



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterthesis

Hannes Martens

Optimierung der Mischkammer einer Stahlwerksentstaubung

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Hannes Martens
Richard-Dehmel-Str. 25
22587 Hamburg
E-Mail: Hannes.Martens@haw-hamburg.de



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Hannes Martens

Matr.-Nr.: 1885529

Optimierung der Mischkammer einer Stahlwerksentstaubung

Masterthesis eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Maschinenbau Berechnung und Simulation
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Franz Vinnemeier

2. Prüfer: Dr.-Ing. Marc Hölling

in Zusammenarbeit mit:



ArcelorMittal Hamburg GmbH
Abteilung Prozesstechnologie
Dradenaustraße 33
21129 Hamburg
Germany

Abgabedatum: 02.10.2013

Kurzfassung

In der vorliegende Masterthesis wird die Entwicklung eines CFD- Modells zur Berechnung des Strömungsfeldes in der Mischkammer einer Stahlwerksentstaubungsanlage dokumentiert. Die Modellierung und Berechnung wird hierbei mit dem Open Source Tool OpenFOAM absolviert. Angefangen mit der Aufnahme des Istzustandes der Anlage, inklusive der Durchführung von Messkampagnen, wird systematisch das Berechnungsmodell aufgebaut. Neben der Netzerstellung mit dem Tool *snappyHexMesh* wird auf spezielle Probleme bei der Implementierung in OpenFOAM eingegangen. Das Resultat ist die Simulation des Istzustandes und die Validierung der Ergebnisse mit vorhandenen Messwerten an den Outlets. Es kann eine relative Übereinstimmung zu den vorhandenen Temperatur- Messdaten von bis zu 98 % je Outlet erreicht werden. Begründet in der komplexen Geometrie werden verschiedene Varianten hinsichtlich Geometrieapproximation und Randbedingungen aufgeführt. Die Ausbreitung des Strömungsfeldes in der Mischkammer kann nicht an der realen Anlage beobachtet werden, weshalb ein direkter Vergleich zur Simulation offen bleibt. Auf Basis der Simulation des Istzustandes werden im Anschluss verschiedene Ansätze zur Optimierung der Temperaturverteilung an den Outlets der Mischkammer untersucht. Resultierend werden Tendenzen aufgezeigt, welche Maßnahmen zusätzliche Mischeffekte zur Folge haben könnten.

This Masterthesis documents the development of a CFD-model for calculating the flowfield in the mixing chamber of a steelplant dedusting system. In this case the open source tool OpenFOAM is used as well for the modelling as for the calculation. After the documentation of the current condition including measurements, the simulation model ist build up scientifically. In addition to the discretization with the tool *snappyHexMesh* this thesis shows the special challenges using OpenFOAM. The result of this investigation is the simulation of the current condition and the validation with the measured values at the outlets. The relative correlation of the simulated and measured temperature values at the outlets can be estimated up to 98 %. Dealing with the complex geometry this paper shows different versions of the geometry approximation and the boundary conditions. The direct validation is not possible because there is still no way to visualize the real flowfield in the mixing chamber. Based on the simulation of the current condition the last chapter brings up some basic approaches to optimize the temperature dispersion at the outlets of the mixing chamber. Which devices could implicate the best additional mixing effects is shown as the final result.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen	vii
Formelzeichen	viii
1 Einleitung	1
2 Entstaubungsanlage CEAG	3
2.1 Funktionsbeschreibung	3
2.2 Geometrische Beschreibung	4
2.3 Ist- und Anlagenzustand	5
2.4 Erfassung und Auswertung von Messdaten	7
2.4.1 Daten aus dem Prozessleitsystem	9
2.4.2 Manuelle Messdatenerfassung	9
2.4.3 Volumenstromerfassung an den Dachkanälen Ofen drei und dem Kanal zur Gießseite	12
2.4.4 Messung der Spülluftmenge von den Filtern	13
3 OpenFOAM – The Open Source CFD – Toolbox	15
3.1 Vorstellung OpenFOAM	15
3.2 Aufbau und Vorgehen	15
3.2.1 Implementierung eines Netzes in OpenFOAM	16
3.2.2 Definition von Randbedingungen und Anfangsbedingungen	17
3.2.3 Angaben der numerischen Schemata im File <code>fvSchemes</code>	20
3.2.4 Angaben zur Lösung des Gleichungssystems im File <code>fvSolution</code>	21
3.2.5 Kontrolldatei der Rechnung <code>controlDict</code>	22
3.2.6 Festlegen thermodynamischer Parameter	22
3.2.7 Angaben zum Turbulenzmodell	22
3.2.8 Parallelisierung einer Berechnung	23
3.2.9 Starten einer Berechnung	24
3.2.10 Ausgabe von Residuen in OpenFOAM	25
3.3 Postprocessing in Paraview	25

4	CFD – Modell und Modellparameter	27
4.1	Systemgrenzen	27
4.2	Fehlertypen und Genauigkeit	27
4.2.1	Modellfehler	27
4.2.2	Diskretisierungsfehler	28
4.2.3	Iterationsfehler	29
4.2.4	Programmier- und Anwenderfehler	29
4.3	Geometrische Modelle	29
4.3.1	Voruntersuchung zur Approximation der Kettenvorhänge	29
4.3.2	Primärmodell-CEAG höchste Detailgenauigkeit	32
4.3.3	Sekundärmodell - CEAG im ideal gereinigten Zustand	34
4.3.4	Einfluss der Randbedingungen an den Outlets auf das Simulationsergebnis	34
4.3.5	Modellierung der Outlets	40
4.4	Mathematisches Modell	41
4.4.1	Zeitliche Diskretisierung und Klassifizierung	41
4.4.2	Kompressibilität	42
4.4.3	Thermodynamisches Fluidmodell	42
4.5	Randbedingungen und Strömungsparameter	42
4.6	Turbulente Strömungen und Turbulenzmodelle	45
4.6.1	Turbulenz und dessen Auswirkung	45
4.6.2	Turbulenzmodellierung in Wandnähe	46
4.6.3	$k-\varepsilon$ -Modell	47
4.6.4	$k-\omega$ -Modell	48
4.6.5	LES - Large Eddy Simulation	48
4.7	Netzerstellung	48
4.7.1	Netzerstellung mit dem OpenFOAM-Tool snappyHexMesh	49
4.7.2	Qualitätskriterien	58
5	CFD – Solver und numerische Methoden	63
5.1	Grundgleichungen der CFD	63
5.1.1	Konvektiver Transport	63
5.1.2	Diffusiver Transport	64
5.1.3	Behandlung des Quellterms	65
5.1.4	Gleichungssystem und Koeffizientenmatrix	65
5.2	Verfahren der Druck- Geschwindigkeits- Dichte- Kopplung	66

5.3	Solver in OpenFOAM	68
5.3.1	Solver für stationäre Rechnungen (<i>non transient</i>)	68
5.3.2	Der Solver rhoSimplecFoam	68
6	Analyse der Ergebnisse	69
6.1	Zusammenfassung der Simulationseinstellungen	69
6.2	Ergebnisse, Simulation des Istzustandes	69
6.2.1	Varianten und Validierung des Modells	71
6.3	Optimierung der saugseitigen Mischkammer	74
6.3.1	Drosselung der Gebläse zwei und drei	74
6.3.2	Berechnung des Sekundärmodells	76
6.3.3	Modifikation des Strömungsteilers (U-Boot)	76
6.3.4	Modifikationen in der saugseitigen Mischkammer	79
6.3.5	Analyse der optimierten Strömungsfelder	81
7	Zusammenfassung und Ausblick	86
8	Anhang	88
	Literatur	92

Abbildungsverzeichnis

2.1	Exemplarische Darstellung der CEAG–Funktionsweise	4
2.2	Übersicht der CEAG-Geometrie	5
2.3	Istzustand der saugseitigen Mischkammer	7
2.4	Istzustand am Strömungsteiler (U-Boot)	8
2.5	Kettenvorhang am Strömungsteiler (U-Boot)	8
2.6	Aufbau der Differenzdruckmessung an den Radialgebläsen der CEAG . .	11
2.7	Auszug Kennfeld der CEAG-Radialgebläse	12
2.8	Übersicht der Messstellen an den Dachkanälen im Bereich Ofen drei . . .	13
3.1	Übersicht der Case - Ordner - Struktur in OpenFOAM	16
3.2	Übersicht der Dateistruktur eines Netze in OpenFOAM	17
3.3	Subdomains nach der Dekomposition	24
4.1	Aufbau der Voruntersuchung zur Approximation der Kettenvorhänge . .	30
4.2	Übersicht des Temperaturfeldes der Voruntersuchung	31
4.3	Temperaturverteilung der Voruntersuchung im Fernfeld	32
4.4	Übersicht des primären Modells	33
4.5	Ausschnitt Primärmodell mit den approximierten Geometrien	33
4.6	Änderungen des Sekundärmodells	35
4.7	Übersicht der untersuchten Beispielgeometrie	35
4.8	Übersicht des Problems am Outlet	36
4.9	Übersicht der Ergebnisse beider Varianten	38
4.10	Schnitt im Fernfeld beider Varianten	38
4.11	Upwind–Verfahren erster und zweiter Ordnung im Vergleich	40
4.12	Übersicht der speziellen Behandlung der Outlets	41
4.13	Exemplarische Gegenüberstellung laminarer und turbulenter Mischeffekte	46
4.14	Vergleich der DNS und LES, [5]	49
4.15	Übersicht der erzeugten Multiblocknetzstruktur	52
4.16	Vergleich der Ergebnisnetze mit <i>snappyHexMesh</i> , 2D-Schnitt der Mischkammer	56

4.17	Ausschnitte des erzeugten Primärnetzes, Schnitt am Strömungsteiler . .	59
4.18	Ausschnitte des erzeugten Primärnetzes, Netzausschnitt mit Randschicht	59
4.19	Verzerrte Zellen der Randschicht am Strömungsteiler	61
4.20	Vergleich OpenFoam Version 2.1.x und 2.2.x	62
6.1	Residuenverlauf der Primärberechnung des Istzustandes	70
6.2	Temperaturverteilung an den Outlets - Variante 4	72
6.3	Temperaturfeld um die Heißgasleitung - Variante 1 und 2 (qualitativer Verlauf)	72
6.4	Temperaturfeld um die Heißgasleitung - Variante 3 und 4 (qualitativer Verlauf)	72
6.5	Temperaturfeld um die Heißgasleitung - Variante 5 und 6 (qualitativer Verlauf)	73
6.6	Temperaturfeld um die Heißgasleitung, bei fünfprozentiger Drosselung der Gesamt - Absaugleistung	76
6.7	Temperaturfeld in der ideal gereinigten Mischkammer	77
6.8	Original- und optimierte- Geometrie des Strömungsteilers	78
6.9	Temperaturfeld mit optimiertem Strömungsteiler	78
6.10	Temperaturfeld mit Original- Strömungsteiler	78
6.11	Heißgasumlenkung vor Gebläse eins mit optimiertem Strömungsteiler . .	79
6.12	Strömungsfeld der Variante A an Gebläse eins	80
6.13	Modifikation der Variante B im Einflussbereich von Gebläse eins und zwei	80
6.14	Modifikation der Variante B im Einflussbereich von Gebläse drei und vier	81
6.15	Strömungsfelder der Variante B im Einflussbereich von Gebläse eins . .	82
6.16	Temperaturfeld der Variante B im Einflussbereich von Gebläse eins und zwei	83
6.17	Strömungsfeld von k der Variante B im Einflussbereich von Gebläse drei und vier	83
6.18	Temperaturfeld der Variante B im Einflussbereich von Gebläse drei und vier	84
6.19	Übersicht des Strömungsfeldes der Variante B im Einflussbereich von Gebläse drei und vier	84

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht der Anschlusskanäle (Inlets/Outlets) der saugseitigen Mischkammer	6
2.2	Gebläseausgangs- und Heißgastemperatur, zehn Schmelzen im Überblick	9
2.3	Messergebnisse der Firma Venti Oelde	10
2.4	Volumenstrombestimmung aus Differenzdruckmessung	12
2.5	Übersicht der Messergebnisse an den Dachhauben im Bereich Ofen drei .	13
2.6	Übersicht der Messergebnisse an den Dachhauben Ofen 3	13
3.1	Exemplarische Übersicht verwendeter Randbedingungen in OpenFOAM	20
4.1	Randbedingungen und Parameter der Voruntersuchung	31
4.2	Übersicht der Inlets/Outlets und Einbauten des Primärmodells	34
4.3	Parameterstudie, Randbedingungen und Parameter der zwei Varianten .	37
4.4	Übersicht der primär verwendeten Randbedingungen	44
4.5	Vorgabe der Geschwindigkeit an den Outlets	45
4.6	Verwendete Tools zur Geometrie- und Netzerzeugung	50
4.7	Übersicht der Netzqualität des Primärnetzes in OpenFOAM	61
6.1	Übersicht wichtiger Rechenparameter	70
6.2	Vergleich der Mess- und CFD-Daten an den vier Gebläsen der CEAG .	73
6.3	Übersicht der Volumenströme bei gedrosselten Gebläsen zwei und drei (linear verteilt)	75
6.4	Übersicht der Massenströme bei gedrosselten Gebläsen zwei und drei . .	76
6.5	Vergleich der Temperaturverteilung der untersuchten Optimierungsansätze	85

Abkürzungen

1D	eindimensional
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
CEAG	Concordia Elektrizitäts - AG
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direkte Numerische Simulation
FEM	Finite - Elemente - Methode
FVM	Finite - Volumen - Methode
GAMG	Geometric - Algebraic Multi - Grid Solver
KV	Kontroll Volumen
LES	Large Eddy Simulation
MUSCL	Monotone Upstream - centered Schemes for Conservation Laws
OpenFOAM	Open Field Operation And Manipulation
QUICK	Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinectics
RA	Reduktions - Anlage
RANS	Reynolds - Averaged Navier - Stokes
RMS	Root Mean Square
SIMPLE	Semi - Implicit Method for Pressure - Linked Equations
SIMPLEC	Semi - Implicit Method for Pressure - Linked Equations - Consistent
SST	Menter's Shear Stress Transport
STEP	Standard For The Exchange Of Product Model Data
STL	Surface Tesselation Language
VTK	Visualization Toolkit

Formelzeichen, Symbole und Indizes

Formelzeichen, Symbole

A_s	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{1/2})$	Sutherland Koeffizient
a		Koeffizient für die Koeffizientenmatrix
A	m^2	Fläche
C_μ		Konstante des $k - \varepsilon$ - Modells
C_p	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Wärmekapazität
d	m	Durchmesser/Dicke
F		beliebige Funktion
f	Hz	Frequenz
H_f	kJ/kg	Schmelzwärme
h	J	Enthalpie
i		Laufvariable
k	m^2/s^2	turbulente kinetische Energie
L_h	m	Längenmaß
Ma		Machzahl
molWeight	kg/kmol	Molgewicht
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
$\Delta \dot{m}$	kg/s	Massenstromänderung
n		Anzahl
N	kW	Leistung
n	min^{-1}	Drehzahl
nMoles		Anzahl der Moleküle
p'		Druckkorrektur
P	MW	Leistung
p	Pa	Druck
Δp	Pa	Druckdifferenz
∇p		Druck - Gradient
Pr		Prandtl Zahl
q		zusammenfassende Variable
r		Abstand/Radius
R	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	spezifische Gaskonstante
Re		Reynolds - Zahl
\dot{s}	W/kg	massespezifischer Quellterm
s	m	Dicke/Stärke (geometrisch)
Tu		Turbulenzgrad
t	$^\circ\text{C}$	Temperatur
T	K	Temperatur
ΔT	K	Temperaturdifferenz
u'		Geschwindigkeitskorrektur
\tilde{u}'		Anteil der Geschwindigkeitskorrektur

u^+		dimensionslose Geschwindigkeit
U	m/s	Geschwindigkeit
\dot{V}	m ³ /h	Volumenstrom in Betriebskubikmeter
\dot{V}	Nm ³ /h	Volumenstrom in Normkubikmetern
$\Delta\dot{V}$	m ³ /h	Änderung des Volumenstromes
y^+		dimensionsloser Wandabstand
A		Koeffizientenmatrix
b		Körperkräfte (pro Masseneinheit)
n		Normalenvektor
S_Q		Spaltenvektor der Quellterm - Werte
S		viskoser Teil des Spannungstensors
S_φ		Quellterm der Transportgleichung
u	m/s	Vektor der Geschwindigkeit
$\overline{\underline{\underline{D}}}$	m/s	Deformationsgeschwindigkeitstensors
$\overline{\underline{\underline{T}}}$	MPa	viskoser Spannungstensor
α	°	Winkel
α_p		Unterrelaxion des Druckes
α_u		Unterrelaxion der Geschwindigkeit
β		Koeffizient der thermischen Ausdehnung (Boussinesq)
Γ		Variable des Diffusionsterms der Transportgleichung
γ	kp/m ³	Dichte
δ_l	m	geometrische Schrittweite
δ	m	Abstand der Zellmittelpunkte der betrachteten Zellen
ε	m ² /s ³	turbulente Dissipationsrate
η		Wirkungsgrad
η_K	m	Kolmogorov Länge
λ	W/(m · K)	Wärmeleitfähigkeit
μ	kg/(m · s)	dynamische Viskosität
ξU		Residuum der Geschwindigkeit
ρ	kg/m ³	Dichte
ϕ		Spaltenvektor der betrachteten Größe
ϕ		Platzhalter für eine beliebige Größe (Transportgleichung)
$\nabla\phi$		Gradient einer beliebigen Größe (Transportgleichung)
$\nabla \cdot \phi$		Divergenz einer beliebigen Größe (Transportgleichung)
Φ	Hz	Dissipationsfunktion
ω	s ⁻¹	turbulente Drehfrequenz

Indizes

<i>abtast</i>	Wert der Abtastrate
<i>B</i>	Blech
<i>BL</i>	boundary layer
<i>dE</i>	Anteil des diffusiven Transportes der östlichen Zelle
<i>dP</i>	Anteil des diffusiven Transportes am betrachteten Zellwert
<i>dyn</i>	dynamisch
<i>e</i>	östlicher Wert
<i>E</i>	Wert der benachbarten Ost - Zelle
<i>ges</i>	gesamt
<i>h</i>	Wert auf eine Stunde bezogen
<i>Inlet</i>	x - Wert am Inlet
<i>Kennfeld</i>	Wert aus Kennfeld
<i>m*</i>	Iterationswert nicht korrigiert
<i>m</i>	anschließende Iteration
<i>max</i>	Maximalwert
<i>n + 1</i>	anschließende Iteration
<i>n</i>	Aktuelle Iteration / Aktueller Wert
<i>N</i>	Wert einer benachbarten Zelle
<i>nenn</i>	Nennwert
<i>out</i>	Wert der Ausströmung
<i>P</i>	Wert an der betrachteten Zelle
<i>PE</i>	Wert zwischen <i>P</i> und <i>E</i>
<i>Q</i>	unabhängiger Anteil des Quellterms
<i>Schaufel</i>	Wert der Schaufeln
<i>stat</i>	statisch
<i>t</i>	total
<i>w</i>	Welle
<i>x</i>	für x/ in x - Richtung
<i>xfixedInlet</i>	x - Komponente mit festem Vorgabewert am Inlet
<i>xfixedOutlet</i>	x - Komponente mit festem Vorgabewert am Outlet

1 Einleitung

Eine Enstaubungsanlage umfasst primär die Absaugung erzeugter Abgase an verschiedenen Quellen einer Produktionsanlage. Durch die Zusammenführung der erfassten Abgase in einer Mischkammer soll eine Homogenisierung erreicht werden. Das entstehende Gasgemisch wird anschließend gefiltert und an die Umwelt abgegeben.

Während der Stahlproduktion bei der ArcelorMittal Hamburg GmbH werden durch die verschiedenen Prozessschritte entsprechende Abgase emittiert. Bevor das Gas in die Umwelt abgegeben werden darf, muss eine Staubabscheidung erfolgen. Zu diesem Zweck wird eine Enstaubungsanlage betrieben, welche die Abgase an den unterschiedlichen Quellen im Stahlwerk absaugt. Die Gasgemische sind dabei hinsichtlich der Staubbelastung, Temperatur und des Volumenstromes unterschiedlich. Besonders das Heißgas, welches die Direktabsaugung am Elektrolichtbogenofen (Ofen drei) erfasst, hebt sich bezüglich Temperatur und Staubfracht deutlich von den übrigen Abgasströmen ab. In der saugseitigen Mischkammer wird dieses mit den anderen Abgasen vermischt. Zur Abreinigung wird das Gemisch, unter der Verwendung von vier parallelen Radialgebläsen, über die druckseitige Mischkammer in das Schlauch-Filterssystem befördert. Das gereinigte Gas wird anschließend in die Umwelt emittiert.

Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Die Geometrie der Mischkammer verhindert die gleichmäßige Verteilung der Transportgrößen. Als Resultat werden die Gebläse und damit die direkt angeschlossenen Filterkammern unterschiedlich stark mit Staub und Temperatur belastet. Besonders die Temperaturverteilung ist problematisch, da das Schlauch-Filterssystem durch zu hohe Temperaturen Schaden nehmen kann. Die Folge sind zeitintensive Wartungsarbeiten zum Austauschen beschädigter Filterschläuche.

Die vorliegende Masterthesis behandelt die Entwicklung und Erstellung einer CFD-Simulation der saugseitigen Mischkammer der Stahlwerksentstaubungsanlage. Über die Simulation soll analysiert werden, in welcher Form sich das Strömungsfeld in der Mischkammer ausbreitet. Auf Basis der zu erstellenden Simulation sollen Optimierungspotentiale hinsichtlich der Temperaturverteilung an den Gebläsen aufgedeckt und beurteilt werden. Für die Simulation wird das Open-Source-Tool OpenFOAM verwendet.

In Kapitel 2 wird auf die Struktur und den Aufbau der Enstaubungsanlage eingegangen. Zudem werden durchgeführte Messungen an der realen Anlage als Eingangsparameter für die spätere Simulation dokumentiert.

Das grundlegende Vorgehen bei der Erstellung einer CFD-Simulation mit dem Tool OpenFOAM wird in Kapitel 3 vorgestellt.

In Kapitel 4 wird anschließend die Entwicklung und Erstellung der Simulation dargestellt. Neben den wesentlichen theoretischen Grundlagen werden notwendige Randbedingungen sowie die Geometrie- und Netzerstellung erläutert.

Eine kurze Einführung in die CFD - Theorie wird in Kapitel 5 gegeben.

Die Ergebnisse der Simulation und die Optimierungsansätze werden in Kapitel 6 präsentiert.

Eine Zusammenfassung der Arbeit mit einer abschließenden Aussicht folgt in Kapitel 7.

Danksagung

Im Speziellen die Umsetzung mit dem Tool OpenFOAM hat sich ohne größere Erfahrungen als sehr zeitintensiv herausgestellt. Um so mehr danke ich allen Personen, welche mich im Laufe der Bearbeitungszeit dieser Masterthesis fachlich und mental unterstützt haben.

Für die Hilfe bei den Messungen möchte ich insbesondere Dipl.-Ing. Christoph Preiß danken, welcher mir fachlich und organisatorisch zur Seite stand. Mein Dank gilt weiter B. Sc. Katrin Witting für die Beratung bei der Formgebung dieser Arbeit.

Bedanken möchte ich mich zudem bei Prof. Dr.-Ing. Peter Wulf, den ich für fachspezifische Fragen jederzeit konsultieren konnte. Ebenfalls muss lobend die Unterstützung bei der Berechnung auf dem HAW - Linux - Cluster des Departments für Maschinenbau und Produktion genannt werden. Ohne die großzügige Zurverfügungstellung von Rechnerressourcen wäre die Umsetzung nicht möglich gewesen.

Ebenfalls danke ich Prof. Dr.-Ing. Franz Vinnemeier für die Betreuung dieser Arbeit, besonders jedoch für die hervorragende Unterstützung bei der Umsetzung mit \LaTeX .

Mein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Marc Hölling, welcher mir jeder Zeit für Fragen jeglicher Art zur Verfügung stand. Ohne seine Unterstützung wäre das Projekt nicht realisierbar gewesen.

Für den Beistand während der zeitintensiven Bearbeitung möchte ich abschließend meiner Familie und speziell meiner Verlobten danken!

2 Entstaubungsanlage CEAG

In Kapitel 2 wird die zu untersuchende Anlage dokumentiert. Die Erfassung von Messdaten für die Simulation soll ebenfalls Bestandteil des Kapitels sein. Die Entstaubungsanlage bei der ArcelorMittal Hamburg GmbH ist nach dem Hersteller Concordia Elektrizitäts-AG, kurz CEAG, benannt. In diesem Kapitel werden aufgabenrelevante Teilbereiche der Anlage technisch abgebildet.

2.1 Funktionsbeschreibung

Die Stahlwerkzentstaubungsanlage, im Folgenden als CEAG bezeichnet, hat die primäre Aufgabe, die während des Stahlwerksbetriebes anfallenden Abgase aus der Werkshalle zu befördern. Abb. 2.1 gibt eine schematische Übersicht des Entstaubungsprozesses mit Schwerpunkt auf der Fluidführung in den Misch- und Filterkammern. Die im laufenden Prozess anfallenden „Abgase“ bestehen hierbei aus verschiedenen Anteilen. Neben unbedenklichen Gasgemischen sind gesundheitsschädliche Gase wie Kohlenstoffmonoxid (CO) oder Schwefeldioxid (SO₂) in geringen Konzentrationen vorhanden. Einen erheblichen Massenanteil des transportierten Fluids macht die Staubbiladung aus. Der primär beim Schmelzprozess (Schrott und Eisenschwamm) anfallende Staub besteht zu über 40 % aus Eisenoxid (FeO). Der restliche Anteil setzt sich aus verschiedenen Oxiden wie SiO₂ oder ZnO zu jeweils wenigen Prozentanteilen zusammen. Die anfallende Staubmenge wächst proportional zur eingesetzten Schrottmenge. Als grober Richtwert kommen auf 135 t produzierten Stahl zwischen 2,2 und 2,5 t Staub. Die Abgase werden über die jeweiligen Kanäle in einer Mischkammer zusammengeführt (Abb. 2.1 a.). Durch die aktuelle Geometrie, siehe Kapitel 2.2, ist eine globale Durchmischung nicht möglich. Die große abrasive Wirkung der staubeladenen Abgase hat zur Folge, dass die Mischkammer großteils frei von Einbauten gehalten ist. Nach Vermischung auf der Saugseite der Anlage werden die ungefilterten Abgase durch die vier Gebläse (Radialventilatoren, vier mal ein MW (P_{nenn})) (Abb. 2.1 b.) in eine weitere Mischkammer (Druckseite) befördert (Abb. 2.1 c.). Die Durchmischung der Abgase ist auch hier lokal begrenzt. Die druckseitige Kammer dient im Wesentlichen zur Verteilung der geförderten Abgase auf die 16 Filterkammern. Das vorliegende Schlauchfiltersystem (Abb. 2.1 d.) ist mit 1.920 Filterschläuchen mit einer Netto-Oberfläche von circa 17.820 m² ausgerüstet, siehe technische Spezifikation [1]. Die Abreinigung der Filterschläuche findet grob durch eine temporäre Rückspülung statt. Zu jeder Zeit wird eine Filterkammer automatisch abgereinigt. Die Spülluft wird über einen separaten Kanal in die saugseitige Mischkammer befördert. Der ausfallende Staub wird über mehrere Schneckenförderer einem Silo zum Abtransport zugeführt. Das mechanisch gefilterte Abgas wird anschließend über acht Dachhauben an die Umgebung emittiert (Abb. 2.1 e.).

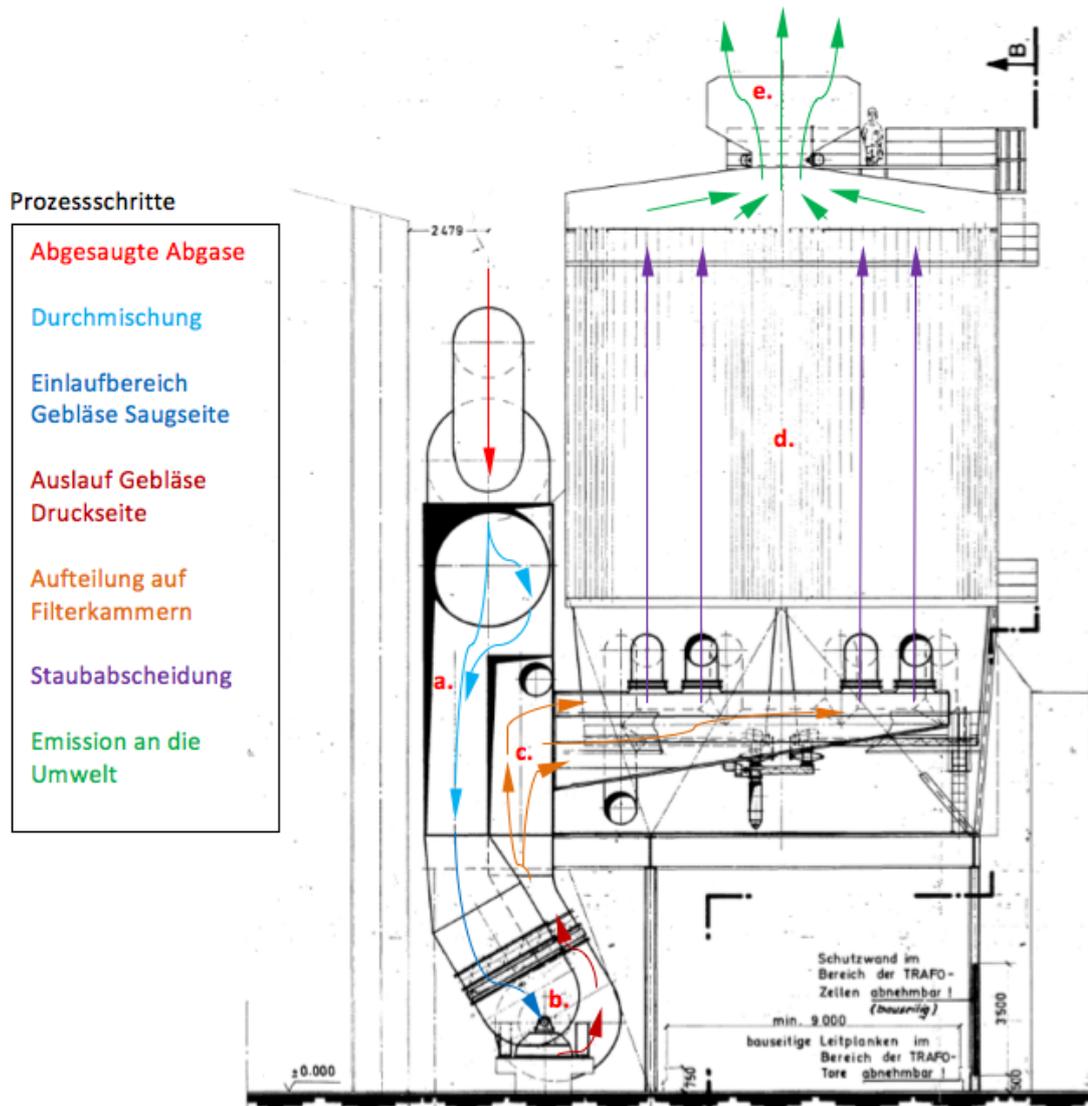


Abbildung 2.1: Exemplarische Darstellung der CEAG – Funktionsweise, Seitenansicht
a. Mischkammer – Saugseite, **b.** Gebläse, **c.** Mischkammer – Druckseite, **d.** Filterkammern, **e.** Dachhauben, Originalzeichnung: 6.14.13.99.9.09

2.2 Geometrische Beschreibung

Es sei vorweggenommen, dass die CEAG in ihren 30 Jahren Betriebszeit mehrere Baustufen durchlaufen hat. Entsprechend sind Verrohrungen und Blindflansche ehemaliger Kanäle vorhanden. Im Folgenden sollen nur relevante (aktive) Komponenten näher beschrieben werden. Primär wird dabei auf die saugseitige Mischkammer eingegangen, siehe Kapitel 4. Abb. 2.2 gibt eine Übersicht der Geometrie der Entstaubungsanlage CEAG. Die Fließrichtungen in den einzelnen Kanälen sind für Inlets (grün) und Outlets (orange) angegeben. Eine zusammenfassende Beschreibung aller markierten Anschlüsse an die saugseitige Mischkammer in Abb. 2.2 wird in Tabelle 2.1 gegeben.

Neben einigen Anschlussbereichen besteht die saugseitige Mischkammer primär aus einer rechteckigen Kammer mit den groben Abmaßen ($L \times B \times H$) $50 \text{ m} \times 1,9 \text{ m} \times 5,5 \text{ m}$. Relevante Einbauten für die Fluidführung sind nur im Einflussbereich der Heißgasleitung vorhanden. Über einen Strömungsteiler (U-Boot) wird das heiße Abgas in die

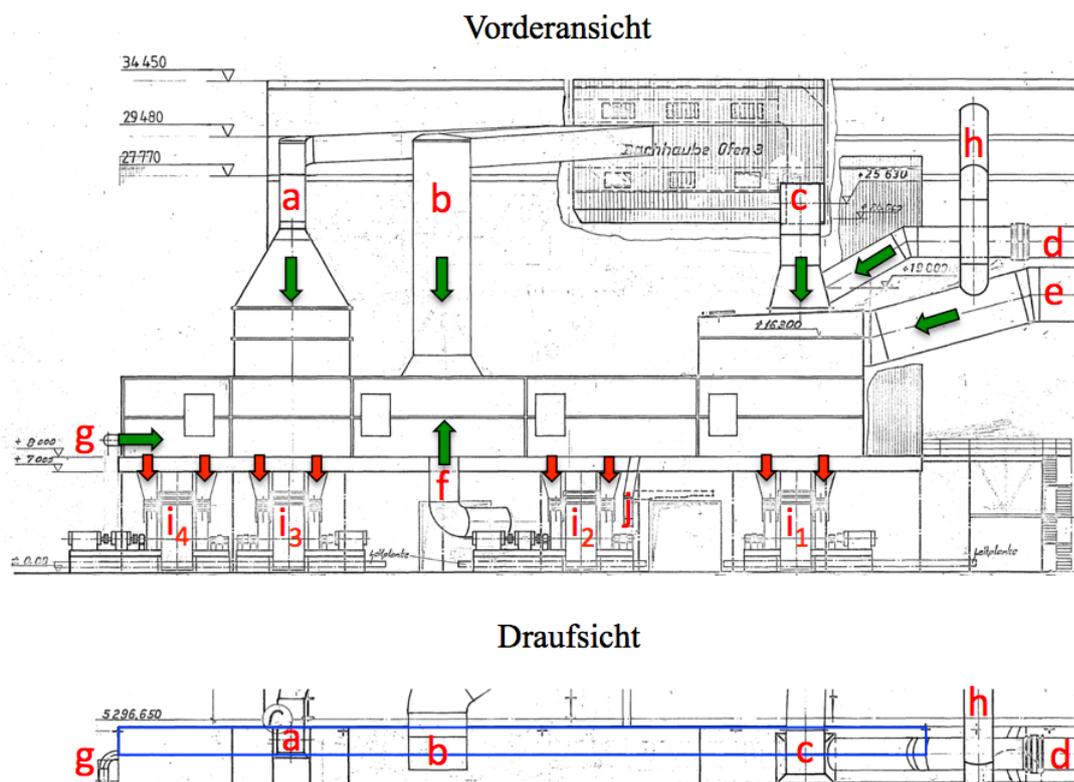


Abbildung 2.2: Übersicht der CEAG-Geometrie, aufgezeigt werden alle angeschlossenen Kanäle und deren Fließrichtung, Seitenansicht siehe Abb. 2.1, Erklärungen siehe Tabelle 2.1

kältere Luft der Dachabsaugung induziert. Die Höhenmaße der Gesamtanlage können aus Abb. 2.2 entnommen werden. Die späteren Modelldaten werden den technischen Zeichnungen (soweit vorhanden) entnommen, wobei relevante Zeichnungen im elektronischen Anhang hinterlegt sind. Die approximierte Form der Mischkammer und der Einbauten wird in Kapitel 4 abgebildet. Weitere Informationen können der technischen Anlagenspezifikation [1] entnommen werden.

