem 1.Hauptsatz der Thermodynamik

$$\frac{\partial E_{tot}}{\partial t} = \dot{W} + \dot{Q} \quad (2.2)$$

abgeleitet werden. $\frac{\partial E_{tot}}{\partial t}$ stellt die Änderung der totalen Energie E_{tot} in einem KV über die Zeit dar, welche äquivalent der Summe aus Leistung \dot{W} und Wärmestrom \dot{Q} in einem KV ist.

2.1.1. Navier-Stokes-Gleichungen

Diese so erhaltenen fünf Erhaltungsgleichungen werden zu Ehren des französischen Ingenieurs und Physiker Claude Louis Marie Henri **Navier** (*1785-1836†) und dem britischen Mathematiker und Physiker Sir Georg Gabriel **Stokes** (*1819-1903†) zu den bekannten Navier-Stokes-Gleichungen zusammen gefasst. Mit Hilfe dieser Gleichungen ist eine gänzliche Beschreibung von newtonschen Flüssigkeiten und Gasen möglich.

Insgesamt haben sich drei Darstellungsformen der Navier-Stokes-Gleichungen etabliert. Die Divergenzform, die Integralform und die Differentialform. Dargestellt in der Divergenzform nehmen die vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen folgende Form an (Gleichung 2.3-2.7). Die Bezeichnung vollständig bezieht sich dabei auf die Tatsache, dass mit Hilfe derer die gesamte Strömung, inklusive Wirbel und Turbulenzen jeglicher Größenordnung beschrieben werden können.

Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.3)$$

Impulsgleichungen:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \operatorname{div} \begin{pmatrix} \tau_{xx} \\ \tau_{yx} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \operatorname{div} \begin{pmatrix} \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{zy} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \operatorname{div} \begin{pmatrix} \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Energiegleichung:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \vec{V}) = \rho \dot{q} + \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad}(T)) - \operatorname{div}(p \vec{V}) + \operatorname{div}(\tau \cdot \vec{V}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \quad (2.7)$$

wobei ρ die Dichte des Fluides, x, y, z die Raumkoordinaten, t die Zeit, $\vec{V} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix}$ die Geschwindigkeit, p der statische Druck und τ die angreifenden Schubspannungen, welche meist zu einem Tensor τ_{ij} zusammengefasst werden, darstellt. Des Weiteren ist T die Temperatur, λ die Wärmeleitfähigkeit des Fluides, \dot{q} die spezifische Energieaufnahme und E die Totalenergie pro Gewichtseinheit. Diese lässt sich mit Hilfe der statisch inneren Energie

$$e = c_v T \quad (2.8)$$

ausdrücken zu

$$E = e + \frac{1}{2} |\vec{V}|^2. \quad (2.9)$$

Hierbei steht c_v für die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen. Zu achten ist auf das korrekte Einsetzen der Größen in SI-Einheiten. Die einzelnen Terme zur Energieerhaltung lassen sich aufgrund ihrer Ursache beschreiben als:

- $div(\lambda \cdot grad(T)) \dots$ durch Wärmeleitung übertragenen Energie
- $-div(p\vec{V}) \dots$ von wirkenden Druckkräften
- $div(\tau \cdot \vec{V}) \dots$ viskose Kräfte
- $\rho \vec{f} \cdot \vec{V} \dots$ von Volumenkräften geleistete Arbeit wie z.B. Gravitation

Zu Bestimmung der 17 Unbekannten $\rho, u, v, w, p, e, T, \tau_{ij}$ bedarf es neben den fünf Erhaltungsgleichungen noch Gleichungen aus der Thermodynamik wie z.B. die thermische Zustandsgleichung für ideale Gase

$$p = \rho RT \quad (2.10)$$

und eine weitere kalorischer Zustandsgleichung, welche neben $e = c_v T$ für ideale Gase durch die spezifische Wärmekapazität c_p bei konstantem Druck und die spezifischen Wärmekapazität c_v bei konstantem Volumen ausgedrückt werden kann zu

$$h = c_p * T = e + \frac{p}{\rho}. \quad (2.11)$$

Die verbleibenden weiteren neun Bestimmungsgleichungen werden aus den Stokesschen Beziehungen für Schubspannungen eines Newtonschen-Fluides erlangt.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \gamma \delta_{ij} div(\vec{V}) \quad (2.12)$$

μ ist hierbei die dynamische Viskosität, welche mit der Volumenviskosität γ im Zusammenhang steht durch $\gamma = -\frac{2}{3} \mu$.

2.1.2. Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen

Das numerische Lösen der vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen ist auch unter dem Namen Direkte Numerische Simulation (**DNS**) bekannt. Sie stellt die genaueste Lösungsmethode von physikalischen Vorgängen einer Strömung dar, benötigt jedoch hochauflösende Rechengitter (kleine räumliche Schrittweite) und hohe Iterationsanzahlen (kleine zeitliche Schrittweite) um eine Diskretisierung kleinster turbulenter Vorgängen zu ermöglichen. Hoher Rechenaufwand und lange Simulationszeiten sind die Folge.

Für technische Anwendungen spielen diese beiden Faktoren jedoch eine wesentliche Rolle, weshalb auf eine genaue Lösung oft verzichtet wird und eine ausreichende, aber dennoch effiziente Näherung der Turbulenzmodellierung angewandt wird. Diese werden Reynolds-gemittelte-Navier-Stokes-Gleichungen, oder wie im Englischen bezeichnet als Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-equation (**RANS**) genannt. Die hochfrequenten nichtlinearen Turbulenzanteile werden hierbei nicht von den Erhaltungsgleichungen selbst beschrieben, sondern durch Turbulenzmodelle modelliert. Die charakterisierenden Strömungsgrößen werden aus der Summe der hochfrequenten Schwankungsterme (meist durch einen hochgestellten Strich \prime gekennzeichnet, z.B. ρ'), welche aus der Turbulenzmodellierung erlangt werden und dem niederfrequenten Mittelwert (z.B. $\bar{\rho}$) zusammengesetzt zu

$$\rho = \bar{\rho} + \rho'. \quad (2.13)$$

Die benötigten Rechengitter können bei der Verwendung von RANS-Simulationen weitaus gröber gestaltet werden und führen somit zu einer Entlastung der benötigten Rechenressourcen.

2.1.3. Turbulenzmodelle

Bei der Verwendung der RANS-Methode hängt die Genauigkeit der Simulation primär von dem verwendeten Turbulenzmodell ab. Diese können unterteilt werden in

- Laminares Modell (keine Turbulenzen berücksichtigt)
- Wirbelviskositätsmodelle
- Reynolds-Spannungsmodelle.

Für den industriellen Gebrauch haben sich vor allem die Wirbelviskositätsmodelle etabliert, in denen die Reynolds-Spannungen durch eine Wirbelviskosität μ_t ersetzt werden. Die wichtigsten Vertreter hiervon sind unter anderem

- Spalart-Allmaras Modell
- $k-\varepsilon$ Modell
- $k-\omega$ Modell
- *SST* (Shear Stress Transport) Modell.

Das Spalart-Allmaras ist ein Vertreter des Ein-Gleichungsmodells, in dem nur eine Differentialgleichung zur Lösung von μ_t verwendet wird. Die letzten drei Turbulenzmodelle gehören hingegen zur Familie der Zwei-Gleichungsmodelle, bei welchen μ_t durch zwei Differentialgleichungen bestimmt wird. Die einzelnen Modelle unterscheiden sich in ihrer Stabilität und Genauigkeit und eignen sich für unterschiedliche Anwendungsbereiche.

Das $k-\varepsilon$ Modell beinhaltet eine Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie k und eine weitere für die turbulente Dissipation ε .

Es ist für die Berechnung der Strömungen im Inneren eines Strömungsfeldes gut geeignet, hat allerdings Probleme bei der Berechnung von Strömungen, die aufgrund von Druckgradienten an der Wand ablösen. (Lechler S., 2011,[1]).

Für genauere Ergebnisse im Wandbereich kann hingegen das $k-\omega$ Modell verwendet werden, welches anstelle von ε die turbulente Frequenz ω verwendet.

Das *SST*-Modell vereint die Vorteile des $k-\varepsilon$ Modells mit der höheren Genauigkeit im Wandbereich des $k-\omega$ Modells, was zu einem besseren Ergebnis des gesamten Strömungsfeldes führt. Aus diesem Grund gilt es heutzutage als Standardmodell in der Industrie.

Bei der Verwendung von Turbulenzmodellen müssen Anfangsbedingungen für die Dichte ρ , Geschwindigkeit \vec{V} und Temperatur T sowie Randbedingungen an den vorhandenen Geometrien wie Einlass, Auslass und Wand festgelegt werden.

2.1.4. Inkompressible Strömung

Die vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen berücksichtigen räumliche und zeitliche Änderung der Strömungs- bzw. Fluideigenschaften. Bei geringen Drücken können viele Flüssigkeiten wie z.B. Wasser jedoch als inkompressibel behandelt werden, da sich ihre Dichte im Verlauf einer Strömung nur unwesentlich verändert. Für Strömungsgeschwindigkeiten kleiner $Ma < 0.3$ können Gase ebenso als inkompressibel unabhängig von Zeit und Ort angenommen werden, was zu einer Vereinfachung der Erhaltungsgleichungen und somit zu einer verkürzten Simulationsdauer führt. Handelt es sich zusätzlich um eine isotherme Strömung ist die Dichte ohnehin konstant und Kontinuitäts- und Impulserhaltungsgleichungen vereinfachen sich zu

$$\operatorname{div}(\vec{V}) = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho V_i \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \Delta V_i \quad (2.15)$$

μ ist hierbei die dynamische Viskosität.

2.1.5. Das Ablagerungsgesetz

Am Zentrum für angewandte industrielle Mathematik an der Universität von Hull in England wurden Untersuchungen von Eisablagerung an Überlandleitungen gemacht. Siehe hierfür [2] und [7]. Motivation dafür ist das in kalten und niederschlagsreichen Regionen herrschende Problem von vermehrten Brüchen von Überlandleitungen während der Wintermonate. Untersuchungen haben ergeben, dass durch die häufig auftretende Winde eine seitliche Schneeablagerung entlang der Leitungskabel stattfindet, welche sich aufgrund ihrer Elastizität

verdreht. Aufgrund der von dem seitlich angelagerten Schneemassen und der dadurch verursachten exzentrisch angreifenden Kraft wirkt ein Torsionsmoment auf die Leitung, was schließlich zum einem Bruch führen kann. Verschiedene Schneeablagerungsformen an zylinderförmigen Geometrien können in den folgenden Abbildungen 3-6 entnommen werden.



Abbildung 3: Schneeablagerung an Hochspannungsleitung [Florian Troger, 2013]

In Abbildung 3 kann schön die einseitige Schneeablagerung und somit stückweise erfolgende Verdrehung der Überlandleitung erkannt werden, was zu einer profilartigen Form der abgelagerten Schneemassen führt. Eine weitere schöpferische Laune der Natur wird in Abbildung 4 gezeigt. Der hierbei von hinten unten angeströmte Leitungsmast erfuh durch die herrschende Strömung eine zwergenförmige Schneeablagerung an seinem freien Ende. Die mützenähnliche Form kommt durch die an einem Flügelprofil ähnlich erzeugten Strömungsbedingungen zustande. Das gleiche Phänomen, aber mit einem unterschiedlichen Ablagerungsbild kann in Abbildung 5 und Abbildung 6 betrachtet werden.



Abbildung 4: Schneeablagerung an Leitungsmasten [Florian Troger, 2013]



Abbildung 5: Schneeablagerung an Wegbegrenzer [Florian Troger, 2013]



Abbildung 6: Schneeablagerung an Wegbegrenzungspfosten 2 [Florian Troger, 2013]

Entlang einer Überlandleitung können unterschiedliche Wachstumsformen von Schneeablagerung beobachtet werden. Im Scheitelpunkt zwischen zweier Strommasten erfolgt eine progressive Eisummantelung, welche auf der Elastizität und damit verbunden Verdrehung der Stromleitung beruht. In unmittelbarer Nähe der Einspannung findet ein axiales Wachstum statt. Auf diesem fest eingespannten und unelastischen Leitungsabschnitt beruht das folgend behandelte Schneeablagerungsgesetz. Diese aus den Untersuchungen des Zentrums für industrielle und angewandte Mathematik der Universität von Hull hervorgegangene Gesetzmäßigkeit kann in der publizierten wissenschaftliche Arbeiten von Poots und Skelton „Simulation of wet-snow accretion by axial growth on a transmission line conductor“[2] entnommen werden.

Eine Schneeflocke besteht aus einer Mixtur aus allen drei Aggregatzuständen, nämlich fest, flüssig und gasförmig. Die massenanteilige Ablagerung einer einzelnen Schneeflocke während des Aufpralls an einem Objekt wird durch den Aufprallwinkel zwischen Flugbahn und Oberflächennormalen bestimmt. Stimmen Flugbahn und Oberflächennormale überein,

erhält man eine 100% Ablagerung der Schneeflocke. Tangiert die Schneeflocke hingegen die Oberfläche, erfolgt keinerlei Ablagerung, was zur folgenden Gesetzmäßigkeit führt

$$\sigma = \sigma_0 * \cos\theta. \quad (2.16)$$

σ_0 ist eine Konstante, welche den Wert $\sigma_0 \leq 1$ einnimmt und aus Versuchen ermittelt werden kann. Sie bestimmt den prozentualen abgelagerten Massenanteil einer Schneeflocke und hängt von den Fluid- bzw. Strömungseigenschaften, sowie der Oberflächenbeschaffenheit des Zylinders ab. Aus Eiskanaltests kann sie im Staupunkt des vereisten Zylinders ($\cos\theta = 1$) für definierte Strömungseigenschaften gemessen werden.

θ bezeichnet den Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor \vec{V} der Schneeflocke und der Oberflächennormale \vec{n} des Aufprallpunktes vor dem Aufprall (Abbildung 7).

Durch die Annahme, dass das Strömungsfeld des Trägerfluides nicht durch die Schneeflocken beeinflusst wird, jedoch Trägheitskräfte sehr wohl auf das Partikel wirken, kann der Winkel θ leicht aus dem Geschwindigkeitsfeld bestimmt werden.

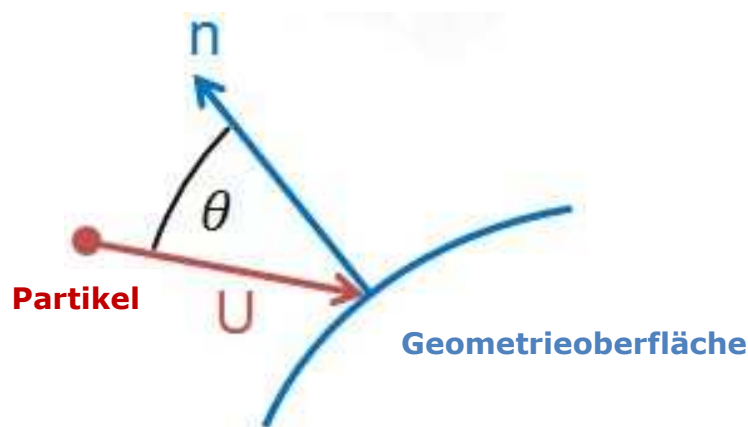


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Sigma Gesetzes

Aus dem Produkt von σ und der einzelnen Partikelmasse m_p erhält man den lokal angelagerten Massenanteil m_{accret} der aufprallenden Schneeflocke pro Zylinderface

$$m_{accret} = \sigma * m_p \quad (2.17)$$

2.1.6. Reynolds-Zahl

Eine charakteristische Größe einer Strömung stellt die Reynolds-Zahl Re dar. Unter anderem lässt sich mit ihr beschreiben, ob eine Strömung an einem bestimmten Punkt laminar, turbulent, oder gerade von einem auf den andern Zustand umschlägt. Sie ist das Verhältnis von Trägheitskräften zu viskosen Kräften und ist definiert als

$$Re = \frac{u * L}{\nu} \quad (2.18)$$

wobei u die charakteristische Geschwindigkeit, L die charakteristische Länge und ν die charakteristische kinematische Viskosität darstellt. Durch das Einsetzen aller Größen in den SI-Einheiten ergibt sich somit die dimensionslose Reynolds-Zahl Re . Die kinematische Viskosität ν errechnet sich aus der Division der dynamischen Viskosität μ und der Stoffdichte ρ .