Die vier doppelt wirkenden Radialgebläse sind auf der Saugseite jeweils mit zwei Kanälen an die Mischkammer angeschlossen. Gebläse drei hat hierbei abweichend zwei asymmetrische Querschnitte, welche bauseitig begründet sind. In Tabelle 2.1 sind die Maße der Anschlusskanäle vor der Umlenkung zum jeweiligen Läufer gegeben. Da in der Simulation die Gebläse nicht simuliert werden, sind die gegebenen Abmessungen als Outlet-Maße zu verstehen. Eine Übersicht hierfür wird in Kapitel 4 gegeben.

2.3 Ist- und Anlagenzustand

Neben den rein geometrischen Sollgrößen ist der Istzustand der Mischkammer und Anlage wichtig zur Bewertung der späteren Ergebnisse. Laufzeitbedingte Beschädigungen, welche die Strömung beeinträchtigen, sind ebenso wie prozessbedingte Ansammlungen von Verschmutzungen zu dokumentieren. Aus sicherheitstechnischen Gründen können nur begrenzte Bereiche der Mischkammer betreten werden. Die Befunde sind auf die angrenzenden Bereiche übertragbar. Das Betreten der Mischkammer kann nur im wöchentlichen Stillstand durchgeführt werden.

Am 25.04.2013 wurde eine Inspektion der Mischkammer absolviert. Abb. 2.3 und 2.4

Tabelle 2.1: Übersicht der Anschlusskanäle (Inlets/Outlets) der saugseitigen Mischkammer

Markierung	Beschreibung	Abmaße
<i>Inlets</i>		
a	Kleiner Kanal Dachabsaugung Ofen 3	Rechteckkanal (1,80 m × 1,80 m)
b	Großer Kanal Dachabsaugung Ofen 3	Rechteckkanal (2,00 m × 4,00 m)
c	Kanal zur gießseitigen Dachhaube Ofen 3	Rechteckkanal (2,60 m × 2,80 m)
d	Kanal Direktabsaugung Pfannenofen 1 und 2	Rundkanal (d = 2,20 m)
e	Kanal Dachabsaugung Pfannenofen 2, (größtenteils geschlossen)	Rundkanal (d = 3,80 m)
f	Kanal Direktabsaugung Ofen 3 (Heißgasleitung)	Rundkanal (d = 1,84 m)
g	Kanal Rückspülung Filter (Spülluft)	Rundkanal (d = 1,00 m)
<i>Outlets</i>		
i ₁	2 symmetrische Saugseiten an Gebläse 1, (Anschluss an Mischkammer)	Rechteckkanal (3,159 m × 0,789 m)
i ₂	2 symmetrische Saugseiten an Gebläse 2, (Anschluss an Mischkammer)	Rechteckkanal (3,159 m × 0,789 m)
i ₃	2 asymmetrische Saugseiten an Gebläse 3, (Anschluss an Mischkammer)	Rechteckkanal (3,159 m × 0,789 m)
i ₄	2 symmetrische Saugseiten an Gebläse 4, (Anschluss an Mischkammer)	Rechteckkanal (3,159 m × 0,789 m)
<i>Außer Betrieb</i>		
h	Kanal der Chargierhauben Ofen 3 (geschlossen)	Rundkanal (d = k.a.)
j	Kanal Absaugung Schlackenammer (geschlossen)	Rechteckkanal (k.a.)

zeigen den aktuellen Zustand zum oben genannten Datum. Aus Abb. 2.3 wird ersichtlich, dass die Staubbelastung des geführten Fluides in Verbindung mit Flüssigkeitsrückständen problematisch werden kann. Der Feuchtigkeitseintrag kommt über die Wassereindüsung vor der Heißgasleitung zustande. Über diesen Prozessschritt wird die Abgastemperatur gesenkt und der Funkenflug zum Schutz der Filterschläuche reduziert. Die bodenseitigen Staubanhäufungen sind aufgrund der Feuchtigkeit fest verklebt. Die Reduktion des Mischkammerquerschnittes kann lokal bis zu 900 mm Höhe betragen (Horizontalverstreungen 1.100 mm über dem eigentlichen Boden der Mischkammer, siehe Abb. 2.4 und 2.3). Eine Beseitigung ist durch grobe mechanische Bearbeitung möglich. Die Teil-/ Komplettreinigung findet jährlich im Sommerstillstand statt. Besonders der Bodenbereich um den Strömungsteiler (U-Boot) ist in Regionen mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten verstärkt mit Anbackungen belastet, siehe Abb. 2.4. Diese Ablagerungen können, neben einer Validierung mit Messwerten, als Indikatoren dienen,



Abbildung 2.3: Mischkammer circa ein Dreivierteljahr nach der Reinigung, zu erkennen sind erhebliche Ansammlungen von Staubpartikeln und Anbackungen

um das später zu simulierende Strömungsbild zu bewerten.

Zur Reduzierung des Funkenfluges sind um den Einlassbereich der Direktabsaugung vom Ofen drei lose Kettenvorhänge vorgesehen. Die oben genannten Anbackungen sind auch hier weitläufig vorhanden. Abb. 2.5 zeigt einen Kettenvorhang vor dem Strömungsteiler (U-Boot).

Neben den genannten Verschmutzungen der Mischkammer ist eine Stützkonstruktion aus Rohren vorhanden. Evident wird die abrasive Wirkung des staubbeladenen Abgases. In einigen Bereichen, wie über dem Einlass der Heißgasleitung, sind die Stützrohre teilweise nicht mehr vorhanden. Dieses Phänomen zeigt, welche Anforderungen verschleißtechnisch an die Aufbauten in der Mischkammer gestellt werden.

2.4 Erfassung und Auswertung von Messdaten

Auf Basis des in Kapitel 2.3 beschriebenen Istzustandes der Anlage sollen Kennwerte wie Volumenströme und Temperaturen der bekannten Strömungen ermittelt werden. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen werden in Kapitel 4.5 als Eingangsparameter des CFD-Modells verwendet. Neben Messdaten aus dem Prozessleitsystem wurden viele Daten durch eigens durchgeführte Messkampagnen gewonnen. Durch das versetzte Messen der Eingangsgrößen und die schwankenden Produktionsbedingungen ist schätzungsweise mit Fehlern von bis zu 10 % zu rechnen. Im folgenden Abschnitt soll die Erfassung und Bewertung der im Weiteren verwendeten Messdaten diskutiert werden.

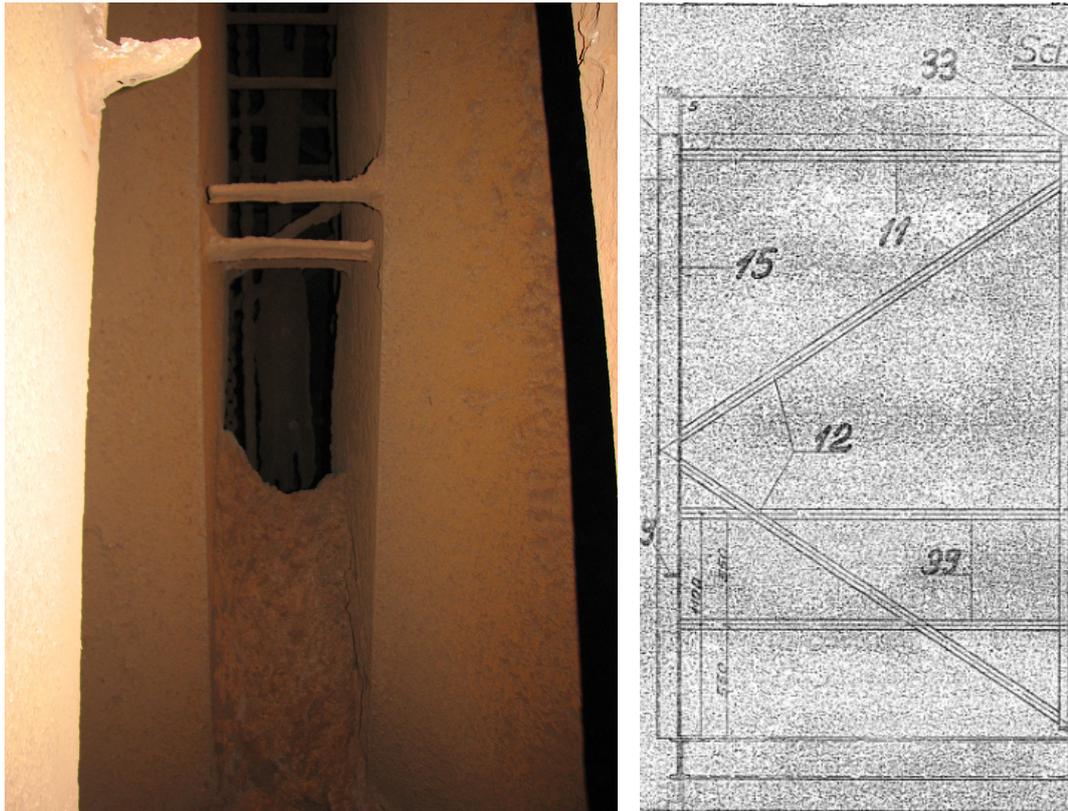


Abbildung 2.4: Istzustand am Strömungsteiler (U-Boot), Anhäufung von Staubanbackungen nahe des Strömungsteilers über der Heißgasleitung (*links*), Zeichnungsausschnitt der Verstrebrungen in der Mischkammer (*rechts*)



Abbildung 2.5: Kettenvorhang mit deutlichen Anbackungen in der Mischkammer

2.4.1 Daten aus dem Prozessleitsystem

Der Ausbau der sensorischen Überwachung der Eingangsgrößen an der CEAG ist rückständig. Einzig die Austrittstemperaturen der vier Gebläse und die Temperatur des Abgases der Heißgasleitung vor der Mischkammer werden überwacht. Die aufgezeichneten Daten können zur Analyse aus der internen Datenbank entnommen werden. Da die Temperatursensoren zweier Gebläse im Sommer 2012 beschädigt wurden, muss auf Daten vor dieser Funktionseinschränkung zurückgegriffen werden. Für die spätere Validierung der Berechnungsergebnisse werden primär die Austrittstemperaturen der Gebläse verwendet. Um aussagekräftige Datensätze verwenden zu können, muss der zu simulierende Zustand des Prozesses festgelegt werden. Es wird der vollbelastete Zustand als stationärer Prozess am Schmelz- und Pfanenofen vorausgesetzt.

Aus den vorhandenen Daten der Austrittstemperaturen werden, in Verbindung mit Informationen über den Zustand der Öfen, zehn Zeitintervalle ausgewählt. Die Auswahl findet zeitlich über das Jahr 2012 verteilt statt. Für die Analyse der Ofenzustände ist die Schmelzleistung maßgeblich. Tabelle 2.2 zeigt die Temperaturdaten der zehn Schmelzen an den fünf Messstellen. Anhand der Daten ist eine geringfügige Korrelation zwischen Außentemperatur/Hallentemperatur und dem Temperaturniveau zu erkennen. Bis zum März 2012 können Temperaturen von unter 100°C an den Gebläsen zwei und drei registriert werden. In den Sommermonaten 2012 sind konstante Temperaturen über 100°C vorhanden. Die Validierungstemperaturen an den Gebläsen werden über eine Mittelwertbildung bestimmt. Der Mittelwert der Temperatur an der Heißgasleitung (vor dem Anschluss an die CEAG) wird als Eingangswert für die Berechnung verwendet, siehe Kapitel 4.

Tabelle 2.2: Gebläseausgangs- und Heißgastemperatur, zehn Schmelzen im Überblick

Datum	Heißgasleitung	Gebläse 1	Gebläse 2	Gebläse 3	Gebläse 4
TT.MM.JJJJ	°C	°C	°C	°C	°C
07.01.2012	469	39	98	93	62
11.02.2012	433	38	83	87	57
07.03.2012	422	41	93	100	64
07.04.2012	468	45	109	111	75
09.05.2012	441	60	114	111	80
15.05.2012	448	54	100	112	79
21.05.2012	395	65	111	118	85
08.06.2012	405	58	107	111	81
15.06.2012	390	55	101	106	74
25.06.2012	406	50	104	109	75
Mittelwert:	428	51	102	106	73

2.4.2 Manuelle Messdatenerfassung

Eine stationäre Überwachung der Volumenströme an den Hauptkanälen der CEAG ist nicht vorhanden. Eine kurzfristige Installation von stationärer Messtechnik ist finanziell und zeittechnisch nicht umsetzbar. Die Zugänglichkeit ist zudem sehr eingeschränkt. Die Messung von Volumenströmen und Temperaturen ist nur sehr begrenzt möglich.

2.4.2.1 Erfassung der Heißgastemperatur und des Volumenstromes der Direktabsaugung am Ofen drei

Im Jahre 2009 erfolgte eine Messung an der Heißgasleitung der Direktabsaugung des Elektrolichtbogenofens (Ofen drei). Aus der Messung geht eine gemittelte Heißgastemperatur von 470°C hervor. Der Volumenstrom wird mit circa 84.387 Nm³/h angegeben. Der überhöhte Temperaturwert, Vergleich Tabelle 2.2, lässt die Vermutung zu, dass die stationären Temperatursensoren durch die hohe Staubbelastung mit einer isolierenden Schicht aus Anbackungen versehen sind. Die Aussagekraft der Handmessung hinsichtlich der Stichprobenmenge ist dagegen deutlich unsicherer.

2.4.2.2 Erfassung des Volumenstromes und der Temperatur der Absaugung an den Pfannenöfen

Für die Ermittlung der Temperatur an den Abgaskanälen der Pfannenöfen wird auf Messungen aus dem Jahre 2011 zurückgegriffen. Zur Projektierung eines neuen Pfannenofens wurden hier Untersuchungen an den Abgaskanälen der Pfannenöfen durchgeführt. Gemittelt wird der Volumenstrom mit 95.532 Nm³/h und die Temperatur mit 79°C übernommen.

2.4.2.3 Volumenstromerfassung an den vier Gebläsen der CEAG

Ein wichtiger Kennwert für das spätere Modell ist die korrekte Erfassung der Volumenströme an den vier Gebläsen der CEAG.

Im Jahre 2009 wurde eine Messkampagne an den vier Gebläsen durch die Firma Venti Oelde durchgeführt. Hierbei wurde über ein Pitot-Messrohr die Geschwindigkeit auf der Saugseite der Radialgebläse an jeweils fünf Messstellen bestimmt. Tabelle 2.3 gibt Übersicht über die Messergebnisse. Es sei angemerkt, dass durch die hochturbulenten Verhältnisse vor dem Eintritt in die Gebläse und den instationären Prozess eine hohe Messunsicherheit vorhanden ist. Diese wurde durch Venti Oelde mit 6,1 % angenähert. Die gemessenen Temperaturen an den Gebläsen zwei und drei müssen aufgrund der überdurchschnittlichen Höhe, Vergleich Tabelle 2.2, angezweifelt werden.

Tabelle 2.3: Messergebnisse der Firma Venti Oelde an den vier Radialgebläsen der CEAG (07.2009)

	Gebläse 1	Gebläse 2	Gebläse 3	Gebläse 4
Volumenstrom in Nm³/h:	424.547	395.983	395.193	438.794
Geschwindigkeit in m/s:	29,15	29,87	33,79	29,44
Temperatur Austritt in °C:	95	140	140	51

Neben den vorhandenen Daten wurden für die Untersuchung Messstellen an den vier Gebläsen installiert. Um einen guten Mittelwert zu erhalten, wurden vier Messpunkte je Saugseite und zwei Messpunkte je Druckseite konzipiert. Über eine Differenzdruckmessung von der Saug- zur Druckseite der Gebläse wird der Volumenstrom berechnet. Eine Übersicht des Aufbaus gibt Abb. 2.6. Für die Berechnung wird die Kennlinie der Gebläse nach Abb. 2.7 verwendet. Neben dem statischen Druck aus der Differenzdruckmessung wird der dynamische Druck zur Bestimmung des totalen Drucks Δp_t beziehungsweise $\Delta p_{ges.}$ benötigt, siehe Gl. (2.1).

$$\Delta p_t \hat{=} \Delta p_{ges} = \Delta p_{stat} + \Delta p_{dyn} = \Delta p_{stat} + \frac{1}{2} |[\rho U^2]_{out} - [\rho U^2]_{in}| \quad (2.1)$$

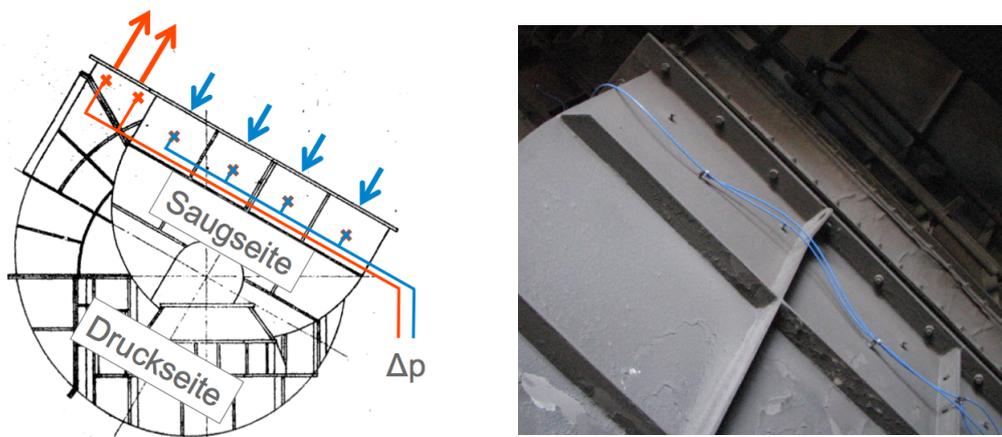


Abbildung 2.6: Aufbau der Differenzdruckmessung an den Radialgebläsen der CEAG, schematische Anordnung der Messpunkte (links), Foto der installierten Messstellen (rechts)

In Absprache mit einem Messingenieur der Firma Venti Oelde kann zur Bestimmung des Volumenstroms ein iteratives Verfahren verwendet werden. Als Basis dienen die Geometriedaten der Gebläse sowie der gemessene Differenzdruck und die Temperatur. Das Vorgehen ist hierbei das folgende:

1. Vorgabe eines Betriebsvolumenstromes (\dot{V}_n)
2. Temperatur aus Messung \rightarrow Berechnung der Dichte (ρ)
3. Bestimmen der Geschwindigkeiten auf der Druck- und Saugseite $\rightarrow \Delta p_{dyn}$
4. Statischer Druck aus Messung \rightarrow Bestimmung des totalen Differenzdruckes Δp_t
5. Ablesen des Betriebsvolumenstromes aus der Kennlinie, siehe Abb. 2.7
6. Vergleich des Vorgabe- und aus der Kennlinie bestimmten Volumenstromes
7. Korrektur des Vorgabevolumenstromes $\rightarrow \dot{V}_{n+1}$
8. Wiederholung der Schritte 1 bis 8 mit angepasstem Volumenstrom (\dot{V}_{n+1}) bis Fehlerschranke unterschritten ist

Durch die iterative Berechnungsmethode werden die Volumenströme nach Tabelle 2.4 bestimmt. Da nicht im Betrieb gemessen wird, sind die korrigierten Messergebnisse nach Gl. (2.2) aufgelistet, wobei die Gebläseaustrittstemperaturen nach Tabelle 2.2 vorausgesetzt werden. Die Bestimmung des Volumenstromes der Gebläse über die durchgeführte Differenzdruckmessung ergibt fehlerhafte, überhöhte Werte. Eine Erklärung liefert die gewählte Messposition. Begründet in der nicht normgerechten Position nahe der Gebläse ist mit einer hohen Beeinflussung der Messwerte zu rechnen. Ebenfalls ist ein Einfluss der Messung im Stillstand möglich. Aufgrund der erheblichen Abweichungen zu den Daten der Anlagenspezifikation werden die Messwerte nach Tabelle 2.3 für die Simulation verwendet.

$$V_n = V_{Kennfeld} \frac{T_n}{T_{Kennfeld}} \quad (2.2)$$

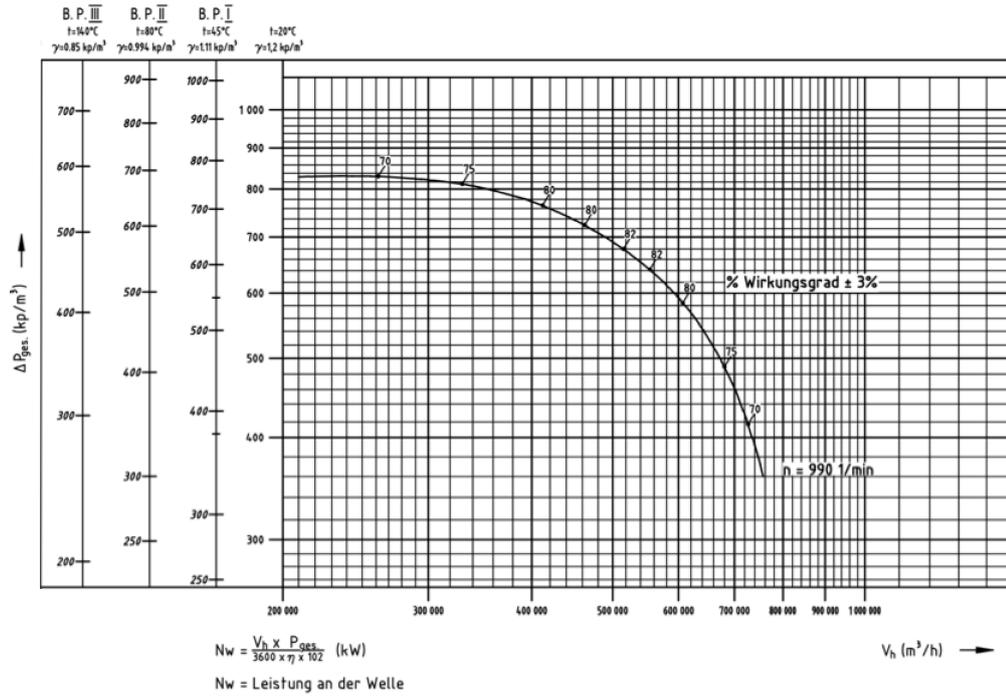


Abbildung 2.7: Auszug Kennfeld der CEAG - Radialgebläse

Tabelle 2.4: Volumenstrombestimmung aus Differenzdruckmessung an den vier Radialgebläsen der CEAG (korrigiert)

	Gebläse 1	Gebläse 2	Gebläse 3	Gebläse 4
Volumenstrom in Nm^3/h :	524.000	406.000	363.000	453.000
Temperatur Austritt in $^\circ\text{C}$:	43	72	87	53

2.4.3 Volumenstromerfassung an den Dachkanälen Ofen drei und dem Kanal zur Gießseite

Ein wesentlicher Aufgabenteil während der Messung war die Bestimmung der Volumenströme an den Dachkanälen und dem Kanal zur Gießseite. In keinem vorangegangenen Projekt wurden hier direkte Untersuchungen vorgenommen. Für die Messungen werden an ausgesuchten (zugänglichen) Punkten entsprechende Messöffnungen installiert. Abb. 2.8 gibt eine Übersicht der Messpositionen an den drei Dachkanälen. Abgebildet sind die Kanäle a./b. der Dachhauben am Ofen drei sowie der Kanal c. der gießseitigen Dachhaube.

Die Installation und Messung ist hinsichtlich der Sicherheit als problematisch einzustufen. Die Kanäle befinden sich im Dachbereich der Stahlwerkshalle unmittelbar über dem Elektrolichtbogenofen. Einerseits ist ein Durchschlagen des Hallendaches beim Chargieren von Schrott am Ofen drei nicht auszuschließen, andererseits besteht akute Absturzgefahr im Dachbereich (circa 30 m Falltiefe). Weiter ist die Nähe zum Abgasausstoß über die Dachhauben der CEAG hinsichtlich der Kohlenmonoxid-Konzentration stark gesundheitsgefährdend. Aufgrund der aufgezählten Gegebenheiten ist die Installation und Messung im Dachbereich nur während der wöchentlichen Stillstände möglich. Weitläufige Messkampagnen sind nicht realisierbar. Am 13.06.2013 wurden die Volumenströme nach Tabelle 2.5 (gemittelt) über eine Staurohrmessung bestimmt.

Die Temperaturen während des Schmelzbetriebes wurden separat direkt am Inlet an der

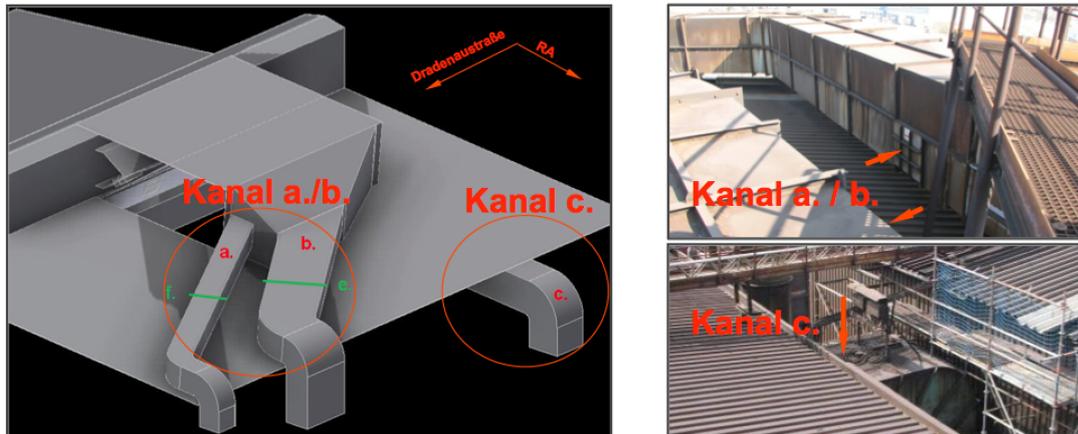


Abbildung 2.8: Übersicht der Messstellen an den Dachkanälen im Bereich Ofen drei, CAD-Grafik der Kanäle im Dachbereich (links), Position der Messstellen an den Dachkanälen a./b. und c. (rechts)

Tabelle 2.5: Übersicht der Messergebnisse an den Dachhauben im Bereich Ofen drei

	Kanal a.	Kanal b.	Kanal c.
Volumenstrom in Nm^3/h :	324.486	598.860	339.175
Temperatur Betrieb in $^{\circ}\text{C}$:	67	67	50

Mischkammer aufgenommen. Die Temperatur am Kanal zur Gießseite wird mit 50°C angenähert.

2.4.4 Messung der Spülluftmenge von den Filtern

Zur Abreinigung der Filterschläuche wird, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, kontinuierlich eine Filterkammer rückgespült. Die Erfassung des Volumenstromes der Rückspülung ist mit einem Pitot-Messrohr möglich. Der entsprechende Kanal ist auch während des Betriebes gefahrlos erreichbar. Über eine 12 mm Bohrung kann das Pitot-Messrohr eingeführt werden. Der gemittelte Wert über den Querschnitt ist in Tabelle 2.6 dargestellt. Die Messung findet während des regulären Schmelzprozesses statt. Aufgrund der hohen Staubbelastung sind nur sehr kurze Messzeiten sinnvoll möglich. Über eine Druckluftspülung wird das Pitotrohr zwischen den Messungen gereinigt. Im Vergleich sind ebenfalls Daten der Firma Venti Oelde aus dem Jahre 2009 aufgelistet, wobei die ermittelten Temperaturen weit über denen der aktuellen Messung liegen. Für die Simulation werden die aktuellen Temperaturdaten verwendet.

Tabelle 2.6: Übersicht der Messergebnisse an den Dachhauben Ofen 3

	Spülluft 2013	Spülluft 2009 (Venti Oelde)
Volumenstrom in Nm^3/h :	41.371	28.020
Temperatur Betrieb in $^{\circ}\text{C}$:	59	173

2.4.4.1 Verwendete Messgeräte

Für die Differenzdruck- und die Temperaturmessung wurden zwei Messaufnehmer verwendet. Aufgrund des hohen Differenzdruckes 3.000 Pa bis 6.000 Pa wurde zu Beginn des Projektes mit dem GDH200 der Firma GREISINGER electronic gearbeitet. Das Gerät zeigt den aktuellen Istwert in mbar an. Eine Log-Funktion ist nicht vorhanden, das heißt, die Werte müssen in Kombination mit der aktuellen Zeit von Hand notiert werden. Der Datenlogger MP 200 der Firma KIMO wurde im Frühsommer 2013 mit einem passenden Druckmodul MDP 10000 für Messungen im Bereich von -10.000 Pa bis $+10.000$ Pa nachgerüstet. Die Aufzeichnung der Differenzdrücke und Temperaturen wird somit im Messzeitraum automatisch durchgeführt. Ein Export der Daten in ein Tabellenkalkulationsprogramm macht eine Analyse auch abseits der KIMO-Software möglich.

Für die Temperaturmessung wurden Thermoelemente vom Typ Thermo FTI-45-150 verwendet.

Die Messung der Volumenströme im Dachbereich Ofen drei wurde mit einem Prandtl-Staurohr Typ-S durchgeführt. Aufgrund des großen Durchmessers ist für die Messung der Spülluft ein kleineres Staurohr vom Typ-L verwendet worden.

Die Kennwerte der verwendeten Geräte können im elektronischen Anhang in den hinterlegten Datenblättern eingesehen werden.

2.4.4.2 Genauigkeit der Temperatur- und Volumenstromerfassung

Alle Messungen unterliegen gewissen Schwankungen der Untersuchungsgrößen. Volumenstrommessungen an den Dachkanälen, während des regulären Betriebes, sind nur mit einem Messgitter und stationärer Messtechnik sinnvoll möglich. Die Messung der Temperatur mit stationärer Messtechnik ist bedingt durch die hohe Staubbeladung und die damit verbundenen Anbackungen mit Fehlern behaftet. Eine normgerechte Volumenstrommessung kann hervorgehend aus den baulichen Gegebenheiten nicht durchgeführt werden. Der dabei entstehende Fehler ist schwer abzuschätzen. Leckagen und Einbauten in den Kanälen sind zudem weitläufig unbekannt und müssen vernachlässigt werden.

Für den kumulierte Messfehler der Temperatur- und Volumenstromerfassung werden daher 10 % abgeschätzt.

3 OpenFOAM – The Open Source CFD – Toolbox

In Kapitel 3 wird das prinzipielle Vorgehen beim Aufbau einer Berechnung mit dem Open Source CFD-Tool OpenFOAM beschrieben. In den folgenden Abschnitten wird nur auf spezielle Themen, welche für die zu bearbeitende Thematik dieser Thesis relevant sind, eingegangen. Für weiterführende Informationen in allen Teilbereichen ist der OpenFOAM User Guide [2] oder OpenFOAM Programme's Guide [3] heranzuziehen.

3.1 Vorstellung OpenFOAM

OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) ist eine frei zugängliche Open Source CFD Toolbox, welche in weiten Bereichen der Wissenschaft wie auch für kommerzielle Ingenieursaufgaben eingesetzt wird. Entwickelt wird das Tool von der *OpenCFD Ltd.* in der *ESI Group*. Die Toolbox enthält neben 80 Solvern für verschiedene Anwendungsfälle Applikationen für das Pre- und Postprocessing. Im Bereich Preprocessing sei der Vernetzer *snappyHexMesh* genannt. Hoch komplexe Geometrien können durch entsprechende Vorgaben iterativ diskretisiert werden. Der Anwender hat hierbei diverse Möglichkeiten, die Qualität des Netzes zu beeinflussen. Näheres zur Anwendung wird in Kapitel 4 erläutert. Neben der CFD können in äquivalenter Weise auch FEM-Rechnungen durchgeführt werden.

Der skriptbasierte Aufbau der jeweiligen Control Files lässt dem Anwender und Programmierer die Freiheit, Solver umzuschreiben. Durch eine entsprechende Ergänzung können Terme verschiedener Einflussgrößen verändert oder hinzugefügt werden. Als Basis kann ein existierender Solver verwendet werden.

Die gut in alle Bereiche integrierte Parallelisierbarkeit bringt einen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber vielen kommerziellen Lösungen mit sich. Die Rechner- oder Serverkapazitäten können somit besser ausgenutzt werden.

3.2 Aufbau und Vorgehen

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei OpenFOAM um ein rein skriptbasiertes Tool. Im Gegensatz zu den meisten kommerziellen Programmen ist eine grafische Oberfläche nicht vorhanden. Es gibt Ansätze von grafischen Elementen, welche von Usern entwickelt wurden. Auf diese soll hier im Speziellen nicht weiter eingegangen werden. Der komplette Programmablauf und die Parametereingabe werden durch entsprechende Script-Dateien und die Konsole gesteuert. Im folgenden Abschnitt soll auf den prinzipiellen Aufbau und den Ablauf der Berechnung mit OpenFOAM eingegangen werden. Für die vorliegende Arbeit wurde mit der OpenFOAM-Version 2.1.1 und 2.2.0 gearbeitet, welche sich nur in wenigen Details unterscheiden, siehe zum Beispiel Kapitel 4.7.

Soll ein strömungsmechanisches Problem mit OpenFOAM untersucht werden, wird hierfür ein neuer *case* angelegt. Damit OpenFOAM die entsprechenden Eingaben und Parameter richtig auslesen kann, müssen diese immer in äquivalenter Form aufgebaut werden. Ein neuer *case* wird immer mit einem eigens benannten Ordner aufgesetzt. Dieser bildet die Hauptebene, alle Unterordner und Dateien werden hierin abgelegt. Abb.3.1 zeigt den Inhalt des Case-Ordners. Bereits am Anfang sollte der für die Berechnung verwendete Solver ausgewählt werden. Um den Aufbau einer neuen Berechnung zu beschleunigen, bietet OpenFOAM über den mitgelieferten Ordner `tutorials` eine Vielzahl an vorgefertigten Beispielfällen. Die Kategorisierung dieser Beispiele findet zum einen über das physikalische Problem, zum Beispiel kompressible/inkompressible Strömungen, zum anderen über die angewendeten Turbulenzmodelle und den Solvertyp statt. Die frühzeitige Entscheidung über das zu verwendende Modell sowie den Solver ist daher hilfreich. Prinzipiell sind die Fälle für alle Modelle sehr ähnlich aufgebaut. Im Hauptordner werden drei Unterordner angelegt (`0`, `constant` und `system`), auf welche im Folgenden eingegangen wird, siehe Abb. 3.1.

▼	0	Heute 16:43
	.DS_Store	Heute 16:43
	alphat	15.07.2013 08:03
	epsilon	15.07.2013 08:03
	k	15.07.2013 08:03
	muT	15.07.2013 08:03
	omega	15.07.2013 08:03
	p	15.07.2013 08:03
	T	15.07.2013 08:03
	U	24.07.2013 16:26
	CEAG1.foam	18.12.2012 18:18
▼	constant	Heute 16:53
	.DS_Store	Heute 16:53
	▶ polyMesh	Heute 16:43
	RASProperties	02.07.2013 09:52
	thermophysicalProperties	05.07.2013 16:55
	turbulenceProperties	22.06.2013 19:16
▼	system	Heute 16:44
	.DS_Store	Heute 16:44
	controlDict	24.07.2013 16:30
	decomposeParDict	10.06.2013 08:48
	fvSchemes	28.06.2013 18:41
	fvSolution	24.07.2013 16:18
	snappyHexMeshDict	09.07.2013 09:09

Abbildung 3.1: Übersicht der Case - Ordner - Struktur in OpenFOAM

3.2.1 Implementierung eines Netzes in OpenFOAM

Neben den in OpenFOAM erzeugten Netzen lassen sich auch viele gängige Netzformate importieren. Als Beispiele seien Netze aus *Ansys* und *Gmsh* genannt. Die zur Verfügung stehenden Importbefehle können im OpenFOAM User Guide [2] eingesehen werden.

Im Ordner `constant/polyMesh` werden alle Informationen über das zu verwendende Netz gespeichert. Die Daten der Knoten, Elemente und Funktionsflächen sind in separaten Dateien abgelegt. Wie in OpenFOAM gängig, werden Auflistungen in Form von Skriptdateien genutzt, welche vom Anwender einsehbar sind. Abb. 3.2 zeigt die Dateistruktur exemplarisch für jedes Netz in OpenFOAM. Das angezeigte `blockMeshDict` wird hierbei nur bei blockstrukturierten Netzen in OpenFOAM verwendet. Im Ordner `sets` werden Informationen über Zellgruppen gespeichert. Durch die Funktion

weise Faces zu den jeweiligen Patches wurde bereits im File `boundarys` im Ordner `constant/polyMesh` vorgenommen, siehe Kapitel 3.2.1.

In OpenFOAM stehen je nach Solver und physikalischer Beschaffenheit des Problems diverse Typen von Randbedingungen zur Verfügung. Als Basis werden fast immer Bedingungen nach Neumann oder Dirichlet verwendet. Eine Bedingung nach Neumann definiert keine Änderung der betrachteten Größe beim Überschreiten des definierten Randes (Patches). Der Gradient der Betrachtungsgröße wird somit auf Null festgelegt. In OpenFOAM wird dieser Typ von Bedingung gleichbedeutend mit `zeroGradient` eingestellt. [5]

Eine Randbedingung nach Dirichlet setzt die Variable, zum Beispiel die Geschwindigkeit, als konstanten Wert für alle am Patch beteiligten Zellen/Faces ein. Äquivalent wird diese Bedingung mit `fixedValue` angegeben. Für die Geschwindigkeiten an haftenden Wänden (`noslip`) wird entsprechend ein Wert von Null für alle Raumrichtungen festgesetzt. Wände ohne Reibung beziehungsweise Haftung können mit `slip` eingestellt werden. Das Fluid kann somit an den Wandzellen eine Geschwindigkeit parallel zur Wand, jedoch nicht in Richtung der Wandnormalen aufweisen (keine Durchdringung). [5]

```

boundaryField
{
  Ofen12_Ofen12
  {
    type          flowRateInletVelocity;
    flowRate      constant 34.285;
    value         uniform (0 0 0);
  }

  Giesshaube
  {
    type          fixedValue;
    value         uniform (0 -10.0 0);
  }

  back
  {
    type          zeroGradient;
  }

  walls_walls
  {
    type          fixedValue;
    value         uniform (0 0 0);
  }

  ceagslipwalls_ceagslipwalls
  {
    type          slip;
  }
}

```

Neben den *einfachen* Bedingungen sind auch gemischte Typen aus Neumann- und Dirichlet-Bedingungen definierbar. Kann zum Beispiel nicht ausgeschlossen werden, dass es zu einer unerwünschten Rückströmung kommt, wird eine gemischte Bedingung definiert. Als Beispiel sei die Randbedingung `inletOutlet` genannt. Über den Eintrag `inletValue uniform (Value)` wird ein fester Wert für den Strömungsparameter festgelegt, wenn die Strömung in den Untersuchungsraum gerichtet ist. Es kann vorkommen, dass während der Ausbildung des Strömungsfeldes am Patch Rückströmbereiche auftreten. Der Geschwindigkeitsvektor zeigt in diesem Fall aus dem Untersuchungsraum heraus. Hier schaltet die gemischte Randbedingung `inletOutlet` von einem festen Vorgabewert auf eine Neumann-Bedingung um. Eine Fallunterscheidung findet dementsprechend in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsrichtung statt. In Tabelle 3.1 sind die in dieser Arbeit verwendeten Randbedingungen aufgelistet. Weitere Varianten sowie nähere Beschreibungen können in [2] gefunden werden. Eine kurze Einführung der Randbedingungen an den Wänden wird in Kapitel 4.6.2 gegeben. Die Angabe im Feld

value wird dabei oft nur als Platzhalter beziehungsweise zur Initialisierung benötigt.

Es sei darauf hingewiesen, dass bei inkompressiblen Fluiden der Druck über die Dichte normiert wird.

Tabelle 3.1: Exemplarische Übersicht verwendeter Randbedingungen in OpenFOAM

Art der Bedingung	Beschreibung	Definition
Neumann	Keine Änderung der Größe: $\nabla\phi = 0$	type zeroGradient;
Dirichlet	Konstanter Wert der Größe: $\phi = Value$	type fixedValue; value uniform (Value/Vektor);
Mixed (Neumann & Dirichlet)	Fallunterscheidung anhand des Richtungsvektors der Strömung/Geschwindigkeit	type inletOutlet; inletValue uniform (Value/Vektor); value uniform (Value/Vektor);
Massen-/Volumenstrom (massflow für $\rho \neq const.$) (volumeFlow für $\rho = const.$)	Angabe eines konstanten Flusses, positive Richtung in den Untersuchungsraum	type flowRateInletVelocity; flowRate constant (Value); value uniform (Value/Vektor);

3.2.3 Angaben der numerischen Schemata im File fvSchemes

Mit welchem Verfahren die jeweiligen Terme der Erhaltungsgleichungen approximiert werden, ist vom Anwender definierbar. Angaben über diese Schemata werden im File `fvSchemes` vorgenommen. Hierbei kann übergeordnet für alle Erhaltungsgrößen eine Approximationsart, zum Beispiel für den konvektiven Term, angegeben werden. Diese Art der Definition wird über den Zusatz `default upwind` implementiert. Die separate Definition des Schemas jedes Terms einer jeden Erhaltungsgröße, zum Beispiel die turbulente kinetische Energie k , ist ebenfalls möglich.

```

ddtSchemes     // Instationärer Term
{
  default       steadyState; // Stationäre Rechnung
}

gradSchemes    // Gradientenrekonstruktion
{
  default       cellLimited Gauss linear 1;
}

divSchemes     // Konvektiver Term
{
  default       none;

  div(phi,U)    Gauss upwind; // 1. Order Upwind
  div((muEff*dev2(T(grad(U))))   Gauss linear; //2. Order Differenzenverfahren
  div(phi,h)    Gauss upwind;
  div(phi,epsilon) Gauss upwind;
  div(phi,omega) Gauss upwind;
  div(phi,k)    Gauss upwind;

  div(phi,d,p)    Gauss upwind;
  div(phi,K)     Gauss upwind;
}

laplacianSchemes
{
  default       Gauss linear limited 0.333; // corrected;
}

```

Welche abweichenden Verfahren für die Approximationen zur Verfügung stehen, kann im OpenFOAM User Guide [2] ermittelt werden. Als Beispiel seien das Upwind - Verfahren

zweiter Ordnung (`upwindLinear`) und das Zentrale-Differenzen-Verfahren (`linear`) genannt.

3.2.4 Angaben zur Lösung des Gleichungssystems im File `fvSolution`

Sind alle Approximationsarten definiert, kann das diskrete Gleichungssystem aufgebaut werden. Welche Methoden zur Lösung des linearen/nichtlinearen Gleichungssystems angewendet werden sollen, wird im File `fvSolution` bestimmt. Hierbei kann für jede Erhaltungsgröße eine separate oder eine kollektive Methode für alle Größen festgelegt werden. Neben Verfahren, welche zur Lösung nur das vorgegebene Netz, das heißt die volle Anzahl an Zellwerten, verwenden, ist ebenfalls die Lösung mit *multigrid* Verfahren möglich. Als Beispiel sei der GAMG (*Geometric-algebraic multi-grid solver*), näher beschrieben in Kapitel 5.1.4, genannt. Für weitere Informationen sind der OpenFOAM User Guide [2] oder [3, 4, 5] zu konsultieren.

Weiter werden im File `fvSolution` Angaben für die Druck-, Dichte-, Geschwindigkeitskopplung gemacht, wie im unten gezeigten Fall zum SIMPLEC-Verfahren. Es kann zudem eine Korrektur für nicht-orthogonale Zellen bereitgestellt werden, ebenso ist die Einstellung weiterer relevanten Parameter möglich. In diesem Bereich können zum Beispiel Angaben über die zu erreichenden Residuen gemacht werden. Im Einzelnen sind die Einstellungen im User und Programmer's Guide [2, 3] ersichtlich. Die Steuerung der Unterrelaxation, mit welcher die Stabilität der Rechnung maßgeblich beeinflusst werden kann, wird ebenfalls im File `fvSolution` durchgeführt. Nähere Informationen sind in Kapitel 5.1.4 zu finden.

```

solvers
{
    "(p|U|h|k|epsilon|omega)"
    {
        solver          GAMG;
        tolerance       1e-08;
        relTol          0.01;
        smoother        GaussSeidel;
        nPreSweeps      0;
        nPostSweeps     2;
        nFinestSweeps   2;
        cacheAgglomeration true;
        nCellsInCoarsestLevel 10;
        agglomerator     faceAreaPair;
        mergeLevels     1;
    }
}

SIMPLE
{
    nNonOrthogonalCorrectors 3;
    rhoMin          rhoMin [1 -3 0 0 0] 0.1;
    rhoMax          rhoMax [1 -3 0 0 0] 1.5;
    transonic       no;
}

relaxationFactors
{
    fields
    {
        p          0.4;
        rho        0.4;
    }
    equations
    {
        U          0.6;
        h          0.6;
        k          0.4;
        epsilon    0.4;
        omega      0.4;
    }
}

```

3.2.5 Kontrolldatei der Rechnung controlDict

Die Datei `controlDict` kann als Kontrolldatei verstanden werden. In dieser werden verschiedene Einstellungen für die Rechnung vorgenommen. Strukturell ist die Datei für alle Arten der Berechnung gleich aufgebaut. Neben dem zu verwendenden Solver werden ebenfalls Angaben über die Startzeit, Schrittweiten und Endzeit der Berechnung gemacht. Ausgedehnte Netze können je Schritt Datenmengen im Bereich mehrerer GB erzeugen. Bei üblichen Iterationszahlen größer 1.000 (stationär) wird ersichtlich, dass es nicht sinnvoll ist, jede Iteration abzuspeichern. Die Angabe eines sinnvollen Schreibintervalls ist daher essentiell. Anfänglich sind CFD-Rechnungen oft instabil. Erst mit fortlaufender Iterationszahl stabilisiert sich der Lösungsprozess. Um bei einem frühzeitigen Abbruch der Rechnung Werte zur Analyse zur Verfügung zu haben, ist es sinnvoll, zu Beginn der Rechnung öfter die Daten speichern zu lassen. Bei der Lokalisierung falscher Randbedingungen ist dieses Vorgehen besonders wichtig. Bereits nach wenigen Iterationen wachsen einzelne Erhaltungsgrößen häufig exponentiell an. Wenn die Rechnung numerisch stabil läuft, kann das Schreibintervall deutlich vergrößert werden. Bei instationären Rechnungen ist eine ähnliche Herangehensweise in Abhängigkeit von der Zeitschrittweite denkbar. Damit OpenFOAM während der Rechnung Änderungen in der Datei `controlDict` erkennt, ist die Einstellung `runTimeModifiable true` in selbiger Datei zu ergänzen. Weitere Informationen und Einstellungen für stationäre und instationäre Rechnungen sind im User Guide [2] zu finden.

```

FoamFile
{
  version      2.0;
  format       ascii;
  class        dictionary;
  location     "system";
  object       controlDict;
}
// *****

application    rhoSimplecFoam;

startFrom      startTime;

startTime      0;

stopAt         endTime;

endTime        1000;

deltaT         1;

writeControl   timeStep;

writeInterval  100;

...

```

3.2.6 Festlegen thermodynamischer Parameter

Für die Rechnung sind Angaben zum Energietransport und zu den Eigenschaften des Fluides notwendig. Im Ordner `constant` ist hierfür die Datei `thermophysicalProperties` vorgesehen. Nach der Vorgabe des Thermo-Modells sind entsprechende Angaben zum thermodynamischen Verhalten des Fluides zu machen. Als Beispiel sei die Wärmekapazität `cp` genannt, siehe auch Kapitel 4. [2]

3.2.7 Angaben zum Turbulenzmodell

Was Turbulenz ist und welche Auswirkungen diese auf das Strömungsfeld hat, wird in Kapitel 4 diskutiert.

```

thermoType      hPsiThermo<pureMixture<constTransport<specieThermo<hConstThermo<
perfectGas>>>>;

mixture
{
  specie
  {
    nMoles      1;
    molWeight   29.22;
  }
  thermodynamics
  {
    Cp          1004.5;
    Hf          2.544e+06;
  }
  transport
  {
    // As       1.4792e-06; // Sutherland
    // Ts       116;

    mu          1.8e-05; // ConstantTransport
    Pr          0.7;
  }
}
}

```

In OpenFOAM wird das anzuwendende Turbulenzmodell über zwei Dateien definiert. Die Datei `turbulenceProperties` gibt den Simulationstyp, zum Beispiel RAS (Reynolds- Averaged- Simulation), an. Über eine zweite Datei, zum Beispiel `RASProperties`, werden anschließend Angaben zur Turbulenz gemacht, das heißt, mit welchem Untermodell diese nachgebildet werden soll. Ebenfalls kann hier eine laminare Strömung definiert werden. Es sei angemerkt, dass leichte Unterschiede im Aufbau zwischen kompressiblen und inkompressiblen Solvern vorhanden sind. [2]

```

RASModel      kOmegaSST;//kEpsilon; //laminar;

turbulence    on; //off;

printCoeffs   on;

```

3.2.8 Parallelisierung einer Berechnung

OpenFOAM beinhaltet ein leistungsfähiges Modell zur Parallelisierung der Rechnung. Die Geschwindigkeit kann je nach CPU/Core Anzahl erheblich gesteigert werden. Bei der Parallelisierung, das heißt der Aufteilung der Rechnung auf „n“ Prozessoren/Kerne, wird jedem Prozessor ein definierter Abschnitt des Netzes zugewiesen (Vergleichmäßigung der CPU/Core Auslastung). Eine lineare Steigerung der Rechengeschwindigkeit ist hierbei nicht möglich, da eine erhöhte Kommunikation zwischen den Prozessoren/Netzabschnitten benötigt wird. Die Ergebnisse der Zellen der gegenseitigen Berandungen müssen bei jeder Iteration abgeglichen werden. Eine unnötig hoch segmentierte Rechnung kann bei kleinen Netzen dazu führen, dass höhere CPU -Anzahlen länger für die Berechnung benötigen als niedrigere. Es ist daher im Einzelnen zu prüfen, ob eine weitere Steigerung der Prozessoranzahl einen Geschwindigkeitsvorteil mit sich bringt. Besonders die Dekomposierungsmethode `scotch` ist für komplexe Strömungsgebiete vorteilhaft. Über einen Algorithmus wird das Untersuchungsgebiet hinsichtlich der Zellanzahl und Berandung gleichmäßig aufgeteilt. Diese Methode bringt dabei erhebliche Geschwindigkeitsvorteile mit sich, da die CPU's äquivalent ausgelastet werden. In welcher Form OpenFOAM das Untersuchungsgebiet aufteilt, wird im Order `system` in der Datei `decomposeParDict` festgelegt, siehe Abb. 3.1.

Prinzipiell sind verschiedene Strategien zur Segmentierung des Netzes möglich, zum Beispiel `scotch` oder `simple`. Die Einstellmöglichkeiten sind im User Guide [2] nachzulesen.

Nachdem die Steuerdatei der Dekomposierung erstellt ist, lässt sich das Gebiet aufteilen.

```

numberOfSubdomains 4;

method            hierarchical;

simpleCoeffs
{
    n              (4 1 1);
    delta          0.001;
}

hierarchicalCoeffs
{
    n              (4 1 1);
    delta          0.001;
    order          xyz;
}

```

Der Konsolenbefehl `decomposePar` leitet die Aufteilung des Netzes und der zugehörigen Felder der Strömungsvariablen ein. Je nach angegebener Prozessoranzahl liegen nach der Ausführung „n“ Subdomains im Hauptordner vor. Abb. 3.3 zeigt exemplarisch das Ergebnis der Aufteilung für vier Prozessoren.

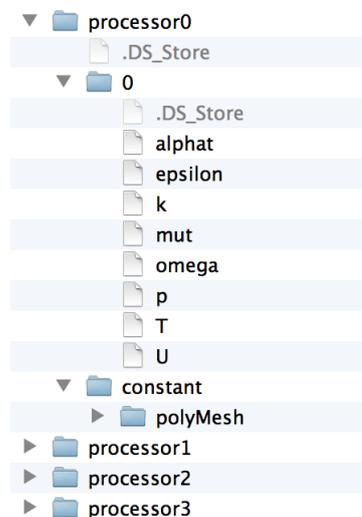


Abbildung 3.3: Subdomains nach der Dekomposition

3.2.9 Starten einer Berechnung

Sind alle Einstellungen, Randbedingungen und Netzangaben vorgenommen, kann die eigentliche Berechnung gestartet werden. Der Start wird über die Konsole im Hauptordner eingeleitet, hierfür wird der Name des Solvers, zum Beispiel `simpleFoam`, verwendet. Sind alle Einstellungen richtig vorgenommen, startet die Rechnung. Andernfalls wird ein Fehler in der Konsole ausgegeben. Während der Rechnung werden die Iterationsschritte, die benötigte Zeit sowie die Residuen der Untersuchungsgrößen in der Konsole angezeigt. Eine grafische Darstellung der Residuen ist nicht direkt implementiert, siehe Kapitel 3.2.10.

Soll die Rechnung parallelisiert ablaufen, ist ein modifizierter Befehl zu verwenden. Basis für die Prozessorkommunikation ist die Open-MPI Library (<http://www.openmpi.org>). Entsprechend wird der Konsolenbefehl zum Starten aufgebaut: `mpirun -np 4 simpleFoam -parallel`. Erneut wird die Anzahl der Prozessoren (vier) und der Name des Solvers (`simpleFoam`) angegeben.

Zur Analyse der Residuenentwicklung ist es sinnvoll, die Konsolenausgabe während der Rechnung in einer Log-Datei zu speichern. Hierzu ist der Startbefehl der Rechnung zu modifizieren: `simpleFoam >log`. Ein äquivalentes Vorgehen ist bei der parallelisier-

ten Rechnung möglich. Die Datei wird während der Berechnung aktualisiert, was eine Echtzeit - Auslesung dieser ermöglicht. [2]

3.2.10 Ausgabe von Residuen in OpenFOAM

Trotz der fehlenden Grafikausgabe der Residuen während der Rechnung in OpenFOAM ist diese über externe Tools möglich. Verwendet werden kann das frei erhältliche Tool Gnuplot (<http://www.gnuplot.info>), welches speziell zur Ausgabe von wissenschaftlichen Daten entwickelt wurde. Zur Auslesung der Daten aus dem erstellten Log-File und zur grafischen Ausgabe wird ein Skript für Gnuplot erstellt (im Hauptordner). Auf den genauen Aufbau der Programmierung soll nicht im Detail eingegangen werden. Folgende Skriptzeilen lesen die Residuen der Geschwindigkeitskomponenten aus und plotten diese in einem separaten Fenster von Gnuplot. [2, 6]

```
set logscale y
set title "Residuals in OpenFOAM"
set ylabel 'Residual'
set xlabel 'Iteration'
plot ...
"< cat log | grep 'Solving for Ux' | cut -d' ' -f9 | tr -d ',' title 'Ux' with lines,\
"< cat log | grep 'Solving for Uy' | cut -d' ' -f9 | tr -d ',' title 'Uy' with lines,\
"< cat log | grep 'Solving for Uz' | cut -d' ' -f9 | tr -d ',' title 'Uz' with lines,
pause 1
reread
```

Gestartet wird die grafische Ausgabe der in der Skriptdatei angegebenen Größen über den Konsolenbefehl: `gnuplot NameSkriptdatei.txt`.

3.3 Postprocessing in Paraview

Nachdem die Rechnung die maximale Iterationszahl oder das Konvergenzkriterium erreicht hat, kann das Postprocessing gestartet werden. Prinzipiell ist die Auswertung mit verschiedenen Tools möglich. Im vorliegenden Fall soll das prädestinierte Tool Paraview verwendet werden. Wie dieses im Detail zu bedienen ist, soll nicht Bestandteil dieser Erläuterung sein. Es soll nur der grundlegende Ablauf aufgezeigt werden.

Nach der Rechnung liegen alle geschriebenen Iterationsschritte in separaten Ordnern, benannt nach der jeweiligen Iterationszahl, vor. Die Struktur ist hierbei ähnlich der des Ordners „0“. Wurde eine parallelisierte Rechnung durchgeführt, müssen die einzelnen Felder der Prozessoren rekonstruiert werden. Dies wird über den Befehl `reconstructPar -latestTime` durchgeführt. Alternativ setzt der Befehl `reconstructPar -time n` ausschließlich den angegebenen Iterationsschritt „n“ wieder zusammen. Gänzlichliches Weglassen der Option `-time` hat zu Folge, dass alle vorliegenden Iterationsschritte rekonstruiert werden. Das Ergebnis liegt anschließend in der selben Dateistruktur wie bei einer nicht parallelisierten Rechnung vor. In Paraview ist es möglich, beide Typen, das heißt, dekomponierte und rekonstruierte Daten auszulesen.

Zwei Möglichkeiten zum Anzeigen in Paraview sind vorhanden. Über den Konsolenbefehl `paraFoam` kann das Ergebnis direkt in Paraview angezeigt und bearbeitet werden. Alternativ kann im Hauptordner eine leere Datei mit dem Präfix „foam“ erzeugt werden. Diese Datei ermöglicht das Öffnen der OpenFOAM-Daten direkt aus Paraview. Ob die Daten zerlegt oder zusammengesetzt vorliegen, wird während des Öffnens angegeben. Ebenfalls können einzelne Größen der Strömung oder bestimmte Patches/InternalMesh aus- oder eingeblendet werden. Die Analyse der Daten über bestimmte Filter in Paraview wird somit erleichtert. Die `.foam`-Datei kann beliebig oft mit verschiedenen

Einstellungen (Patches/Variablen) parallel geladen werden. Weitere Informationen sind auf der Hersteller-Homepage zu finden (<http://www.paraview.org>). [2]

4 CFD – Modell und Modellparameter

In Kapitel 4 wird die Modellbildung beschrieben und zugrundeliegende Ansätze definiert. Neben wichtigen Einflussparametern wird insbesondere auf die Netzerstellung mit dem OpenFOAM-Tool *snappyHexMesh* eingegangen. Die Implementierung der turbulenten Einflüsse soll ebenfalls beleuchtet werden.

4.1 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen werden entsprechend der Aufgabenstellung gesetzt. Da die Abgasdurchmischung im Wesentlichen in der saugseitigen Mischkammer stattfindet, wird die geometrische Begrenzung entsprechend um diese Mischkammer gelegt. Zur hinreichenden Abbildung der Ein- und Ausströmvorgänge werden die angrenzenden Kanäle abschnittsweise mit modelliert. In Richtung der Radialgebläse wird der Absaugkanal bis vor die Umlenkung zu den Läufern simuliert. Zur Stabilisierung der Rechnung wird der Bereich mit gradlinigen Abgängen für eine etablierte Austrittsströmung modelliert.

Der instationäre Stahlwerks-Prozess hat äquivalent nicht stationäre Bedingungen bei der Absaugung durch die CEAG zur Folge. Es muss für eine stationäre Rechnung ein Zeitintervall mit ähnlichen Parametern ausgewählt werden. Die Anlage soll im voll belasteten Zustand, das heißt mit laufendem Schmelz- und Pfannenofen, simuliert werden. Der Einlauf- und Auslaufprozess (Start/Ende des Schmelzprozesses) wird hierbei nicht simuliert. Über diese Einschränkungen kann von stationären Eingangsgrößen ausgegangen werden. Näheres ist in Kapitel 2.4 beschrieben.

4.2 Fehlertypen und Genauigkeit

Bei der Vorbereitung, Erstellung und Berechnung der spezifischen Aufgaben in der CFD können Fehler nicht ausgeschlossen werden. Es gilt durch geeignete Maßnahmen die verschiedenen Fehlertypen zu minimieren, um ein realitätsnahes Ergebnis zu erhalten. Wichtig ist, sich nicht speziell auf einen Typ zu konzentrieren und die übrigen zu ignorieren. Ein hoch komplexes und genaues Modell kann bei einer mangelhaften Diskretisierung kein gutes Ergebnis liefern. [5]

4.2.1 Modellfehler

Der Modellfehler wird als Unterschied zwischen der realen Strömung und der exakten Lösung des mathematischen Modells, das heißt der Erhaltungsgleichungen, definiert. [5, 7]

Die oftmals als exakt bezeichneten Differenzialgleichungen zur Beschreibung eines Phänomens sind so genau wie das zugrundeliegende Modell. Als Beispiel sei das Ideale-

Gasgesetz zur Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Druck, Dichte und Temperatur zu nennen. Die Boussinesq-Approximation kann ebenfalls als Beispiel für einen bewussten Modellfehler angeführt werden. Durch die Festsetzung der Dichte für alle Terme außer dem Gravitationsterm wird ein Fehler eingeführt. Im gleichen Maße gehen Vereinfachungen bei der Geometrieapproximation in den Modellfehler ein. Details können oft nur grob oder gar nicht abgebildet werden (Beispiel: Rohrverstrebenungen in der CEAG-Mischkammer). Es muss abgeschätzt werden, wie groß der Einfluss der vernachlässigten Effekte ist. Bei fehlerhaften Annahmen und übermäßigen Vereinfachungen kann das entstehende Strömungsfeld fehlerhaft bis gänzlich falsch sein. [5, 7]

Oftmals ist diese Abschätzung schwierig, weshalb eine Validierung der Ergebnisse von entscheidender Wichtigkeit ist. Bei der Validierung wird auf Messwerte von Modellen oder realen Bauteilen zurückgegriffen. Die Messwertaufnahme, Analyse und Interpretation birgt ein weiteres Fehlerpotential. Eine hinreichende Prüfung und Aufbereitung der Rohdaten ist nötig. Als Beispiel sei das Detektieren von Fehlermessungen zu nennen. Die Validierung sollte, wenn möglich, anhand mehrerer Größen durchgeführt werden, zum Beispiel Temperatur- und Volumenstrommessung. Nach Kapitel 2.4 stehen zur Validierung nur die Temperaturdaten zur Verfügung. Messungen in der Mischkammer sind nicht möglich, entsprechende Daten stehen somit nicht zur Verfügung. [5, 7]

4.2.2 Diskretisierungsfehler

Der Diskretisierungsfehler ist definiert als Differenz zwischen der exakten Lösung des mathematischen Modells (Erhaltungsgleichungen) und der exakten Lösung der diskreten Näherungsansätze. [5, 7]

Da nur für sehr einfache Strömungen analytische Lösungen der vorliegenden Erhaltungsgleichungen bekannt sind, müssen in der Regel durch verschiedene Approximationen Näherungslösungen verwendet werden. Wird die Finite-Volumen-Methode als Beispiel herangezogen, zeigt sich, dass alleine in diesem Verfahren drei Approximationsarten nötig sind. Neben der Approximation der Integrale und der Interpolation der Flächenmittelpunktwerte ist ebenfalls die Gradientenrekonstruktion nur eine Näherung der mathematisch exakten Lösung. Durch ein höheres Diskretisierungslevel des Untersuchungsraumes, das heißt Reduktion der Zellgröße, kann der Diskretisierungsfehler im Verfahren reduziert werden. Lässt man die Elementlänge gegen Null laufen, werden die diskreten algebraischen Gleichungen wieder in Differenzialgleichungen umgewandelt. Der resultierende Fehler strebt gegen Null, die mathematisch exakte Lösung ist wieder hergestellt (*Konsistenz*). [5, 7, 8, 9]

Prinzipiell ist ein *netzunabhängiges* Ergebnis anzustreben. Durch eine Konvergenzstudie wird analysiert, ab welcher Netzauflösung keine relevanten Änderungen der Erhaltungsgrößen mehr auftreten. Für komplexe Untersuchungsgebiete ist eine solche Studie oftmals nicht umsetzbar. Da der Rechenaufwand proportional zur Elementanzahl wächst, ist eine Steigerung der Auflösung nur in strikten Grenzen sinnvoll. Die vorhandene Hardware (Arbeitsspeicher, CPUs) sowie die verfügbare Rechenzeit limitieren die Auflösung erheblich. Ähnliches gilt für die zeitliche Diskretisierung. Nach Möglichkeit sollten mindestens drei Netze mit unterschiedlichen Auflösungen und ähnlicher Struktur verglichen werden. Eine Abschätzung ist zum Beispiel über die *Richardson-Extrapolation* möglich. [5, 7, 8, 9]

4.2.3 Iterationsfehler

Die Abweichung der exakten Lösung des diskreten Gleichungssystems zur iterativ erzielten Lösung wird als Iterationsfehler bezeichnet. [5, 7]

Bei korrekt eingestellten Modell- und Solverparametern konvergiert eine numerische Berechnung im Idealfall nach einer bestimmten Iterationsanzahl gegen einen verbleibenden Restfehler (Residuum). Durch weitere Iterationen ändert sich die Lösung in keinem relevanten Maße. Das Konvergenzkriterium wird als Vorgabe definiert. Je nach Güte des vordefinierten Initialfeldes sollten die Residuen während des iterativen Lösungsverfahrens (äußere Iterationen) um vier bis sechs Größenordnungen fallen. Es sei angemerkt, dass ein niedriges Residuum nicht als Garant für eine gut angenäherte Lösung der abzubildenden Strömung gesehen werden darf. Durch die anderen Fehlerarten kann die erzielte Lösung dennoch falsch sein. [5, 7, 8]

4.2.4 Programmier- und Anwenderfehler

Als Programmier- und Anwenderfehler werden solche Fehler betrachtet, welche direkt durch eine falsche Implementierung oder Eingabe entstehen. Durch simple Testfälle können diese Fehler weitestgehend aufgedeckt werden, da ein direkter Vergleich zur analytischen Lösung dieser einfachen Fälle möglich ist. Oftmals ist die falsche Annahme von Randbedingungen Fehlerursache für eine vorzeitige Beendigung der Berechnung. Nur durch ein systematisches Vorgehen und mit ausreichender Erfahrung ist eine weitestgehende Prävention möglich. [5]

4.3 Geometrische Modelle

Bei der Approximation der 3D-Geometrie ist es notwendig, Vereinfachungen zu treffen. Auf- und Einbauten in der Mischkammer und den angrenzenden Kanälen, deren Einfluss als gering erachtet wird, werden nicht modelliert. Vernachlässigt werden sollen alle Rohrverstreungen in der Mischkammer, siehe Abb. 2.4. Der Einfluss im Fernfeld und somit für die global zu untersuchende Strömung ist als gering abzuschätzen. Lokale Auswirkungen der Verstreungen für das Nahfeld der Strömung bleiben unberücksichtigt. Dieser Fehler muss in Kauf genommen werden, da eine ausreichende Diskretisierung im Umfeld jeder Verstreung nicht umsetzbar ist. Die Hardware limitiert hier die Umsetzbarkeit einer sehr genauen Approximation der Geometrie. Auf die Diskretisierungsgüte wird in Kapitel 4.7 eingegangen.

Da das Strömungsfeld in der Mischkammer von übergeordnetem Interesse ist, werden alle Jalousieklappen vor den Gebläsen, das heißt unmittelbar vor den Outlets des Modells, geometrisch vernachlässigt. Eine Reduktion des Volumenstroms über geänderte Anstellwinkel der Jalousieklappen wird direkt über die Randbedingungen an den Outlets beeinflusst.

4.3.1 Voruntersuchung zur Approximation der Kettenvorhänge

Bei der Vernachlässigung von Verschmutzungen wie massiven Anbackungen oder Anhäufungen am Mischkammerboden, siehe Abb. 2.4 und 2.5, ist es ersichtlich, dass das Fluid entsprechend umgelenkt wird. Eine Änderung mit unbekannter Höhe im Fernfeld ist anzunehmen. Bei der Vernachlässigung wird dieser Modellfehler zu Gunsten einer stabileren und schnelleren Berechnung/Konvergenz in Kauf genommen. Die Auswirkung

von komplett umströmten Einbauten im Untersuchungsraum ist schwerer abschätzbar. Wie oben erwähnt, werden die Rohrverstreben in der Mischkammer komplett vernachlässigt. In Bezug auf das sie umschließende Volumen sind diese nur vereinzelt vorhanden. Ihre Wirkung im globalen Strömungsfeld ist daher als sehr gering einzuschätzen.

Abweichend sind die in Kapitel 2 erwähnten Kettenvorhänge zur Reduzierung des Funkenfluges aus der Heißgasleitung näher zu betrachten. Auch wenn das Geschwindigkeitsprofil im Fernfeld der Kettenvorhänge als ähnlich anzunehmen ist (Vergleich mit und ohne Kettenvorhänge), kann die Mischwirkung beim turbulenten Umströmen der Ketten kaum vorhergesagt werden. Durch Anbackungen an den Kettengliedern reduziert sich der Abstand zu den Nachbarketten erheblich. Die Folge ist eine erhöhte Geschwindigkeit und damit eine größere Turbulenz vor und nach dem Durchschreiten der Engstellen. Wie sich Turbulenz genau auswirkt, ist in Kapitel 4.6 nachzulesen. Um zu beurteilen, ob durch die Kettenvorhänge relevante Mischvorgänge in diesem Bereich hervorgerufen werden, wird eine Voruntersuchung durchgeführt. Neben der Auswirkung im Fernfeld gilt es die Konvergenz beider Varianten zu vergleichen.

Um den Aufbau einfach zu gestalten und dennoch die vorhandenen Bedingungen bestmöglich abzubilden, werden drei parallel laufende Freistrahlen untersucht. Abb. 4.1 zeigt das 3D-Modell als Iso-Ansicht ohne Ketten. In Anlehnung an die späteren Simulationverhältnisse wird ein heißer Abgasstrahl mittig zwischen zwei kältere Fluidschichten induziert. Ziel ist es die reguläre Turbulenz und damit den Mischeffekt mit und ohne Kettenvorhang bei äquivalenten Turbulenzparametern zu vergleichen.

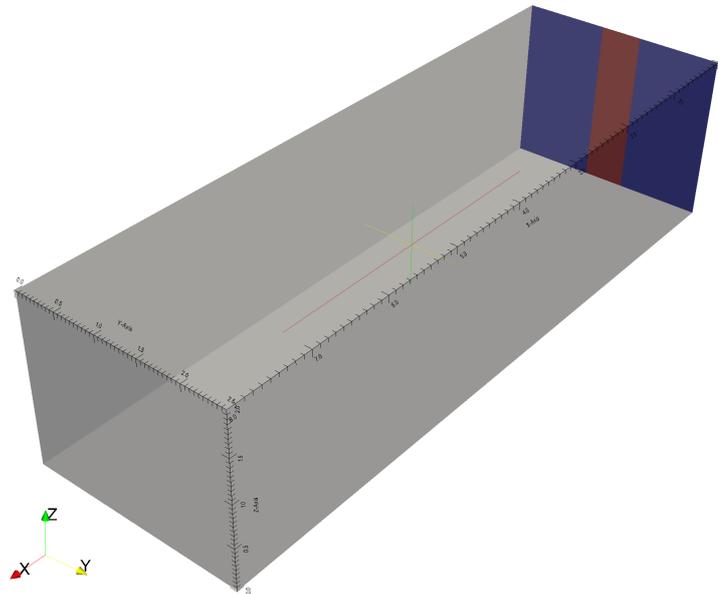


Abbildung 4.1: Aufbau der Voruntersuchung zur Approximation der Kettenvorhänge, Inletcold (blau), Inlethot (rot)

Tabelle 4.1 gibt eine Übersicht der Randbedingungen. Für die umgebenden Wände wurde für U eine `slip` Bedingung festgelegt. Die spätere Kette wird mit `noslip` belegt. Für die Untersuchung wird wie in der späteren Simulation der Solver `rhoSimplecFoam` verwendet. Die Einstellung in den Verzeichnissen `fvSolution` und `fvSchemes` werden äquivalent zur Hauptsimulation vorgenommen.