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.19)$$

Zur Bestimmung der Re an einem frontal angeströmten Zylinder wird der Durchmesser d als charakteristische Länge eingesetzt. Für eine Strömungsgeschwindigkeit $u = 15 \frac{m}{s}$, einen Zylinderdurchmesser $d = 0.025mm$ und einer kinematischen Viskosität $\nu = 11.6116 * 10^{-6} \frac{m}{s^2}$, welche aus entsprechenden Tabellen für trockene Luft bei 1 bar Umgebungsdruck und $-20^\circ C$ Umgebungstemperatur entnommen werden kann ergibt sich somit

$$Re = \frac{u * d}{\nu} = \frac{15 * 0.025}{11.6116 * 10^{-6}} \sim 32295$$

Im Vergleich dazu findet bei $Re < 1$ keinerlei Strömungsablösung statt. Bei $40 < Re < 80$ zeichnen sich erste Instabilitäten aus und erst bei $Re > 200$ beginnt der Umschlag zwischen laminarer und turbulenter Strömung im entfernten Nachlauf. Mit steigender Re nähert sich der Umschlagpunkt stetig der Zylinderwand, wobei die kritische Reynolds-Zahl $Re_{krit} > 10^4$ liegt. Das in Abhängigkeit der Reynolds Nummer entstehende Strömungsbild an einem Zylinder wird in Abbildung 8 veranschaulicht.

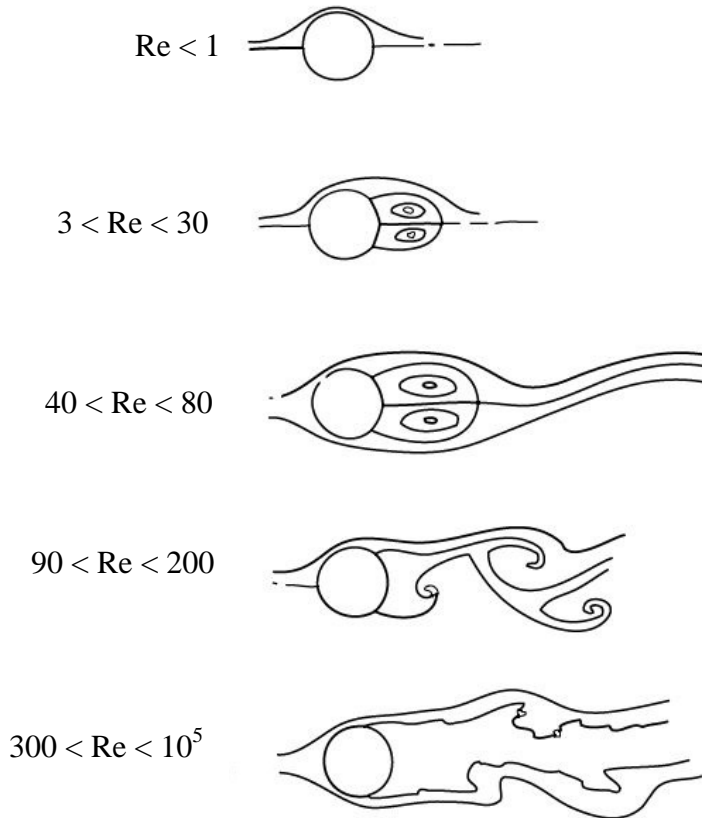


Abbildung 8: Zylinderumströmung bei verschiedenen Reynoldszahlen [Eckelmann, 1975 [8]]

2.1.7. Strouhal-Zahl

Mit Hilfe der Strouhal-Zahl Sr kann die Wirbelablösefrequenz f eines Strömungsfeldes an einem Körper bestimmt werden. Sie ist definiert als

$$Sr = \frac{f \cdot l}{u} \quad (2.20)$$

mit l als Länge des umströmten Hindernisses und der Strömungsgeschwindigkeit u . Im Falle eines Zylinders wird für l erneut der Zylinderdurchmesser d herangezogen. Für die meisten praktischen Fälle eines umströmten Zylinders gilt die Näherung von $Sr = 0.2$, womit sich eine Ablösefrequenz f ergibt von

$$f = \frac{Sr \cdot u}{d} = \frac{0.2 \cdot 15}{0.025} = 120 \text{ Hz}$$

Dieser Wert soll bei der Bestimmung des Zeitschrittes Δt einer transienten Simulation in Betracht gezogen werden, um eine akkurate Wirbelauflösung zu garantieren. Bei einer steady state Simulation stellt Δt lediglich einen Iterationsschritt dar und erlaubt somit eine Nichtbeachtung der Ablösefrequenz.

3. Simulation eines Drahtsegments

Im folgenden Kapitel wird die Herangehensweise zur erstellten Eisablagerungssimulation an einem einfachen Zylinder beschrieben. Die dabei verwendete Software iconCFD ist ein von ICON entwickeltes und vertriebenes Simulationsprogramm, basierend auf dem Open-Source CFD-Tool OpenFOAM.

3.1. Geometrie

Um eine Validierung der CFD-Simulation und dem damit verbundenen Eisablagerungsgesetz mit Messungen aus dem Eiskanal zu ermöglichen wird einer Simulation mit passend skalierten Geometrien aufgesetzt. An den Eckdaten des Eiskanal der University of Applied Sciences FH JOANNEUM Graz orientiert ergeben sich somit eine freie Strömungsgeschwindigkeit $V = 15 \frac{m}{s}$ und eine Teststückhöhe $h = 100mm$. Um Einflüsse der Seitenwände des Eiskanal auf das Strömungsfeld und somit auch auf das Testergebnis zu vermeiden, wird der Zylinder als unendlich lang angesehen. Die erforderliche Teststückbreite b der Simulation erfordert somit nur wenige Zellen was die benötigte Rechenkapazität verringert, jedoch die Simulation nicht auf einen zweidimensionalen Fall beschränkt. Als Zylinderdurchmesser wird ein Wert von $D = 25mm$ festgelegt, was aus den Daten des Versuchsaufbaus im Eiskanal beruht.

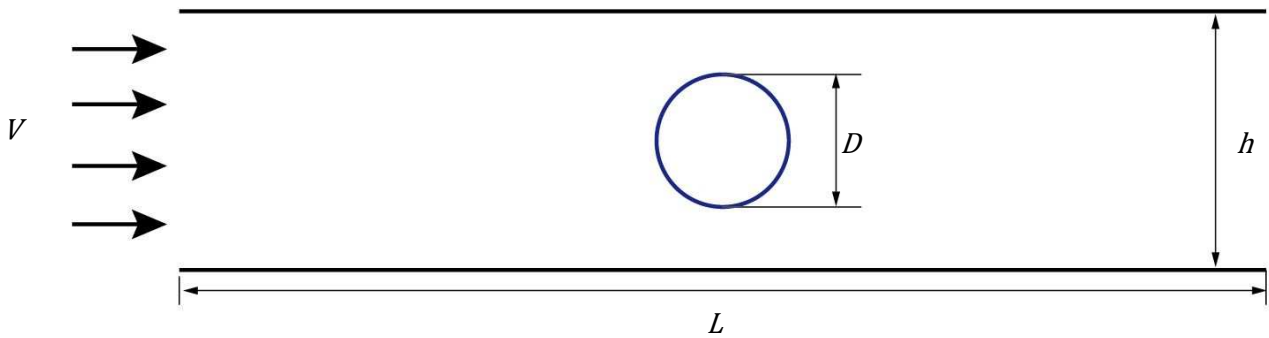


Abbildung 9: Geometriedaten des Simulationsabschnittes

Zur Erstellung der Simulationsgeometrie kann jede CAD-Software herangezogen werden. Wichtig dabei ist, dass das Oberflächennetz der Geometrie entweder als STL (STereoLithography), oder als NASTRAN (Nasa Structural Analysis System) für die weitere Verwendung in FOAMpro exportiert werden kann. Die für die Simulation benötigte Geometrie, bestehend aus einem Zylinder mit einem Durchmesser $D = 25\text{mm}$ und der Teststrecke des Eiskanals. In diesen Fall wurde die von $\beta\text{BETA CAE Systems SA}$ entwickelten Software ANSA zur Erstellung der Geometrie verwendet und als STL-Datei exportiert.

Um das Strömungsfeld in der Nähe des Zylinders nicht zu beeinflussen und somit weitgehendst von den Randbedingungen am Einlass und Auslass unverfälschte Simulationsergebnisse zu erhalten, wurde eine Vorlauflänge von $12 * D$ und eine Nachlauflänge von $40 * D$ festgelegt. Die Teststückbreite b wurde mit $b = 0.8 * D$ bestimmt, was zu den Gesamtabmessungen des Testabschnittes von $1300/20/100\text{ mm}$ führt. Für eine lokal höhere Zellauflösung in unmittelbarer Nähe des Zylinders wurden zwei Verfeinerungszonen erstellt. Dies erlaubt eine ressourcensparende lokal höhere Zelldichte am ausschlaggebenden Zylinderbereich, was zu einer höheren Genauigkeit des Strömungsverhaltens führt. Abmessungen der Simulationsgeometrie und dessen genaue Definition werden in Abbildung 10 veranschaulicht.

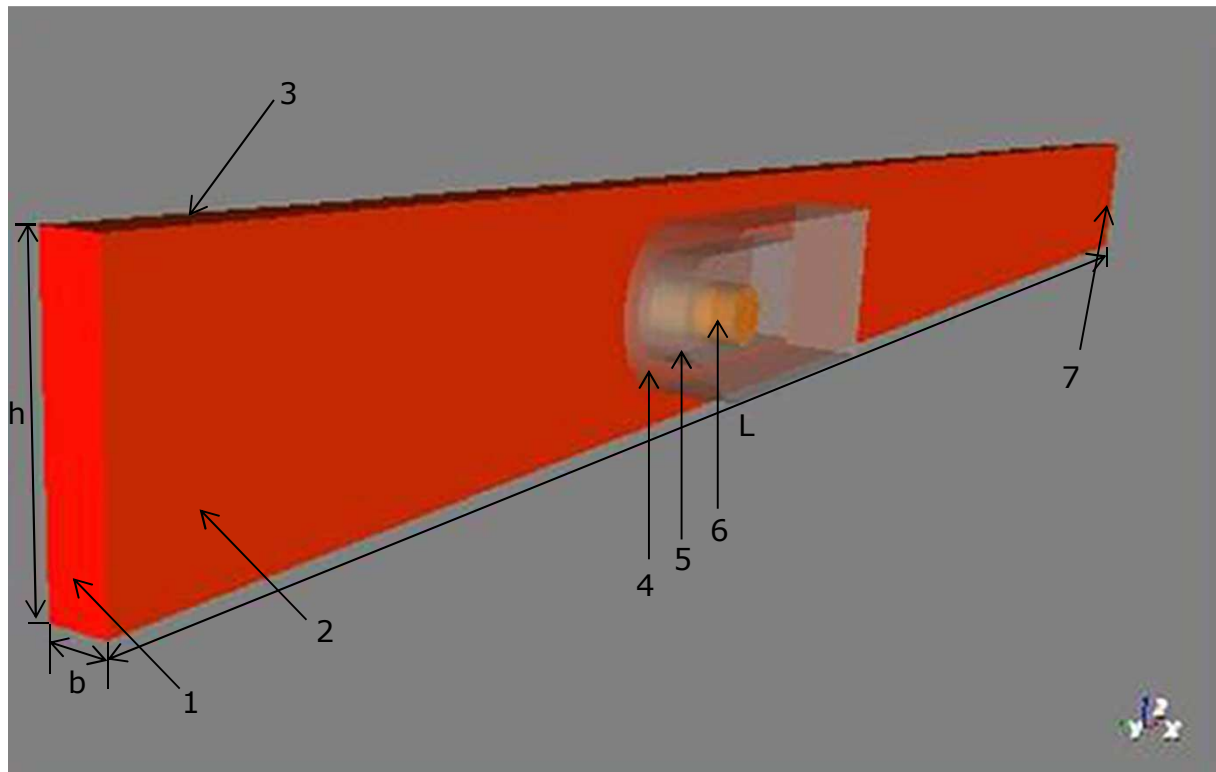


Abbildung 10: Definition der Simulationsgeometrie

Patch Definition:

- 1. : Einlass
- 2. : Linke-/rechte Wand
- 3. : Ober-/untere Wand
- 4. : Refinement-zone 1
- 5. : Refinement-zone 2
- 6. : Zylinder
- 7. : Auslass

Geometrieabmessungen:

$$D = 25mm$$

$$L = 1300mm$$

$$b = 20mm$$

$$h = 100mm$$

3.2. Vernetzung

3.2.1. Diskretisierung

Eine analytische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen ist nur für wenige Spezialfälle. Um eine numerische Lösung zu ermöglichen müssen die Differentialgleichungen (DGL) diskretisiert, also die Differentiale mit endlichen Differenzen ersetzt werden. Die so erhaltenen Gleichungen werden unter anderem als Differenzengleichungen bezeichnet und können folglich im Rahmen eines Rechnernetzes an festgelegten Stützstellen gelöst werden. Diese könne entweder die Knotenpunkte eines Netzes darstellen, oder in das Kontrollvolumen

selbst verschoben werden und wird als Zellzentrumverfahren bezeichnet. Zur Diskretisierung verwendete Vorgehensweisen lassen sich unterteilen in

- Finite-Differenzen-Diskretisierung (FD)
- Finite-Volumen-Diskretisierung (FV)
- Finite-Elemente-Methode (FE).

Sie unterscheiden sich in der verwendeten Darstellungsform der DGL, so z.B. kommen bei der FD die Differentialform und bei der FV die Integralform, welche im Zuge der Diskretisierung in Summenzeichen übergeführt werden, zur Anwendung. Die FD bietet die höchste Genauigkeit, jedoch hat die FV aufgrund ihrer Flexibilität sich in den CFD-Programmen etabliert.

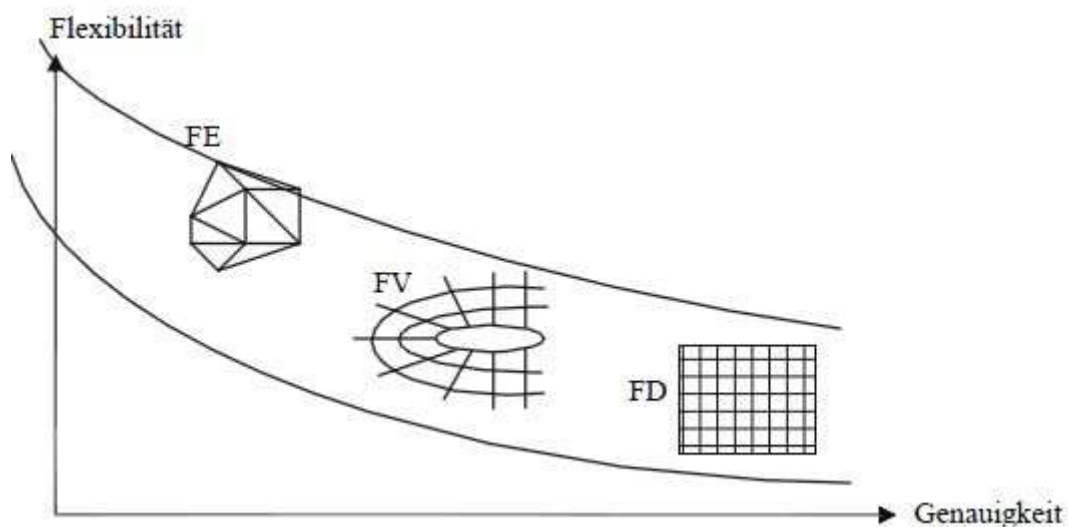


Abbildung 11: Einteilung der Diskretisierungsmethoden [Lechler S.,2011, S.41]

3.2.2. Vernetzungsutility FOAMpro Mesh

Die Vernetzung der erstellten Geometrie erfolgt mit dem von ICON entwickelten Vernetzungsutility FOAMpro MESH, dessen Funktionsweise anschließend kurz erläutert werden soll. Die Netzerstellung mittels FOAMpro MESH fundiert auf der Generierung eines

strukturierten Netzes, dessen Zellen regelmäßige gleichgroße Blöcke darstellen. Eine schnelle und einfache Vernetzung von blockförmigen Geometrien lässt sich somit verwirklichen, verbunden mit einer hohen Ergebnisgenauigkeit, da die algebraischen Gleichungssysteme eine reguläre Matrix darstellen. Für die Anwendung an gekrümmten und komplexeren Geometrien bedarf es entweder eine sehr hohe lokale Zellanzahl, oder eine individuelle Zellanpassung an den Festkörperperrand der Geometrie. Unstrukturierte Netze besitzen eine beliebige Form von Kontrollvolumen und können mehrere Nachbarzellen als die bei strukturierten Netzen üblichen sechs Nachbarzellen für 3D-Netze besitzen. Allgemein besteht ein Netz aus lauter Knotenpunkten, den Stützstellen in denen die Differenzengleichungen gelöst werden. Ein Verband von Punkten im 2D-Raum bildet eine Face und alle daran angrenzenden Faces definieren zusammen im 3D-Raum eine Zelle. Ein Netz besteht aus vielen Zellen und eine Netzoberfläche wird als Patch bezeichnet. Dies ist in Abbildung 12 schematisch dargestellt

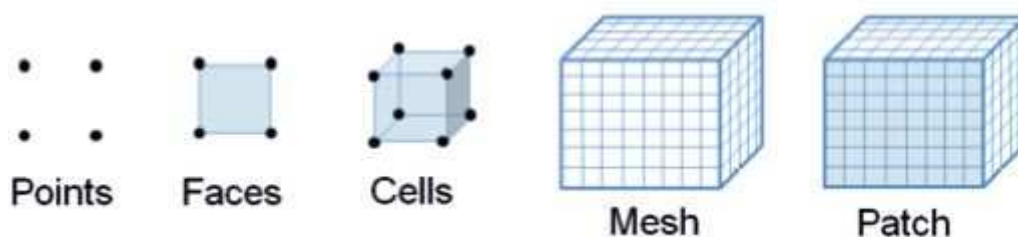


Abbildung 12: Definition der Komponenten eines Netzes [ICON FOAMpro User guide, 2013,[6]]

Zur Netzgenerierung wird in FOAMpro Mesh ein Block-Netz (blockMesh) über den gesamten Simulationsbereich gespannt und entweder von fiktiv definierten, oder real vorhandenen Oberflächen begrenzt. Im Falle des Eiskanalteststückes stellen jene die Kanalwände dar. Eine Fläche für Ein- und Auslass begrenzen die Länge des Simulationsbereichs. Um eine Zellgenerierung außerhalb des gewünschten Simulationsbereichs zu unterdrücken und somit die Zellanzahl und benötigte Rechenleistung zu minimieren, wird der gewünschte Simulationsbereich mit einem Punkt gekennzeichnet, dem sogenannten Keep-point.

FOAMpro Mesh erstellt innerhalb dieses Bereichs das Block-Netz und verwirft alle weiteren Zellen, welche sich nicht mit der Geometrie schneiden und außerhalb der Begrenzungsflächen liegen. Unabdingbar hierfür ist, dass das Oberflächennetz der erstellten Geometrien wasserdicht, also keinerlei Lücken aufweisen, da ansonsten der gewünschte

Simulationsbereich nicht erkannt werden kann und Zellen außerhalb des gewünschten Simulationsbereichs generiert werden.

Eine Definition von Verfeinerungs-Stufen (Refinement level) erlaubt eine individuelle Zellverfeinerung im Nahbereich der einzelnen Simulationsgrenzen und bewirkt eine höhere Anzahl an Zellen und somit eine höhere Netzknotendichte. Eine genauere Lösung der diskretisierten Differentialgleichungen an der erhöhten Stützstellenanzahl an der Geometrieoberfläche ist dadurch gegeben. Das Hinzufügen von Refinement levels an bestimmten Netzbereichen kann entweder durch eigens erstellte Volumina (Refinement zones), oder bestehender Geometrieflächen realisiert werden. Ein Refinement level von 1 bewirkt eine Halbierung der Zellgröße und somit eine Verachtfachung der Zellanzahl.

Im darauffolgenden Schritt werden die mit den Grenzen durchschnittenen noch rechteckigen Zellen auf die Geometrieoberfläche projiziert. So wird sichergestellt, dass keine Netzknoten außerhalb des Simulationsbereichs liegen, sondern sich auf der Festkörpergrenze befinden. Ein unstrukturiertes Netz bestehend aus lauter Hexaedern wird generiert. Anschließend kann eine gewünschte Anzahl an Oberflächen-Lagen (Surface-layer) zur genaueren Auflösung der Grenzschicht hinzugefügt werden. Eine schematische Vorgehensweise wird am Beispiel eines Spoilers in Abbildung 13 gezeigt.

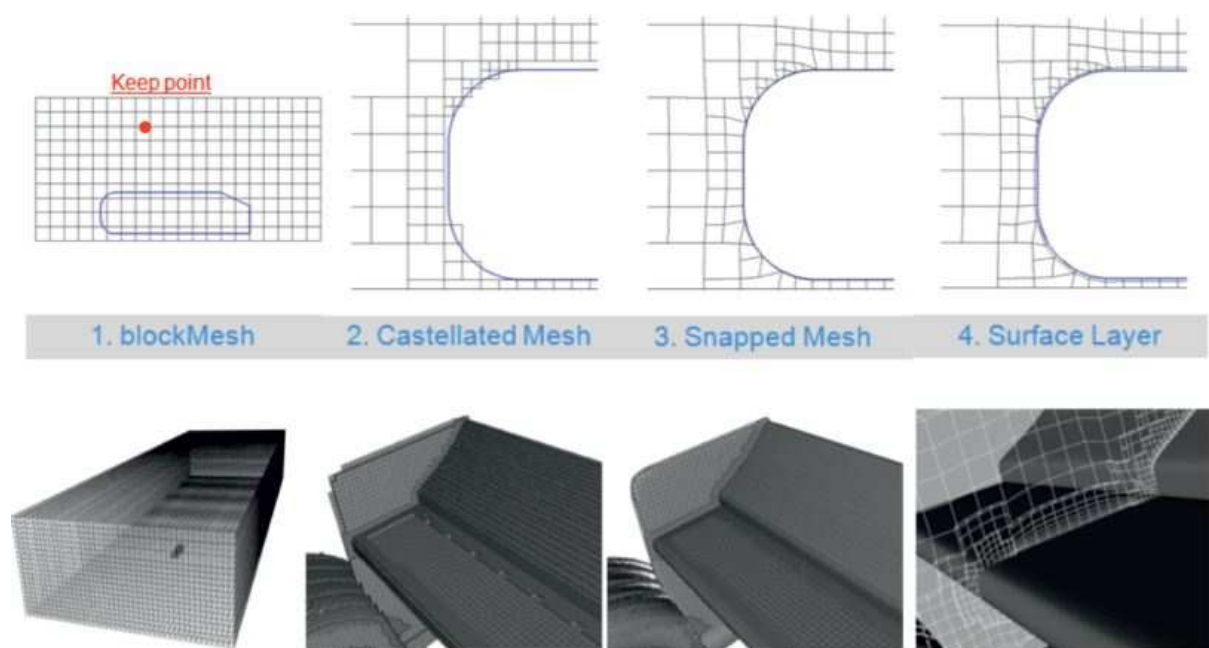


Abbildung 13: Vorgehensweise zur Netzerstellung mittels foamPROMesh [ICON, 2013]

3.2.3. Zellgenerierung

Für die Vernetzung des Eiskanaltestsegments wurde ein Block-Mesh mit einer Zellgröße von 3.2mm Seitenlänge initiiert. Mit den Testsegmentabmessungen von 1300x20x100mm ergibt sich somit eine Gesamtzellanzahl an Blockzellen von:

$$\text{Gesamtzellanzahl} = \frac{\text{Volumen Eiskanal}}{\text{Volumen Zelle}} = \frac{1300 \cdot 20 \cdot 100}{3.2^3} = \frac{2600000}{32.768} \approx 79346 \text{ Zellen}$$

Zusätzlich zu dieser Zellanzahl wurden unterschiedliche Refinement levels im Einlassbereichs, Teststückboden sowie Teststückdecke und am Testzylinder selbst erstellt. Die erhöhte Zellanzahl am Einlass erlaubt eine gleichmäßigere Partikelverteilung, welche wahlweise am Zellmittelpunkt injiziert werden können. Zwei Verfeinerungs-Zonen in unmittelbarer Umgebung des Zylinders erlauben eine höhere Auflösung des markanten Strömungsfeldbereiches ohne die Zellanzahl des Gesamtsystems überproportional zu erhöhen. Ihre Form wurde durch das vermutete Strömungsfeld um den Zylinder festgelegt und dient hauptsächlich zur genaueren Auflösung des Strömungsfeldes unmittelbar vor dem Zylinder und dessen Nachlauf. Das so erstellte Netz wird in Abbildung 14 gezeigt.

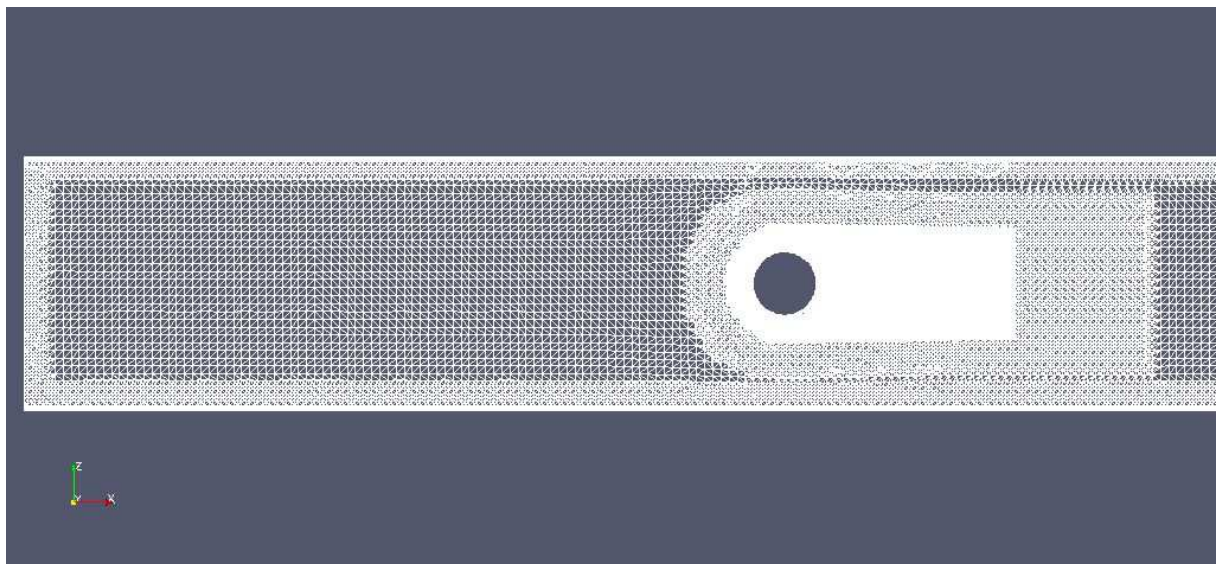


Abbildung 14: Fertig erstelltes Rechnetz der Zylindersimulation

Zusätzlich zu den lokal angewandten Zellverfeinerungen durch Refinement levels werden mehrere Surface layers an Geometrieoberflächen erstellt, welche für die Eisablagerung von

besonderem Interesse sind. Die hohe Zelldichte in Oberflächennähe ermöglicht eine detaillierte Auflösung der sich ausprägenden Grenzschicht. Da für die Partikelablagerung der jeweilige Geschwindigkeitsvektor eines Partikels unmittelbar vor dem Aufprall an der Oberfläche und derer Oberflächennormalen bekannt sein müssen, ist eine feine Auflösung des Geschwindigkeitsfeldes notwendig. Ebenso muss die Geometrieoberfläche mit genügend Zellen aufgelöst werden, um ein genaues Ergebnis der Massenablagerungsrate zu erhalten, welche pro Zelle erhalten wird. Aus diesem Grund wurden an der oberen und unteren Wand des Testbereiches sowie des sich darin befindenden Zylinder mehrere Surface layer angebracht.

Genaue Werte der Verfeinerungsbereiche können dem folgenden Ausschnitt des Simulationsverzeichnisses meshDict im system Ordner entnommen werden. Pro Refinement region kann ein minimaler und maximaler Verfeinerungsfaktor festgelegt werden, welcher hinter dem jeweiligen Vermerk level in folgenden Klammerausdruck definiert wird. Unter dem Punkt „refinementRegions“ wird das Verfeinerungslevel jeweiliger Refinement zones definiert und zusätzlich ob jene intern, oder extern des Volumen erfolgen soll.

```
castellatedMeshControls
{
    refinementSurfaces
    {
        WindTunnel_small
        {
            level (0 0);
            regions
            {
                INLET
                {
                    level (1 1);
                }

                OUTLET
                {
                    level (0 0);
                }

                LEFTWALL
                {
                    level (0 0);
                }

                UPPERWALL
                {
                    level (1 1);
                }

                RIGHTWALL
                {
```



```

        level (0 0);
    }

    BOTTOM
    {
        level (1 1);
    }

}

}

cylinder25mm
{
    level (0 0);
    regions
    {
        cylinder
        {
            level (2 2);
        }
    }
}

}

refinementRegions
{
    ref
    {
        mode inside;
        levels ((1E15 1));
    }

    ref_1
    {
        mode inside;
        levels ((1E15 2));
    }
}

layers
{
    WindTunnel_small_UPPERWALL
    {
        nSurfaceLayers 5;
    }

    WindTunnel_small_BOTTOM
    {
        nSurfaceLayers 5;
    }

    cylinder25mm_cylinder
    {
        nSurfaceLayers 5;
    }
}

```

Linke und rechte Wand des Testsegments dienen nur zur Bereichseinschränkung und repräsentieren nur fiktiv vorhandene Wände. Sie besitzen keinerlei Einfluss auf das Strömungsfeld und werden diesbezüglich als Symmetrie-Ebene definiert. Ein Hinzufügen von Surfac layers, oder Refinement levels ist demnach überflüssig. Ebenso für den Auslass. Das angewandte Refinement level 2 an der Zylinderwand ermöglicht eine Auflösung des Umfangs mit 91 Zellen. Siehe dazu Abbildung 15. Das so erstellte Netz, bestehend aus unterschiedlichen Polygonen und besitzt eine Zellanzahl von 476204 Zellen.

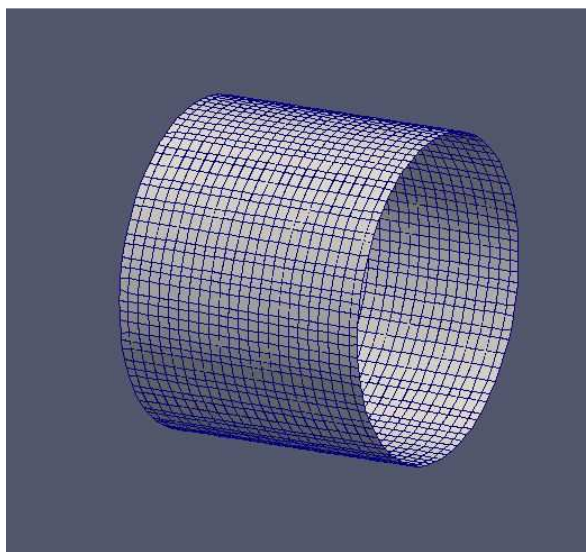


Abbildung 15: Faces der Zylindergeometrie

3.2.4. Netzvalidierung

Nach erfolgreicher Vernetzung des Simulationsbereiches erfolgt eine qualitative Beurteilung des Netzes um es für nachstehende Simulation als adäquat zu erachten. Dies ist essentiell für das Konvergenzverhalten eines aufgesetzten Cases. Eine Beurteilung und damit Evaluierung der bestimmenden Netzparameter geschieht mit der von FOAMpro integrierten Netz-Kontroll utility checkMesh. Die markantesten Größen eines CFD-Netzes sind:

- Skewness
- Orthogonalität
- Aspect Ratio

- Expansionsrate.