Das Untersuchungsgebiet wird in der ersten Variante ohne Kette analysiert. In dieser

Ausführung wird ein Multi-Blocknetz mit circa 470.000 Hexaederzellen in OpenFOAM erzeugt.

In der zweiten Variante wird der Kettenvorhang approximiert. Da die genaue Kettengeometrie nicht abbildbar ist, werden 16 Stangen mit einem Durchmesser von 60 mm und einem axialen Abstand von 146 mm verwendet. Das Netz wird mit dem OpenFOAM-Tool *snappyHexMesh* erstellt. Es wird eine lokale Verfeinerung im Bereich der Ketten mit einer anschließenden Randschicht von drei Elementen verwendet. Insgesamt werden 1.930.000 Zellen erstellt. Der Aufbau und Ablauf der Vernetzung mit *snappyHexMesh* wird in Kapitel 4.7 beschrieben.

Tabelle 4.1: Randbedingungen und Parameter der Voruntersuchung zur Approximation der Kettenvorhänge

Größe	inletcold	inlethot	outlet	walls/kette
U :	flowRateInletVelocity; 20.0; kg/s	flowRateInletVelocity; 10.0; kg/s	zeroGradient;	slip; (walls) fixedValue; (kette) (0 0 0); m/s
p :	zeroGradient;	zeroGradient;	fixedValue; 1.01325e5; Pa	zeroGradient;
T :	fixedValue; 323.15; K	fixedValue; 701.15; K	zeroGradient;	zeroGradient;
k :	turbulentIntensity... KineticEnergyInlet; intensity 0.05;	turbulentIntensity... KineticEnergyInlet; intensity 0.05;	zeroGradient;	compressible:... kqRWallFunction;
ω :	compressible:... turbulentMixing... LengthFrequencyInlet; mixingLength 0.005;	compressible:... turbulentMixing... LengthFrequencyInlet; mixingLength 0.005;	zeroGradient;	compressible:... omegaWallFunction;

Der turbulente Transport von skalaren Größen und deren Durchmischung hängt primär vom Turbulenzgrad Tu und der `mixinglength`; ab. Für das nachfolgende Ergebnis wurden beide Werte gleich gesetzt, siehe Tabelle 4.1. Abb. 4.2 zeigt im Vergleich die Verteilung der skalaren Größe T im Untersuchungsraum. Es kann festgestellt werden, dass bedingt durch die höhere Turbulenz an den Ketten, eine abweichende Durchmischung stattfindet.

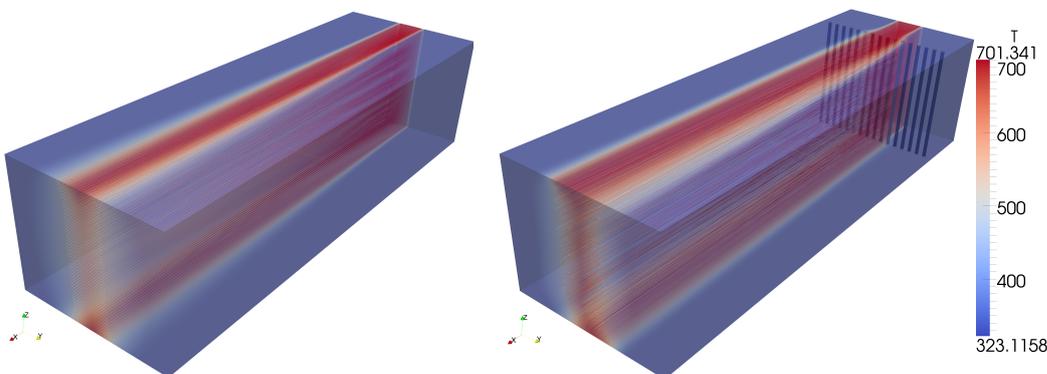


Abbildung 4.2: Übersicht des Temperaturfeldes der Voruntersuchung, Verteilung ohne Kette (links), Verteilung mit Kette (rechts)

Ohne Ketten findet eine regelmäßiger Durchmischung in ähnlichem Ausmaß statt. Bei der Rechnung mit approximierten Ketten ist das Durchmischungsbild im Fernfeld (Outlet - Patch) deutlich unregelmäßiger. Abb. 4.3 zeigt das Ergebnis der Durchmischung im Fernfeld (Outlet - Patch). Es ist anzunehmen, dass sich bei weiterer Streckung des Untersuchungsraumes in der Höhe die Wirbelstruktur noch unregelmäßiger aufbaut. Welche Auswirkungen dies im Einzelnen hat, bleibt unklar. Aus Abb. 4.2 kann entnommen werden, dass sich das Temperaturfeld im Bereich der Ketten früh aufweitet. Bei der Berechnung ohne Ketten kann beobachtet werden, dass erst deutlich später eine Vermischung stattfindet. Die Approximation der Ketten im Hauptmodell ist, da eine ähnlich gute Konvergenz der Rechnung erreicht werden kann, empfehlenswert.

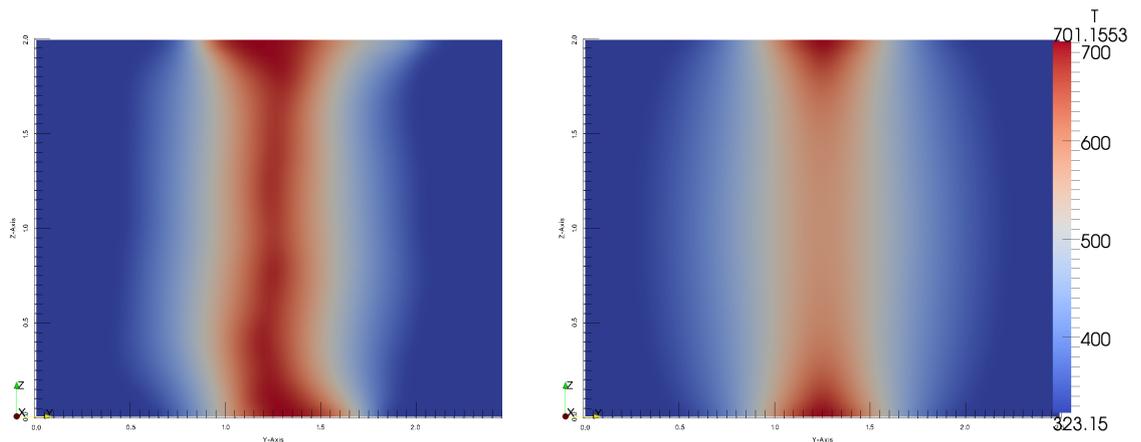


Abbildung 4.3: Temperaturverteilung der Voruntersuchung im Fernfeld, Variante mit Ketten (links), Variante ohne Ketten (rechts)

4.3.2 Primärmodell - CEAG höchste Detailgenauigkeit

Das Primärmodell der CEAG stellt die höchste Approximationsgüte der Geometrie dar, welche in dieser Arbeit untersucht wurde. Es werden die folgenden Beeinflussungen der Geometrie berücksichtigt, Vergleich siehe Kapitel 2:

1. Massive Anbackungen im Eintrittsbereich des Heißgases
2. Feste Staubanhebungen im Bodenbereich
3. Approximation der Kettenvorhänge im Eintrittsbereich des Heißgases

Eine Übersicht des Modells und dessen In- und Outlets wird in Abb. 4.4 dargestellt. Die markierten Funktionsflächen werden in Tabelle 4.2 definiert. Um den Einfluss grober Verschmutzungen in der Mischkammer zu bewerten, ist es notwendig diese geometrisch zu approximieren. Da das Betreten der Mischkammer nur begrenzt möglich ist, sind die Höhen der Anhäufungen ebenfalls weitläufig abzuschätzen. Die Oberflächen werden als glatt angenommen und äquivalent zu den Wänden der Mischkammer modelliert. Für die Formgebung werden einfache Splines in Anlehnung an vorhandene Messdaten sowie Bildmaterial der Mischkammer verwendet. Es ist anzunehmen, dass sich das Bild der Ablagerungen im Laufe eines Betriebsjahres leicht ändern kann. Eine genauere Modellierung ist daher nicht als sinnvoll zu erachten. Die massiven Anbackungen im oberen Bereich der Kettenvorhänge werden als komplett geschlossen angenommen und mit einem idealen Radius modelliert. Für die Oberflächen werden dieselben Parameter wie für die Wände gewählt.

Wie bereits in Kapitel 4.3.1 beschrieben, werden die Kettenvorhänge als Stangen mit definiertem Radius und Abstand modelliert. Abweichend zum Vorversuch werden 12 Stangen je Kettenvorhang verwendet (in Anlehnung an die Kettenanzahl). Abb. 4.5 zeigt den Aufbau des Strömungsteilers (U-Boot) und die approximierte Geometrie in höchster Detailstufe.

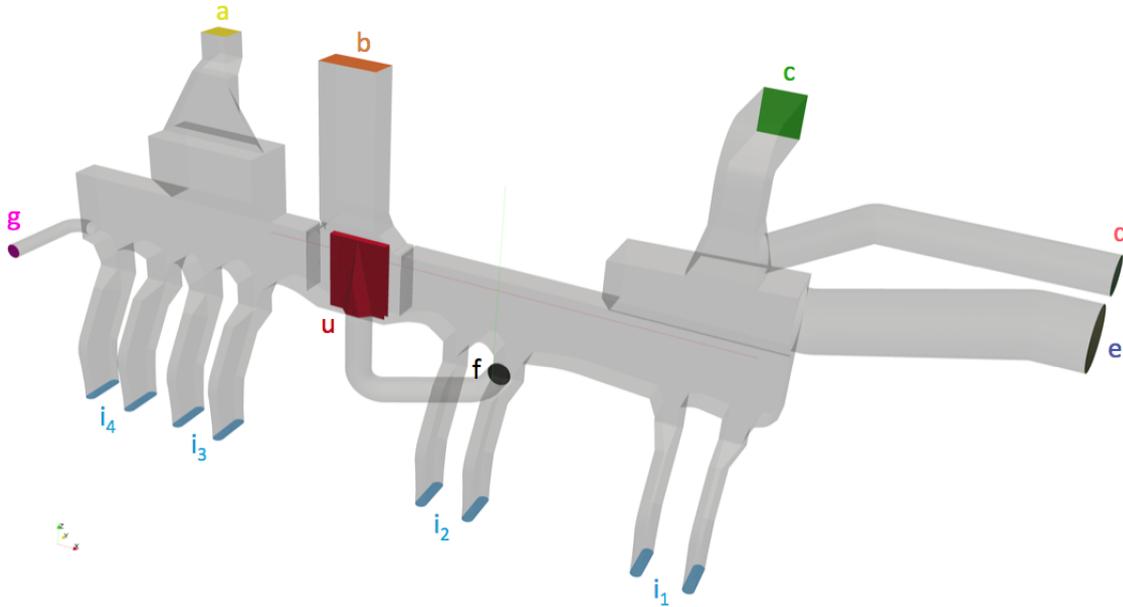


Abbildung 4.4: Übersicht des primären Modells, Inlets und Outlets sind farblich markiert, Beschreibungen siehe Tabelle 4.2 und 2.1

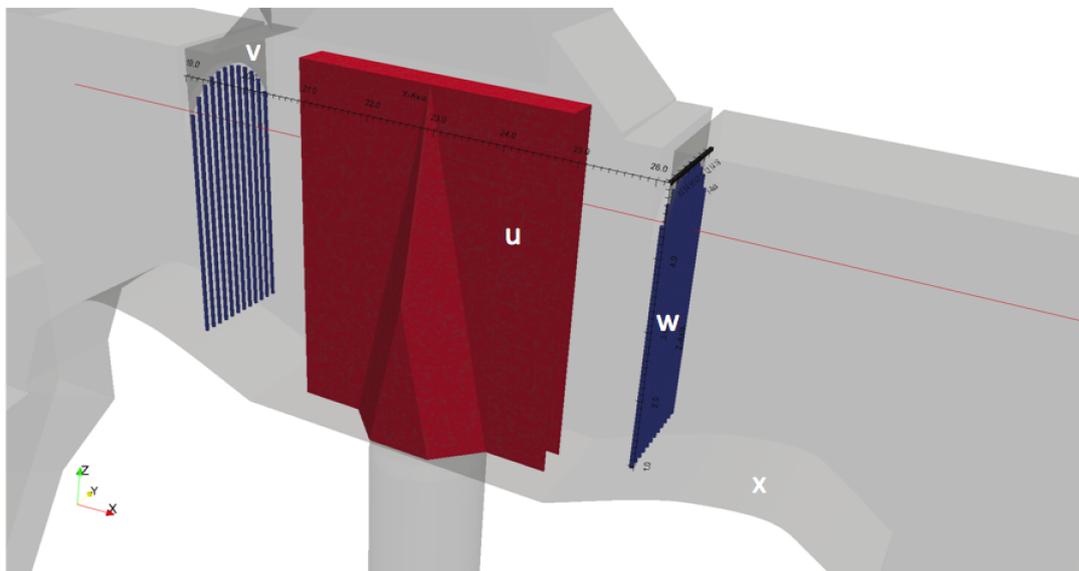


Abbildung 4.5: Ausschnitt Primärmodell mit den approximierten Geometrien, siehe Tabelle 4.2

Tabelle 4.2: Übersicht der Inlets/Outlets und Einbauten des Primärmodells

Markierung	Beschreibung	Benennung im Modell
<i>Inlets</i>		
a	Kleiner Kanal Dachabsaugung Ofen 3	Ofen3Dach1
b	Großer Kanal Dachabsaugung Ofen 3	Ofen3Dach2
c	Gießseitige Dachhaube Ofen 3	Giesshaube
d	Direktabsaugung Pfannenofen 1 und 2	Ofen12
e	Dachabsaugung Pfannenofen 2	back
f	Direktabsaugung Ofen 3 (Heißgasleitung)	Ofen3Direkt
g	Rückspülung Filter (Spülluft)	rueck
<i>Outlets</i>		
i ₁	Gebläse 1	Geb1
i ₂	Gebläse 2	Geb2
i ₃	Gebläse 3	Geb3
i ₄	Gebläse 4	Geb4
<i>Einbauten</i>		
u	Strömungsteiler über Heißgasleitung (U-Boot)	ceaguboot
v	Massive Anbackung im oberen Bereich der Kettenvorhänge	In walls inbegriffen
w	Approximierte Kettenvorhänge	kette
x	Anhäufung von Staub am Boden der Mischkammer	In walls inbegriffen

4.3.3 Sekundärmodell - CEAG im ideal gereinigten Zustand

Beim Sekundärmodell werden alle Einbauten und Beeinflussungen in der saugseitigen Mischkammer, bis auf den Strömungsteiler, vernachlässigt. Dieses Modell stellt somit die einfachste Form da. Als realer Vergleichszustand kann die ideal gereinigte Mischkammer angesehen werden. Massive Anbackungen und Staubablagerungen im Bodenbereich sind hier nicht vorhanden. Die Ketten können, wenn diese ideal gereinigt sind, ebenfalls grob vernachlässigt werden. Übersicht gibt die Abb. 4.6.

4.3.4 Einfluss der Randbedingungen an den Outlets auf das Simulationsergebnis

Für die durchgeführte Simulation ist es notwendig, entsprechende Randbedingungen an den Inlets und Outlets sowie an den begrenzenden Wänden zu definieren. Ein großes Problem ist die Definition einer Geschwindigkeit, die aus dem Untersuchungsraum gerichtet ist. Es konnte festgestellt werden, dass selbige bei nach innen gerichteten Bedingungen keine Probleme im Randbereich der entsprechenden Patches verursachen. Im Fall einer Strömung aus dem Kontrollraum, hier an den Outlets der Gebläse, kommt es zu physikalisch nicht erklärbaeren Wirbeln mit sehr hohen Geschwindigkeiten. Das

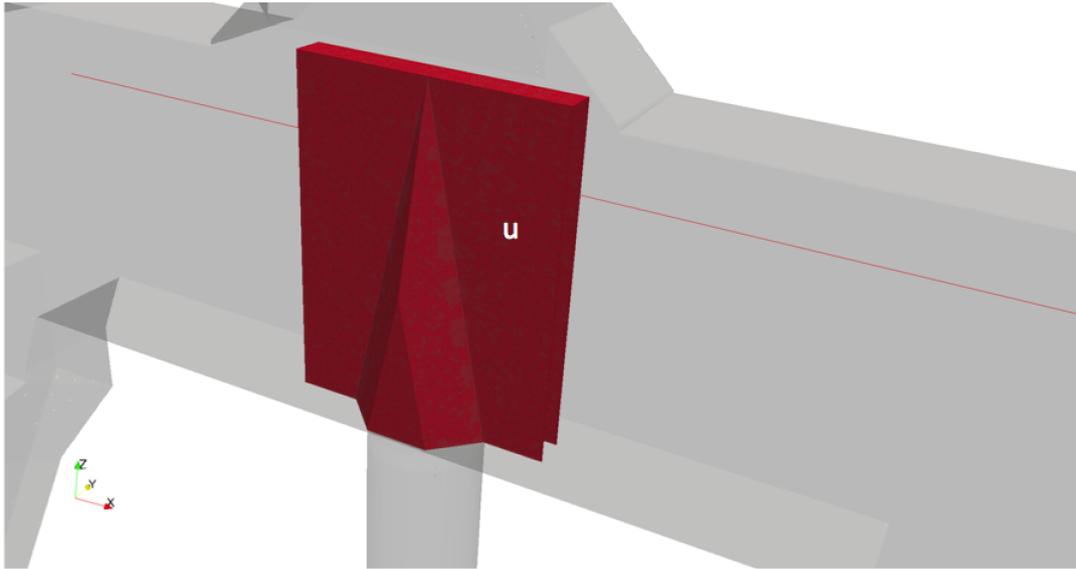


Abbildung 4.6: Änderungen des Sekundärmodells, Kettenvorhänge, Anbackungen und Staubablagerungen im Bodenbereich werden vernachlässigt, Vergleich Tabelle 4.2

Strömungsfeld im Randbereich wird hierdurch „leicht“ abgelenkt. Es wurde eine Parameterstudie durchgeführt, um alle Einflussgrößen und deren Auswirkung auf dieses Phänomen zu untersuchen. Im Folgenden soll diese Studie und ihr Ergebnis gezeigt werden. Die exemplarisch untersuchte Geometrie ist in Abb. 4.7 dargestellt. Um vergleichbar komplexe Bedingungen hinsichtlich der Vernetzung zu untersuchen, wurde ein Teilabschnitt des realen Untersuchungsraumes der CEAG verwendet.

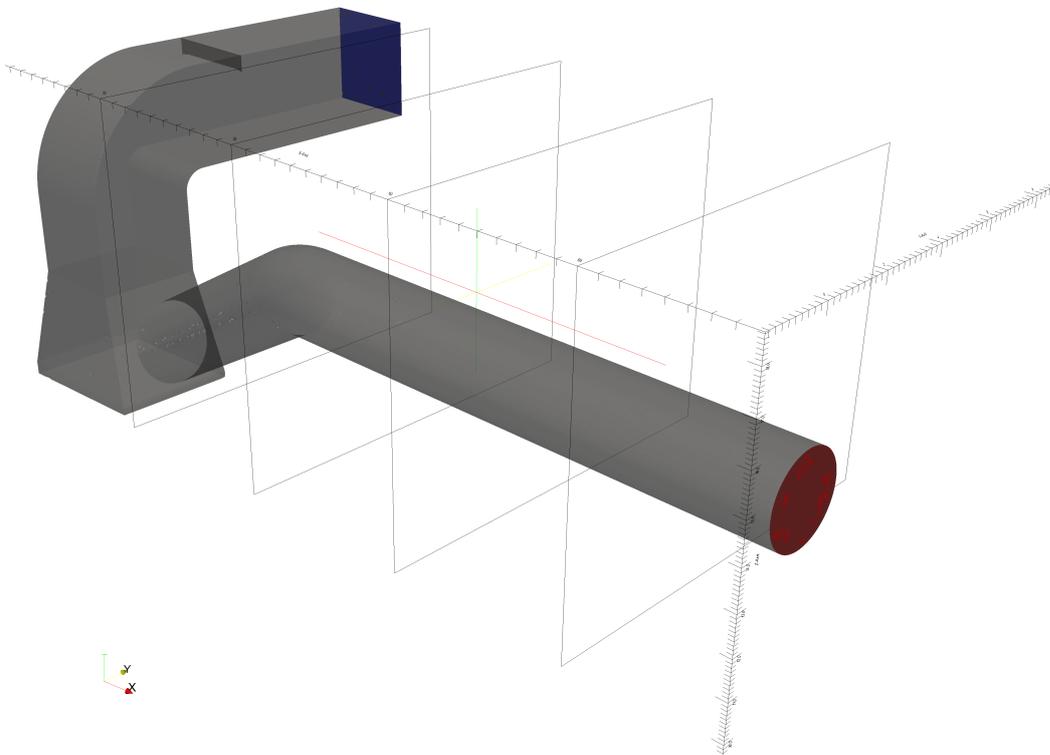


Abbildung 4.7: Übersicht der untersuchten Beispielgeometrie, Wände (grau), Inlet (blau), Outlet (rot)

Das zu untersuchende Phänomen an den Outlets der Strömung ist in Abb. 4.8 illustriert. Deutlich ist der Unterschied zwischen den Bedingungen nach Neumann und Dirichlet (Geschwindigkeit/Massenstrom) am Outlet/Inlet zu erkennen. In der unmittelbaren Randschicht am Outlet bilden sich tangential stark überhöhte Geschwindigkeiten aus. Auch nach hohen Iterationszahlen sind diese beständig. Die Streamlines werden entsprechend vor dem Patch verzerrt.

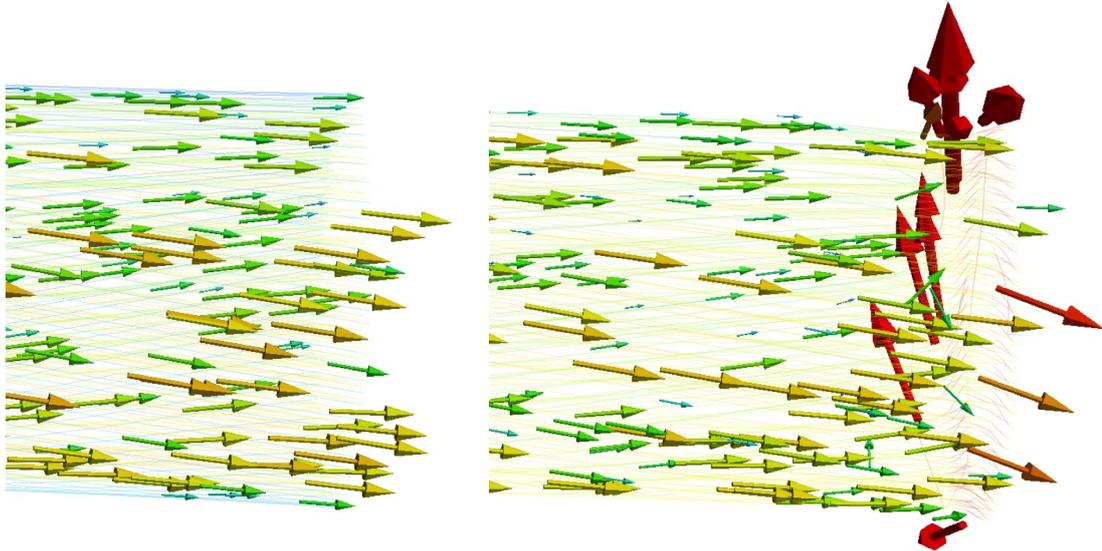


Abbildung 4.8: Übersicht des Problems am Outlet, Abbildung des qualitativen Verlaufes der Geschwindigkeitsvektoren und Streamlines, fixedInlet (links), fixedOutlet (rechts)

Auswirkung des Problems im Fernfeld der Strömung

Dass die lokalen Einflüssen unmittelbar am Outlet-Patch hoch sind, ist ersichtlich. In diesem Abschnitt soll der Einfluss im Fernfeld analysiert werden. Es werden zwei Konfigurationen untersucht. Auf der einen Seite wird ein fester Massenstrom am Inlet, auf der anderen Seite ein fester Massenstrom am Outlet simuliert. Tabelle 4.3 gibt eine Übersicht der Untersuchung mit allen relevanten Parametern der Randbedingungen. Es wurde exemplarisch eine laminare Strömung mit dem Solver `rhoSimplecFoam`; untersucht.

Dass ein abweichendes Strömungsprofil am Outlet der zwei Varianten einen Einfluss auf die Strömung hat, ist ersichtlich. Da das reale Profil am Outlet unbekannt ist, wird dieses mit einem gemittelten Wert, nach obigen Einstellungen, approximiert. Die Berechnung durchläuft 1.500 Iterationen je Untersuchung.

Die Residuen-Entwicklung zeigt geringfügige Unterschiede. Eine Vorgabe am Inlet ergibt kleinere Werte. Bei beiden Berechnungsvarianten liegen die Residuen der Geschwindigkeitskomponenten (U) in der Größenordnung 10^{-4} . Der Druck p sowie die Enthalpie h sind im Bereich von 10^{-3} angesiedelt. Das niedrige Konvergenzniveau kann teilweise auf die vergleichsweise geringe Iterationszahl zurückgeführt werden. Abb. 4.9 zeigt in einer isometrischen Ansicht die sich ausgebildeten Strömungsfelder. Zur Visualisierung wird eine Kombination aus Vektoren (Glyphs) und Streamlines verwendet, womit der Verlauf und die Richtung sichtbar gemacht werden können.

Das qualitative Feld der Strömung kann global als annähernd gleich angesehen werden.

Tabelle 4.3: Parameterstudie, Randbedingungen und Parameter der zwei Varianten

Parameter	Variante fixedInlet	Variante fixedOutlet
U Inlet:	type flowRateInletVelocity; flowRate constant 0.726; kg/s	type zeroGradient;
p Inlet:	type zeroGradient;	type fixedValue; value uniform 1.01325e5; Pa
U Outlet:	type zeroGradient;	type flowRateInletVelocity; flowRate constant -0.726; kg/s
p Outlet:	type fixedValue; value uniform 1.01325e5; Pa	type zeroGradient;
p walls:	type zeroGradient;	type zeroGradient;
U walls:	type fixedValue; value uniform (0 0 0); m/s	type zeroGradient; value uniform (0 0 0); m/s
T Inlet:	type fixedValue; value uniform 373.15; K	type zeroGradient; value uniform 373.15; K
Unterrelaxion U	0.6;	0.6;
Unterrelaxion p	0.4;	0.4;
GLS - Solver	GAMG;	GAMG;
Approximation	upwind; (linear;)	upwind; (linear;)

Der angezeigte Wert (GlyphVector Magnitude) in Abb. 4.9 stellt die Geschwindigkeit im dar.

Um die Einflüsse im Fernfeld genauer zu visualisieren, werden zwei Schnitte mit unterschiedlichen Abständen zum Outlet untersucht. Abb. 4.10 zeigt exemplarisch einen der Schnitte. Es kann gezeigt werden, dass es auch im Fernfeld Unterschiede gibt. Die Strömung richtet sich bei einem festen Outlet-Wert für alle Zellen entsprechend starrer aus (homogenere Verteilung). Es muss bei der Analyse differenziert werden, dass der Einfluss der überdurchschnittlich hohen Geschwindigkeiten im Randbereich des Outlets untersucht wird. Dass unterschiedliche Strömungsprofile am Inlet/Outlet auch Unterschiede im internen Feld hervorrufen, ist bekannt. Eine Beeinflussung durch die überhöhten Geschwindigkeiten am Outlet (Randbereich) muss nach Abb. 4.9 als kaum relevant eingestuft werden. Eine erhöhte Rotation des Fernfeldes im Outlet-Kanal, siehe Abb. 4.9, ist nicht nachweisbar. Die Auswirkung der tangential ausgerichteten Geschwindigkeit wirkt sich stark lokal begrenzt aus, siehe auch Abb. 4.8.

Durch eine künstliche Verlängerung der Outlet-Kanäle kann der Einfluss im Untersuchungsraum minimiert beziehungsweise weitgehend eliminiert werden. Negativ wirkt sich jedoch die leicht verschlechterte Konvergenz nach 1.500 Iterationen aus. Zum Vergleich sei das Residuum der Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung gezeigt:

$$\xi U_{x \text{ fixedOutlet}} = 2,520E - 04, \quad \xi U_{x \text{ fixedInlet}} = 1,578E - 04.$$

Der Unterschied ist jedoch marginal und kann durch entsprechend mehr äußere Iterationen korrigiert werden, da keine erhöhte diffusive Wirkung erkennbar ist.

Abb. 4.9 und 4.10 können mit erhöhter Auflösung im elektronischen Anhang eingesehen werden.

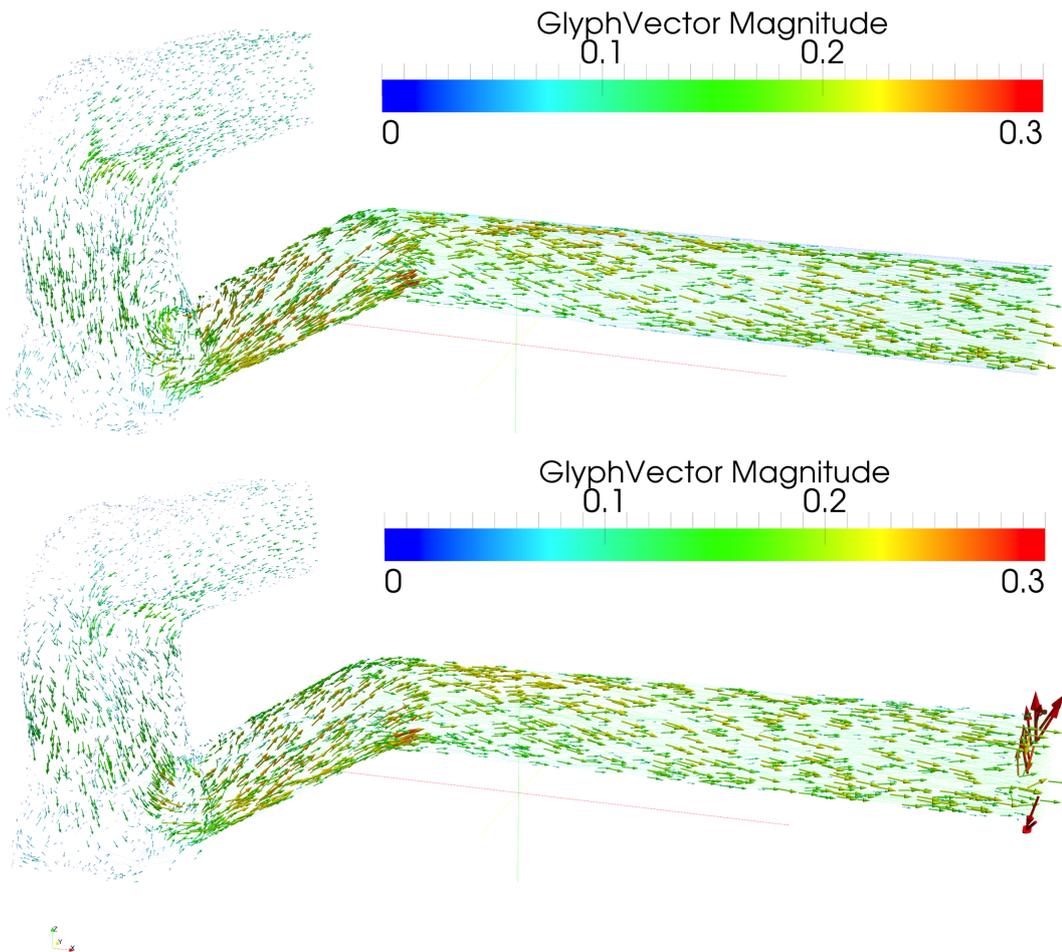


Abbildung 4.9: Übersicht der Ergebnisse beider Varianten, fixedInlet (oben), fixedOutlet (unten)

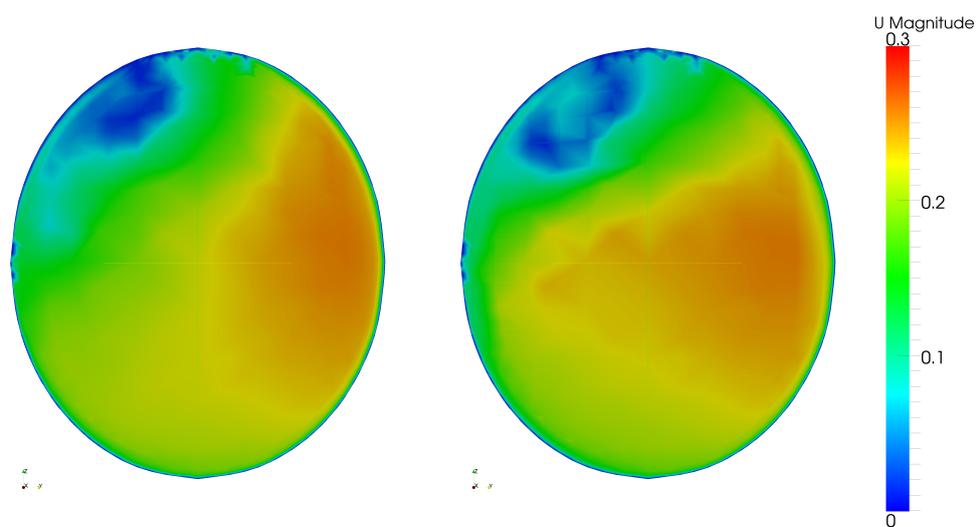


Abbildung 4.10: Schnitt im Fernfeld beider Varianten (Anzeigewert U Magnitude), fixedInlet (links), fixedOutlet (rechts)

Geometrischer Einfluss

Um auszuschließen, dass rückwirkende Effekte am Outlet für das vorliegende Phänomen verantwortlich sind, wurde dieser mit verschiedenen langen Auslaufkanälen untersucht. Durch die gradlinige Verlängerung des Outlet-Kanals wird sichergestellt, dass die Strömung beim Verlassen des Untersuchungsraumes weitestgehend etabliert und die Gradienten hier minimiert sind. Auch nach einer sehr langen Auslaufstrecke kann direkt am Outlet-Patch keine Änderung der Problematik erkannt werden.

Eine Verbesserung durch eine längere Auslaufstrecke kann nicht festgestellt werden. Das Phänomen wird nicht durch geometrische Bedingungen hervorgerufen.

Einfluss Turbulenzmodell

Um mögliche Einflüsse des gewählten Turbulenzmodells auszuschließen, werden verschiedene Konstellationen getestet. Als Basis wird das später zu verwendende $k-\omega$ -SST Modell angewendet. Zum Vergleich wird eine laminare Strömung simuliert.

Das Deaktivieren der Turbulenz brachte keine Änderung des Problems. Auch bei laminarer Strömung treten qualitativ äquivalente Geschwindigkeitsvektoren am Outlet-Patch auf. Die Ursache ist daher nicht im Turbulenzmodell begründet.

Einfluss der Randbedingungen

Die Wahl der Randbedingungen an den Outlets und Inlets hat bekanntlich einen erheblichen Einfluss auf das Strömungsfeld und die in diesem Abschnitt untersuchten Probleme am Outlet-Patch. Neben den oben genannten festen Werten für den Massenstrom (Inlet/Outlet) werden ebenfalls feste Geschwindigkeitsvorgaben getestet. Es sind keine Änderungen des Problems bei einer festen Geschwindigkeitsvorgabe am Outlet festzustellen.

Ein Einfluss der absoluten Geschwindigkeitswerte am Outlet wurde mit Werten zwischen 0,6 – 30,0 m/s untersucht. Es können keine Änderungen des qualitativen Verlaufes, bei einer Variation der Geschwindigkeitsvorgaben am Outlet, nachgewiesen werden.

Die Verwendung einer gemischten Bedingung (`inletOutlet`) am Outlet statt einer reinen Neumann-Bedingung (`zeroGradient`) für den Druck p und die Temperatur T ergibt keine Verbesserung des auftretenden Phänomens.