Skewness und Orthogonalität stehen für die Verzerrung der einzelnen Netzzellen zueinander und beeinflussen Konvergenzverhalten, Ergebnisqualität und anwendbare Lösungs- und Diskretisierungsmethoden erheblich. Skewness ist das Verhältnis der Länge der Verbindungslinie zweier benachbarter Zellmittelpunkte d zum Abstand Δ des Facemittelpunktes zu jenem Punkt, wo d die Facefläche intersectiert.

$$Skewness = \frac{\Delta}{d} \quad (3.1)$$

Eine schematische Darstellung der Skewness ist in Abbildung 16 ersichtlich. Um Konvergenzverhalten und Genauigkeit von Simulationsergebnissen zu begünstigen soll eine $Skewness \geq 10$ nicht überschritten werden.

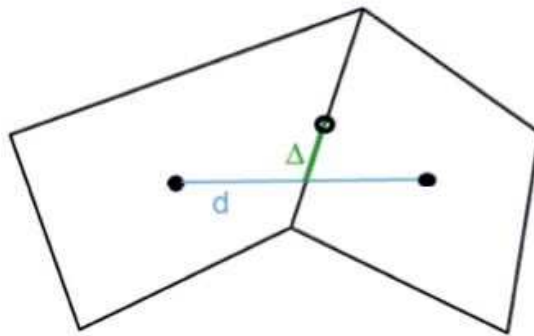


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Skewness einer Zelle

Als Orthogonalität wird der Winkel zwischen der Verbindungslinie d zweier Zellmittelpunkte und der Normalen der intersectierten Facefläche betrachtet wie in Abbildung 17 verbildlicht wird. Bei Werten des Winkels von unter 30° kann das Netz als orthogonal betrachtet werden.

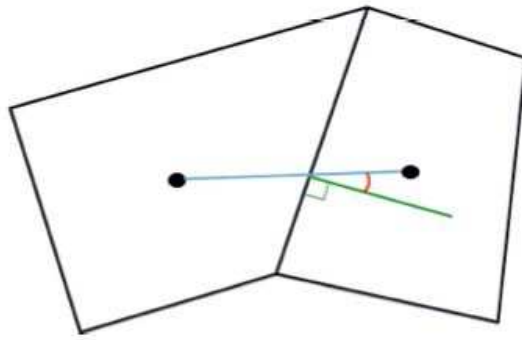


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Orthogonalität einer Zelle

Die Aspect Ratio, oder auch Streckung der Zelle, bezeichnet das Seitenverhältnis der jeweils gegenüberliegenden Zellwände. Für CFD-Simulationen sollen Werte von 0.1 nicht unter- bzw. von 10 nicht überschritten werden. Ein Maß für die Zellschiefheit stellt die Determinante dar, welche bei quaderförmigen Zellen als höchsten Wert 1 erreicht.

Als Expansion Ratio wird die Volumendifferenz zweier benachbarten Zellen bezeichnet. Als ideal stellt sich ein Wert von 1.2 dar, jedoch können Werte zwischen 0.5 und 10 angestrebt werden.

Ein Ausschnitt des Berichtes des checkMesh Befehls gibt folgende Daten wieder

Checking geometry...

```
Max aspect ratio = 8.00550586419 OK.
Minumum face area = 3.35971472767e-09. Maximum face area = 1.21564744284e-05.
Face area magnitudes OK.
Min volume = 3.50607491199e-11. Max volume = 3.712005243e-08.
Total volume = 0.00259018543737. Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 44.3868060006 average: 2.47375260928
Max skewness = 1.03536839415 OK.
```

Mesh OK.

3.3. Simulations Set-Up

3.3.1. Steady State Simulation

Nach erfolgreicher Netzerstellung und dessen zufriedenstellende Validierung mittels der checkMesh Funktion müssen adäquate Anfangs- und Randbedingungen zur Lösung der

Erhaltungsgleichungen aufgestellt werden, welche der Simulationsbeschaffenheit gerecht werden. Anfangsbedingungen sind für die Initialisierung einer Strömungsberechnung unabdingbar, da ansonsten Strömungsparameter wie Dichte ρ , Geschwindigkeit \vec{V} und Temperatur T eines Fluides zum Zeitpunkt $t = 0$ nicht definiert wären und somit keine Lösung der Erhaltungsgleichungen erfolgen kann. Markant für den Strömungseinlass ist, dass ρ , \vec{V} und T eine zeitabhängige Funktion darstellen. Ebenso müssen am Auslass Normalspannung F_n (3.2), Tangentialspannung F_t (3.3) und der Wärmefluss normal zum Face q_n (3.4) als zeitabhängige Funktionen gegeben werden.

$$F_n = -p + \mu \frac{\partial u_n}{\partial n} \quad (3.2)$$

$$F_t = \mu \frac{\partial u_t}{\partial n} \quad (3.3)$$

$$q_n = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.4)$$

u_n stellt hierbei die Geschwindigkeitskomponente in Richtung der Oberflächennormalen n , u_t steht orthogonal zu u_n und k die thermische Konduktivität dar.

Häufig angewandte Randbedingungen für den Auslass ist die Definition des statischen Druckes,

$$\frac{\partial u_t}{\partial n} = \frac{\partial u_n}{\partial n} = 0, \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0. \quad (3.6)$$

Je nach dem ob eine Strömung als stationäre (steady state), also zeitunabhängig behandelt werden kann, oder eine transiente Betrachtungsweise erfordert, kann auf unterschiedliche Solver zurückgegriffen werden. Wie in Kapitel Reynolds-Zahl beschrieben, stellt jene eine wichtig Größe zur Bestimmung der passenden Lösungsmethode dar.

Bei den stationären Berechnungsmethoden werden die Navier Stokes Gleichungen ohne transiente Anteile gelöst, da alle Terme nach der Zeit abgeleitet null ergeben und somit wegfallen. Steady state Simulationen sind aus diesem Grund weitaus ressourcenschonender als transiente und können zur Generierung von schnellen Simulationsergebnissen verwendet werden.

Da es sich bei der Einströmgeschwindigkeit $V = 15 \frac{m}{s}$ um relativ geringe Werte handelt, kann die Simulation des Fluides als inkompressibel betrachtet werden. Für Luft ist diese Vereinfachung der Navier Stocks Gleichungen bis zu einer Machzahl von $Ma < 0.3$ durchaus realistisch.

Zur Modellierung des hochfrequenten Turbulenzanteils der RANS Berechnung wurde das in ICON FOAMpro vorhanden kOmegaSST Model verwendet. Eine von ICON getätigte Studie zeigt, dass jenes im Vergleich zu anderen Turbulenzmodellen die besten Übereinstimmungen mit Berechnungsverfahren aus der Literatur besitzt.

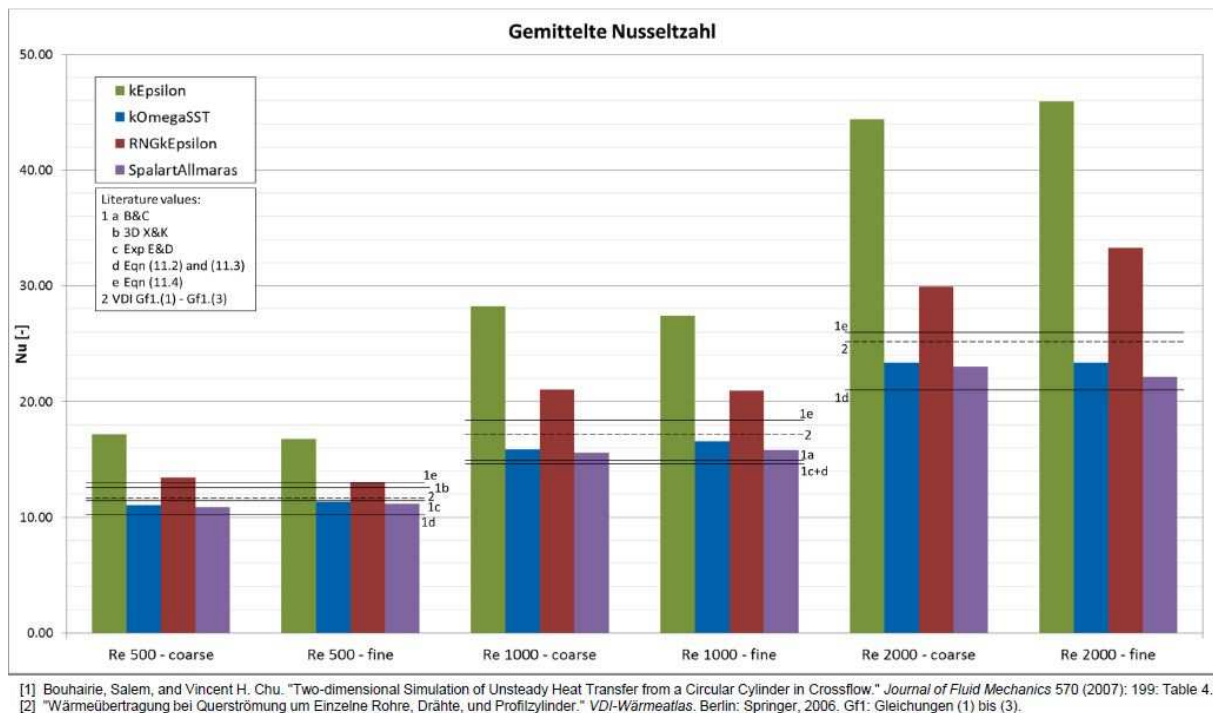


Abbildung 18: Vergleich unterschiedlicher Turbulenzmodelle [ICON, 2013]

Die globalen Simulationsparameter wie z.B. Simulationsart, Turbulenzmodell und Fluidmaterial werden im Verzeichnis caseSetupDict2 definiert, welcher sich unter system befindet. Ein Beispiel zeigt der nachstehende Eintrag.

```
global
{
    state (steadystate incompressible ras);
    turbulenceModel kOmegaSST;
    materials (air);
    fieldMaps
    {
    }
}

constant
{
```

```

environmentalProperties
{
    g g [0 1 -2 0 0 0 0] (0 0 -9.81);
}
}

```

Die Simulation der Eispartikelinjektion und deren Anlagerung am Zylinder beruht auf der Annahme, dass jene bei einem bereits voll entwickelten Strömungsfeld stattfindet. Um die Konvergenz des verwendeten transienten, inkompressiblen, RANS Solvers zu beschleunigen und die generelle Rechenzeit der Simulation zu verkürzen, wird eine steady state Simulation ohne Partikelinjektion dieser vorangesetzt. Diese Vorgehensweise hat zusätzlich den Vorteil, dass fälschlich gesetzte Simulationssetup erkannt werden können bevor die längerfristige Hauptsimulation gestartet wird. Des Weiteren erhält man erstmalige Ergebnisse und kann somit beurteilen, ob eine anschließend transiente Simulation tatsächlich von Nöten ist.

In einem Residual-plot (Abbildung 19-20) können Werte des Folgefehlers jeder Iteration der Kontinuitätsgleichung und jene zur Momentenerhaltung und Verlauf der Konvergenz grafisch dargestellt werden.

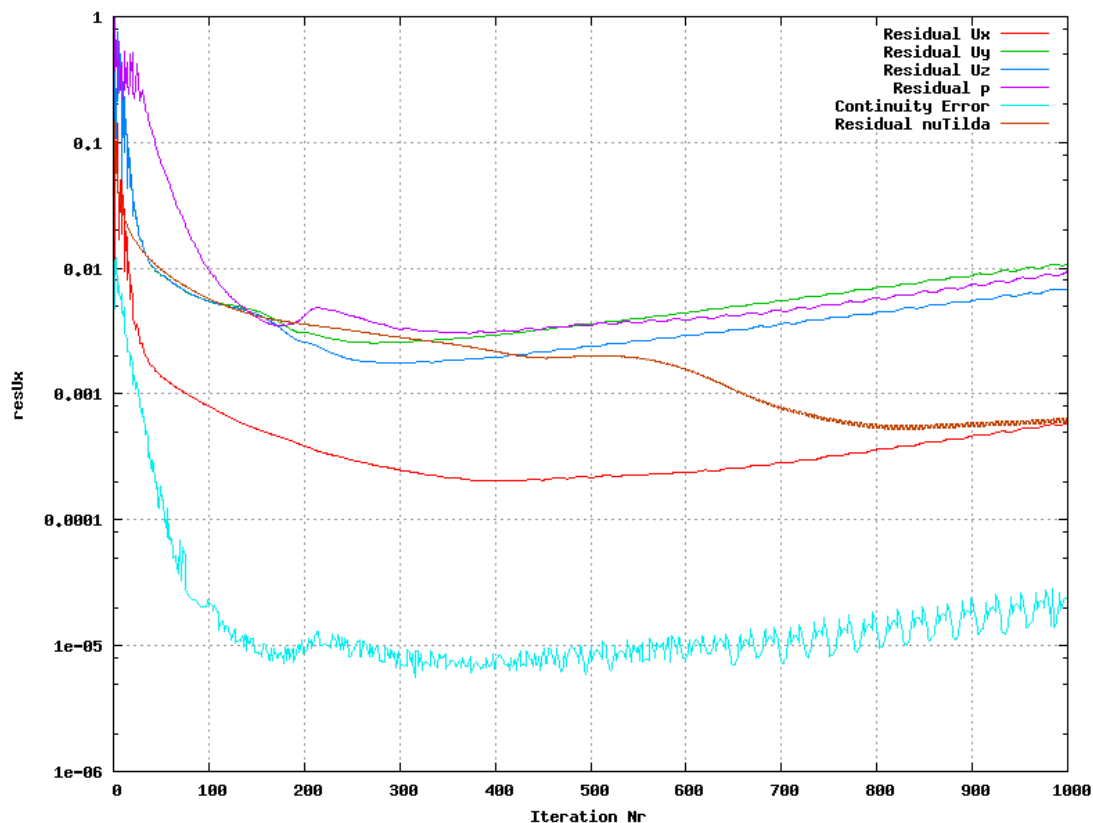


Abbildung 19: Residual-plot der Zylindersimulation

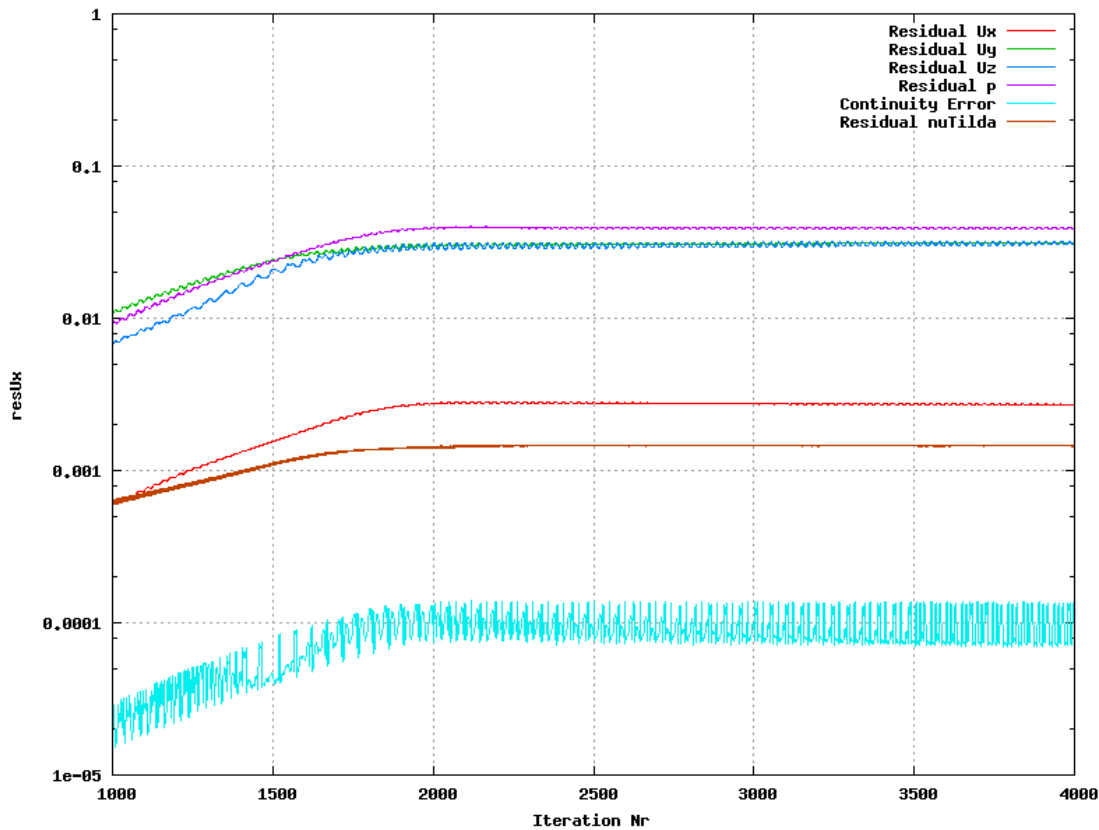


Abbildung 20: Residual-plot 2 der Zylindersimulation

Aus Abbildung 19 ist sehr deutlich zu erkennen, dass alle Residuen der Kontinuitäts- und Momentenerhaltungsgleichung, sowie Continuity Error ihren Minimalwert bereits nach 150-400 Iterationen erreichen. Diese konvergieren jedoch nicht linear, sondern deuten zunächst eine nachfolgende Divergenz an und pendeln sich bei längerer Betrachtung auf konstante Werte ein. Besonders hervorgehoben sei der Continuity Error von 10^{-5} , welcher sich ab 2000 Iterationen auf einen Wert von 10^{-4} einpendelt. Dabei weist der fluktuierende Wert auf ein sich periodisch veränderndes Strömungsfeld hin, welches auf die Ausbildung einer Kármánschen-Wirbelstraße schließen lässt. Die Vorsimulation kann somit nach 2000 Iterationen beendet (in Abbildung 20 ersichtlich) und die Ergebnisse der Strömungsfelder in einer Post-processor Software, wie das von Kitware betreute Open Source Visualisierungstool ParaView, ausgewertet werden.