Eine Änderung der Bedingung an den anschließenden Wänden des Outlet-Patches von `nonslip` zu `slip` kann das Phänomen nicht umgehen. Die Auswirkung auf die Strömung hinsichtlich der Interaktion mit der Wand (Wärmeentwicklung, Dichte) durch die hohen Geschwindigkeiten wird jedoch deutlich reduziert.

Einfluss des physikalische Modells und des Solvers

Um Probleme/Fehler des primär verwendeten kompressiblen Solvers `rhoSimplecFoam` auszuschließen, wurde das inkompressible Äquivalent `simpleFoam` für eine Vergleichsrechnung verwendet. Nach 500 Iterationen kann qualitativ keine Verbesserung hinsichtlich der tangentialen Fehlgeschwindigkeiten am Outlet-Patch erreicht werden. Das auftretende Problem ist nicht durch den Solver induziert.

Einfluss der Lösungsverfahren des Gleichungssystems, der Unterrelaxion und der nicht - orthogonalen Korrektorschritte

Um Probleme bei der Lösung des internen Gleichungssystems auszuschließen, werden verschiedene Lösungsverfahren in der Datei `fvSolution` getestet. Im Speziellen werden der Solver `GAMG` und `smoothSolver` untersucht. Die Variation des Lösungsverfahrens erbringt keine Änderung der Effekte am Outlet - Patch.

Ebenfalls wird die Rechnung bei verschiedenen Unterrelaxionen $(0, 2 - 1, 0)$ für U und p durchlaufen. Die Variation verzögert das Problem geringfügig, ändert jedoch qualitativ nichts am Verlauf der Geschwindigkeit am Outlet - Patch. Eine Erhöhung der Korrektur für nicht - orthogonale Zellen (`nonorthogonalCorrector`) hat keinen positiven Effekt auf die Problematik.

Einfluss der Approximationsschemata

Abschließend wird die Auswirkung der verwendeten Schemata zur Approximation der einzelnen Terme untersucht (`fvSchemes`). Speziell wird das Verfahren des konvektiven Terms der Geschwindigkeit variiert. Als Basis wird für alle vorangegangenen Untersuchungen das Upwind - Verfahren erster Ordnung herangezogen. Untersucht werden soll, ob Verfahren höherer Ordnung eine Verbesserung oder Verschlechterung des betrachteten Phänomens hervorrufen. Es werden das Upwind - Verfahren zweiter, das QUICK - sowie das MUSCL - Verfahren angewendet. Exemplarisch wird das Ergebnis mit dem Upwind - Verfahren erster und zweiter Ordnung in Abb. 4.11 gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass der Einfluss bei Verfahren höherer Ordnung weitläufiger ist. Diese Verfahren beziehen mehr Nachbarzellen in die Bestimmung der Zellwerte ϕ_P ein als Verfahren niedrigerer Ordnung. Der Gradient der Auswirkung nahe des Outlet - Patches ist somit deutlich flacher, die Auswirkung geometrisch weitläufiger.

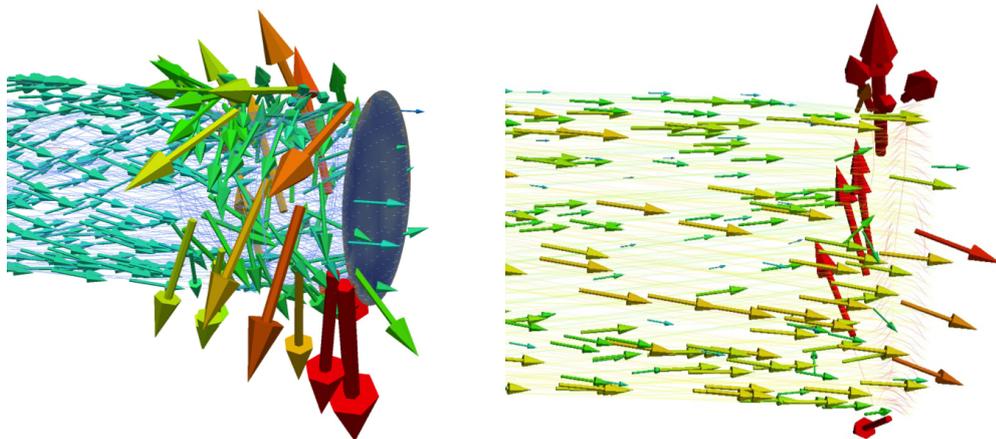


Abbildung 4.11: Upwind – Verfahren erster und zweiter Ordnung im qualitativen Vergleich, Upwind zweiter Ordnung (links), Upwind erster Ordnung (rechts)

4.3.5 Modellierung der Outlets

Für die Modellierung der Outlet - Bereiche wird zur Reduzierung der in Kapitel 4.3.4 beschriebenen Probleme eine mehrstufige Idealisierung vorgenommen. Zur Minderung der Turbulenz und potentieller Rückströmgebiete an den Outlets werden diese künstlich verlängert. Durch diese Maßnahme wird der Grad der Etablierung beim Verlassen

des Untersuchungsraumes erhöht. Wie gezeigt, treten in Wandnähe der Outlet - Patches überdurchschnittliche Geschwindigkeiten auf. Damit keine beeinflussende Interaktion mit der Wand im Outlet - Bereich auftritt, wird diese speziell modelliert. Die künstlich verlängerten Outlet - Kanäle werden als `slipwall` definiert. Zur Prävention von Stau-bereichen in den Eckregionen der Outlets wird der rechteckige Kanalquerschnitt im Endbereich abgerundet. Abb. 4.12 zeigt die angewendeten Maßnahmen zur Reduzierung der Outlet - Probleme. Wie im Kapitel 6 gezeigt, können negative Auswirkungen der Phänomene durch die beschriebenen Maßnahmen reduziert werden.

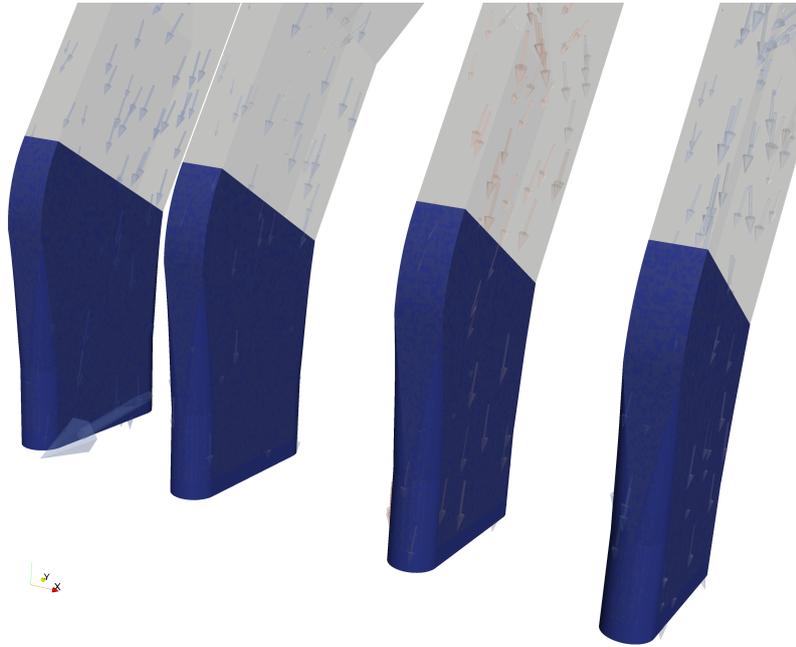


Abbildung 4.12: Übersicht der speziellen Behandlung der Outlets, künstliche Verlängerung ohne Haftung `slipwalls` (blau)

4.4 Mathematisches Modell

4.4.1 Zeitliche Diskretisierung und Klassifizierung

Die vorliegende Strömung ist, auch wenn keine direkten Angaben vorhanden sind, als turbulent anzunehmen. Durch die vier Gebläse mit je zehn Schaufeln wird das Abgas mit 990 1/min abgesaugt. Es ergibt sich somit eine Absaug-Frequenz von circa $f_{out_n} \approx n_{Schaufel} \cdot 990/60 = 165$ Hz. Unter der realistischen Annahme eines asynchronen Laufens der vier Gebläse ergibt sich in grober Näherung eine Fluktuation von circa $f_{out} \approx 4 f_{out_n} = 660$ Hz. Aufgrund der hohen Frequenz kann an den Outlets/Inlets mit konstanten gemittelten Werten gerechnet werden (Messwerte, Abtastrate $f_{abtast} \ll f_{out}$).

Bedingt durch die annähernd konstanten Randbedingungen soll ein gemitteltes Verfahren zum Einsatz kommen. Für die Berechnung des quasistationären Strömungsfeldes wird das RANS (*Raynolds-Average-Navier-Stokes*)-Verfahren verwendet. Eine instationäre Rechnung ist aufgrund der geometrischen Ausdehnung des Untersuchungsraumes und der damit verbundenen hohen Elementanzahl und Rechenzeit nicht in einem sinnvollen Rahmen möglich.

4.4.2 Kompressibilität

Das geförderte Abgas wird näherungsweise als homogenes Fluid angenommen. Nach [5] kann ein kompressibles Fluid bei maximalen Geschwindigkeiten $U_{max} < 0,3 \text{ Ma} \approx 100 \text{ m/s}$ als inkompressibel angenähert werden. Über die Boussinesq-Approximation wird die Dichte ausschließlich im Gravitationsterm als Variable betrachtet. Für den linear angenäherten Temperatureinfluss auf die Dichte kann der Koeffizient β der thermischen Ausdehnung eingeführt werden. Der Fehler bei $\Delta T_{max} < 15^\circ\text{C}$ in Luft liegt circa im Bereich von eins. Aufgrund der Temperaturunterschiede von bis zu $\Delta T_{max} \approx 400^\circ\text{C} \gg 15^\circ\text{C}$ ist von einem Fehler $\gg 1\%$ auszugehen. Die Verwendung eines kompressiblen Solvers und damit die realere Abbildung des Abgases als kompressibles Fluid ist vorzugsweise zu verwenden. [5]

4.4.3 Thermodynamisches Fluidmodell

Für das thermodynamische Modell wird das Fluid als reines ideales Gas nach Gl. (4.1) betrachtet. Über Gl. (4.2) wird der Energietransport innerhalb des Fluides in Divergenzform beschrieben. \dot{s} in W/kg stellt den massespezifischen Quellterm dar. Die irreversible Transformation von mechanischer in thermische Energie wird über die viskose Dissipationsfunktion Φ als Tensorprodukt aus dem viskosen Spannungstensor $\overline{\overline{\mathbf{T}'}}$ und dem Deformationsgeschwindigkeitstensor $\overline{\overline{\mathbf{D}}}$ abgebildet, siehe Gl. (4.3). [5, 10, 11]

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{U} - \lambda \nabla T) = -\frac{\partial p}{\partial t} + \rho \dot{s} + \Phi \quad (4.2)$$

$$\Phi = \overline{\overline{\mathbf{T}'}} : \overline{\overline{\mathbf{D}}} \quad (4.3)$$

Die Transporteigenschaften für die Energie, das heißt der Wärmetransport, werden als konstant angenähert. Abweichende Beschreibungen für variable Transporteigenschaften, zum Beispiel nach der *Sutherland Law*, sind äquivalent in OpenFOAM implementiert, siehe Kapitel 3.

4.5 Randbedingungen und Strömungsparameter

Das Einstellen korrekt gewählter Rand- und Anfangsbedingungen ist für eine konvergierende Simulation von hoher Priorität. Falsche Annahmen verletzen in der Regel Teile der Erhaltungsgleichungen und führen zu instabilen Rechnungen beziehungsweise oft zum exponentiellen Anstieg einzelner Parameter. Ein systematisches Vorgehen bei der Erstellung sowie der Fehlersuche ist unumgänglich. [5, 16]

Die Werte für die Geschwindigkeit, Massenströme und Temperatur können aus Messwerten bestimmt werden. Wie in Kapitel 2.4 gezeigt, wurden die Werte über das Prozessleitsystem und durch eigens durchgeführte Messkampagnen ermittelt.

Im Folgenden sollen die Randbedingungen an den Inlets/Outlets und Wandregionen nach Tabelle 4.2 definiert werden. An den Inlets der Mischkammer werden die gemessenen Größen, siehe Kapitel 2.4, als Eingangswerte für die Temperatur und den Massenstrom verwendet. Wie die Randbedingungen zu definieren sind, ist in Tabelle 3.1

beschrieben. Eine Übersicht der primär verwendeten Werte gibt die nachfolgende Tabelle 4.4. Auf die spezielle Modellierung der Turbulenzparameter k , ω wird in Kapitel 4.6 eingegangen.

Die geschlossene Vorgabe von U an den Inlets und Outlets ist bei kompressiblen wie inkompressiblen Strömungen problematisch. Die Kontinuität des Systems muss erhalten bleiben. Dies ist aufgrund der Approximationen in der CFD kaum möglich. Eine Bedingung muss daher mindestens zum Ausgleich der Größen frei einstellbar sein (Neumann, Mixed). Im vorliegenden Fall werden die Randbedingungen für die Dachabsaugung der Pfannenöfen (back) entsprechend vorgenommen. Durch diese Methode wird eine Vorgabe der Massenströme an den übrigen Inlets/Outlets ermöglicht, ohne die Massenerhaltung im System zu gefährden. [5, 16]

Die Massenströme an den Outlets müssen streng genommen iterativ bestimmt werden. Nach den Proportionalitätsgesetzen [12] bleibt der Volumenstrom (Betriebskubikmeter) eines Gebläses gleich, dieser ist unabhängig von der Temperatur des geförderten Fluides. Der Massenstrom hingegen ändert sich je nach Dichte des transportierten Mediums stark. Soll dieser an den Outlets vorgegeben werden, muss für die Dichte vorerst eine Abschätzung an jedem einzelnen Gebläse getroffen werden. Als Eingangswerte dienen die gemessenen Temperaturen. Stimmen die Temperaturen der Simulation nicht genau mit den Messwerten überein, muss die Temperatur, Dichte und damit der Massenstrom angepasst werden. Iterativ kann somit das korrekte Feld des vorhandenen Modells berechnet werden.

Abweichend zum Massenstrom ist die Vorgabe der Geschwindigkeit an den Gebläsen, das heißt den Outlets, definierbar. Da der Betriebsmassenstrom als konstant anzusehen ist, ist ebenfalls die Geschwindigkeit als fester Wert anzusetzen. Der Massenstrom kann sich je nach Temperatur frei einstellen. Wenn demnach keine Messungen der Temperatur vorliegen, ist die zweite Variante vorteilhaft. Diese Problematik tritt besonders bei der Optimierung der Mischkammer auf. Das Temperaturfeld, das heißt die Temperaturverteilung über die vier Gebläse, soll hier simuliert und nicht einzeln gemessen werden. Tabelle 4.5 gibt Übersicht über die angepassten Randbedingungen an den Outlets. (Messwerte siehe Kapitel 2)

Tabelle 4.4: Übersicht der primär verwendeten Randbedingungen

Benennung im Modell	Größe	Art der Bedingung/ Vorgabe	Wert/Einstellung
<i>Inlets</i>			
Ofen3Dach1	U p T k omega	flowRateInletVelocity; zeroGradient; fixedValue; turbulentIntensityKineticEnergyInlet; comp...:turbulentMixingLengthFrequencyInlet;	116.454; in kg/s 340.15; in K intensity 0.25; mixingLength 5e-3; in m
Ofen3Dach2	U p T k omega	flowRateInletVelocity; zeroGradient; fixedValue; turbulentIntensityKineticEnergyInlet; comp...:turbulentMixingLengthFrequencyInlet;	214.924; in kg/s 340.15; in K intensity 0.25; mixingLength 0.25; in m
Giesshaube	U p T k omega	flowRateInletVelocity; zeroGradient; fixedValue; turbulentIntensityKineticEnergyInlet; comp...:turbulentMixingLengthFrequencyInlet;	121.726; in kg/s 323.15; in K intensity 0.05; mixingLength 0.25; in m
Ofen12	U p T k omega	flowRateInletVelocity; zeroGradient; fixedValue; turbulentIntensityKineticEnergyInlet; comp...:turbulentMixingLengthFrequencyInlet;	34.285; in kg/s 352.15; in K intensity 0.05; mixingLength 5e-3; in m
back	U p T k omega	zeroGradient; fixedValue; inletOutlet; inletOutlet; inletOutlet;	1.01325e5; in Pa 318.15; in K 0.0959; 20.64;
Ofen3Direkt	U p T k omega	flowRateInletVelocity; zeroGradient; fixedValue; turbulentIntensityKineticEnergyInlet; comp...:turbulentMixingLengthFrequencyInlet;	30.286; in kg/s 701.15; in K intensity 0.25; mixingLength 0.5; in m
rueck	U p T k omega	flowRateInletVelocity; zeroGradient; fixedValue; turbulentIntensityKineticEnergyInlet; comp...:turbulentMixingLengthFrequencyInlet;	14.114; in kg/s 332.15; in K intensity 0.05; mixingLength 5e-3; in m
<i>Outlets</i>			
Geb1	U	flowRateInletVelocity;	-152.405; in kg/s
Geb2	U	flowRateInletVelocity;	-142.338; in kg/s
Geb3	U	flowRateInletVelocity;	-142.104; in kg/s
Geb4	U	flowRateInletVelocity;	-157.536; in kg/s
Geb1...4	p, T, k, omega	zeroGradient;	
<i>Einbauten/Wände</i>			
walls kette	U p, T k omega	fixedValue; zeroGradient; compressible::kqRWallFunction; compressible::omegaWallFunction;	(0 0 0); in m/s
ceaguboot	U p T k omega	fixedValue; zeroGradient; fixedValue; compressible::kqRWallFunction; compressible::omegaWallFunction;	(0 0 0); in m/s 701.15; in K
slipwalls	U p, T, k, omega	slip; zeroGradient;	

Tabelle 4.5: Vorgabe der Geschwindigkeit an den Outlets

Benennung im Modell	Größe	Art der Bedingung/ Vorgabe	Wert/Einstellung
<i>Outlets</i>			
Geb1	U	fixedValue;	(0 0 -29.15); in m/s
Geb2	U	fixedValue;	(0 0 -29.87); in m/s
Geb3	U	fixedValue;	(0 0 -33.79); in m/s
Geb4	U	fixedValue;	(0 0 -29.44); in m/s
Geb1...4	p, T, k, omega	zeroGradient;	

4.6 Turbulente Strömungen und Turbulenzmodelle

In Kapitel 4.6 soll eine Übersicht der gängigen CFD-Turbulenzmodelle zur Berechnung von Rohr- und Kanalströmungen gegeben werden. Die Ansätze werden speziell aus modelltechnischer und weniger aus mathematischer Sicht vorgestellt. Bei der Modellierung der Randschicht wird auf die Netzerstellung in Kapitel 4.7 Bezug genommen.

4.6.1 Turbulenz und dessen Auswirkung

In der Strömungsmechanik wird explizit zwischen laminaren und turbulenten Strömungen unterschieden. Als dimensionslose Kennziffer wird hier meist die Reynolds-Zahl einer Strömung herangezogen. Rohrströmungen beispielsweise gelten als laminar, wenn die Bedingung $Re < 2.300$ erfüllt ist. Für nicht etablierte komplexe Strömungsfelder ist kein klarer Definitionsbereich bekannt. Die meisten technischen Strömungen, wie auch das in dieser Arbeit untersuchte Strömungsfeld, sind turbulenzbehaftet. Die hiermit verbundenen Effekte können sich vorteilhaft wie auch nachteilig auf die gewünschten Phänomene der Strömung auswirken. Vorteile ergeben sich vor allem bei der Mischung von Fluiden mit unterschiedlich hohen Werten der Transportgrößen, wie zum Beispiel der Temperatur. Turbulenz ist die Ausbildung dreidimensionaler, hoch instationärer Wirbelstrukturen. Die lokalen wirbelartigen Strömungsphänomene führen zu einem erhöhten Kontakt angrenzender Fluidschichten. Diffusive Prozesse, auch *turbulente Diffusion* genannt, zwischen diesen Schichten bewirken das erhöhte Angleichen der jeweiligen Transportgrößen. Prinzipiell kann gesagt werden, dass durch die Wirbelstrukturausbildung die Oberfläche sich gegenüberliegender Fluidschichten, mit unterschiedlichen Werten der Transportgrößen, ausgedehnt wird. Abb. 4.13 zeigt exemplarisch an zwei parallelen Freistrahlen den turbulenten Mischeffekt gegenüber einer rein laminaren Strömung (Betrachtungsgröße Temperatur). Es kann beobachtet werden, dass sich die strukturelle Ausbildung dieser Wirbelfelder näherungsweise wiederholt. Über mittelnende Verfahren, zum Beispiel RMS (*Root Mean Square*), kann demnach das zeitliche Mittel dieser Strukturen abgebildet werden. Das Ergebnis ist das RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*)-Verfahren. Die numerisch berechnete Konstellation stellt eine Näherung der real auftretenden Strukturen dar. Die im Weiteren gezeigten Modelle haben sich in vielen Bereichen als ausreichend erwiesen. [5, 13, 14, 16]

Steht der reine Fluidtransport im Vordergrund, wirkt sich Turbulenz deutlich negativ aus. Der Kontakt der Fluidschichten führt zu einem Anstieg der Reibung. Die kinetische Energie der Primärströmung wird somit teilweise in innere Energie umgewandelt. Betrachtet man eine verallgemeinerte Wirbelstruktur als Relativsystem, welches sich, absolut betrachtet, mit der Hauptströmung bewegt, so finden Bewegungen in alle

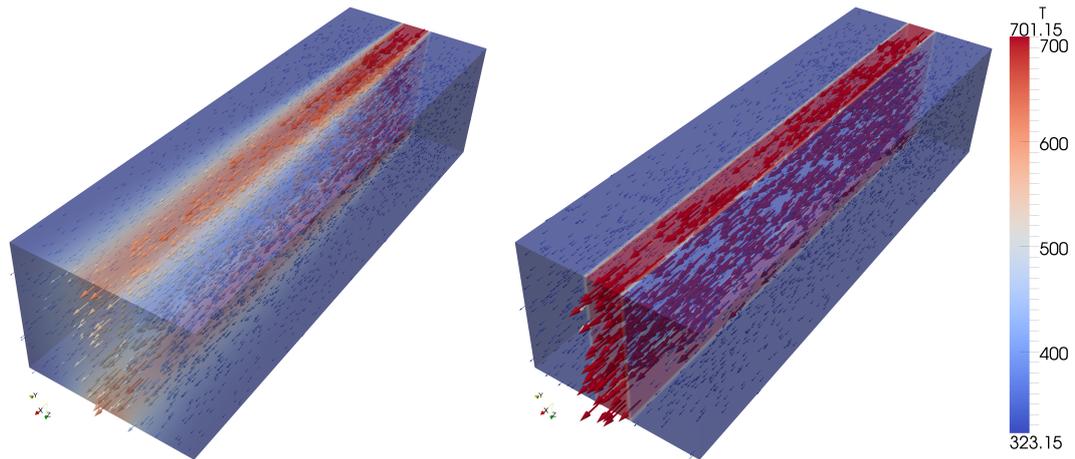


Abbildung 4.13: Exemplanische Gegenüberstellung laminarer und turbulenter Mischeffekte, turbulenter Transport (links), laminarer Transport (rechts)

drei Raumrichtungen statt. Diese Effekte schwächen durch die Energieumwandlung die Hauptströmung. Teile der primären kinetischen Energie gehen in die turbulente kinetische Energie k über. Entsprechend steigt der Druckverlust an. [5, 15, 16]

4.6.2 Turbulenzmodellierung in Wandnähe

Turbulente Phänomene in der Nähe der Wände sind für die Ausbildung von Ablösegebieten und damit für das gesamte Strömungsfeld von immenser Wichtigkeit. Grenzschichten in Wandnähe können hierbei durch zwei grundlegende Strategien abgebildet werden. Die entscheidenden Auslegungsparameter sind die dimensionslosen Größen u^+ (Geschwindigkeit) und y^+ (Wandabstand). Eine Abhängigkeit besteht hier vor allem zum allgemeinen Strömungsbild, das heißt, welche Geschwindigkeiten vorherrschen, sowie zum modellierten Netz der Randschicht. Auf die angewendete Randschichtmodellierung wird in Kapitel 4.7 eingegangen. Im Folgenden sollen die zwei Strategien vorgestellt werden. [5, 13, 15, 16]

4.6.2.1 Anwendung von Wandfunktionen

Die Verwendung von Wandfunktionen ist für viele Anwendungen hinsichtlich des Modellierungsaufwandes am effizientesten. Die viskose Unterschicht wird bei dieser Herangehensweise nicht über das Netz des Modells aufgelöst. Der Abstand des Mittelpunktes der ersten Zellschicht muss außerhalb der viskosen Unterschicht liegen. Voraussetzung hierfür ist ein dimensionsloser Wandabstand y^+ zwischen 20 und 100. [15] Die Modellierung der wandnahen Bereiche wird über entsprechende Wandfunktionen umgesetzt. Durch diese Verwendung kann auf eine explizite Auflösung der viskosen Unterschicht verzichtet werden. Die Berechnung erfolgt wie in Kapitel 4.7 beschrieben. Beim Primärnetz (Kapitel 4.7) wird ein Durchschnittswert von $y^+ = 74$ erreicht. Der Gültigkeitsbereich der logarithmischen Wandfunktion wird somit eingehalten. [5, 13, 15]

4.6.2.2 Modellierung wandnaher Turbulenzeffekte ohne die Verwendung von Wandfunktionen

Die zweite Strategie beinhaltet die Abbildung der turbulenten Effekte direkt über das Netz, das heißt über die Randschichtvernetzung. Diese muss zur hinreichenden Darstel-

lung der Effekte eine hohe, in Richtung der Wand ansteigende, Auflösung aufweisen. Für die Verdichtungsfunktion sollte ein Wert von circa 1,2 gewählt werden. [15] Die erste Zelle muss in der viskosen Unterschicht, das heißt im Bereich von $y^+ = 1$ liegen. Darüber hinaus sollten mindestens drei Zellschichten die Bedingung $y^+ < 5$ erfüllen. Eine Grenzschicht mit mindestens zehn Zellen ist anzustreben. Bei hoher Verzerrung beziehungsweise hohem Seitenverhältnis der wandnahen Zellen kann es zu Konvergenzproblemen und numerischer Instabilität kommen. Eine progressive Anordnung der Zellen in Richtung Randschicht ist daher sinnvoll. Ebenfalls wird der Längensprung zum anschließenden Netz so herabgesetzt (Idealwert circa zwei). [5, 13, 15, 16]

4.6.3 $k - \varepsilon$ - Modell

Das $k - \varepsilon$ - Turbulenzmodell wird in weiten Bereichen der CFD auch heute noch als Standardmodell angesehen. Das Zweigleichungsmodell definiert zwei partielle Differentialgleichungen zusätzlich zu den Navier-Stokes-Gleichungen zur Modellierung der turbulenten kinetischen Energie k und der Dissipationsrate ε . Die turbulente kinetische Energie an den Boundaries kann über Gl. (4.4) für OpenFOAM gut abgeschätzt werden. Bekannt sind hier die Geschwindigkeit U_{inlet} an den Inlets sowie der zugrunde gelegte Turbulenzgrad Tu der Strömung. [13, 15, 16]

$$k = \frac{3}{2} \cdot (Tu \cdot U_{inlet})^2 \quad (4.4)$$

Die Dissipationsrate ε wird über Gl. (4.5) für die Boundaries angenähert. Die Schwierigkeit dieser Abschätzung liegt in der Bestimmung des Längenmaßes L_h .

$$\varepsilon = C_\mu \cdot \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L_h} \quad (4.5)$$

Nach [17] kann das turbulente Längenmaß L_h für OpenFOAM an den Inlets über Gl. (4.6) näherungsweise festgelegt werden. Wobei d_{BL} die Dicke der Randschicht am betrachteten Inlet darstellt.

$$L_h \approx 0,22 \cdot d_{BL} \quad (4.6)$$

Die Stabilität der Rechnung, siehe Kapitel 4.6 und 4.5, ist stark von den Randbedingungen abhängig. Die Berechnung der turbulenten kinetischen Energie k kann in OpenFOAM über die Randbedingung `turbulentIntensityKineticEnergyInlet` realisiert werden. Durch Vorgabe des Turbulenzgrades `intensity` an den Inlets wird die Eingangsgröße von k automatisch berechnet. Der Startwert wird über den Platzhalter `value` vorgegeben. Die verwendeten Standardkonstanten des $k - \varepsilon$ - Modells können in der angegebenen Literatur nachgelesen werden. [2, 13, 15, 16]

Äquivalent wird `compressible::turbulentMixingLengthDissipationRateInlet` als Randbedingung für die Eingangswerte von ε verwendet. Die Berechnung der Dissipationsrate an den jeweiligen Inlets erfolgt durch Vorgabe des turbulenten Längenmaßes `mixingLength`. Die Implementierung des Initialwertes findet über `value` statt. Die Fluidströmungen erfahren keine Änderung hinsichtlich k und ε beim Überschreiten der Systemgrenze (Outlets). Die Randbedingung an den Outlets werden daher nach Neumann mit `zeroGradient` vorgegeben. Die wandnahen Bereiche werden über Wandfunktionen modelliert. Die Randbedingung `compressible::kqRWallFunction` wird für die Berechnung der turbulenten kinetischen Energie an den Wänden eingesetzt. In gleicher Weise wird für die Dissipationsrate an den Wänden verfahren. [2, 13, 15, 16]

4.6.4 k - ω - Modell

Ein weiteres häufig angewendetes Zweigleichungsmodell verwendet zur Turbulenzmodellierung, neben der leicht modifizierten turbulenten kinetischen Energie k , die turbulente Frequenz ω . Das am meisten verbreitete k - ω - Modell wurde von D.C. Wilcox entwickelt. Die turbulente „Drehfrequenz“ ω berechnet sich an den Inlets nach Gl. (4.7). [5, 13, 15]

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu \cdot k} = \frac{\sqrt{k}}{L_h} \quad (4.7)$$

Eine Abwandlung stellt das 1993 von Menter vorgestellte k - ω - SST - Modell dar. Menter versucht, durch ein kombiniertes Modell die Vorteile des k - ω - und k - ε - Modells zu vereinen. Gegenüber den ursprünglichen Modellen kann eine Verbesserung der Bestimmung von Ablöse- und Wiederanlegepunkten erreicht werden. Ebenfalls wird die Genauigkeit bei der Berechnung von Wandschubspannungen erhöht. Das k - ω - Modell ermöglicht die Modellierung wandnaher Bereiche. Es kann daher bei einer entsprechend hohen Netzauflösung im Randbereich auf Wandfunktionen verzichtet werden. Die verwendeten Konstanten des k - ω - Modells sind in einschlägiger Literatur nachzuschlagen. [5, 13, 15]

Bei der vorliegenden Strömungssimulation wurde primär das k - ω - SST - Modell verwendet. Ähnlich der Randbedingung für ε wird für die turbulente Drehfrequenz ω die Bedingung `compressible::turbulentMixingLengthFrequencyInlet` in OpenFOAM verwendet. Unter der Angabe der `mixingLength` wird ω automatisch am Inlet berechnet. Die Einstellung für die turbulente kinetische Energie k wird äquivalent zum k - ε - Modell gewählt. Der Startwerte an den Inlets kann für k mit Gl. (4.4) und für ω über Gl. (4.7) berechnet werden. [2, 5, 13, 15]

4.6.5 LES - Large Eddy Simulation

Die „Large Eddy Simulation“ kurz LES umfasst die Simulation von Strömungen/Wirbeln großräumiger Skalen. Sie gilt als Ableger der DNS, das heißt der direkten numerischen Simulation. Die Auflösung großer energiereicher Wirbelstrukturen, welche im hohen Maße zum Transport der Erhaltungsgrößen beitragen, ist das Ziel der LES. Sie ergibt somit einen Kompromiss zwischen DNS und RANS, welcher eine reduzierte Rechenzeit in Verbindung mit einer erniedrigten Genauigkeit beinhaltet. Die LES rückt somit hinsichtlich Rechen- und Modellierungsaufwand für einige spezielle Anwendungen in einen finanziell rentablen Bereich. Anders als bei der DNS, bei welcher alle Schwankungsgrößen bis zur Kolmogorov Länge η_K im Netz aufgelöst werden, umfasst die Grobstruktursimulation nur größere Wirbelstrukturen des Strömungsfeldes. Kleinere zeitliche und räumliche Schwankungen werden gemittelt. Abb. 4.14 zeigt den exemplarischen Vergleich der zwei Methoden. Da die LES wie auch die DNS instationäre Rechnungen darstellen, ist die Steigerung der erforderlichen Rechenzeit gegenüber zeitlich gemittelten Modellen, zum Beispiel dem RANS - Modell, beträchtlich. Oftmals ist der zeitliche Mittelwert zur Beurteilung eines Strömungsfeldes ausreichend. Die Effektivität der LES für komplexe und räumlich ausgedehnte Strömungsgebiete ist häufig fragwürdig. Wenn hoch instationäre Strömungen simuliert werden, ist jedoch die Anwendung der LES sinnvoll. [5, 13, 16]

4.7 Netzerstellung

Zur Lösung der vorliegenden strömungsmechanischen Aufgabe muss das Untersuchungsgebiet diskretisiert werden. Die Differentialgleichungen zur Beschreibung eines Volumens

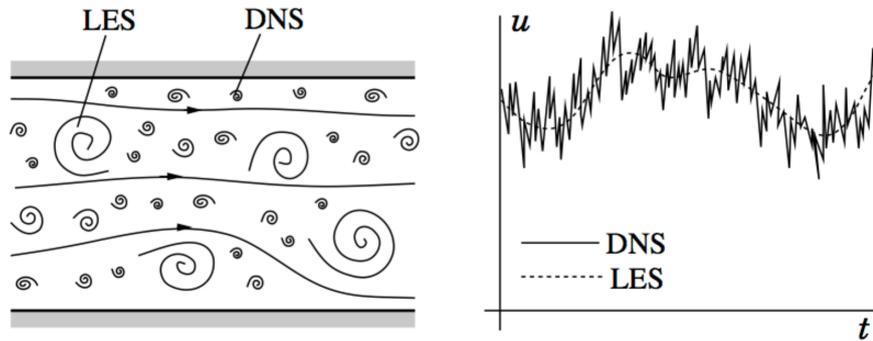


Abbildung 4.14: Vergleich der DNS und LES, [5]

können so in ein finites Gleichungssystem überführt werden. Die Lösung des entstehenden Gleichungssystems, nach Kapitel 5, ist als Näherung der realen Lösung zu verstehen. Die Auflösung und Qualität der Diskretisierung und damit des Netzes aus „ n “ Zellen hat einen großen Einfluss auf die Ergebnislösung (Reduktion des Diskretisierungsfehlers), siehe Kapitel 4.2. Der Rechenfehler aus der numerischen Methode überwiegt bei hoch aufgelösten Netzen deutlich. Das Diskretisierungslevel darf daher nicht auf Kosten der inneren und äußeren Iterationszahlen beziehungsweise der Toleranzen erhöht werden. Bei einer geringen Netzaufösung können Effekte des Strömungsfeldes und damit Informationen verloren gehen. Beispielsweise werden Wirbel und damit potentielle Ablöse- und Wiederanlegegebiete falsch abgebildet, da die Netzaufösung im vorliegenden Untersuchungsgebiet zu klein ist. Dieser Effekt rührt aus den Interpolationen der Finiten-Volumen-Methode her, welche beim vorliegenden Fall zum Einsatz kommt. Als Standardmethode wird die Eulersche Betrachtungsweise herangezogen, bei welcher ein ortsfester Untersuchungsraum mit konstantem Volumen und konstanter Form betrachtet wird. [5, 9, 18]

Im folgenden Kapitel wird die Herangehensweise zur Netzerstellung für eine anschließende CFD-Berechnung vorgestellt. Es sollen hierbei ausschließlich nicht kommerzielle Open-Source-Lösungen zum Einsatz kommen. Ein Vergleich der Netzqualitäten gegenüber kommerzieller Software kann aufgrund der fehlenden Lizenzen nicht abgedeckt werden. Eine Beurteilung der Qualität der jeweiligen Vernetzung wird über allgemein gültige Bewertungskriterien vorgenommen. [18] Die Analyse der Qualität wird am Ende des Kapitels angeführt. Zur Vernetzung und Geometriebearbeitung werden die Tools nach Tabelle 4.6 verwendet.

4.7.1 Netzerstellung mit dem OpenFOAM-Tool snappyHexMesh

Für die Vernetzung des Untersuchungsraumes können verschiedene Ansätze gewählt werden. Das einfachste Vorgehen bei komplexen Strömungsgebieten ist die unstrukturierte Vernetzung mit Tetraederzellen (zum Beispiel mit dem Tool Gmsh). Der zweite Weg ist die Diskretisierung des Untersuchungsraumes mit strukturierten, orthogonal angeordneten Hexaeder-/Polyederzellen. Auch wenn strukturierte Netze qualitativ am hochwertigsten sind, ist ihre Anwendung auf sehr einfache Geometrien beschränkt. Eine nähere Beschreibung der Netztypen ist zum Beispiel in [14, 18] zu finden. Für die Vernetzung von komplexen Geometrien ist es sinnvoll, ein gemischtes Netz aus strukturierten und unstrukturierten Bereichen zu erzeugen (*mixed*). Auf diesem Weg ist es möglich, einige Vorteile der strukturierten mit der Flexibilität der unstrukturierten Net-

Tabelle 4.6: Verwendete Tools zur Geometrie- und Netzerzeugung

Software	Softwaretyp	Entwickler	Verwendet für
<i>Inventor 2011</i>	Kommerziell	<i>Autodesk</i> http://www.autodesk.de	- Basisgeometrie
<i>Gmsh</i>	Open Source	<i>Christophe Geuzaine and Jean-Francois Remacle</i> http://geuz.org/gmsh/	- Geometriaufbereitung - Kompilierung über STL
<i>snappyHexMesh</i>	Open Source	<i>ESI OpenCFD Ltd / OpenFOAM Foundation</i> http://www.openfoam.com	- Finale Vernetzung - boundary layers
<i>blockMesh</i>	Open Source	<i>ESI OpenCFD Ltd / OpenFOAM Foundation</i> http://www.openfoam.com	- Erzeugung des Block- Basisnetzes
<i>ParaView</i>	Open Source	<i>Kitware</i> http://www.kitware.com http://www.paraview.org	- Anzeige und Analyse der Ergebnisse - STL Analyse

ze zu verbinden. Vorteil ist eine Reduzierung der numerischen Diffusion in Regionen mit gerichteten Strömungen wie in ideal horizontal/vertikal ausgerichteten Kanälen. Ebenfalls wird die benötigte Zellanzahl durch Hexader- oder Polyederzellen gegenüber reinen Tetraedernetzen deutlich reduziert. Bei einem unstrukturierten Aufbau des Netzes sind ebenfalls das spätere Gleichungssystem beziehungsweise die Koeffizientenmatrizen weniger stark diagonal besetzt. Der Zeitaufwand der iterativen Lösung steigt. [4, 5, 14, 18]

Das Tool *snappyHexMesh* baut auf einem Block- oder Multiblocknetz, das heißt einem voll strukturierten Netz, auf. Im folgenden Kapitel soll der grobe Ablauf der Vernetzung aufgezeigt werden. Ziel ist es, ein Netz aus Hexaeder-Zellen zu generieren und nicht abbildbare Bereiche wie Freiformflächen mit Pyramiden, Prismaten, Tetraedern oder Polyedern zu approximieren. Das Ergebnis ist ein gemischtes Netz aus strukturierten und unstrukturierten Bereichen.

4.7.1.1 Vorbereitung der Geometrie

Ausgangspunkt ist eine Volumenkörpergeometrie der zu untersuchenden Anlage entsprechend den gesetzten Systemgrenzen (*Autodesk Inventor 2011*). Neben der Geometrie wird der Nullpunkt, wichtig für spätere Vernetzungsschritte, definiert. Zur Aufbereitung der Volumenkörpergeometrie aus dem CAD-System und zur Separierung einzelner Flächenbereiche wird die Geometrie in *Gmsh* überführt. Als Schnittstelle kann das Format STEP (*Standard For The Exchange Of Product Model Data*) mit hoher Auflösung verwendet werden. Die Längenmaße müssen für die spätere CFD-Rechnung in SI-Einheiten vordefiniert sein. Verbleibende Exportfehler wie doppelte Linien/Punkte können in *Gmsh* korrigiert werden. Um Abstürze des teilweise instabilen Open-Source-Tools zu vermeiden, werden alle beim STEP-Import generierten *surfaces* und *volumes* gelöscht. Aus der verbleibenden Kantenstruktur werden alle benötigten Flächen manuell neu generiert. Das Resultat ist eine exakte, geschlossene Flächenstruktur der Geometrie. Übersicht über das Modell gibt Abb. 4.4.

Für den Import benannter Flächenbereiche in *snappyHexMesh* werden diese einzeln aus *Gmsh* exportiert. Als Schnittstelle fungiert das Format STL (*Surface Tessellation Language*). Alle Flächen werden nach vorgegebener Auflösung, in *Gmsh* über die 2D-

Vernetzung, in Dreiecke unterteilt. Ein Vorteil dieser Methode ist die lokale Definierbarkeit der STL-Auflösung in *Gmsh* (**Transfinite Line**, **Transfinite Surface**). Freiformflächen können so höher aufgelöst werden als plane Flächenbereiche, der Speicherbedarf reduziert sich.

Für die anschließende Vernetzung des Primärmodells werden die Wände (**walls**), die Kettenvorhänge (**kette**), die verlängerten Outlets (**slipwalls**) sowie der Strömungsteiler (**ceaguboot**) als separate Flächenmodelle benötigt. Über die „delete“ Funktion in *Gmsh* können einzelne Flächen temporär unterdrückt werden. Diese Funktion wird schrittweise für die STL-Erzeugung verwendet.

Äquivalent zur beschriebenen Vorgehensweise in Kapitel 3.3 können die STL-Dateien in Paraview geöffnet werden. Über eine Sichtkontrolle der Oberflächen werden diese auf Vollständigkeit und Qualität geprüft. Für die Verwendung in *snappyHexMesh* werden eindeutige interne Bezeichnungen der STL-Dateien benötigt. Durch Editieren der Kopf- und Fußzeile der Dateien (Texteditor) wird der automatisch durch *Gmsh* erzeugte Name *Created by Gmsh* durch eine prägnante Bezeichnung wie **walls** ersetzt.

Als Ausgangssituation für die folgende Vernetzung liegen vier STL-Dateien, extern sowie intern eindeutig benannt, vor.

4.7.1.2 Erzeugung eines Basisnetzes mit dem OpenFOAM-Tool *blockMesh*

Für die spätere Vernetzung mit *snappyHexMesh* ist die Erzeugung eines strukturierten Ausgangsnetzes erforderlich. Zur Generierung wird die OpenFOAM-Funktion *blockMesh* verwendet. Ziel ist es, ein Netz mit $n \times i \times j$ Hexaederzellen zu erzeugen, die die später zu vernetzende Geometrie komplett umschließt. Alle außerhalb der Geometriebegrenzung (STL-Oberflächen) liegenden Zellen werden im weiteren Verlauf der Vernetzung gelöscht. Da durch die Weiterverarbeitung mit dem Tool *snappyHexMesh* eine globale/lokale Verfeinerung durchgeführt wird, ist die voreingestellte Elementanzahl nur bedingt relevant. Struktur und Vorgehen bei der Verwendung des Tools *blockMesh* kann im OpenFOAM User Guide [2] nachgeschlagen werden.

Abb. 4.15 zeigt das erzeugte Multi-Blocknetz aus Hexaederzellen. Der Aufbau aus mehreren Blocknetzen wird in Kapitel 4.7.1.3 begründet. Als Dimensionierungsgrundlage dient die später zu vernetzende Geometrie plus ein Sicherheitsabstand in alle Raumrichtungen.

4.7.1.3 Probleme an den Inlets und Outlets

Die Approximation geneigter Flächen mit *snappyHexMesh* kann im Randbereich Fehler hervorbringen. Es können Elemente mit erheblichen Winkelabweichungen der Flächennormalen vorkommen (*nonOrthogonal*). Die Stabilität der Rechnung kann durch diese Elemente negativ beeinflusst werden. Neben Methoden zur Dezimierung solcher Fehlstellen in *snappyHexMesh* ist ein präventives Vorgehen beim Erzeugen des Basisnetzes sinnvoll. Über ein Multiblocknetz werden die 11 Funktionsflächen für In- und Outlets generiert. Die Abmessung der Flächen ist nicht relevant. Bei der anschließenden Vernetzung mit *snappyHexMesh* werden die 11 Kanäle an den Teilflächen des Blocknetzes geschnitten. Hierfür müssen diese aus der Blocknetzstruktur ragen. Diese Herangehensweise bietet den Vorteil, dass die Winkelnormale der Zellflächen an den In- und Outlets ideal ausgerichtet sind. Die Geometrie muss im Vorfeld zur Ausnutzung dieser Methode entsprechend präpariert werden (Verlängerung der In- und Outlet-Kanäle). Die Multiblock-Struktur wird in Abb. 4.15 gezeigt. In Anlehnung an Abb. 4.5 sind die In- und

Outlet - Schnittflächen farblich markiert. Tabelle 4.2 gibt Übersicht über die Funktionsflächen. Die `slipwalls` der Outlet - Kanäle sind grau gekennzeichnet. Die Hüllkurve der übrigen Wände (`walls`) ist in dunkelblau illustriert.

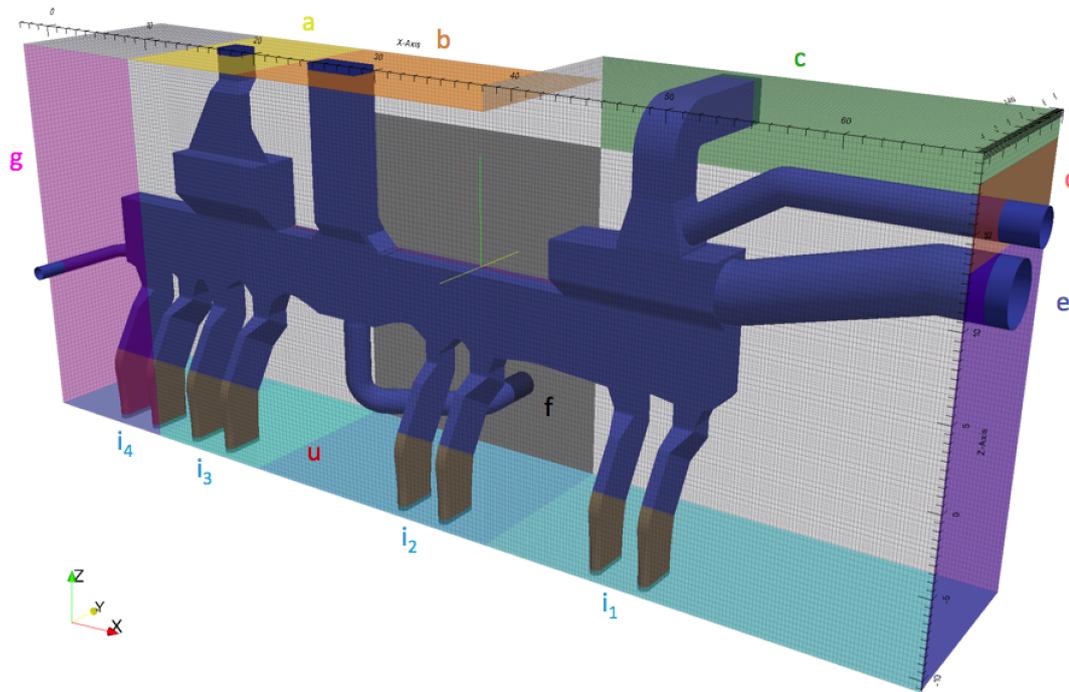


Abbildung 4.15: Übersicht der mit *blockMesh* erzeugten Multiblocknetzstruktur inklusive der STL - Hüllkurven, Markierung nach Tabelle 4.2, Vergleich mit der Geometrie siehe Abb. 4.5

4.7.1.4 Durchführung der finalen Vernetzung

Als Grundlage dienen die in Kapitel 4.7.1.1 erzeugten STL - Dateien und das in Kapitel 4.7.1.2 generierte Basisnetz. Ziel der Vernetzung mit dem Tool *snappyHexMesh* ist es, ein Hexaeder - dominantes Netz der zu approximierenden Geometrie zu erzeugen.

Prinzipielles Vorgehen

Es sei vorweg betont, dass an dieser Stellung nur das prinzipielle Vorgehen des Tools *snappyHexMesh* dargestellt werden soll. Eine detaillierte Beschreibung kann im OpenFOAM User Guide [2] eingesehen werden.

Ausgehend von dem Basisnetz wird in iterativer Vorgehensweise die durch die STL - Dateien zur Verfügung gestellte Geometrie approximiert. Es können aerodynamische Probleme mit außerhalb der STL - Geometrie liegenden Netzen wie auch strömungsmechanische Fälle mit innenliegenden Netzen modelliert werden.

Die vorhandenen Rechnerressourcen begrenzen die maximal zu erreichende Netzauflösung. Eine homogene Diskretisierung ist daher nicht für komplexe Geometrien, wie auch die CEAG, anwendbar. Für größere Untersuchungsgebiete ist eine lokale Netzverfeinerung sinnvoll. Prinzipiell sind verschiedene Strategien der Netzverfeinerung möglich. Vor der eigentlichen Vernetzung muss nach Möglichkeit ein grobes Bild des späteren Strömungsfeldes vorliegen. Der grobe qualitative Verlauf ist oft hinreichend abschätzbar. Wichtig ist die Annäherung für die adaptive Netzverfeinerung, das heißt die Erhöhung

der Auflösung in Bereichen mit hohen Gradienten. Auch ein manuelles oder automatisiertes iteratives Vorgehen ist hier möglich. [18]

Eine erhöhte Auflösung im Randbereich, das heißt im Anschluss an die später zu generierende Randschicht, ist sinnvoll. Die Approximationsgüte der Geometrie kann somit erhöht werden. Der Fehler durch ein stark überhöhtes Kantenlängenverhältnis (*aspect ratio*) der Randschichtelemente wird reduziert. Hohe Gradienten sind nach erster Abschätzung besonders im Bereich des internen Strömungsteilers (*ceaguboot*) zu erwarten. Die Auflösung soll hier stark erhöht werden, um die lokalen Mischeffekte am Strömungsteiler genau abbilden zu können. Ebenfalls wird die Approximation der im Gegensatz zur umgebenden Geometrie kleinen Längenskalen ($s_B = 0.01$ m) durch die lokal erhöhte Auflösung erleichtert. Die Umsetzung erfolgt über die Implementierung einer `box` im Abschnitt `refinementRegions`. Alle Zellen innerhalb dieser Begrenzung werden höher aufgelöst. [18, 19]

Aufbau `snappyHexMeshDict`

Die Vernetzung mit *snappyHexMesh* wird über das Script- beziehungsweise Steuerfile `snappyHexMeshDict` gelenkt. Nach der Definition der durchzuführenden Schritte werden die Geometrie-Files durch einen Verweis integriert. Die jeweiligen Funktionen sollen im Folgenden in Kommentarform grob erläutert werden. Es wird nur auf ausgesuchte Bereiche eingegangen. [19]

```
castellatedMesh true; // Hexaederezellen erzeugen
snap           true; // Zellen zuschneiden (Bei Schnitt mit Hüllkurven)
addLayers     true; // Boundary Layer hinzufügen

geometry
{
    CEAGWallsf.stl // Geschlossene Hüllkurve der gesamten Anlage
    {
        type triSurfaceMesh;
        name wallsf;
    }
    CEAGUboot.stl // Hüllkurve des Strömungsteilers
    {
        type triSurfaceMesh;
        name ceaguboot;
    }
    CEAGWalls.stl // Alle noslip Wände
    {
        type triSurfaceMesh;
        name walls;
    }
    CEAGSlipWalls.stl // Outletverlängerung als slip Wände
    {
        type triSurfaceMesh;
        name ceagslipwalls;
    }
    CEAGKette.stl // Kettenvorhänge
    {
        type triSurfaceMesh;
        name kette;
    }
    box1 // Lokaler Bereich um den Strömungsteiler
    {
        type searchableBox;
        min (17 0 0);
        max (28.14 1.9 5.5);
    }
};
```

Im Abschnitt `castellatedMeshControls` kann neben der maximalen lokalen/globalen Zellanzahl die Anzahl an Zellschichten je Diskretisierungslevel eingestellt werden (`nCellsBetweenLevels`).

Für eine verbesserte Abbildung scharfer Kanten steht die Integration eines `extended-FeatureEdgeMesh`-Files, kurz `eMesh`, zur Verfügung. Das File enthält die Abbildung aller scharfen Kanten der zu approximierenden Geometrie. Die Erzeugung findet direkt

über OpenFOAM statt. Als Grundlage wird die STL-Geometrie des entsprechenden Bereiches verwendet. Über den folgenden Konsolenbefehl wird das eMesh-File für die Wände erzeugt:

```
surfaceFeatureExtract -includedAngle 150 -writeObj ...
constant/triSurface/CEAGWallsf.stl CEAGWallsf
```

Äquivalent kann mit den Bereichen `ceaguboot`, `kette` und `slipwalls` verfahren werden. Ab der OpenFOAM-Version 2.2.x kann anstelle dieser Vorgehensweise direkt die STL-Datei zur impliziten Kantenabbildung verwendet werden, siehe Kapitel 4.7.2.4. Je `level` der Diskretisierung wird jede Hexaederzelle achsensymmetrisch halbiert. Es entstehen je Stufe und Zelle acht neue Zellen. Bei einer homogenen Netzverfeinerung verachtfacht sich damit die Zellanzahl des Netzes je Stufe. Wird von einem Ausgangsnetz mit 100.000 Zellen ausgegangen, wäre bereits nach drei Teilungsstufen eine Elementanzahl von größer 51 Millionen erreicht. Eine globale Verfeinerung kann somit nur in strikten Grenzen vollzogen werden. [19]

Die Netzverfeinerung an Oberflächen wird über die Funktion `refinementSurfaces` gesteuert. Die Stufen der Verfeinerung werden durch Grenzen angegeben. Der *snappyHex-Mesh*-Algorithmus durchläuft bei der Vernetzung eine Fallunterscheidung. In Bereichen wie glatten, ausgerichteten Wänden reicht zur hinreichenden Abbildung gegebenenfalls die Mindestanzahl an Verfeinerungen aus. In Abschnitten wie starken Krümmungen oder Ecken muss hingegen die maximale Teilungsstufe angewendet werden. Durch Gleichsetzen der oberen und unteren Grenze wird an allen Oberflächen dieselbe Diskretisierungsstufe angewendet. [19]

Über die Funktion `patchInfo` wird die Art der erzeugten Oberfläche beziehungsweise Schnittfläche der Zellen vordefiniert (`wall`, `patch`), siehe auch Kapitel 3.

```
refinementSurfaces
{
    walls
    {
        // Surface-wise min and max refinement level
        level (3 3);
        patchInfo
        {
            type wall;
        }
    }
    ...
}
```

Die zweite Möglichkeit lokal Einfluss auf die Maschenweite des Netzes zu nehmen, wird über die Funktion `refinementRegions` realisiert. In diesem Abschnitt können definierte Bereiche höher aufgelöst werden. Die Begrenzung wird entweder über simple Geometrieformen oder eine geschlossene Hüllfläche genommen. [19]

Durch die Angabe eines Ausgangspunktes `locationInMesh` wird die Fallunterscheidung initialisiert, ob das Netz innerhalb oder außerhalb der STL-Geometrie erzeugt werden soll. Der gewählte Punkt muss somit im zu vernetzenden Bereich, das heißt im betrachteten Fall innerhalb der CEAG-Geometrie liegen. [19]

Es sei darauf hingewiesen, dass die Angabe der Diskretisierungsstufen als absolut betrachtet werden muss. Bezug ist immer das Basis-Blocknetz. Wird bereits eine `Region` mit `level 1` aufgelöst, bewirkt die anschließende Angabe der Oberflächendiskretisierung `level 1` keine weitere Änderung.

```

refinementRegions
{
wallsf                                     // Angabe des bearbeiteten Bereiches
{
mode inside;                               // Verfeinerung im Bereich
levels ((1E15 1));                          // Angabe über das Diskretisierungslevel 1
}

box1                                       // Lokale Verfeinerung um den Strömungsteiler
{
mode inside;
levels ((1E15 2));                          // Angabe über das Diskretisierungslevel 2
}
}

locationInMesh (10.1111 0.1111 6.1111); // Ausgangspunkt der Verfeinerung

```

Abschließend werden Angaben über die Iterationsanzahlen der einzelnen Schritte gemacht. Die Güte des Ergebnisnetzes kann durch eine Erhöhung deutlich verbessert werden, proportional steigt jedoch die benötigte Rechenzeit.

Auf den Bereich `addLayersControls` und `meshQualityControls` wird in Kapitel 4.7.1.4 und 4.7.2 eingegangen.

Untersuchung der Vernetzung

Es wurden drei Möglichkeiten vorgestellt, die Kantenlängen der erzeugten Zellen zu beeinflussen (direkt über `blockMesh`, `refinementSurfaces` und `refinementRegions`). Am Beispiel eines Teilschnittes der CEAG-Geometrie sollen die Unterschiede demonstriert und das gewählte Vorgehen geschildert werden. Als Ausgangfile wird das im elektronischen Anhang hinterlegte finale `snappyHexMeshDict` verwendet. Änderungen werden im Folgenden darauf bezogen. Die Randschichtvernetzung wird nur am finalen Netz demonstriert.

1. Keine lokale und globale Netzverfeinerung. Die Kantenlänge wird direkt über das erzeugte Blocknetz festgelegt. Die abzubildende Geometrie wird über reines Schneiden an den Geometrieoberflächen approximiert. Abbildung 4.16 (links) zeigt die erzeugte Vernetzung. Alle Verfeinerungen sind mit `level 0` deaktiviert. Es ist ersichtlich, dass besonders an mehrdimensional verdrehten Kanten keine zufriedenstellende Abbildung der Geometrie erreicht werden kann. Die Auflösung ist deutlich zu niedrig für die zu approximierende Geometrie.
2. Globale Erhöhung der Auflösung im gesamten Gebiet (`refinementRegions`). Abbildung 4.16 (Mitte) zeigt das besser aufgelöste Ergebnisnetz. Die Netzqualität beziehungsweise der Approximationsgrad ist weiter als ungenügend zu beurteilen.
3. Abbildung 4.16 (rechts) zeigt das Ergebnisnetz bei einem Diskretisierungslevel von drei im Bereich der `ceaguboot` Oberflächen. Die Geometrie des Strömungsteilers ist bereits in einem ausreichenden Maße abgebildet. Für eine gute Diskretisierung ist das `level 4` anzusetzen.

Parallelisierung der Vernetzung in OpenFoam

Der Aufwand der Netzerstellung mit dem Tool `snappyHexMesh` kann durch das Anheben der Qualitätskriterien und Iterationsschritte stark steigen. Die Vernetzung komplexer Strömungsgebiete ist daher nur durch eine Parallelisierung sinnvoll möglich. Die Befehls-eingabe erfolgt äquivalent zur Solverparallelisierung, siehe Kapitel 3. Da die tatsächlich

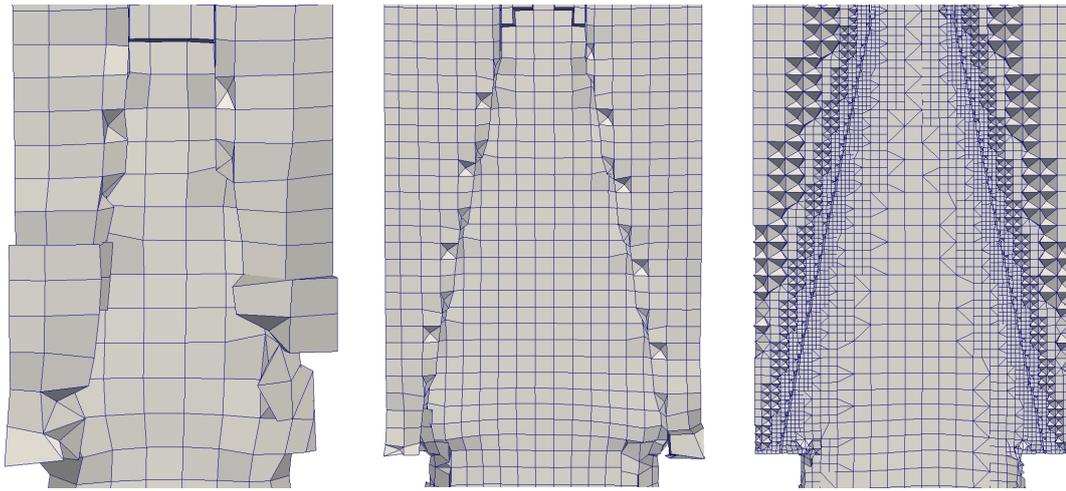


Abbildung 4.16: Übersicht der Ergebnisse am Beispiel eines abgesetzten 2D - Schnittes der CEAG - Mischkammer über der Heißgasleitung, keine Verfeinerung (links), global um eine Stufe erhöhte Auflösung (Mitte), erhöhte Auflösung im Wandbereich *ceaguboot* (rechts)

zu diskretisierende Geometrie beim Blocknetz (Ausgangspunkt bei *snappyHexMesh*) noch nicht implementiert ist, bringt die Dekomposition nach *scotch* hier keine Vorteile mit sich.

Das Netz wird mit dem Befehl `decomposePar -constant` auf „*n*“ Subdomains aufgeteilt. Da im ersten Schritt das reine Blocknetz behandelt wird, sind noch alle Dummyflächen vorhanden. Diese Regionen sind in den Randbedingungen der späteren Rechnung nicht definiert, was zu einem Fehler in OpenFOAM führt. Mit der Option `-constant` werden keine Felder aufgeteilt, der Fehler wird umgangen.

Der Befehl `mpirun -np n snappyHexMesh -parallel >snappylog` startet die Vernetzung auf „*n*“ subdomains. Die Erweiterung `>snappylog` erzeugt ein Log-File des Prozesses.

Nach erfolgreicher Prozedur wird das finale Netz wieder zusammengesetzt. Abweichend zum Ablauf bei der Rekonstruktion von Felddaten muss die Toleranz der Koordinatenabweichung angegeben werden. `reconstructParMesh -mergeTol 1e-6 -latestTime` fügt das finale Netz zusammen.

Randschicht - Realisierung

Die Vorgehensweise zur Addition einer Randschicht in *snappyHexMesh* soll Thema dieses Kapitels sein. Die Umsetzung hinreichender boundary layers ist ein großer Problemschwerpunkt der Vernetzung mit nicht kommerzieller Software. Die Umsetzung in OpenFOAM ist dennoch, mit einem entsprechenden Zeitaufwand, zufriedenstellend möglich. Ziel der im Zeitschritt „*3*“ der *snappyHexMesh* Vernetzung durchzuführenden Netzmodifikation ist es, eine durchgehende Randschicht zu erzeugen. Die Notwendigkeit einer entsprechend aufgelösten Randschicht wurde in Kapitel 4.6.2 erläutert. Der iterative Aufwand der Extrusion der boundary layers kann bei hohen Qualitätsanforderungen auch bei parallelisierten Vernetzungen sehr hoch sein. Besonders der Speicherbedarf darf nicht unterschätzt werden und führt auch bei Vernetzungen auf Cluster - Servern schnell zu Problemen.

Die Skalierung der Randschichten kann absolut oder relativ definiert werden. Bei absoluter Definition der Größe wird die Dicke des am weitesten vom Rand entfernten boundary layers festgelegt. Die relative Definition ermöglicht es, die Randschicht in Abhängigkeit des anliegenden internen Netzes zu definieren. Über die Angabe eines Skalierungsfaktors wird die Dicke des ersten boundary layers angegeben. In Abschnitten mit hoher Auflösung im Randbereich wird die Randschichtdicke somit deutlich reduziert. Da *snappyHexMesh* in der Regel die Auflösung an Kanten und Ecken erhöht, kann die relative boundary-layer-Definition vorteilhaft sein. Oftmals lokalisieren sich an Überströmkanten Bereiche mit hohen Gradienten. Eine erhöhte Auflösung auch im Randschichtbereich ist hier sinnvoll. Ein progressiver Aufbau wird über die Funktion `expansionRatio` ermöglicht. [19]

```
addLayersControls
{
    relativeSizes true; // Zelldicke relativ zum anliegenden Netz

    layers
    {
        "walls.*" // Angabe der Faces (Alle Faces des Patches walls)
        {
            nSurfaceLayers 6; // Anzahl der Zellschichten
        }
        "ceagslipwalls.*"
        {
            nSurfaceLayers 6;
        }
        "ceaguboot.*"
        {
            nSurfaceLayers 6;
        }
        "kette.*"
        {
            nSurfaceLayers 3;
        }
    }
    expansionRatio 1.2; // Verdichtung der Zellen zur Außenwand
    finalLayerThickness 0.4; // Relative Dicke der ersten Zellschicht
    minThickness 0.01; // Relative Mindestdicke der ersten Zellschicht
}
```

Im anschließenden Definitionsbereich werden erweiterte Netzeinstellungen vorgenommen. Speziell werden Angaben zu den Iterationszahlen sowie der Glättung der Zellübergänge gemacht. Besonders die Einstellung `nSmoothNormals` hat erheblichen Einfluss auf die Verzerrung des Netzes. Über die Einstellung `nSmoothThickness` wird der Übergang zwischen Bereichen mit unterschiedlichen Randschichtstärken geglättet. Die generierte Wandschichtdicke kann durch die Reduzierung des `maxThicknessToMedialRatio` einheitlich auf die definierte Dicke festgelegt werden. Hierbei wird das Verhältnis zwischen dem Abstand zur definierten Medialen-Achse und der Randschichtdicke angegeben. [19]

Die Abbildung von Kanten und Ecken kann über die Einstellung `featureAngle` beeinflusst werden. Durch das Setzen der Einstellung größer „ 90 “ werden die Zellschichten in den Ecken kombiniert. Einstellungen wie „ 30 “ bewirken eine Verjüngung der boundary layers in Richtung der Ecken. Ebenfalls spielen die Zellgrößen im Randbereich, die Anzahl der boundary layers sowie die Kombination aus `finalLayerThickness` und `minThickness` eine große Rolle. Es muss im iterativen Verfahren eine Kombination gefunden werden, um die Kanten bestmöglich abzubilden. [19]

Durch die teilweise abweichenden Elementgrößen im Randbereich, ohne boundary layers, ist eine komplett geschlossene Randschicht bei komplexen Geometrien nicht erreichbar. Es muss der bestmögliche Kompromiss zwischen iterativem Aufwand und Netzgüte gefunden werden. Abb. 4.17 und 4.18 zeigen das erzeugte Ergebnisnetz mit sechs boundary layers. Die Randschicht ist großteils geschlossen, weist jedoch an einzelnen Ecken nicht extrudierte Bereiche auf. Neben Kanten und Ecken sind auch mehrdimensional verdrehte Faces schwer abzubilden. Im besonderen Maße kommt hier das Qualitätskriterium der Orthogonalität zum Tragen, siehe Kapitel 4.7.2. Der lokale Einfluss auf diese Bereiche ist problematisch. Als Lösung kann die umhüllende Geometrie in weitere Untergruppen

```

featureAngle 355; // Abbildung von Aufeinandertreffenden
// Randschichten, das heisst in Ecken und Kanten
...
nRelaxIter 10; // Anzahl der Iterationen zur Reduzierung der
// Extrusionstiefe
...
nSmoothNormals 50; // Glättung des Netzes
nSmoothThickness 20; // Glättung der Übergänge zu Randschichten mit
// abweichender Dicke
...
maxThicknessToMedialRatio 0.01; // Angabe des Verhältnisses des Abstandes
// zur Medialen-Achse der boundary layer thickness
nLayerIter 300; // Anzahl an Iterationen zur Randschichterzeugung
// wenn nach 300 Iterationen keine Konvergenz
// erreicht wird, wird das aktuell Netz verwendet

nRelaxedIter 200; // Wenn keine Konvergenz mit den gewählten Kriterien
// erreicht werden konnte, werden reduzierte
// Anforderungen aktiviert und 200 mal iteriert.

```

unterteilt werden. Der Aufwand hierfür steht jedoch in keinem Verhältnis zum Nutzen. Besonders an den Outlets, das heißt in Bereichen mit hohen Geschwindigkeiten, kommt es an den Randelementen zu Problemen. Der *snappyHexMesh*-Algorithmus lässt die boundary layers nicht mit dem Patch der Inlets/Outlets abschließen, sondern baut diese schrittweise ab. Hierfür werden Tetraederelemente mit einer hoher Verzerrung eingesetzt. Die Qualität des Netzes sinkt. Ab der OpenFOAM-Version 2.2.x wird dieses Problem umgangen, siehe Kapitel 4.7.2.4

Neben dem in *snappyHexMesh* integrierten Randschichtvernetzer bietet OpenFOAM die Funktion `refineWallLayers` an. Rein optisch ist das Ergebnis besser als mit dem *snappyHexMesh*-Algorithmus. Qualitätskriterien werden hier nicht berücksichtigt, weshalb eine Vielzahl nicht orthogonaler Zellen sowie solche mit einer falschen Oberflächenausrichtung erzeugt werden. Die Funktion ist nur für einfache Geometrien nutzbar.

Abb. 4.17 und 4.18 zeigen das Ergebnisnetz des Primärmodells mit höchster Auflösung in zwei ausgesuchten Schnitten. Der erste Schnitt (Abb. 4.17) geht vertikal, mittig durch die saugseitige Mischkammer. Aufgrund der hohen Auflösung wird nur der Bereich um den Strömungsteiler abgebildet. Die Verdichtung an Elementen zu den Geometrieoberflächen sowie im Bereich des Strömungsteilers ist deutlich sichtbar. Der zweite Schnitt (Abb. 4.18) zeigt einen Teilbereich eines Outlet-Kanals. Deutlich ist die weitläufig geschlossene Randschicht mit sechs boundary layers zu erkennen. Die Abbildungen sind im elektronischen Anhang in hoher Auflösung hinterlegt.