Eine Visualisierung des Strömungsfeldes der Geschwindigkeit zeigt deutlich die schrittweise Ausbildung einer Kármánschen-Wirbelstraße, was bereits aus den Residual-plots vermutet werden konnte. Siehe dazu Abbildung 21-23. Das sich allmählich aufbauende Strömungsfeld bewirkt eine Reynolds-Nummer-Variation in dem in Kapitel 2.1.7 Reynolds-Nummer gezeigter Abbildung 8. Die Ablösefrequenz der voll ausgebildeten Strömung (Abbildung 23) beträgt hierbei 120Hz wie bereits im Kapitel 2.1.8 Strouhal-Zahl aufgezeigt.

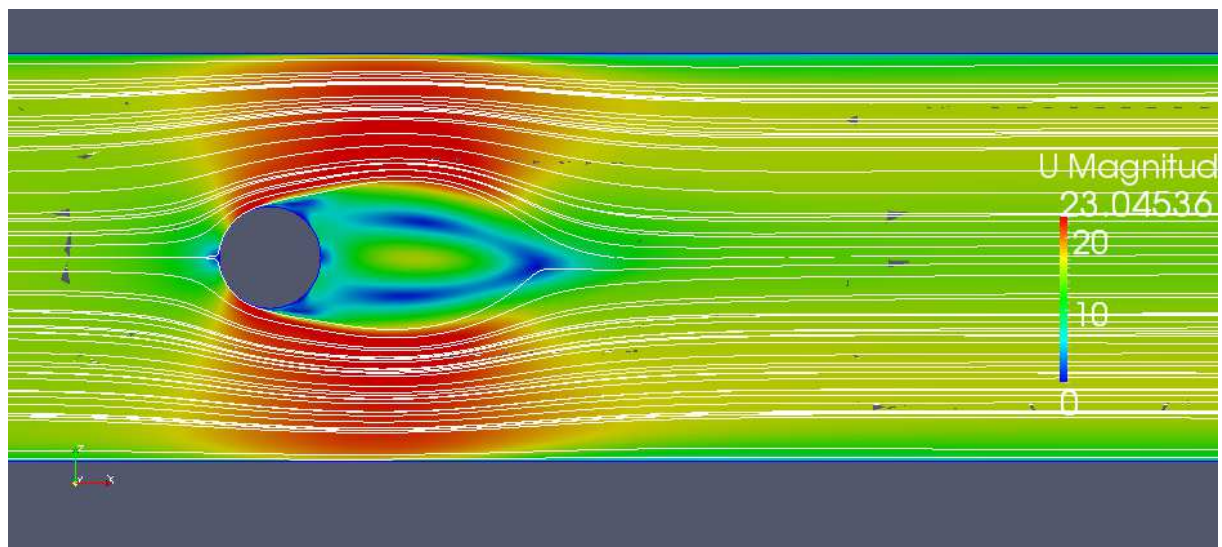


Abbildung 21: Anfängliche Entwicklung des Strömungsfeldes bei $Re \sim 30$

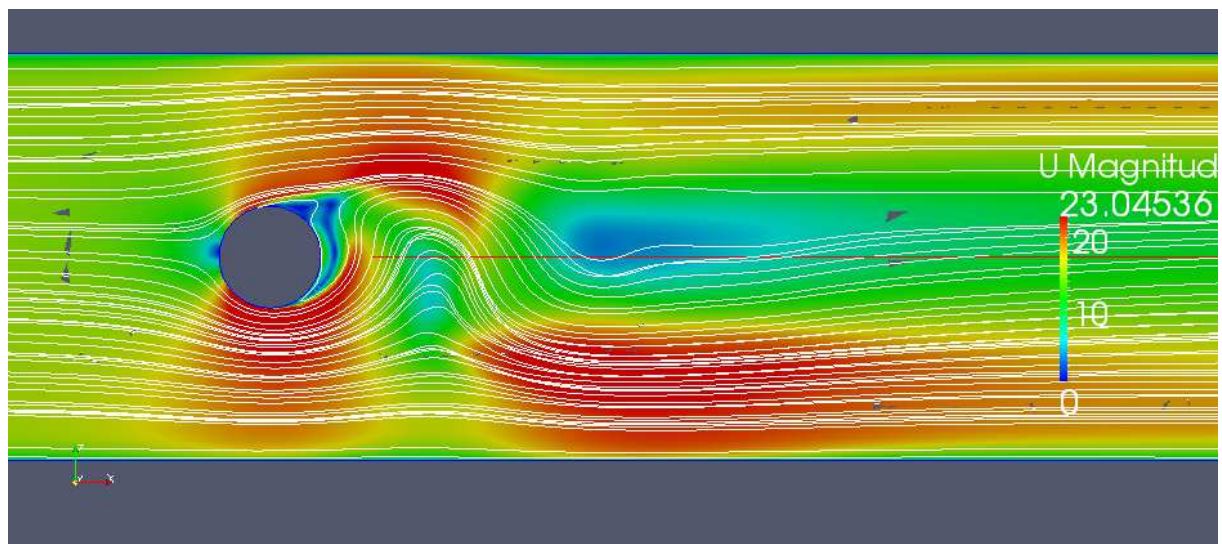


Abbildung 22: Fortgeschrittene Entwicklung des Strömungsfeldes mit $90 < Re < 150$

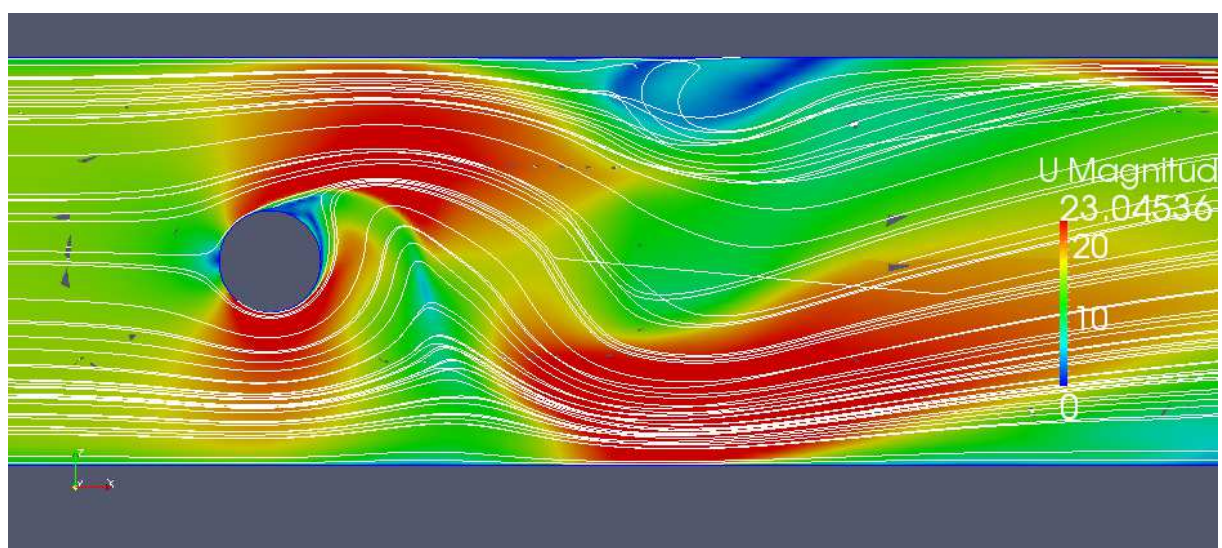


Abbildung 23: Voll ausgebildetes Strömungsfeld der Zylindersimulation

3.4. Transiente Simulation mit Partikelinjektion

Das so erhaltene Strömungsfeld der zeitinvarianten Simulation kann im folgendem als Initialisierung der transienten Simulation mit Partikelinjektion verwendet werden, was zu einer schnelleren Residualkonvergenz und somit zu einem ressourcensparendem Erhalt von Ergebnissen führt. Die steady state Simulation wurde nach Auswertung der Residualplots nach 2000 Iterationsschritten beendet. Bevor die Partikelinjektion in der Simulationsumgebung stattfindet wird eine transiente Vorlaufszeit von 0.5 Sekunden mit

einer Schrittweite von 0.0001 Sekunden simuliert, damit sich das Strömungsfeld dementsprechend zeitabhängig ausbilden kann. Dies ist aufgrund der herrschenden Reynold-Zahlen und der entstehende Kármánsche Wirbelstraße notwendig. Die Partikelinjektion findet nach besagten 0.5 Sekunden statt und hält über 1 Sekunde an. Im Darauf folgenden dauert die Simulation 0.2 Sekunde, innerhalb jener alle injezierten und nicht abgelagerten Partikel den Simulationsbereich wieder verlassen haben.

$$Simulationsdauer = 0.5_{vorlauf} + 1_{injekt} + 0.2_{nachlauf} = 1.7sec$$

3.4.1. Lagrangian Partikel Modell

Zur Simulation von Eispartikel in einem Strömungsfeld wird das Lagrangian Partikelmodell verwendet. Mit der Anwendung des zweiten Newtonsche Gesetzes $F = m * a$ kann die kinetische Energie eines sich translatorisch bewegendes Partikels ausgedrückt werden zu:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_{body} + F_{surface} + F_{collision} \quad (3.7)$$

Hierbei symbolisiert

- m_p die Masse und v_p die lineare Geschwindigkeit des Partikels p .
- F_{body} sämtliche auf das Partikel einwirkende Volumskräfte wie z.B. Gravitation, oder elektromagnetische Kräfte.

- $F_{surface}$ alle äußerlich auf die Partikeloberfläche wirkende Kräfte wie z.B. Widerstandskraft der umgebenden Phase
- $F_{collision}$ die Kraft zweier kollidierenden Partikel

Durch eine Division der Gleichung 3.7 mit m_p lässt sie sich umformen zu

$$\frac{dv_p}{dt} = F_{drag} + F_p \quad (3.8)$$

Für kugelförmige Partikel lässt sich die Widerstandskraft F_{drag} berechnen als

$$F_{drag} = -\frac{6C_D\rho_c|V_p|V_p}{8d_p\rho_p} \quad (3.9)$$

Die Dichte eines einzelnen Partikels wird beschrieben mit ρ_p . C_D ist der Widerstandskoeffizient einer Kugel (sphereDrag), welcher von der Reynolds Zahl des Partikels Re_p abhängt. Diese ist definiert als

$$Re_p = \frac{\rho_c|V_p|d_p}{\mu_c} \quad (3.10)$$

Hierbei sind

- ρ_c die Dichte und μ_c die dynamische Viskosität des umgebenden Fluides.
- d_p der Partikeldurchmesser
- V_p die Relativgeschwindigkeit des Partikels gegenüber der Fluidgeschwindigkeit und wird erhalten aus der Differenz des globalen Geschwindigkeitsvektors v_p und der Fluidgeschwindigkeit U_c .

$$V_p = v_p - U_c \quad (3.11)$$

Alle weiteren äußerlich angreifenden Kräfte sind im Term F_p zusammengefasst wie z.B. Gravitationskraft g . F_p kann für jene ausgedrückt werden zu

$$F_p = g(1 - \frac{\rho_c}{\rho_p}) \quad (3.12)$$

Sämtliche physikalischen Parameter welche der Partikelmodellierung dienen sind im constant Ordner der Simulation unter kinematicCloudProperties zu definieren. Ein Auszug aus der Zylindersimulation soll die Herangehensweise verdeutlichen.

```
object kinematicCloudProperties;
}

active true;

DragModel SphereDrag;
DispersionModel StochasticDispersionIcoRAS;
PatchInteractionModel LocalInteraction;

coupled false;

constantProperties
{
  minParticleMass minParticleMass [ 1 0 0 0 0 ] 1e-15;
  rho0 rho0 [ 1 -3 0 0 0 ] 916.7;
  rhoMin rhoMin [ 1 -3 0 0 0 ] 1e-15;
}
```

PatchInteractionModel: Hier kann eine lokale Selektierung der Wandinteraktionsmodelle mit dem aufprallenden Partikel getroffen werden. Diese können entweder als stick, rebound, oder escape definiert werden und beschreiben das Partikelverhalten nach Interaktion der Oberflächenfaces wie:

- Stick: Die Partikelgeschwindigkeit wird unmittelbar nach Oberflächenberührung zu Null.
- Escape: Das Partikel wird aus der Simulationsumgebung nach Oberflächenberührung entfernt.
- Rebound: Das Partikel prallt mit einem neuen Geschwindigkeitsvektor von der Oberfläche ab. Diese wird berechnet mit

$$v_p = (1 - COF)v_{pt} - (COR)v_{pn} \quad (3.7)$$

COF und COR repräsentieren hierbei Reibungskoeffizient und Elastizitätsfaktor der Oberfläche des getroffenen Objektes. v_{pt} und v_{pn} repräsentieren die Tangential- bzw. Normalgeschwindigkeitskomponente des Partikels vor dem Aufprall.

```

LocalInteractionCoeffs
{
    patches
    (
        WindTunnel_small_BOTTOM
        {
            type stick;
        }

        WindTunnel_small_UPPERWALL
        {
            type stick;
        }

        cylinder25mm_cylinder
        {
            type stick;
        }

    );
}

StandardWallInteractionCoeffs
{
    type stick;
}

```

Für die Eisablagerung wurde für alle Geometrien das Wandinteraktionsmodell `stick` gewählt, was für den anhaftenden Massenanteil eines Partikels gilt. Die verbleibende Partikelmasse, sofern der Winkel θ einen Wert $\theta \neq 0$ einnimmt, prallt von der Oberfläche ab und wird wieder als verkleinertes Eispartikel in der Simulation miteinbezogen. Unter einem gewissen Minimum wird das Restpartikel aus der Simulationsumgebung genommen und an die Oberfläche gebunden (`stick`), um Endlosschleifen von Massenaufspaltung zu unterbinden. Da das Simulationsnetz keine dynamische Adaptierung der sich verändernden Oberflächengeometrie vollzieht, wird das Strömungsfeld auch nicht von der angelagerten Partikelmasse beeinflusst.

`Coupled` gibt an, ob das Partikel Einfluss auf das Trägerfluid ausübt, oder nur von der Strömung als solches einfach mitgenommen wird.

`constantProperties` enthält alle Partikeleigenschaften wie Dichte `roh0` und die minimalen Partikelmasse sowie Dichte nach welcher das Partikel aus der Simulation genommen wird.

Da die Partikel zellgrenzübergreifend agieren und sich nicht stets auf einem Knotenpunkt des Netzes befinden, müssen Parameter wie Geschwindigkeitsvektor U des Strömungsfluides an

der aktuellen Stelle des Partikels, dynamische Viskosität μ , oder der Druck p auf eine Stützstelle interpoliert werden. `Cell` bewirkt dabei, dass der aktuelle Wert eines Feldes an einer beliebigen Position P in der betrachteten Zelle in den Zellmittelpunkt C verschoben wird.

```
interpolationSchemes
{
  p cell;
  Cp cell;
  T cell;
  mu cell;
  U cellPointFace;
  rho cell;
}
```

Eine genauere Interpolationsmethode stellt `cellPointFace` dar. Befindet sich der Punkt P auf einer Face der Zelle, so wird sie in Dreiecke unterteilt in dessen Fläche sich P befindet. Eckpunkte sind dabei der Facemittelpunkt F und zwei weitere beliebige Eckpunkte $P1$ und $P2$. Mithilfe von Gewichtungsfaktoren ($u \ v \ w$) wird folglich der Wert an der Stelle P auf jene drei Punkte anteilmäßig interpoliert. Befindet sich P nicht auf einer Face, so wird ein Tetraeder mit einem Facedreieck und dem Zellmittelpunkt C aufgespannt auf dessen Faces sich P befindet und wieder anteilmäßig auf die drei Punkte interpoliert. Trifft dies ebenfalls nicht zu, so wird die nächstliegende Face zur Interpolation herangezogen. Diese Herangehensweise ist in Abbildung 24 verdeutlicht.

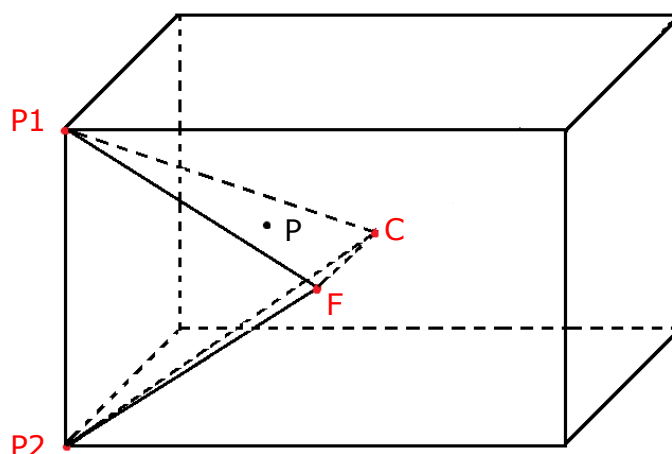


Abbildung 24: Interpolationsmethode `cellPointFace`

Die Eulersche-Integrationsmethode (Linearisierung an jeweiliger Stützstelle) wird zur Berechnung der lokalen Partikelgeschwindigkeit U verwendet.

```

integrationSchemes
{
    U Euler;
}

particleForces
{
    virtualMass no;
    pressureGradient yes;
    gravity yes;
}

```

Zur Simulation der von den Partikeln erzeugten Turbulenzen wird das Dispersionsmodell StochasticDispersionIcoRAS verwendet. Um eine zufallsorientierte Partikelinjektion im Einlassbereich zu erhalten, wurde ein eigens entwickelter Algorithmus verwendet, welcher innerhalb definierter Grenzen die Partikelinjektion im Zellkern zufällig ausgewählter Zellen veranlasst. Für einen möglichen Vergleich zu Eiskanaltests wurden die Partikelparameter entsprechend festgelegt mit einem mittlerer Partikeldurchmesser $MVD = 40\mu m$ und einer Partikeldichte $LWC = 10 \frac{g}{m^3}$. Aufgrund der niederen Temperaturen von $T = -20^\circ C$ und der möglichen praktischen Umsetzung im Eiskanal werden die Partikel bestehend aus reinem Eis mit nur einem Aggregatzustand des festen Phase betrachtet. Mit der Dichte von Eis $\rho_{eis} = 0.9167 \frac{g}{m^3}$ und dem mittlere Partikelradius $r_p = 20\mu m$ lässt sich das Partikelvolumen $V_{particel}$ bestimmen zu:

$$V_{particel} = \frac{4}{3} r_p^3 \pi = \frac{4}{3} (20 * 10^{-6})^3 \pi = 3.3510 * 10^{-14} m^3$$

Die Partikelmasse ergibt sich dementsprechend zu:

$$m_{particel} = V_{particel} * \rho_{eis} = 3.3510 * 10^{-14} * 0.9167 = 3.0718 * 10^{-14} g$$

Für eine Einlassfläche von $A = 0.1 * 0.06 = 0.006 m^2$ und einer Partikelgeschwindigkeit $V_p = 15 \frac{m}{s}$ ergibt sich somit eine Injektionsrate von

$$\text{Injektionsrate} = V_p A * LWC = 15 * 0.006 * 10 = 0.9 \frac{g}{s}$$

und eine benötigte Partikelanzahl von

$$\text{Partikelanzahl} = \text{Injektionsrate} * m_{\text{particel}} = 0.9 * 3.0718 * 10^{-14} \sim 2.8 * 10^{-14} \frac{\text{particel}}{\text{s}}$$

4. Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die erhaltenen Ergebnisse der CFD-Simulation von Eisablagerung an einem einzelnen Drahtfilament und an einem Draht-Kreuz, bestehend aus zwei sich durchdringenden Drahtfilamenten, gezeigt.

4.1. Simulation eines Drahtsegments

Wie bereits beschrieben, wurde der transienten Strömungssimulation eine zeitunabhängige (steady state) Simulation vorangestellt, um das Konvergenzverhalten der Residuen zu beschleunigen. Um eine transiente Partikelsimulation zu ermöglichen, musste Verschachtelung des transienten Solvers mit dem Partikelsolvers erfolgen. Eine hintereinander gereichte Lösung hätte ansonsten zur Folge, dass das Strömungsfeld zwar korrekt berechnet, die Partikelsimulation sich jedoch nur auf ein einzelnes Strömungsfeld eines Zeitschrittes beziehen würde und somit als steady state behandelt wird. Ein Beispiel hierfür kann in Abbildung 25 gesehen werden.

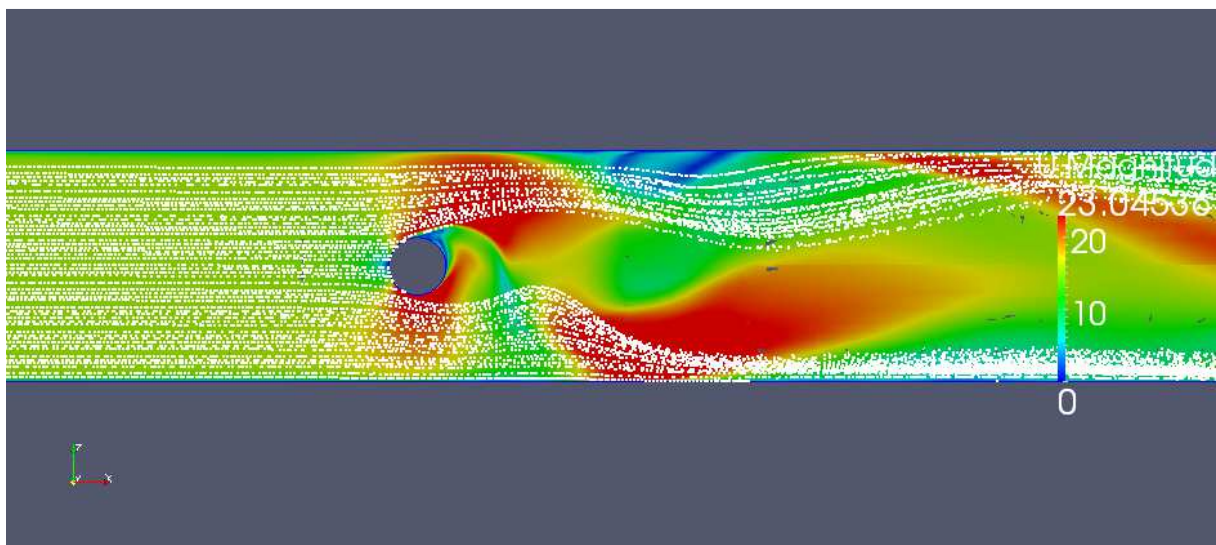


Abbildung 25: Geschwindigkeitsfeld mit steady-state Partikelsimulation.

Die sequenziell abwechselnde Lösung von Strömungsberechnung und Partikelsimulation innerhalb jedes Zeitschrittes erlaubt eine zeitabhängige Partikelsimulation, welche dem transienten Strömungsfeld exakt folgt. Dies ist in Abbildung 26 dargestellt. Aufgrund der Massenträgheit der Partikel ist das anfänglich verzögerte Fließverhalten in Bezug zur herrschenden Strömung gut ersichtlich. Dieses passt sich jedoch nach wenigen Perioden dem Strömungsfeld des Trägerfluides an. Die unterschiedliche Beschleunigung der einzelnen Partikel wirkt sich auf deren Strömungsverhalten aus. Einzelne Partikel werden so in den direkt hinter dem Zylinder stehenden Nachlauf geworfen.

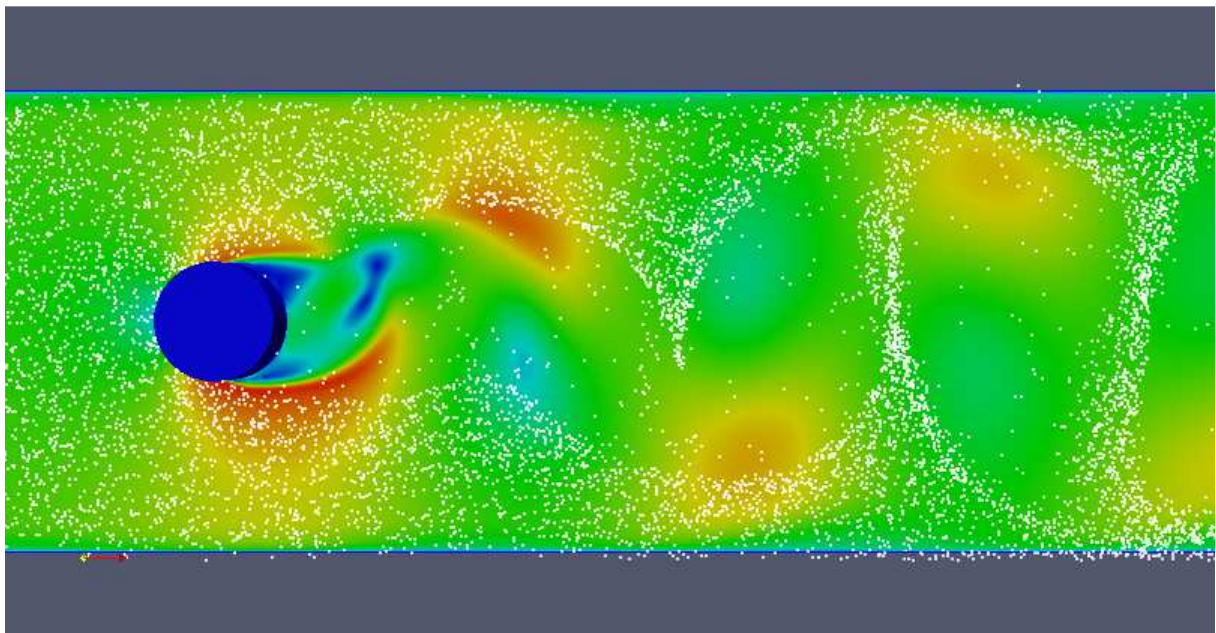


Abbildung 26: Transiente Partikelsimulation

Eine längere Betrachtung der Partikelströmung zeigt deutlich das periodische Einschwingen von trägen Eisteilchen zum Strömungsverhalten des Trägerfluides Luft. Die zuvor berechnete Ablösefrequenz der Kármánschen-Wirbelstrasse von 120Hz ist in Abbildung 27 bei herrschender Strömungsgeschwindigkeit $u = 15 \frac{m}{s}$ und einer Nachlauflänge von $l_{nach} = 1m$ gut ersichtlich.

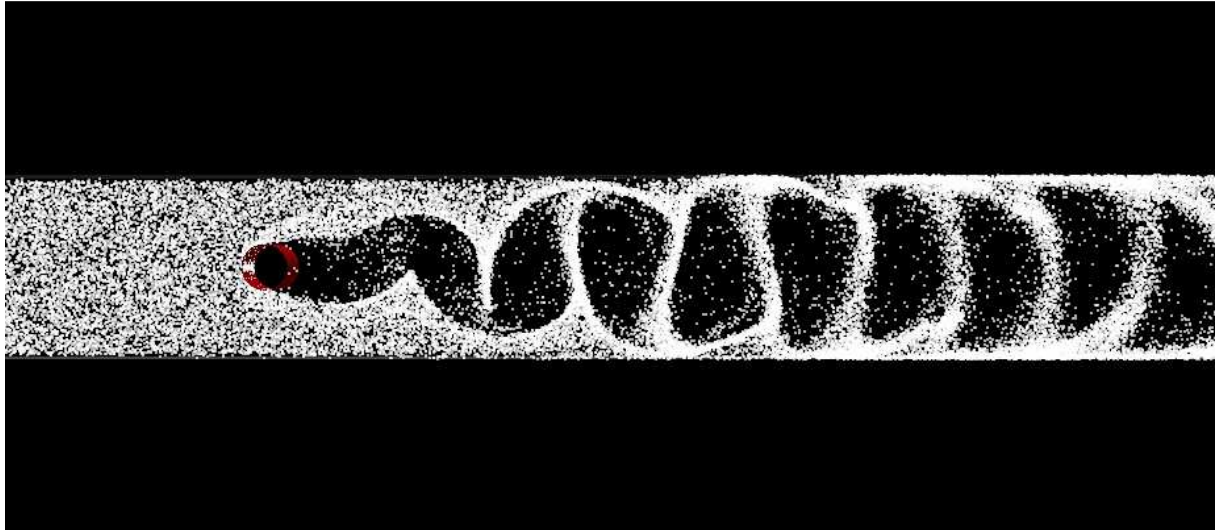


Abbildung 27: Periodisches Einschwingen der Partikelverteilung auf Strömungsfeld des Trägerfluides

Das ursprüngliche Injektionsmodell von Partikeln, welche zeitgleich in den Zellkernen des Einlassbereiches an das Trägerfluid übergeben wurden, zeigt eine anfängliche systematische Partikelverteilung, welche jedoch durch das auf die Partikel wirkende Dispersionsmodell für die herrschenden Turbulenzen nach einem Viertel der Vorlauflänge zu einer völlig unregelmäßigen Verteilung führt. Siehe Abbildung 28.

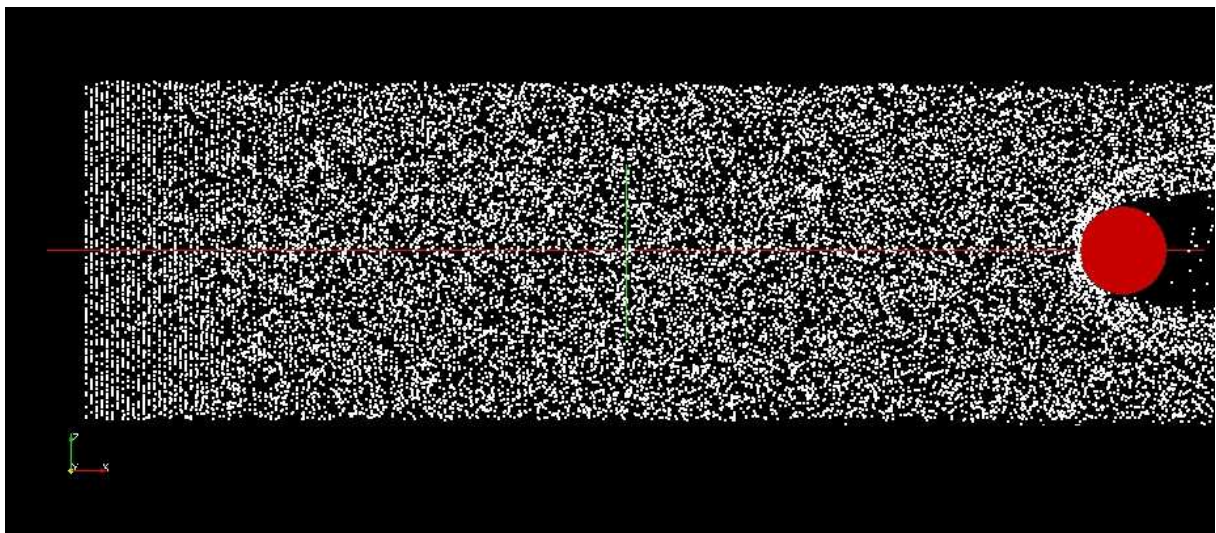


Abbildung 28: Symetrie der Partikelverteilung im Einlassbereich

Um der zufälligen Partikelinjektion gerecht zu werden und somit der anfänglich symmetrischen Partikelverteilung entgegenzuwirken, wurde ein Injektionsmodell entworfen, welches eine zufällig Partikelinjektion im dreidimensionalen Raum des Einlassbereiches erlaubt. Die symmetrische Verteilung in Fließrichtung kann so bereits am Einlass verhindert werden. Die zufällige Partikelinjektion wird aus der Draufsicht des Einlasses in Richtung der

Fluidströmung in Abbildung 29 gezeigt. Die erste Partikelinjektion ist auf der linken Seite ersichtlich, während auf der rechten Seite die Verteilung nach einigen erfolgten Injektionszyklen gezeigt wird.