4.7.2 Qualitätskriterien

Da der Aspekt „Qualität“ von jedem unterschiedlich aufgefasst wird, werden verschiedene Kriterien zur Bewertung festgesetzt. Die in diesem Kapitel besprochenen Faktoren stellen die wichtigsten Bewertungskriterien dar. Bei sehr komplexen Geometrien muss oftmals ein Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Ergebnis/Netzqualität geschlossen werden. Die Notwendigkeit einer hohen Netz- und Elementgüte spiegelt sich in deutlich reduzierten Fehlern und einer erhöhten numerischen Stabilität der Rechnung wieder. Hochgradig verzerrte Zellen wirken numerisch diffusiv. Der Fehler bei der Approximation der Zellmittelpunktwerte auf die `faces` steigt (Finite - Volumen - Methode). [18]

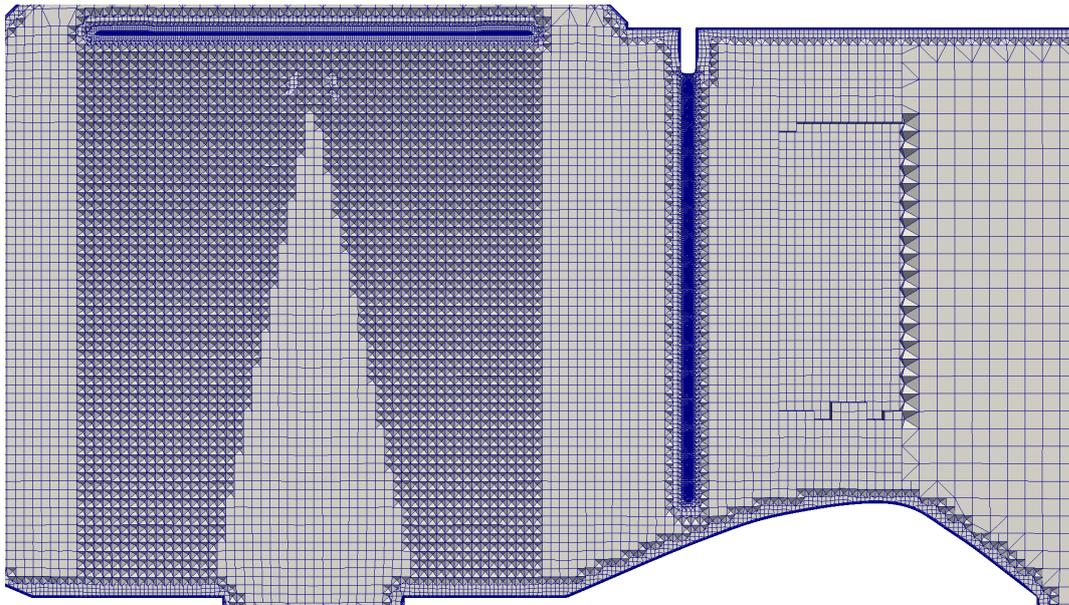


Abbildung 4.17: Ausschnitte des erzeugten Primärnetzes, Schnitt am Strömungsteiler

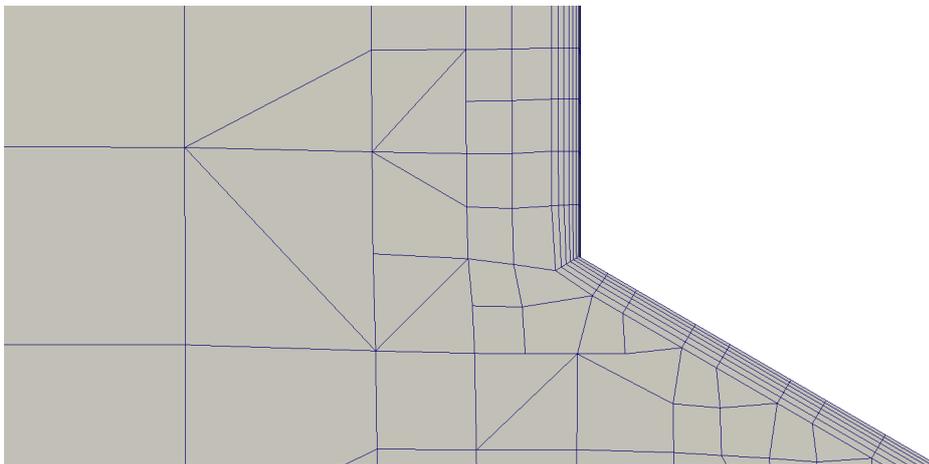


Abbildung 4.18: Ausschnitte des erzeugten Primärnetzes, Netzausschnitt mit Rand-schicht

Orthogonalität (orthogonality)

Durch eine gute Orthogonalität der Zellen wird die Genauigkeit der Gradientenrekonstruktion über das Zentrale-Differenzen-Schema erhöht. Bei hoher Nichtorthogonalität wird die approximierte Ableitung hier verfälscht. Der Grad der Orthogonalität wird in OpenFOAM über den Winkel α angegeben. α ist definiert als Winkel zwischen dem Normalenvektor der Verbindungsfläche zweier benachbarter Zellen (P und N) und dem Verbindungsvektor zwischen den Zellmittelpunkten dieser Zellen. Bei Werten $\alpha > 70^\circ$ ist die Stabilität und Konvergenz der Rechnung gefährdet. Über Korrekturverfahren kann bei Werten ($\alpha < 70^\circ$) eine genaue Lösung erzielt werden (`nNonOrthogonalCorrectors`). Ziel ist es, den Winkel α zu minimieren. [2, 5, 18]

Verzerrung (skewness)

Über den `skewness`-Wert wird die Verzerrung der Zellen ausgedrückt. Bei stark verzerrten Zellen ist die Interpolation der Zellmittelpunktswerte auf die Zellflächenmittelpunkte

ungenauer. Das Ergebnis ist eine schlechtere Konvergenz und erhöhte Instabilität. OpenFOAM warnt den Anwender bei Werten größer vier. In Randschichten können Werte deutlich über vier auftreten. Für weitere Informationen siehe [2, 3, 5, 18]

Seitenverhältnis (*aspectratio*)

Das *aspectratio* gibt das Verhältnis der Seitenlängen zueinander an. Ins Verhältnis wird hierbei der Abstand der Zellmittelpunkte zu den Zellflächenmittelpunkten und der diagonale Abstand zu den Knotenpunkten gesetzt. Für Hexaederzellen sollte ein Maximalwert von zehn eingehalten werden. Bei Tetraederzellen sollte der Wert kleiner eins sein. In Randschichten können deutlich höhere Werte auftreten. [18]

Größenverhältnis (*smoothness*)

Das Größenverhältnis von benachbarten Zellen wird über deren Volumen bestimmt. Für qualitativ hochwertige Netze sollten Werte < 2 eingehalten werden. Besonders beim Übergang zur boundary layer kann dieses Verhältnis schnell überschritten werden. [18]

4.7.2.1 Netzqualität in *snappyHexMesh*

Im letzten Abschnitt des *snappyHexMeshDict* werden Vorgabewerte für die Elementbeziehungweise Netzqualität vorgenommen. Welche Werte vorgegeben werden können, ist im OpenFOAM User Guide [2] nachzulesen. Als Beispiel werden Angaben zum maximalen Winkel α des Orthogonalitätskriteriums gemacht. Iterativ versucht das Tool *snappyHexMesh* alle Vorgabewerte bei allen Zellen zu erfüllen. Wird zum Beispiel bei der Randschicht auch nach der maximalen Iterationszahl keine Lösung nach den Vorgabewerten gefunden, wird in den entsprechenden Bereichen keine Randschicht erzeugt. Über die Angabe von reduzierten Kriterien, zum Beispiel `relaxed{maxNonOrtho 70}`, kann für problematische Bereiche ein Netz mit weniger strikten Vorgaben erzeugt werden. [2]

4.7.2.2 Analyse der Netzqualität in OpenFOAM

In OpenFOAM wird die Analyse der Netzqualität über den Konsolenbefehl `checkMesh` ermöglicht. Es folgt die Ausgabe der wichtigsten Netzparameter, zum Beispiel Anzahl der jeweiligen Zelltypen, *orthogonality*, *skewness* und *aspectratio*. Werden Qualitätskriterien verletzt, gibt OpenFOAM eine Warnung mit einem bis drei „*“. Durch die Markierung wird die Brisanz des Fehlers bewertet („***“ höchste Priorität). Wenn fehlerhafte Zellen auftreten, schreibt OpenFOAM zur Analyse automatisch die betroffenen Zellen/Faces in *cellSets* beziehungsweise *faceSets*. Die erstellten Sets können über den Befehl `foamToVTK -faceSet skewFaces (faceSet)` in eine VTK-Datei umgewandelt werden. Eine Analyse der betroffenen Bereiche ist anschließend in Paraview möglich.

Tabelle 4.7 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Netzparameter des erstellten Primärnetzes. Wie ersichtlich ist, liegt der Wert *skewness* bei $5,9108 > 4$. Eine Untersuchung der problematischen Zellen in Paraview über das *faceSet* zeigt, dass alle höher verzerrten Zellen in der Randschicht zu finden sind. Ein Großteil der Zellen ist an scharfen Kanten kumuliert.

Abb. 4.19 zeigt exemplarisch an einer Kante des Strömungsteilers einige verzerrte Zellen. Wie gezeigt werden kann (*rechts*), treten keine unphysikalischen Phänomene in den

Tabelle 4.7: Übersicht der Netzqualität des Primärnetzes in OpenFOAM

Parameter	Angabe/Wert
<i>Zell-Informationen</i>	
cells:	17.046.749
hexahedra:	15.366.585
prisms:	271.295
wedges:	507
pyramids:	0
tet wedges:	615
tetrahedra:	0
polyhedra:	1.407.747
faces:	53.504.032
<i>Zell-Qualität</i>	
Mesh non-orthogonality	Max: 65,248 average: 7,83439
Max aspect ratio	51,5685
***Max skewness	5,91038, 974 highly skew faces detected

betroffenen Bereichen auf (Beispiel Geschwindigkeit U). Alle weiteren Qualitätskriterien werden erfüllt und liegen in unproblematischen Größenordnungen (`aspectratio` nur in der Randschicht hoch). Zur Berechnung der y^+ Werte wird der Befehl `yPlusRAS-compressible` verwendet.

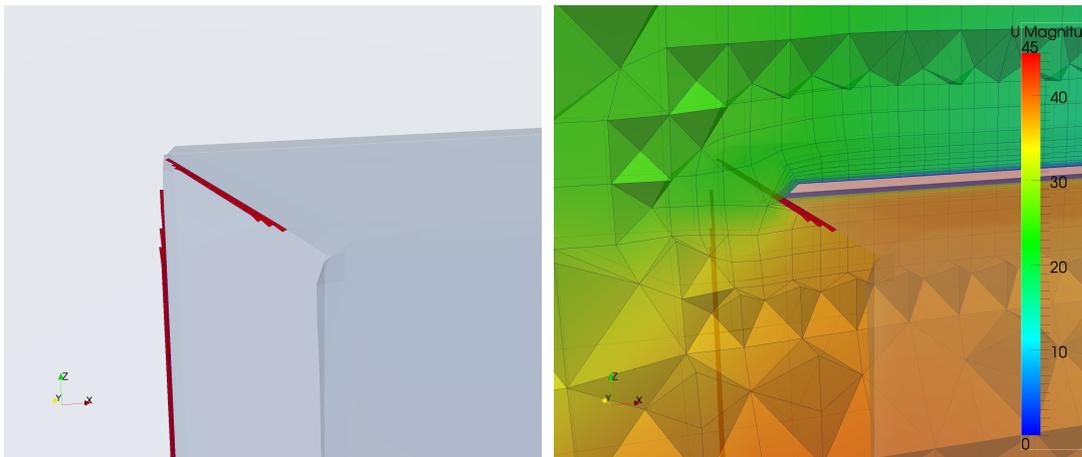


Abbildung 4.19: Verzerrte Zellen der Randschicht am Strömungsteiler, Darstellung Skewness (links), Untersuchung der Auswirkung auf die lokale Geschwindigkeit (rechts)

4.7.2.3 Untersuchung des Diskretisierungsfehlers

Wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben kann eine Abschätzung des Diskretisierungsfehlers über die Richardson-Extrapolation erfolgen. Im vorliegenden Fall limitiert die Hardware die Auflösung des Untersuchungsraumes. Wird die maximal mögliche Konstellation als höchste Diskretisierungsstufe angesehen, muss nach Richardson eine zweistufige Reduktion der Auflösung durchgeführt werden. Ein systematisches Vorgehen ist dabei essentiell, das heißt zum Beispiel 50 % weniger Zellen je Stufe (relativ zur vorherigen Diskretisierungsstufe), bei ähnlicher Verteilung. [5, 7, 18]

Aufgrund des komplexen Untersuchungsraumes ist eine Herabsetzung der Auflösung nicht systematisch möglich. Wird die Anzahl der Zellen halbiert, kann die Geometrie

nicht mehr hinreichend abgebildet werden. Erhöhte Verzerrungen der Randzellen beeinflussen die Randschichterzeugung signifikant. Die Generierung einer großteils geschlossenen Randschicht ist nicht mehr möglich. Resultierend ist das Ergebnisnetz mit dem Primärnetz nicht vergleichbar, die Extrapolation nach Richardson ist in diesem speziellen Fall nicht möglich. Es wird das Primärnetz bei höchstmöglicher Auflösung verwendet (Hardware - Limit).

4.7.2.4 Unterschiede der OpenFOAM - Version 2.2.x zu 2.1.x

Die genauen Änderungen der aktuellen Version 2.2.x zur Version 2.1.1 ist auf der OpenFOAM-Homepage [20] ersichtlich. Es soll in diesem Kapitel in Kurzform auf relevante Änderung hinsichtlich der Vernetzung eingegangen werden.

Prinzipiell können drei grundlegende Verbesserungen bei der Vernetzung mit *snappy-HexMesh* festgestellt werden. Auf der einen Seite wurde die Kantentreue, das heißt die Darstellung von *scharfen* Kanten, verbessert. Die oben beschriebene Methode, nach welcher über eine `patch.eMesh`-Datei eine separate Definition der *scharfen* Kanten nötig ist, wurde überarbeitet. Über die Angabe einer *impliziten* Katenvernetzung werden die Kanten direkt aus den STL-Dateien beziehungsweise Patches extrahiert. Qualitativ können keine Unterschiede festgestellt werden.

Auf der anderen Seite wurden signifikante Änderungen bei der Randschichtvernetzung implementiert. Bei der Erzeugung der Randschicht kann festgestellt werden, dass eine weitläufiger geschlossene Schicht generiert wird. Ebenfalls ist die Vernetzung an Kanten erheblich verbessert worden. Statt an jeder *scharfen* Kante auf eine Randschichtdicke/Randschichtanzahl von Null zu fallen, wird nun weitläufig eine geschlossene Schicht auch um die Kanten herum aufgebaut. Das oben beschriebene Problem der nicht gänzlich geschlossenen boundary layers kann somit deutlich reduziert werden.

Eine weitere Neuerung bei der Randschichtvernetzung kann am Übergang von Wänden (`wall`) zu Funktionsflächen (`patch`) festgestellt werden. Bei Version 2.1.1 wurde die Randschichtanzahl hier auf Null reduziert, was eine Verzerrung im direkten Randbereich zur Folge hat. Bei 2D-Netzen kann über die Deklaration der Funktionsflächen als `empty` das Problem umgangen werden. Im 3D-Bereich steht diese Funktion nicht zur Verfügung. Ab der Version 2.2.x wird auch im 3D-Bereich beim Übergang zu Funktionsflächen (`patch`) eine durchgängige Randschicht erzeugt. Die Verzerrung kann hier deutlich reduziert werden, ohne zusätzliche Maßnahmen ergreifen zu müssen. Der Unterschied ist in Abb. 4.20 illustriert. Der linke Rand beider Netze ist als `patch` definiert, der Rest als `wall`. Die unterschiedliche Anzahl der Schichten ist nicht versionsbedingt.

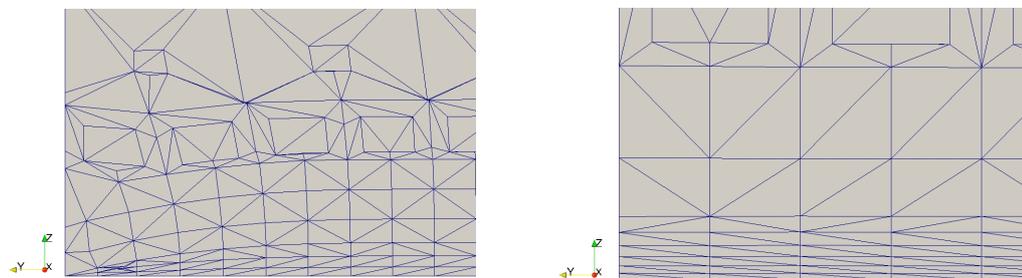


Abbildung 4.20: Vergleich OpenFoam Version 2.1.x (links) mit drei und 2.2.x (rechts) mit sechs boundary layers

5 CFD – Solver und numerische Methoden

In Kapitel 5 werden die numerischen Lösungsmethoden zur Berechnung des diskretisierten Untersuchungsraumes aufgezeigt. Neben den grundlegenden Algorithmen zur Lösung des entstehenden Gleichungssystems soll im Anschluss auf den primär verwendeten Solver der vorliegenden Arbeit eingegangen werden.

5.1 Grundgleichungen der CFD

Die Grundzüge der CFD werden als bekannt vorausgesetzt. Die Gleichungen der Massen-, Impuls- und Energieerhaltung werden nicht explizit hergeleitet. Gl. (5.1) zeigt die allgemeine Transportgleichung einer Größe ϕ in der CFD. Es zeigt sich ein schematischer Aufbau der Transportgleichung mit Instationärem-, Konvektions-, Diffusions- und Quellterm. [3, 5, 11]

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\phi\mathbf{u}) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad (5.1)$$

Die nichtlinearen, partiellen Differentialgleichungen des mathematischen Modells werden über die Finite-Volumen-Methode in ein diskretes Gleichungssystem überführt. Anschließend wird iterativ über numerische Methoden eine Lösung erarbeitet. Der erste Schritt zur Behandlung der Gleichung (5.1) ist die Integration über ein Kontrollvolumen (KV), siehe Gl. (5.2). Einige Terme werden im Anschluss über den *Gauß'schen Divergenzansatz* in Flächenintegrale umgewandelt. Über diese Herangehensweise wird die Änderung einer Größe über die Oberfläche des Kontrollvolumens beschrieben. [3, 5, 11, 16]

$$\int_{KV} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{KV} \nabla \cdot (\rho\phi\mathbf{u}) dV = \int_{KV} \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) dV + \int_{KV} S_\phi dV \quad (5.2)$$

Im Folgenden soll exemplarisch auf die Bearbeitung einzelner Terme eingegangen werden. Die jeweiligen Methoden zur Interpolation werden nur kurz erläutert. Für nähere Informationen sind zum Beispiel [5, 8, 9] heranzuziehen. Abweichend von den aufgezeigten Verfahren sind ebenfalls Methoden höherer Ordnung in OpenFOAM implementiert. Als Beispiel sei das von dritter Ordnung genaue QUICK (*Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinectics*) Verfahren, näher beschrieben in [5, 8, 16], erwähnt.

5.1.1 Konvektiver Transport

Der konvektive Transport einer Stoffgröße ϕ zeigt im Gegensatz zum diffusiven Transport ein anisotropes Verhalten. Als Beispiel kann die Verteilung von thermischer Energie in einer Strömung herangezogen werden. Es wird ersichtlich, dass Zellwerte, die

sich *aufwärts* in einer Strömung befinden, einen höheren Einfluss auf die zu berechnende Zelle ϕ_P (weiter *abwärts*) haben, als solche, welche weiter *abwärts* von ϕ_P in der Strömung angeordnet sind. Dieser Einfluss kann nicht vernachlässigt werden und muss über eine entsprechende Wichtung der Einflüsse abgeschätzt werden. Zum Einsatz kommt zum Beispiel das Upwind-Schema, welches eine Fallunterscheidung je nach Strömungsrichtung einführt. Gl. (5.3) zeigt die Vorgehensweise. Nach der Überführung des Volumenintegrals in ein Flächenintegral wird die zunächst geschlossene Oberfläche in i Einzelflächen unterteilt und über alle summiert. Die Normalenvektoren \mathbf{n} , die Flächenmittelpunktswerte ϕ sowie die Seitenflächen A_i sind als jeweilige Einzelwerte der begrenzenden Teilflächen zu sehen. Anschließend wird die bis dahin mathematisch exakte Formulierung zum Beispiel über die *Mittelpunktregel* in eine algebraische Näherungsgleichung transformiert. [5, 8, 15, 16]

$$\int_{KV} \nabla \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) dV = \sum_i \int_{A_i} \rho \phi_i (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_i dA \approx \sum_i \rho \phi_i (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_i A_i \quad (5.3)$$

Für jede Teilfläche des betrachteten Kontrollvolumens wird anschließend die eingeführte Fallunterscheidung der Upwind-Interpolation, exemplarisch gezeigt an Gl. (5.4) für die *Ost-Fläche*, durchgeführt. Sie ist in dieser Form von erster Ordnung genau.

$$\sum_i \rho \phi_i (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_i A_i \quad \text{mit: } \phi_e \begin{cases} \phi_E & \text{wenn } (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_e < 0 \\ \phi_P & \text{wenn } (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n})_e > 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

Aufgrund der numerischen Stabilität (numerisch diffusive Wirkung des führenden Fehlertermes) wird dieses Verfahren als Starteinstellung für komplexe Strömungsgebiete bevorzugt verwendet. Nähere Informationen sind zum Beispiel in [5, 8, 16] zu finden. In OpenFOAM wird die Behandlung im `fvSchemes`-File für die aufgeführten divergenten Terme festgelegt, siehe Kapitel 3.

Als Ergebnis der Interpolation an der *Ost-Fläche* unter der Verwendung von Gl. (5.4) ergibt sich bei einer ideal ausgerichteten Strömung mit \mathbf{u} aus *westlicher* Richtung das Ergebnis nach Gl. (5.5).

$$\phi_P (\rho u A_i) = \phi_P a_{P_1} \quad (5.5)$$

5.1.2 Diffusiver Transport

Beim diffusiven Transport (*Laplacian term*), siehe Gl. (5.6), ist der Einfluss der Zellwerte der angrenzenden Zellen gleich groß. Zur Rekonstruktion der Gradienten $(\nabla \phi)_i$ kommt zum Beispiel das Zentrale-Differenzen-Verfahren zum Einsatz, hier exemplarisch an der *Ost-Fläche* gezeigt, Gl. (5.7). δ_{xPE} ist dabei der Abstand der jeweiligen Mittelpunkte der betrachteten Zellen. In OpenFOAM findet die Rekonstruktion der Gradienten als eine Kombination aus orthogonalem Ansatz und Gradientenrekonstruktion statt. Die Koeffizientenanteile a_{dE_2} und a_{dP_2} werden durch die Interpolation an den übrigen Teilflächen des Kontrollvolumens und äquivalent bei der Behandlung weiterer Terme ergänzt. [2, 3, 5, 8, 9, 16]

$$\int_{KV} \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV = \sum_i \int_{A_i} \Gamma_i ((\nabla \phi) \cdot \mathbf{n})_i dA \approx \sum_i \Gamma_i (\nabla \phi)_i \cdot \mathbf{n}_i A_i \quad (5.6)$$

$$\Gamma_E \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta_{xPE}} \right) A_E = \phi_E \left(\frac{\Gamma_E A_E}{\delta_{xPE}} \right) - \phi_P \left(\frac{\Gamma_E A_E}{\delta_{xPE}} \right) = \phi_E a_{E1} - \phi_P a_{P2} \quad (5.7)$$

Die Steuerung in OpenFOAM wird im `fvSchemes` - Verzeichnis vorgenommen, siehe Kapitel 3.

5.1.3 Behandlung des Quellterms

Der zweite Term der rechten Seite in Gl. (5.2) beinhaltet alle Senken und Quellen im betrachteten Kontrollvolumen. Es wird zwischen expliziten und impliziten Quelltermen unterschieden. Als Beispiel sei die Poisson's Gleichung $\nabla^2 \phi = F$ nach [3] betrachtet. Die skalaren Werte für F werden explizit in ein `volScalarField` eingetragen.

Ein impliziter Term nach Gl. (5.8) wird direkt über das Kontrollvolumen integriert und linearisiert, zum Beispiel durch die von zweiter Ordnung genaue Mittelpunkregel. Der sich ergebene Eintrag für die spätere Koeffizientenmatrix ist der Teilkoeffizient a_{P3} der zu berechnenden Größe ϕ_P . [3, 8].

$$S_\phi = S_P \phi_P + S_Q = \int_{KV} S_P \phi_P + S_Q dV \approx S_P \phi_P V_P + S_Q V_P = \phi_P a_{P3} + S_Q \quad (5.8)$$

5.1.4 Gleichungssystem und Koeffizientenmatrix

Äquivalent zu den gezeigten Verfahren wird mit allen Termen der zu approximierenden Differenzialgleichungen verfahren. Alle Teilkoeffizienten werden jeweils so addiert, dass ein Gleichungssystem entsteht. Fasst man alle Koeffizienten der obigen Gleichungen zusammen, erhält man ein System nach Gl. (5.9). [5, 8, 16]

$$\sum_i a_{P_i} \phi_P = \sum_i a_i \phi_i + S_Q \quad (5.9)$$

In Matrix-Notation kann das System mit der Koeffizientenmatrix \mathbf{A} , dem Spaltenvektor ϕ der gesuchten Größen an den Gitterknoten sowie dem Spaltenvektor \mathbf{S}_Q mit den bekannten Quelltermen geschrieben werden, siehe Gl. (5.10). [5, 8, 16]

$$\mathbf{A}\phi = \mathbf{S}_Q \quad (5.10)$$

Für das iterative Lösen des entstehenden linearen beziehungsweise nichtlinearen Gleichungssystems kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz. Auf die Verfahren soll nicht näher eingegangen werden, weitere Informationen siehe [5, 8, 9, 14]. Es sei angemerkt, dass das System erst durch das Setzen korrekter Rand- und Anfangsbedingungen lösbar wird. Die Diagonalisierung der Koeffizientenmatrix durch Zerlegung und das Lösen des Gesamtsystems kann durch Angaben im Steuerfile `fvSolution` in OpenFOAM beeinflusst werden (`preconditioner`).

In der vorliegenden Arbeit wird primär der GAMG (*Geometric Algebraic Multi-Grid Solver*) verwendet. Beginnend mit einem groben Netz werden die Ergebnisse der jeweiligen Berechnungsstufe als Initialwerte für die nächste Diskretisierungsstufe verwendet. Diese Art an Solvern bietet einen erheblichen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber herkömmlichen Methoden mit einem statischen Netz. Die zusätzlich zur Diskretisierung

sowie zur Zuordnung der Felder benötigte Zeit wird durch die erhöhte Rechengeschwindigkeit durch einen guten Initialwert weit übertroffen. Es können diverse Einstellungen hinsichtlich der jeweiligen Diskretisierungsmechanismen gemacht werden. Als Beispiel sei die `tolerance` und die `relTol` genannt. Näheres hierzu ist im User Guide [2] zu finden. [4, 5]

5.2 Verfahren der Druck - Geschwindigkeits - Dichte - Kopplung

Der Druck p und sein Gradient ∇p gehen aus den Navier - Stokes - Gleichungen als vierte Unbekannte hervor. Die Bestimmung des Druckfeldes erfolgt indirekt über die Impuls- und Kontinuitätsgleichung (*pressure based solver*). Aus beiden Erhaltungsgleichung wird eine Poisson - Gleichung für den Druck entwickelt, siehe Gl. (5.11). Weitere Erläuterungen sind zum Beispiel in [5] zu finden. Bei kompressiblen Strömungen kann ebenfalls die Zustandsgleichung, zum Beispiel das ideale Gasgesetz, genutzt werden (*desity based solver*). Das absolute Druckniveau, spielt anders als bei den inkompressiblen Strömungen, dann eine wichtige Rolle. [5, 14, 16, 21]

$$\nabla \cdot (\nabla p) = -\nabla \cdot \left[\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u} - \mathbf{S}) - \rho \mathbf{b} + \frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} \right] \quad (5.11)$$

Es soll speziell auf verwendete Ansätze eingegangen werden, um die angewendeten Berechnungsmechanismen nachvollziehen zu können. Für stationäre Rechnungen (*steady state*) ist speziell ein Algorithmus prädestiniert. Primär wird der SIMPLE- (*Semi-Implicit Method for Pressure - Linked Equations*) oder SIMPLER- (*SIMPLE - Consistent*) Algorithmus zur Kopplung von Druck, Geschwindigkeit und Dichte verwendet. Die Nutzung von impliziten Methoden wird aufgrund ihrer Stabilität bei erhöhter Schrittweite bevorzugt bei stationären Problemen verwendet. [5, 14, 16, 21]

Bei der Kopplung von Geschwindigkeit, Druck und Dichte wird prinzipiell auch bei stationären Problemen eine instationäre Ausbreitung der gekoppelten Felder berechnet, bis ein stationärer Zustand erreicht ist. Anders als bei instationären Rechnungen ist die Genauigkeit der Zwischenschritte weniger relevant, weshalb auf implizite Berechnungsmethoden mit großen Zeitschritten zurückgegriffen werden kann. Die Toleranz bei der iterativen Lösung des Gleichungssystems, das heißt der *inneren Iterationen*, kann entsprechend niedrig angesetzt werden. Eine erhöhte Anzahl an äußeren Iterationen reduziert den entstehenden Iterationsfehler hinreichend. Als *äußere Iteration* wird hierbei das Durchlaufen der Druck - Korrektur - Sequenz und das damit verbundene Korrigieren der Feldgrößen bezeichnet. Jede äußere Iteration ist das Ergebnis zum jeweils neuen Zeitschritt u_i^{n+1} beziehungsweise u_i^n . [5, 14, 16]

Die diskretisierte Impulsgleichung nimmt, mit explizitem Druckgradiententerm, die Form nach Gl. (5.12) an. Hierbei wird die Gleichung gezeigt, welche bei jeder äußeren Iteration mit den Werten $()_P$ des aktuell betrachteten Knotens und den Werten $()_N$ der Nachbarknoten gelöst werden muss. Die vorläufige Werte $()^{m*}$ erfüllen eine der Erhaltungsgleichungen noch nicht und müssen entsprechend korrigiert werden. [5, 14, 16]

$$A_P^{u_i} u_{i,P}^{m*} + \sum_N A_N^{u_i} u_{i,N}^{m*} = (S_Q)_{u_i}^{m-1} - \left(\frac{\delta p}{\delta x_i} \right)_P^{m-1} \quad (5.12)$$

Es erfolgt das sequenzielle Lösen der Impulsgleichungen, siehe Gl. (5.12), für die jeweilige Impulskomponente nach der primären Geschwindigkeitskomponente. Hierbei werden

alle sekundären Anteile der Geschwindigkeit sowie der Druck mit den Werten der vorherigen äußeren Iteration $()^{m-1}$ approximiert. Die Folge ist, dass die diskretisierten Kontinuitätsgleichungen nicht hinreichend erfüllt sind. Durch ein angepasstes Druckfeld werden die Geschwindigkeiten korrigiert. Es ergibt sich die Poisson-Gleichung für den Druck. Diese erfüllt nach der ersten äußeren Iteration zwar die Kontinuitätsgleichung, jedoch nicht mehr die Impulsgleichung. Diese Abweichung hat ihren Ursprung in der vernachlässigten Beziehung zwischen u_i^m und p^m bei der Approximation der Impulsgleichung. Durch das erneute Durchlaufen einer äußeren Iteration wird dieser Fehler herabgesetzt. Es müssen bis zur geforderten Toleranzen n äußere Iterationen absolviert werden, bis eine Lösung gefunden ist, welche die Impuls- und Kontinuitätsgleichung hinreichend erfüllt. Man spricht bei dieser Art von der Herangehensweise auch von *Projektionsmethode*, siehe [5, 14, 16, 21].

Der SIMPLE/SIMPLEC-Algorithmus nutzt neben anderen ähnlichen Verfahren statt des Druckes p eine Druckkorrektur p' beziehungsweise u' , welche iterativ addiert werden. Es ergibt sich $u_i^m = u_i^{m*} + u'$ und $p_i^m = p_i^{m*} + p'$. Als Verbindung der Korrekturen kann Gl. (5.13) entwickelt werden. [5]

$$u'_{i,P} = \tilde{u}'_{i,P} - \frac{1}{A_P^{u_i}} \left(\frac{\delta p'}{\delta x_i} \right)_P \quad \text{mit: } \tilde{u}'_{i,P} = - \frac{\sum_N A_N^{u_i} u'_{i,N}}{A_P^{u_i}} \quad (5.13)$$

Drückt man die Geschwindigkeits- über die Druckkorrektur nach Gl. (5.13) aus und stellt die Anforderungen, dass die sich ergebenden Geschwindigkeiten die Kontinuitätsgleichung erfüllen, ergibt sich Gl. (5.14) (Druckkorrekturgleichung). [5]

$$\frac{\delta}{\delta x_i} \left[\frac{\rho}{A_P^{u_i}} \left(\frac{\delta p'}{\delta x_i} \right) \right]_P = \left[\frac{\delta(\rho u_i^{m*})}{\delta x_i} \right]_P + \left[\frac{\delta(\rho \tilde{u}'_i)}{\delta x_i} \right]_P \quad (5.14)$$

Bei der ersten äußeren Iteration ist die Korrektur \tilde{u}'_i nicht bekannt und wird beim SIMPLE-Verfahren durch Streichen des letzten Terms der rechten Seite, siehe Gl. (5.14), vernachlässigt. Nachdem die erste Berechnung durchlaufen ist, kann \tilde{u}'_i aktualisiert werden. Die Folge dieser Vereinfachung kann eine schlechte Konvergenz sein. Abhilfe kann hier das Setzen einer Unterrelaxion für den Druck beziehungsweise die Geschwindigkeit im Verhältnis nach Gl. (5.15) bringen. [5, 21]

$$\alpha_p = 1 - \alpha_u \quad (5.15)$$

Als besseres Verfahren hinsichtlich der Konvergenz hat sich das SIMPLEC-Verfahren (nach Doormal & Raithby, 1984) erwiesen. Beim SIMPLEC-Algorithmus wird \tilde{u}'_i approximiert, statt ignoriert zu werden. Die Idee ist, die Knotenwerte P durch eine Mittelung der Nachbarwerte N anzunähern, siehe Gl. (5.16). [5, 21]

$$\tilde{u}'_{i,P} \approx \frac{\sum_N A_N^{u_i} u'_{i,N}}{\sum_N A_N^{u_i}} \quad (5.16)$$

Es ergibt sich als gewichtete Mittelung der Nachbarwerte N die approximierte Verbindung nach Gl. (5.17). Der Einfluss der benachbarten Zellen wird somit nicht komplett ignoriert. Weiterführende Informationen sind in [5, 21] zu finden.

$$u'_{i,P} = - \frac{1}{A_P^{u_i} + \sum_N A_N^{u_i}} \left(\frac{\delta p'}{\delta x_i} \right)_P \quad (5.17)$$

5.3 Solver in OpenFOAM

5.3.1 Solver für stationäre Rechnungen (*non transient*)

Wie in Kapitel 4 beschrieben, ist die Lösung des Systems mit einem kompressiblen Fluid empfehlenswert. Aufgrund der erhöhten Genauigkeit soll primär dieser Ansatz verfolgt werden. In OpenFOAM stehen zur Lösung von kompressiblen Problemen verschiedene Solver zur Verfügung. Da regulär eine kompressible Rechnung erst in Bereichen mit $U_{max} > 0,3 \text{ Ma}$ durchgeführt wird, sind die meisten vorgefertigten Solver für schallnahe Strömungen konzipiert. Nach [5] sind solche Solver bei inkompressiblen und schwach kompressiblen Problemen ineffizient. Als Konsequenz muss ein Solver gefunden werden, welcher entsprechende Terme nicht berücksichtigt. Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist auch die Entwicklung eines eigenen Solvers möglich.

Das vorliegende System ist durch die erheblichen Temperaturunterschiede als schwach kompressibel anzusehen. Geschwindigkeiten im Schallbereich sind nicht zu erwarten. Es können daher Methoden zur Kopplung ähnlich denen bei rein inkompressiblen Strömungen effektiv verwendet werden. Die Gleichung für die Druckkorrektur kann aufgrund der proportionalen Abhängigkeit von Geschwindigkeitskorrektur und Gradient der Druckkorrektur gewonnen werden. [5]

Differenziert werden die bereits implementierten Lösungsalgorithmen über das Lösungsverfahren der Druck - Dichte - Geschwindigkeitskopplung. Für eine stationäre Rechnung empfiehlt sich das SIMPLEC - Verfahren wie in Kapitel 5.2 beschrieben. [5, 16]

5.3.2 Der Solver rhoSimplecFoam

Primär wurde der Solver rhoSimplecFoam zur numerischen Näherung des untersuchten Strömungsfeldes herangezogen. Wie der Name des Solvers prägnant angibt, handelt es sich um einen stationären Solver mit implementiertem SIMPLEC - Verfahren für die Druck - Dichte - Geschwindigkeitskorrektur.