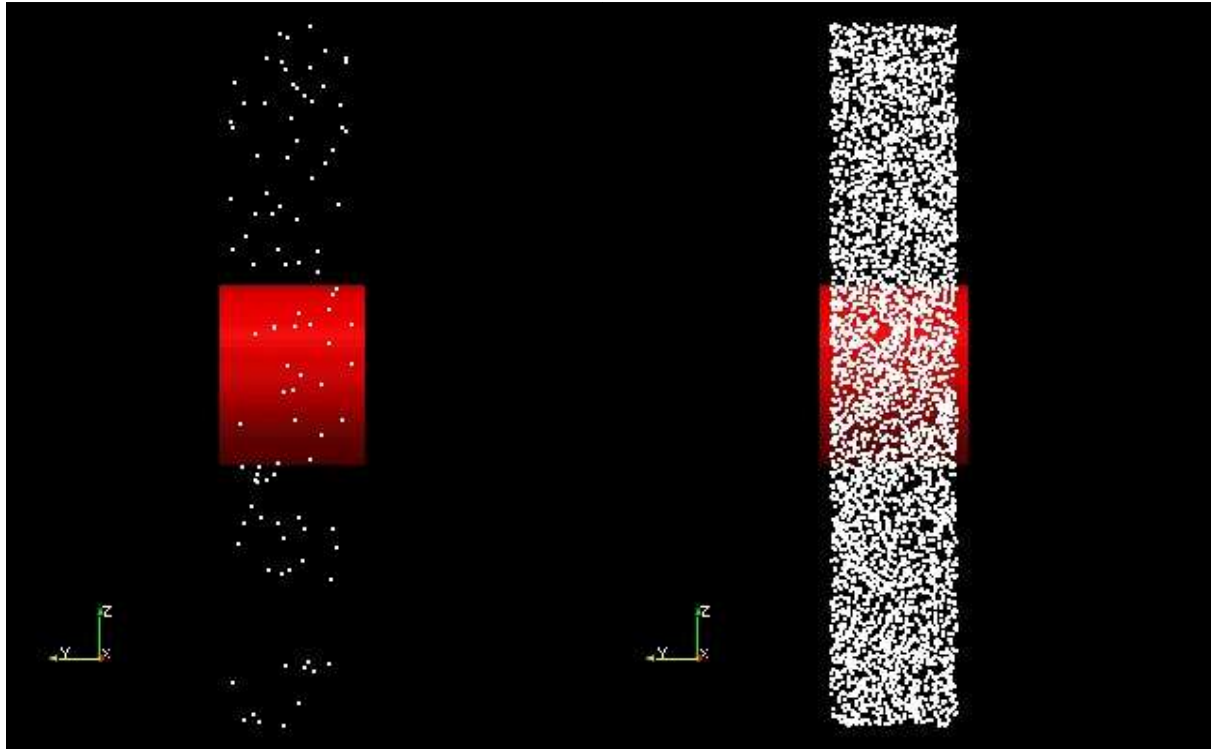


Abbildung 29: Zufallsbasierende Generierung der Partikelinjektion aus der Perspektive der Einlassebene

Nach einer 1.0 Sekunden langen Simulation der Ablagerung von Partikeln an dem Zylinder mit einem Durchmesser von $D = 25\text{mm}$, ergibt sich eine lokal maximal angelagerte Eisdicke von ca. $20\mu\text{m}$. Der im Ablagerungsgesetz enthaltene σ_0 Werte wurde dabei auf einen Wert von $\sigma_0 = 0.5$ gesetzt, was die Annahme einer 50% Ablagerung bei frontalem Partikelaufrall widerspiegelt. Im Bereich des Staupunktes fällt die Ablagerung am höchsten aus und flacht aufgrund der sich mit fortschreitender Lauflänge verkleinernden Oberflächennormalkomponente der Partikelgeschwindigkeit ab. Dabei sind die einzelnen Faces der Zylindergeometrie gut in Abbildung 30 erkennbar.

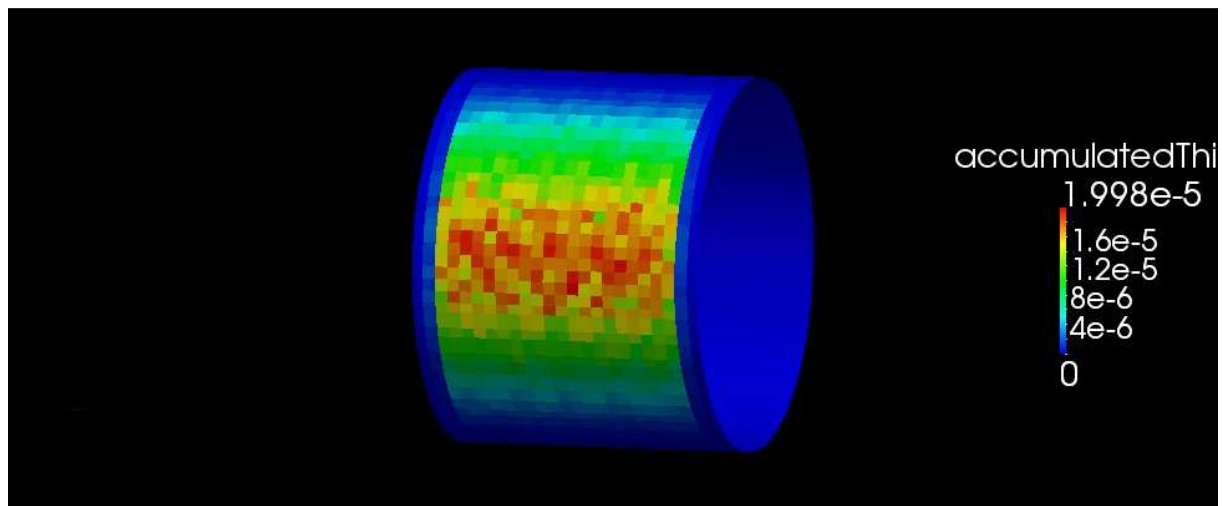


Abbildung 30: Abgelagerte Eisdicke pro Zelle nach 1 Sekunde ausgesetztem Partikelbeschuss

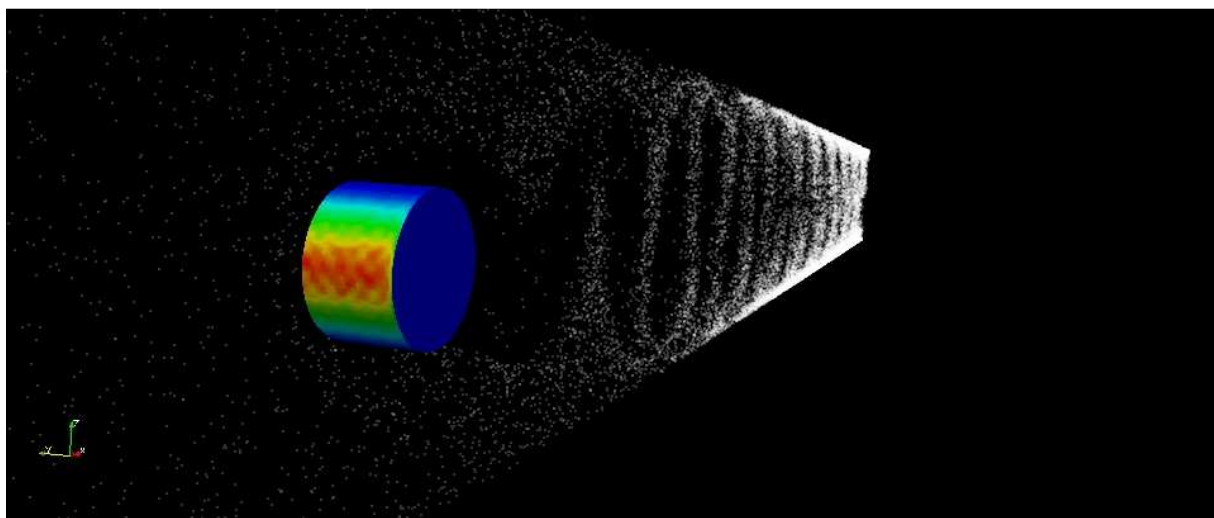


Abbildung 31: Eisablagerungssimulation mit Kármánscher-Wirbelstrasse im Nachlauf

4.2. Simulation eines Drahtkreuzes

Nach erfolgreicher Simulation von Eisablagerung am Testzylinder mit einem Durchmesser von $D = 25\text{mm}$ und der Validierung des Sigma-Gesetzes wird ein Gittersegment des Rückhaltegitters simuliert. Die Maschenweite des von Airbus installierten Rückhaltegitters beträgt $l = 15\text{mm}$ mit einem Drahtdurchmesser von 1.1mm . Die Simulation des Rückhaltegitters mit einem Durchmesser von 160mm wird auf ein einzelnes Kreuzsegment vereinfacht, von welchem aus auf das Eisablagerungsverhalten des gesamten Gitters rückgeschlossen werden kann.

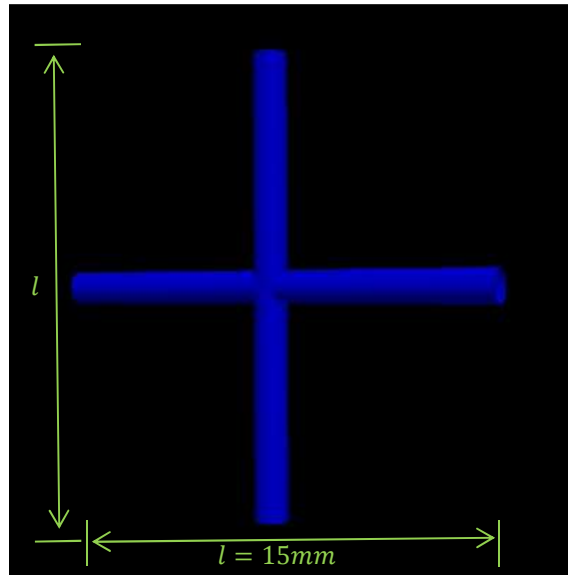


Abbildung 32: Geometrie des Gitterkreuzes

Das Netz wurde wie bei der Testzylindersimulation durch fiktiv vorhandene Quader bestehend aus einem Einlass, einem Auslass und vier umschließenden Begrenzungsflächen, welche als Symmetrieebene definiert sind, erstellt. In unmittelbarer Nähe des Kreuzes wurden zwei Zellverfeinerungszonen entlang der Drähte erstellt, um eine lokal höhere Zelldichte vor und nach den intersektierenden Zylindern zu ermöglichen, ohne die Zellanzahl des Gesamtnetzes überproportional zu erhöhen. Eine Surfacelayeranzahl von 5 Lagen wurde wie am Testzylinder generiert um eine höhere Auflösung der Grenzschicht zu erlauben. Zu den Symmetrieebenen hin wurde insgesamt eine doppelte Zellverfeinerung der ursprünglichen Zellgröße erstellt, um ebenfalls eine exaktere Auflösung des Strömungsfeldes zu erhalten. Das Netz um dem Drahtkreuz und eine detaillierter Auflösung der Surfacelayer wird in Abbildung 33 und 34 gezeigt.

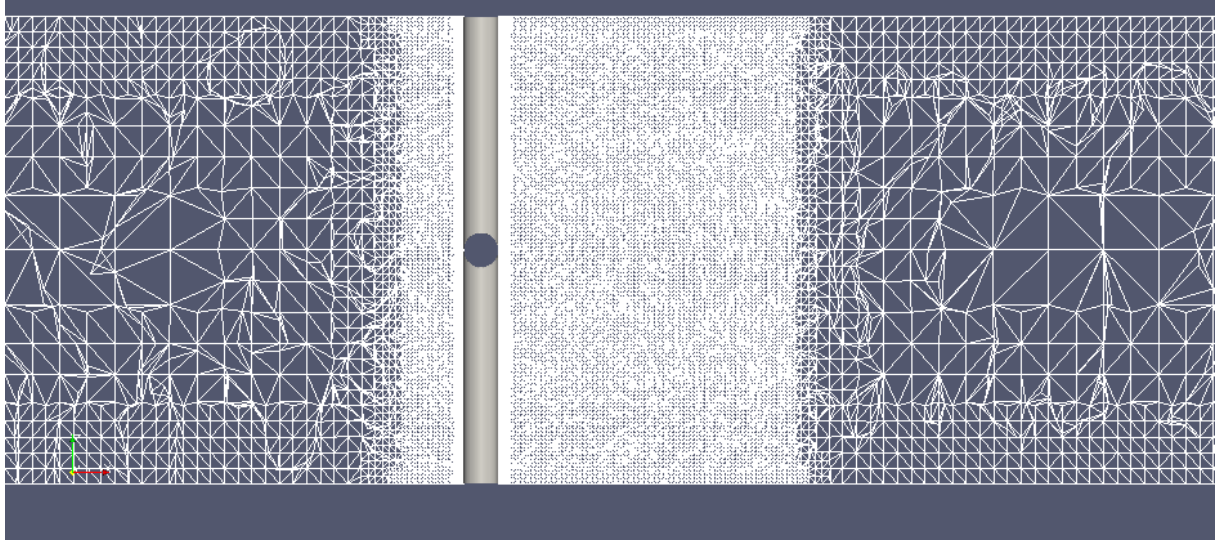


Abbildung 33: Das generierte Netz der Drahtkreuzsimulation

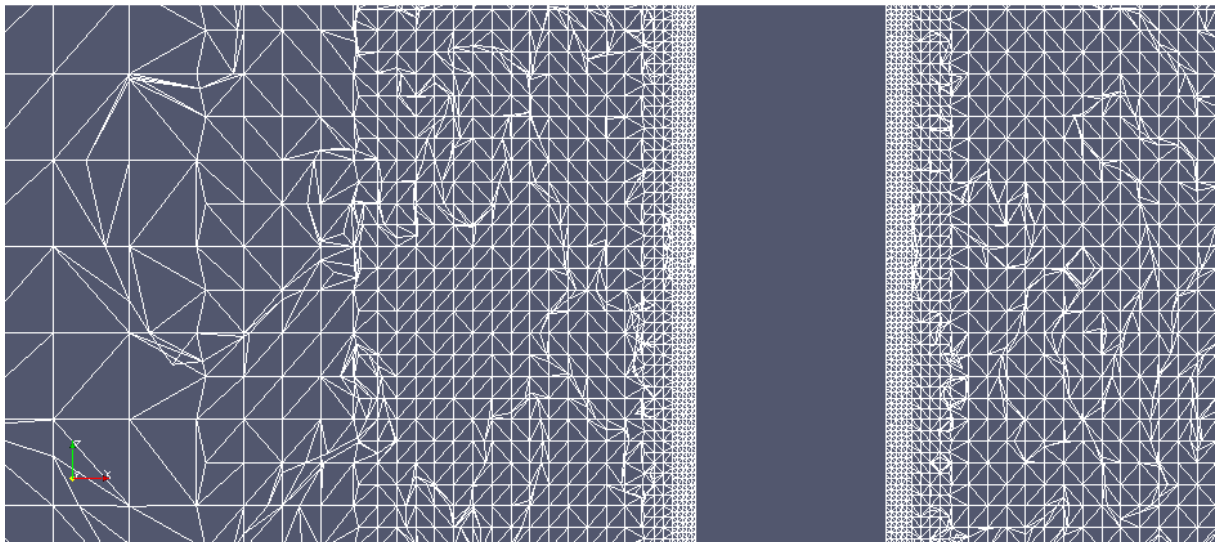


Abbildung 34: Netz des Drahtkreuzes im Detail

Mit den identen Fluidparametern, wie sie zuvor in der aufgesetzten der Zylindersimulation angewandt wurden, welche eine Strömungsgeschwindigkeit von $V = 15 \frac{m}{s}$, Luft bei $-20^{\circ}C$ als Trägermaterial, sowie das Turbulenzmodell kOmegaSST umfassten, wurde eine zunächst zeitinvariante und darauffolgend eine transiente Simulation gestartet. Trotz des kleineren Zylinderdurchmessers und somit geringeren Reynolds-Zahl bildet sich nach voll entwickeltem Strömungsfeld eine Kármánsche-Wirbelstrasse an den äußeren Enden des Kreuzes. Hierbei ist die Ablösefrequenz gegeben durch

$$f = \frac{Sr * u}{d} = \frac{0.2 * 15}{0.0011} = 2727 \text{ Hz}$$

Bei einer Reynolds-Zahl von

$$Re = \frac{u * d}{\nu} = \frac{15 * 0.0011}{11.6116 * 10^{-6}} \sim 1421$$

Durch Interferenz der beiden Drähte ergibt sich ein Strömungsfeld mit unterschiedlicher Druckverteilung im Nachlauf, wie in Abbildung 35 gezeigt.

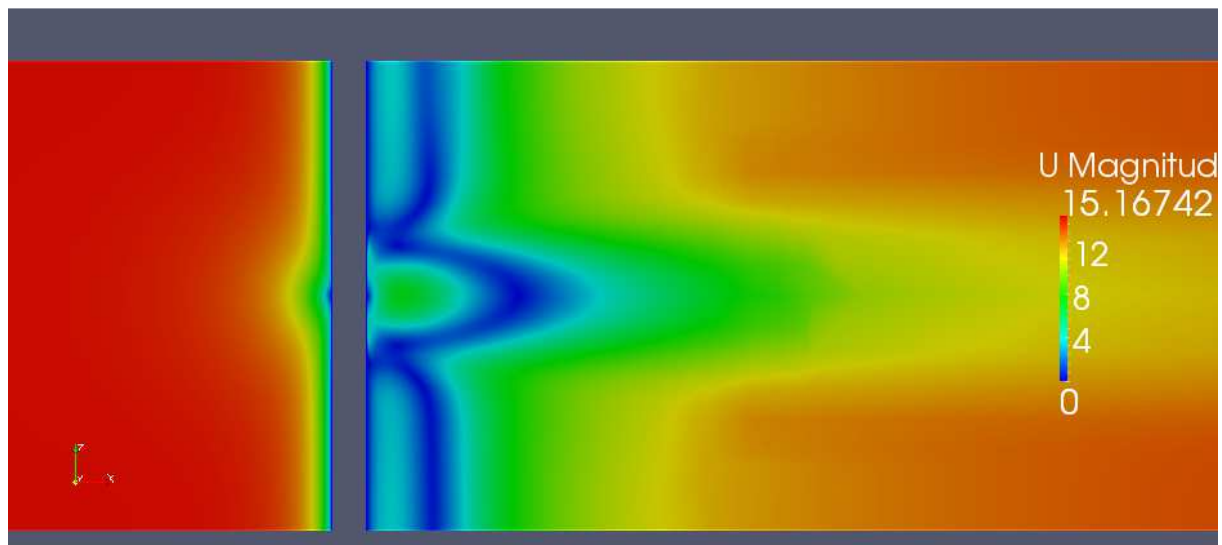


Abbildung 35: Geschwindigkeitsfeld des transient simulierten Gitterkreuzes

Die Entwicklung einer Kármánschen-Wirbelstrasse kann an den äußeren Enden des Kreuzes festgestellt werden. Diese ist in Abbildung 36 gezeigt.

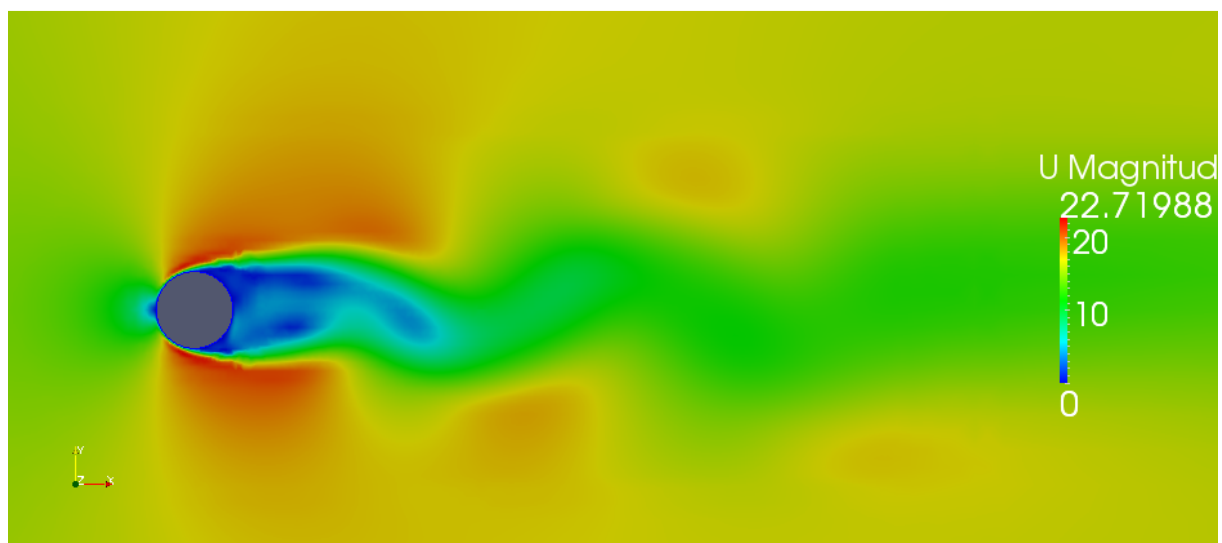


Abbildung 36: Zeitabhängiges Strömungsfeld an den Enden des Gitterkreuzes

Wie in Abbildung 37 und 38 gezeigt, lagert sich nach einer Partikelinjektionsdauer von 1 Sekunde lokal eine Eisschicht von bis zu 0.2mm ab. Die erhöhte Ablagerung am unterem Kreuzende rührt von dem wirkenden Gravitationsfeld her.

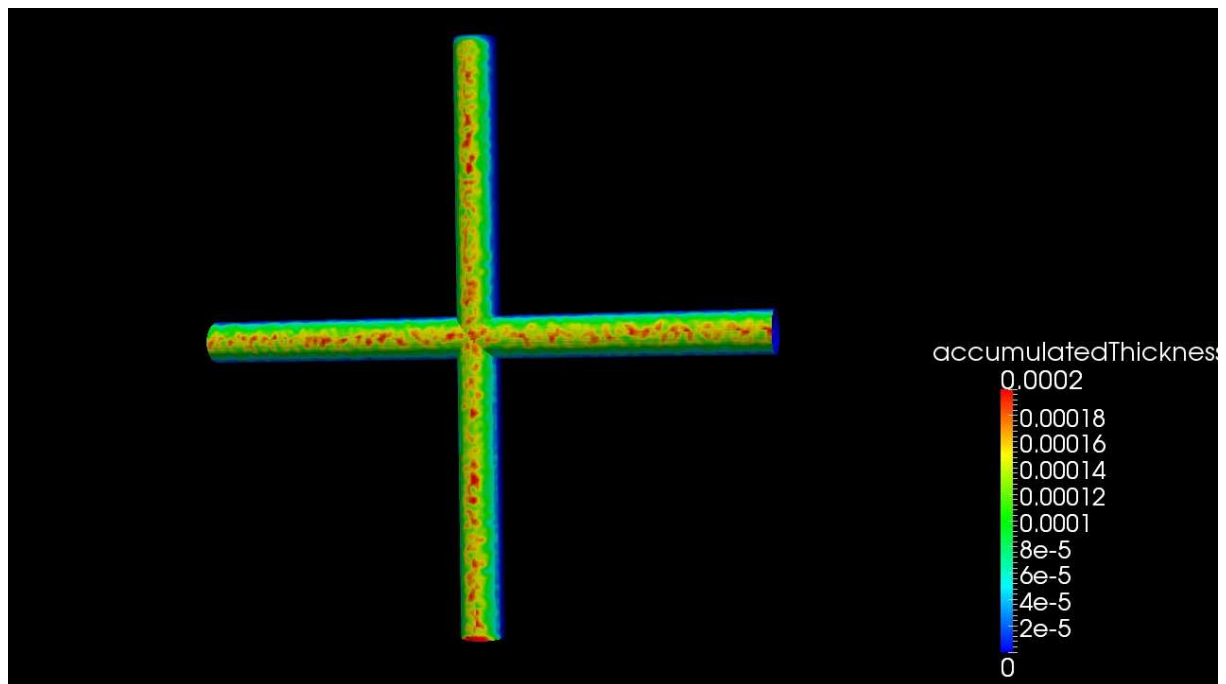


Abbildung 37: Angelagerte Eisdicke pro Zelle nach 1 Sekunden langem Beschuss

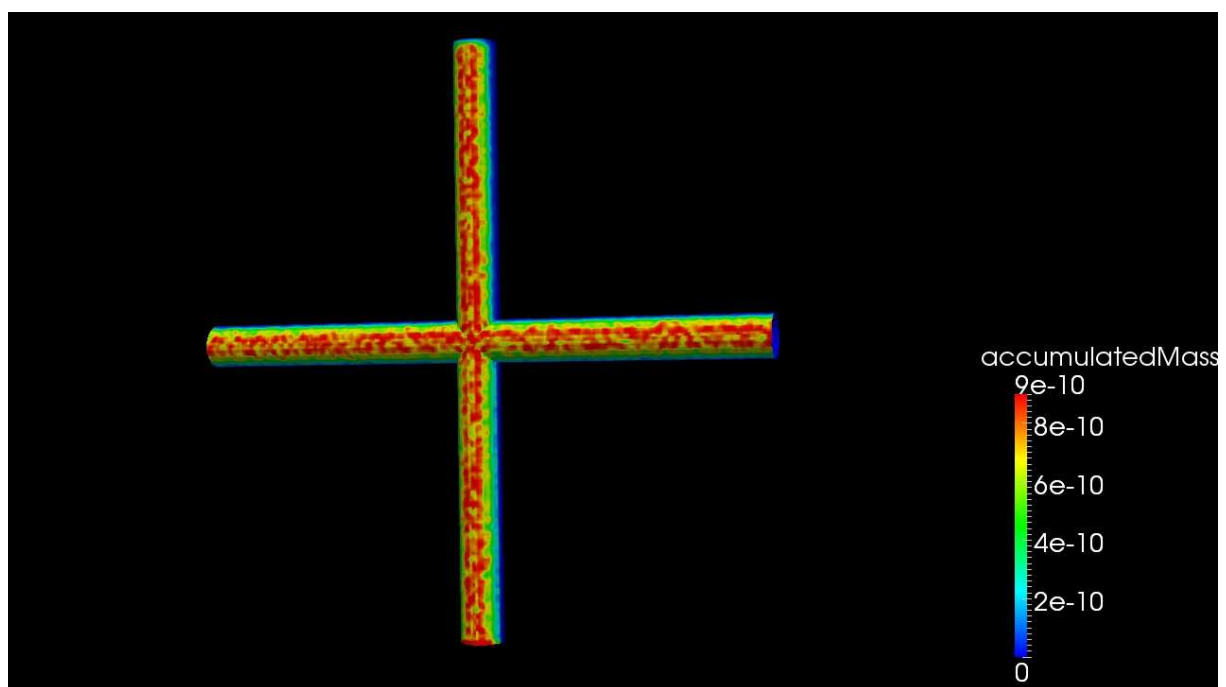


Abbildung 38: Abgelagerte Eismasse am Gitterkreuz

5. Diskussion

Die erstellte Eisablagerungssimulation am Drahtkreuz zeigt, dass sich unter den gegebenen Strömungsbedingungen von $V = 15 \frac{m}{s}$ und $T = -20^\circ C$ des Trägerfluides Luft und einer Ablagerungsrate $\sigma_0 = 0.5$ sich innerhalb einer Sekunde eine lokale Eisdicke von bis zu 0.2 mm im Staupunkt der Drahtkreuzsegmente ablagert. Die vorherrschende Reynoldszahl von $Re = 1421$ und das zeitlich fluktuierende Strömungsfeld in Form von Ausbildung einer Kármánschen Wirbelstrasse an den Kreuzenden nötigt zu einem transienten Lösungsverfahren der Kreuzsimulation. In gemachten Simulationen wurde eine einmalige Netzgenerierung angewandt, welche für die gesamte Ablagerungssimulation beibehalten wurde. Dies führt zu dem Effekt, dass abgelagerte Masse pro Zelle zwar erfasst wird, jedoch die verändernde Oberflächenstruktur keiner Auswirkung auf das Strömungsfeld ausübt. Eine größere Geometrieänderung innerhalb einer Simulation bedarf einer zyklischen Rechennetzadaption an die sich verändernde Oberflächengestalt, um der sich ändernden Strömung des Trägerfluides gerecht zu werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden zwei computergestützte CFD Simulationen von Vereisung eines Drahtgitters erarbeitet und durchgeführt. Motivation dafür ist eine neue Klimatisierungsmethode von am Boden befindlichen Passagiermaschinen, welche die Installation eines Rückhaltegitters an der flugzeugseitigen Schnittstelle als Präventivmaßnahme gegen Fremdkörperinfiltration erforderlich machte. Für Validierungszwecke des angewandten Eisablagerungsgesetzes, welches aus Forschungsarbeiten der Universität von Hull an Hochspannungsleitungen hervorgeht, wurde das Ablagerungsverhalten an einem einzelnen Zylinder betrachtet. Die nachfolgende Gittersimulation wurde auf ein Drahtkreuz beschränkt, um auf Basis erhaltener Ergebnisse auf die gesamte Eisablagerung schießen zu können. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass sich nach einer einsekündigen Partikelinjektion eine Eisdicke von bis zu 0.2mm abgelagert.

Für zukünftige Simulationen mit Partikelablagerung wäre eine kontinuierliche Netzanpassung an die sich verändernde Geometrie vorgesehen, um das Einsatzspektrum auf sich stark veränderlichen Oberflächengeometrien zu erweitern. Die in dieser Simulation verwendeten Partikel fundieren in der Annahme, dass sie jeweils aus der festen Phase bestehen und eine kugelige Form aufweisen. Da unter realen Bedingungen eine Schneeflocke aus mehreren Phasen besteht und durch den Aufprall an einem Objekt ein Energietransport zwischen den Kollisionspartnern erfolgt, welcher zur Verflüssigung einer Schneeflocke führen kann, könnte dies in einem weiteren Projekt miteinbezogen werden. Für den Einsatz der Vereisungssimulation an z.B. Flügelvorderkanten, oder Triebwerkseinlässe wäre eine Simulation des Run-back Wassers von großem Interesse, da jenes eine essentielle Rolle in Flugzeugvereisung spielt.

Literatur

- [1] Lecheler, S., “Numerische Strömungssimulation, Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele“, 2. Auflage, Vieweg und Teubner Verlag, 2011.
- [2] Poots G. und Skelton P.L.I., “Simulation of wet-snow accretion by axial growth on a transmission line conductor“, Centre for Industrial Applied Mathematics, University of Hull, Hull, UK, 1993.
- [3] Hassler, W., “Heat transfer“, Skriptum, FH JOANNEUM – University of Applied Sciences, Graz, Österreich, 2013.
- [4] Hassler, W., “Numerische Berechnungsverfahren“, Skriptum, FH JOANNEUM – University of Applied Sciences, Graz, Österreich, 2013.
- [5] Ferziger, J.H., Peric M., “Numerische Strömungsmechanik“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2008.
- [6] “ICON FOAMpro the ICON CFD Service for Industry User Guide“, 6th edition, Icon Technology & Process Consulting Ltd., 2012.
- [7] Poots G. und Skelton P.L.I., “The effect of aerodynamic torque on the rotation of overhead line conductor during snow accretion“, Centre for Industrial Applied Mathematics, University of Hull, Hull, UK, 1993.
- [8] Eckelmann, H., “Messungen in flüssiger Medien mit Hitzdrahtgeräten“, Max Planck Institut für Strömungsforschung, 1975.