Dieser Solver bietet den Vorteil, dass Geschwindigkeit, Druck, Dichte, Temperatur und Viskosität berechnet werden, ohne in den Code eingreifen zu müssen. Im Steuerfile `fvSolution` kann die Art der Kompressibilität beziehungsweise der erwartete Geschwindigkeitsbereich angegeben werden. Über den Eintrag `transonic no` wird der Solver für ein schwach kompressibles Problem konfiguriert. Terme zur Behandlung von Druckstößen im System werden ausgeblendet. Ebenfalls können Einträge für die maximal beziehungsweise minimal zu erwartende Dichte gemacht werden. Spitzen an einzelnen Elementen werden somit „gefiltert“. Der Solver zeichnet sich durch eine gute Stabilität und Konvergenz in Abhängigkeit von den Einstellungen (Netz, Approximationsmethoden) aus.

```
SIMPLE
{
  nNonOrthogonalCorrectors 2;
  rhoMin          rhoMin [1 -3 0 0 0] 0.1;
  rhoMax          rhoMax [1 -3 0 0 0] 1.5;
  transonic       no;
}
```

6 Analyse der Ergebnisse

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten CFD-Berechnung aufgezeigt und analysiert. Ebenfalls werden verschiedene Optimierungsansätze für die saugseitige Mischkammer der CEAG vorgestellt.

6.1 Zusammenfassung der Simulationseinstellungen

Die verwendeten Modellansätze hinsichtlich Geometrie, Strömungsphysik, Thermodynamik und Numerik wurden in den Kapiteln 4 und 5 erläutert. Die Grundzüge der verwendeten Simulationssoftware OpenFOAM wurden in Kapitel 3 aufgezeigt. Eingangsbedingungen wie Volumenströme oder Temperaturen wurden durch Messungen gewonnen, siehe Kapitel 2. Zur Abbildung der Turbulenz wird das $k-\omega$ -SST-Modell verwendet. Eine zusammenfassende Übersicht der Einstellungen gibt Tabelle 6.1. Die Validierung des Modells erfolgt im Istzustand. Wird eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten aus Kapitel 2 erzielt, kann das Modell für die Optimierung herangezogen werden.

Für die Berechnung wird der Linux-Cluster der HAW-Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg des Departments Maschinenbau und Produktion verwendet. Es wird eine parallelisierte Rechnung auf 32 CPU's durchgeführt.

Die Berechnung wird mit den Einstellungen nach Tabelle 6.1 absolviert. Es werden keine festen Konvergenzkriterien gesetzt. Die erreichten Residuen werden während der Rechnung manuell kontrolliert. Es zeigt sich, dass die *pseudo-stationäre* Ausbreitung von skalaren Größen wie der Temperatur eine beträchtliche Anzahl an Iterationen benötigt, um einen stationären Zustand zu erreichen (begründet in der Unterrelaxion). Das Konvergenzniveau gibt hierbei nur bedingt Aufschluss, ob bereits ein stationärer Zustand erreicht ist. Ein qualitativer Vergleich zweier Iterationsschritte, zum Beispiel Schritt 2.600 und 2.800, ist diesbezüglich empfehlenswert. Es werden für alle folgenden Rechnungen die Relaxionsfaktoren nach Tabelle 6.1 verwendet.

Für eine hinreichende Konvergenz mit Residuen in den Größenordnungen 10^{-4} bis 10^{-6} werden zum Erreichen einer stationären Lösung 2.800 Iterationen durchgeführt. Die benötigte Zeit beträgt in der oben genannten Konfiguration circa 40 Stunden. Abb. 6.1 zeigt den Residuenabfall der Berechnung. Die Residuen-Entwicklung der im folgenden Kapitel aufgezeigten Varianten befindet sich in der selben Größenordnung.

6.2 Ergebnisse, Simulation des Istzustandes

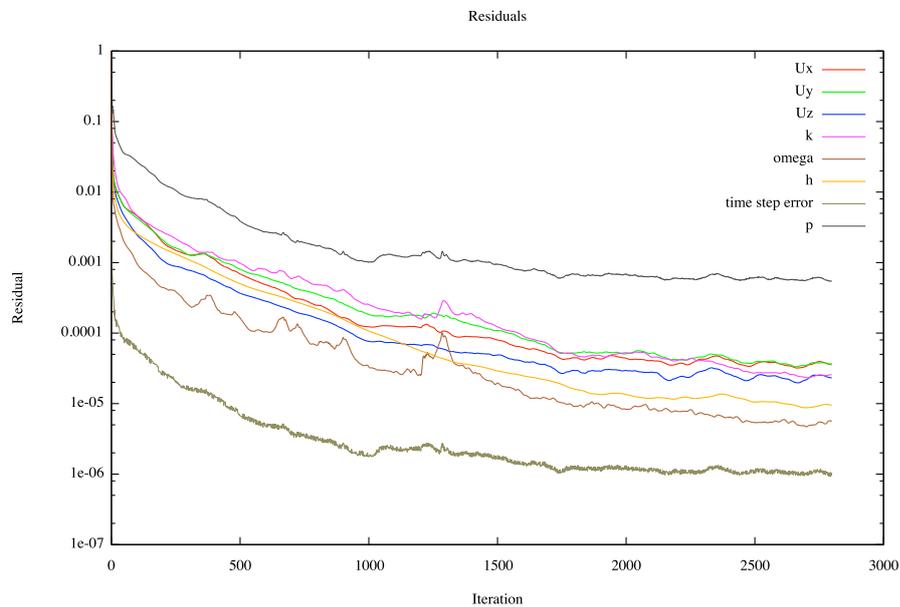
Die erste Aufgabe ist es, den Istzustand der Anlage bestmöglich nachzubilden. Hierfür wird das Primärmodell mit den Einstellungen nach Kapitel 6.1 simuliert. Aufgrund der hohen Unsicherheit der Eingangsparameter werden verschiedene Varianten berechnet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 6.2 zusammengefasst. Neben den gemittelten Temperaturen an den Gebläsen sind ebenfalls die absoluten und relativen Abweichungen

Tabelle 6.1: Übersicht wichtiger Rechenparameter

Solver und Numerik	
Solver:	rhoSimplecFoam
nNonOrthogonalCorrectors:	2
relTol:	0,001 bis 0,01
Approximationsschemata:	Großteils upwind 1. Order
Äußere Iterationen:	2.800
Parallelisierung:	32 Subdomains

Relaxionsfaktoren	
p	0.4;
rho	0.4;
U	0.6;
h	0.5;
k	0.4;
epsilon	0.5;
omega	0.4;

Modelleinstellungen	
Art des Fluides:	kompressibel
Thermodynamik-Modell:	Ideales Gasgesetz
Turbulenzmodell:	$k - \omega$ - SST
Wandnahe Modellierung:	Wandfunktionen
y^+ Mittelwert:	74
Randbedingungen:	siehe Kapitel 6.2
Netz:	17 Mio. Zellen (mixed)

**Abbildung 6.1:** Residuenverlauf der Primärberechnung des Istzustandes

dargestellt. Die relativen Werte werden auf die Temperatur in Kelvin bezogen. Alle Abbildungen sind in hoher Auflösung im elektronischen Anhang hinterlegt. Die Temperaturskala der Illustrationen wird zur besseren Visualisierung auf 420 K als Maximalwert skaliert.

6.2.1 Varianten und Validierung des Modells

Wie in Kapitel 2 beschrieben, stehen zur Validierung ausschließlich die Temperaturdaten zur Verfügung. Temperaturbeeinflussungen an den Outlet - Patches, siehe Kapitel 4.3.4, sollen verhindert werden. Es wird die gemittelte Temperatur jedes Gebläses über einen horizontalen Slice auf Höhe des realen Auslaufs der Gebläse ($z = -5.8$ m) berechnet. Die Lösungen der nachfolgenden Rechenvarianten werden in Tabelle 6.2 mit den gemittelten Messwerten der CEAG verglichen.

Variante 1 - Ideal verteilter Massenstrom an den Gebläsen - 428°C

Als Randbedingung für die Gebläse wird ein gleichmäßiger Massenstrom von 143,556 kg/s je Gebläse angesetzt. Die Menge geht aus der Vorgabe von 400.000 Nm³/h je Gebläse hervor, siehe [1]. Die Heißgastemperatur wird mit 428°C nach Tabelle 2.2 vorgegeben (Abb. 6.3).

Variante 2 - Ideal verteilter Massenstrom an den Gebläsen - 470°C

Die Randbedingungen an den Outlets werden äquivalent zur Variante eins festgelegt. Die Heißgastemperatur wird mit 470°C eingestellt, siehe Kapitel 2.4.2.1.

Variante 3 - Vorgabe der Geschwindigkeit an den Gebläsen - 428°C

In Kapitel 2 wird auf eine Messung der Firma Venti Oelde aus dem Jahre 2009 verwiesen. Bei der Bestimmung der Volumenströme wurde über ein Messraster die Strömungsgeschwindigkeit auf der Saugseite der Gebläse bestimmt. Die gemittelten Werte an den Gebläsen sind in Tabelle 4.5 zusammengefasst. In der Variante drei wird mit der Heißgastemperatur von 428°C nach Tabelle 2.2 gerechnet. Die gemittelte Temperaturverteilung ist in Tabelle 6.2 hinterlegt.

Variante 4 - Vorgabe der Geschwindigkeit an den Gebläsen - 470°C

Variante vier umfasst dieselben Randbedingungen an den Outlets wie Variante drei. Die Heißgastemperatur wird auf 470°C erhöht. Abb. 6.2 zeigt den Temperaturverlauf an den Gebläsen, Abb. 6.3 das Temperaturfeld.

Variante 5 - Vorgabe Massenstrom an den Gebläsen - 428°C

Als Randbedingung werden die in Kapitel 2 vorgestellten Messwerte des Massenstromes der Firma Venti Oelde an den Gebläsen vorgegeben. Die Heißgastemperatur wird mit 428°C nach Tabelle 2.2 eingestellt. In Tabelle 6.2 ist die gemittelte Temperaturverteilung hinterlegt.

Variante 6 - Vorgabe Massenstrom an den Gebläsen - 470°C

Die Randbedingungen an den Outlets sind wie in Variante 5 gesetzt. Für die Heißgastemperatur werden 470°C vorgegeben. Tabelle 6.2 zeigt die gemittelte Temperaturverteilung. Das Temperaturfeld wird qualitativ in Abb. 6.5 aufgezeigt.

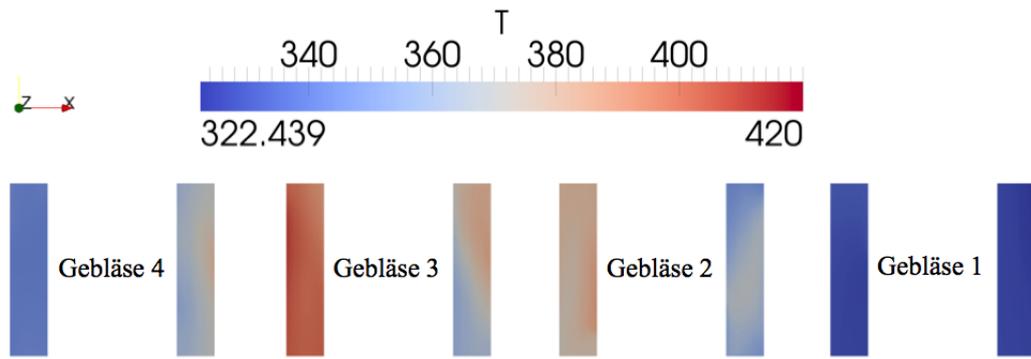


Abbildung 6.2: Temperaturverteilung an den Outlets - Variante 4

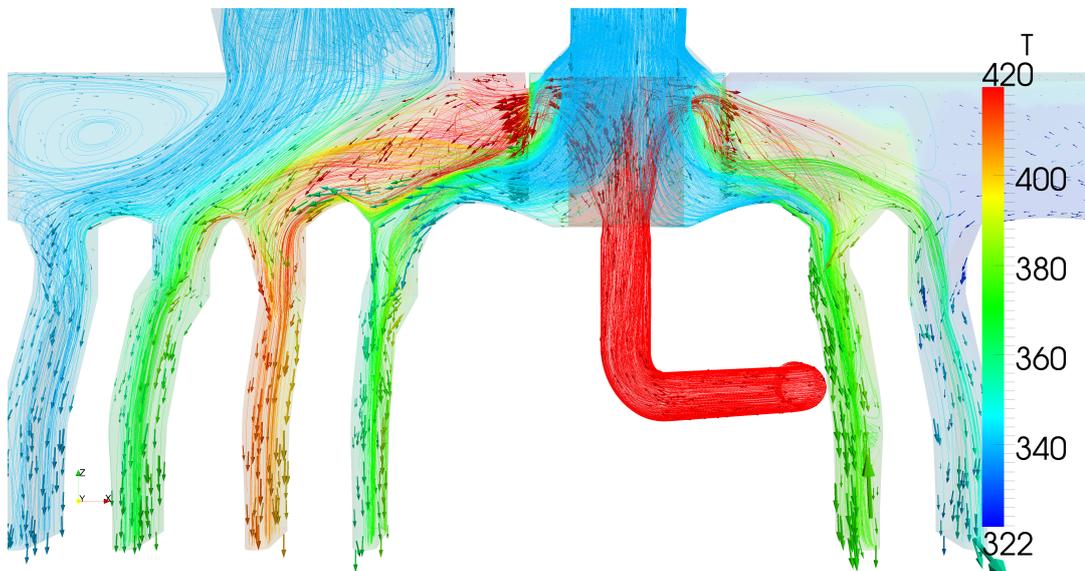


Abbildung 6.3: Temperaturfeld um die Heißgasleitung - Variante 1 und 2 (qualitativer Verlauf)

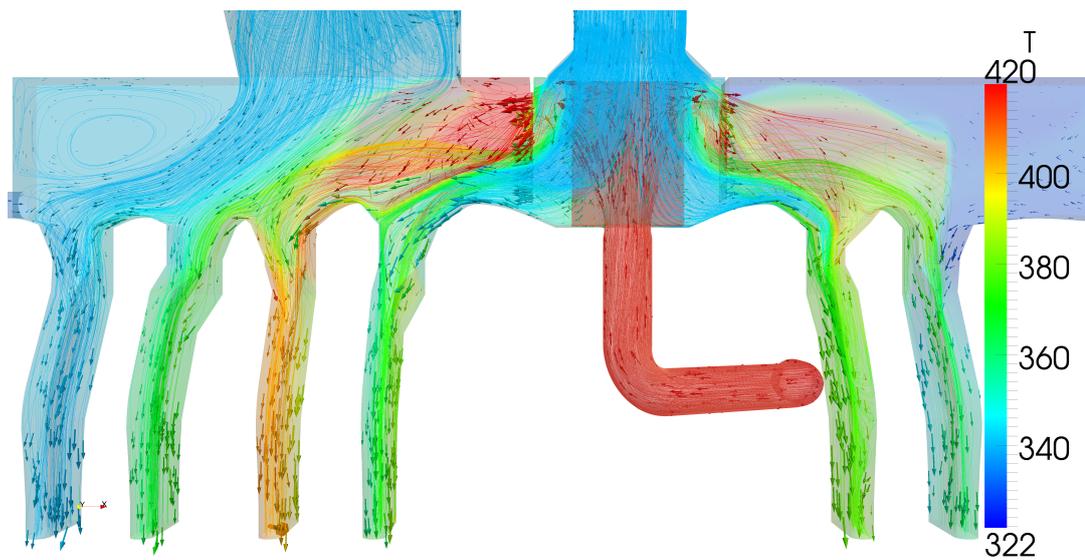


Abbildung 6.4: Temperaturfeld um die Heißgasleitung - Variante 3 und 4 (qualitativer Verlauf)

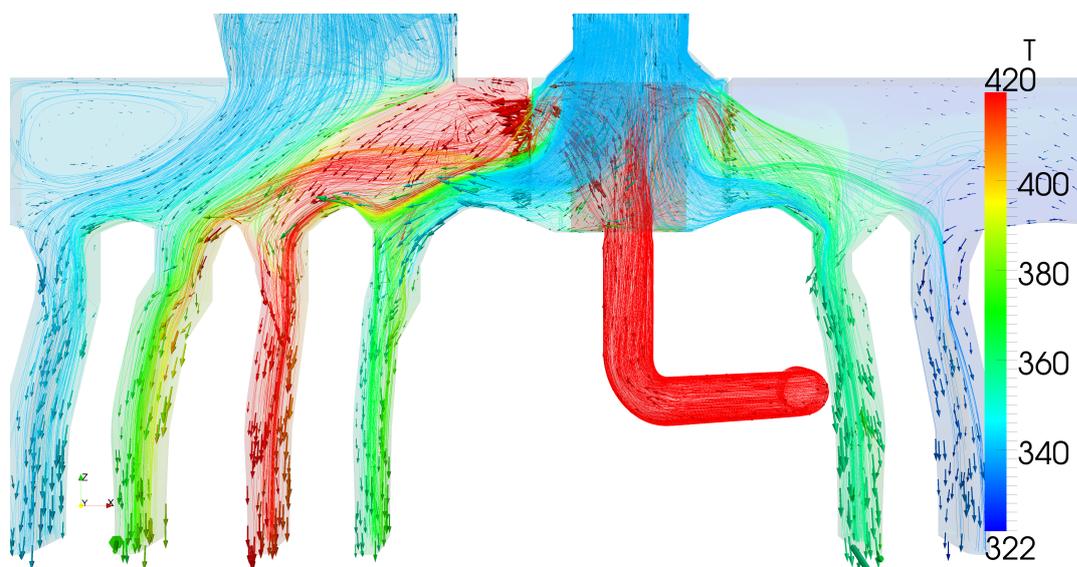


Abbildung 6.5: Temperaturfeld um die Heißgasleitung - Variante 5 und 6 (qualitativer Verlauf)

Tabelle 6.2: Vergleich der Mess- und CFD-Daten an den vier Gebläsen der CEAG

Daten	Heißgastemperatur	Gebläse 1	Gebläse 2	Gebläse 3	Gebläse 4
	°C	°C	°C	°C	°C
Messdaten (2012):	428	51	102	106	73
Handmessung (2011):	470				
CFD (Variante 1):	428	52,7	85,9	110,8	79,9
Absolute Abweichung:		1,7	-16,1	4,8	6,9
Relative Abweichung:		0,5 %	-4,3 %	1,3 %	2,0 %
CFD (Variante 2):	470	52,8	88,7	114,6	80,4
Absolute Abweichung:		1,8	-13,3	8,6	7,4
Relative Abweichung:		0,5 %	-3,5 %	2,3 %	2,1 %
CFD (Variante 3):	428	53,0	91,7	110,3	79,1
Absolute Abweichung:		2,0	-10,3	4,3	6,1
Relative Abweichung:		0,6 %	-2,8 %	1,1 %	1,8 %
CFD (Variante 4):	470	53,1	95,8	113,3	79,9
Absolute Abweichung:		2,1	-6,2	7,3	6,9
Relative Abweichung:		0,7 %	-1,7 %	1,9 %	2,0 %
CFD (Variante 5):	428	51,0	71,1	115,9	87,5
Absolute Abweichung:		0,0	-30,9	9,8	14,5
Relative Abweichung:		0,0 %	-8,2 %	2,6 %	4,2 %
CFD (Variante 6):	470	51,0	73,2	118,9	88,0
Absolute Abweichung:		0,0	-28,9	12,9	15,0
Relative Abweichung:		0,0 %	-7,7 %	3,4 %	4,3 %

6.2.1.1 Bewertung der Ergebnisse der berechneten Varianten

Das in Abb. 6.3 illustrierte Feld gibt die qualitative Verteilung der Temperatur von Variante eins und zwei wieder. Der Unterschied der Felder ist marginal, die unterschiedlichen Heißgastemperaturen wirken sich nur gering auf die Outlet-Temperaturen aus. Es zeigt sich eine erhöhte Temperaturbelastung an Gebläse drei und vier. Die Temperatur am Gebläse zwei fällt hingegen signifikant zu klein aus. Die relativen Abweichungen der berechneten Temperaturen zu den Messdaten liegen im Bereich $-4,3\%$ bis $+2,3\%$. Die Ergebnis-Übereinstimmung der Varianten eins und zwei zu den gemessenen Werten ist als mangelhaft zu bewerten.

Bei Variante fünf und sechs verlagert sich das Temperaturfeld (Vergleich zur Variante eins und zwei). Es kommt zu einem erhöhten Volumenstrom am Gebläse vier und zur gleichzeitigen Minderung der Absaugmenge an den Gebläsen zwei und drei. Wie Abb. 6.5 illustriert, wird Gebläse zwei entlastet ($-3,9\%$ bis $-4,2\%$), wohingegen Gebläse drei ($+1,1\%$ bis $+1,3\%$) und vier ($+2,2\%$) erhöhte Temperaturen aufweisen. Es sind signifikante Abweichungen zu den Messwerten vorhanden. Die Vorgabe des Massenstromes an den Gebläsen nach den vorgestellten Messwerten der Firma Venti Oelde ergibt keine nachvollziehbare Lösung.

In Variante drei und vier ist die einseitige Temperaturbelastung am Gebläse drei sichtbar. Die äußeren Gebläse werden mit Temperaturen unter 80°C belastet. Das Temperaturfeld unter der Verwendung von Streamlines wird in Abb. 6.4 aufgezeigt. Der qualitative Verlauf des Temperaturfeldes unterscheidet sich in Variante drei und vier nur sehr gering. Der in Abb. 6.2 gezeigte Temperaturverlauf an den Gebläsen kann durch die Messdaten bestätigt werden. Die vorhandenen Abweichungen sind in Tabelle 6.2 dokumentiert. Obwohl Variante vier absolut betrachtet höhere Abweichungen als Variante drei aufweist, wird diese für die Simulation des Istzustandes herangezogen. Grund ist die bessere Annäherung an die Messdaten speziell an den Gebläsen zwei und drei. Eine theoretische Optimierung auf Basis des erstellten Simulationsmodells ist durchführbar.

6.3 Optimierung der saugseitigen Mischkammer

Auf Basis der Simulation und Messdaten soll die Mischkammer hinsichtlich der Temperaturverteilung an den Gebläsen optimiert werden. Als ideales Ergebnis soll jedes Gebläse mit einer äquivalenten Temperatur belastet werden. Um die Simulation als Optimierungsgrundlage zu nutzen, sind in Bezug auf die Randbedingungen Annahmen zur Näherung notwendig. Prinzipiell sind verschiedene Formen der Optimierung möglich. Da die Rechenzeit je Variante erheblich ist, soll primär geklärt werden, welche Ansätze das größte Potenzial bergen. Im Folgenden werden verschiedene Ansätze aufgezeigt und anschließend bewertet.

6.3.1 Drosselung der Gebläse zwei und drei

Die erste Herangehensweise der Optimierung beschränkt sich auf eine Anpassung der Absaugleistung der einzelnen Gebläse. Durch eine Reduktion des Volumenstromes an den Gebläsen zwei und drei soll eine verbesserte Temperaturverteilung erreicht werden. Der Volumenstrom kann über vorhandene Drosselklappen auf den Saugseiten je Gebläse angepasst werden. Für die modifizierte Absaugleistung müssen zur Einhaltung der Kontinuitätsgleichung ebenfalls die Randbedingungen an den Inlets angepasst werden. Bei der Simulation des Istzustandes konnten die Eingangsgrößen direkt gemessen werden. Für die Optimierung ist die erneute Messung aller Eingangsgrößen nicht möglich. Es muss über entsprechende Ansätze eine Abhängigkeit der einzelnen In- zu den Outlets gefunden werden. Ziel ist es, eine gute Approximation der Volumenstromänderung der Inlets bei angepasster Absaugleistung zu erhalten. Die Temperatur der Inlets wird als konstant, unabhängig vom geförderten Volumenstrom, angenommen.

In erster Näherung erfolgt eine lineare Verteilung des geänderten Volumenstromes an einem Gebläse auf alle Inlets. Dabei ist $\Delta\dot{V}_i$ nur vom Volumenstrom des jeweiligen Inlets (i) der Simulation des Istzustandes abhängig ($\Delta\dot{V}(\dot{V}^{n-1})$). Die Änderung wird somit prozentual auf die Inlets verteilt. Da die Drosselung einzelner Gebläse die gesamte Absaugleistung reduziert, sind dabei Grenzen gesetzt. Eine Herabsetzung der

Absaugleistung um mehr als 10 % ist nicht empfehlenswert. Tabelle 6.5 zeigt die Temperaturverteilung bei reduziertem Volumenstrom. Wie ersichtlich, werden Gebläse zwei und drei um jeweils 10 % reduziert, was eine Minderung der Gesamtmenge von 5 % entspricht. In der zweiten Simulationsvariante wurde der geförderte Volumenstrom um weitere 5 % auf 90 % der Maximalmenge der Gesamtanlage gedrosselt, siehe Tabelle 6.3.

Tabelle 6.3: Übersicht der Volumenströme bei gedrosselten Gebläsen zwei und drei (linear verteilt)

Inlet	\dot{m}^{n-1} kg/s	$\Delta\dot{m}_i$ kg/s	\dot{m}_i^n kg/s	U Geb2 m/s	U Geb3 m/s
95 % Absaugmenge					
Ofen12	34,26	1,71	32,57	26,88	30,41
Giesshaube	121,73	6,09	115,64	26,88	30,41
Ofen3Direkt	30,29	1,51	28,77	26,88	30,41
Ofen3Dach1	116,45	5,82	110,63	26,88	30,41
Ofen3Dach2	214,92	10,75	204,18	26,88	30,41
rueck	14,11	0,71	13,41	26,88	30,41
90 % Absaugmenge					
Ofen12	34,26	3,43	30,26	23,90	27,15
Giesshaube	121,73	12,17	109,55	23,90	27,15
Ofen3Direkt	30,29	3,03	27,26	23,90	27,15
Ofen3Dach1	116,45	11,65	104,81	23,90	27,15
Ofen3Dach2	214,92	21,49	193,43	23,90	27,15
rueck	14,11	1,41	12,70	23,90	27,15

Durch die geometrische Ausdehnung der CEAG - Mischkammer ist die gleichmäßige Auswirkung einer Änderung an einem Outlet an allen Punkten des Untersuchungsraumes unwahrscheinlich. Über Gl. (6.1) wird ein abweichender Näherungsansatz eingeführt. Der Einfluss des Rohr-/Kanalwiderstandes wird über den Ist - Massenstrom \dot{m}_i^{n-1} abgebildet. Ebenfalls soll der Abstand der Inlet - Patches zum jeweiligen geänderten Outlet - Patch quantifiziert werden. Die Abhängigkeit wird mit Gl. (6.2) mathematisch beschrieben. Der Einfluss beider Parameter wird als linear angenähert. Aufgrund der quadratischen Abhängigkeit des Strömungswiderstandes in den Kanälen wird die vorherrschende Geschwindigkeit und damit der Volumenstrom/Massenstrom höher gewichtet als der rein geometrische Abstand. Die Teilkoeffizienten gehen zu $1/3 q_1(r_i)$ und $2/3 q_2(\dot{m}_i^{n-1})$ in den Koeffizienten $a_i(r_i, \dot{m}_i^{n-1})$ ein. Grundvoraussetzung des Ansatzes ist die Erfüllung der Kontinuitätsgleichung, siehe Gl. (6.3). r_i wird als Abstand zwischen dem jeweiligen Outlet - Patch und dem direkten Eintritt der betrachteten Inlet - Strömung in die Mischkammer berechnet. Tabelle 6.4 zeigt die Daten nach Gl. (6.2) bei einer Reduktion der Absaugmenge auf 95 % und 90 %.

$$\Delta\dot{m} = \sum a_i \Delta\dot{m} = (a_1 \Delta\dot{m} + a_2 \Delta\dot{m} + a_3 \Delta\dot{m} + a_4 \Delta\dot{m} + a_5 \Delta\dot{m} + a_6 \Delta\dot{m}) \quad (6.1)$$

$$a_i(r_i, \dot{m}_i^{n-1}) \approx \frac{1}{3} q_1(r_i) + \frac{2}{3} q_2(\dot{m}_i^{n-1}) = \left(\frac{\sum r_i}{3 \sum \frac{r_i}{r_i}} + \frac{2 \dot{m}_i^{n-1}}{3 \sum \dot{m}_i^{n-1}} \right) \quad (6.2)$$

$$\sum a_i \stackrel{!}{=} 1 \quad (6.3)$$

Tabelle 6.4: Übersicht der Massenströme bei gedrosselten Gebläsen zwei und drei nach Gl. (6.2)

Inlet	\dot{m}^{n-1}	$\Delta\dot{m}_i$	$\Delta\dot{m}_i$	\dot{m}_i^n	U Geb2	U Geb3
	kg/s	%	kg/s	kg/s	m/s	m/s
<i>95 % Absaugmenge</i>						
Ofen12	34,26	0,41	2,47	31,81	26,88	30,41
Giesshaube	121,73	0,89	5,35	116,38	26,88	30,41
Ofen3Direkt	30,29	0,84	5,06	25,21	26,88	30,41
Ofen3Dach1	116,45	0,90	5,39	111,06	26,88	30,41
Ofen3Dach2	214,92	1,61	9,73	205,20	26,88	30,41
rueck	14,11	0,38	2,27	11,85	26,88	30,41
<i>90 % Absaugmenge</i>						
Ofen12	34,26	0,82	4,95	29,34	23,90	27,15
Giesshaube	121,73	1,78	10,70	111,03	23,90	27,15
Ofen3Direkt	30,29	1,68	10,15	20,14	23,90	27,15
Ofen3Dach1	116,45	1,79	10,79	105,67	23,90	27,15
Ofen3Dach2	214,92	3,23	19,46	195,47	23,90	27,15
rueck	14,11	0,75	4,53	9,58	23,90	27,15

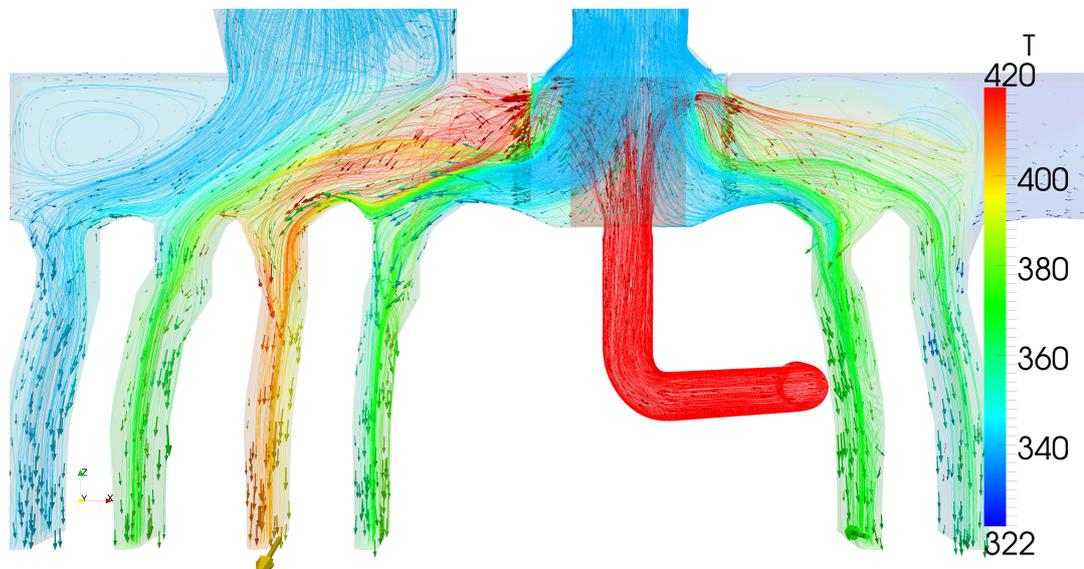


Abbildung 6.6: Temperaturfeld um die Heißgasleitung, bei fünfprozentiger Drosselung der Gesamt - Absaugleistung, verteilt auf die Gebläse zwei und drei

6.3.2 Berechnung des Sekundärmodells

Als naheliegende Lösung soll die Auswirkung der Verunreinigungen in der Mischkammer ausgeblendet werden. Hierfür wird das Sekundärmodell herangezogen, welches die ideal gereinigte Mischkammer darstellt, siehe Kapitel 4. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.5 zusammengefasst.

6.3.3 Modifikation des Strömungsteilers (U-Boot)

Um die direkte Aufteilung des Abgases hinsichtlich der Temperaturverteilung zu optimieren ist die Anpassung des Strömungsteilers naheliegend. Theoretisch sind Methoden der Mehrzieloptimierung, zum Beispiel über Evolutionstrategien, heranzuziehen. Der vorliegende Strömungsteiler (U-Boot) wird dabei in „ n “ Geometrievariablen eingeteilt.

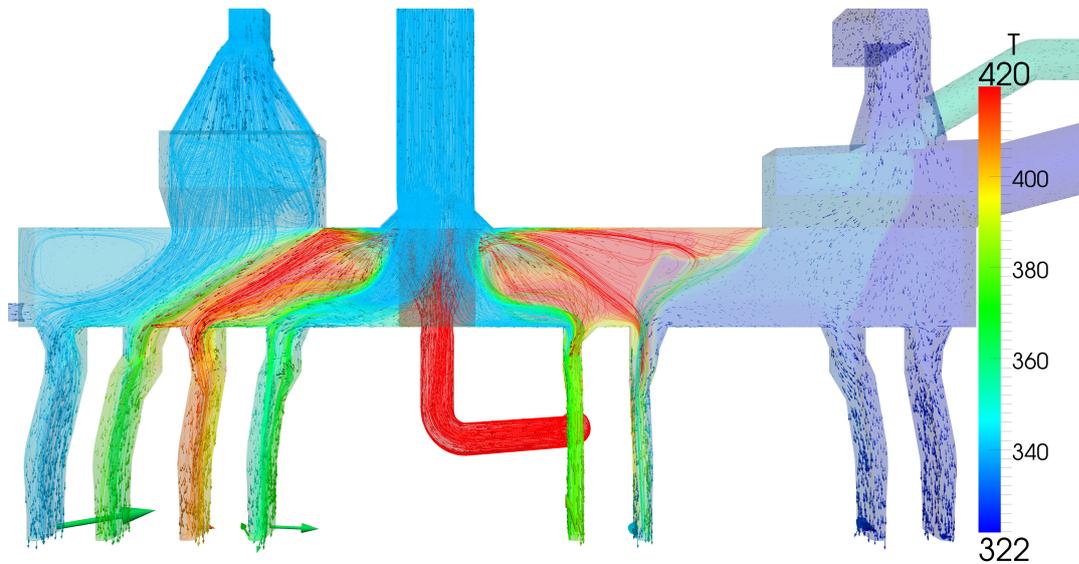


Abbildung 6.7: Temperaturfeld in der ideal gereinigten Mischkammer

Als Beispiel sei die Höhe sowie die Breite genannt. Die zu entwickelnden Zielfunktionen sind hochkomplex. Auf der einen Seite ist die Verteilung in der Mischkammer, auf der anderen Seite der Strömungswiderstand und damit der förderbare Volumenstrom durch die Heißgasleitung zu optimieren. Werden neben den topologischen Parametern auch Formparameter berücksichtigt, steigt der Rechenaufwand immens. Je Iteration der Optimierung sind damit eine neue Vernetzung und CFD-Rechnung notwendig. Auch wenn die Variablen der Optimierung grob diskretisiert werden (optimale Lösung fällt gegebenenfalls durch das Raster) ist der Rechenaufwand sehr hoch und bewegt sich schnell im Bereich von Jahren. Als Beispiel seien nur die Parameter Breite (min: 0,1 m; max: 1,0 m; $\delta_l = 0,1$ m) und Höhe (min: 1,0 m; max: 5,0 m; $\delta_l = 0,1$ m) variabel. Wird die Pareto-Menge abgebildet, sind zur Rasterung des Gebietes (bei $\delta_l = 0,1$ m) 360 Berechnungen notwendig. Die Rechenzeit je CFD-Rechnung beträgt circa 40 Stunden (bei einer Neuvernetzung kann das Initialfeld der vorherigen Rechnung nicht verwendet werden). Für die CFD-Berechnungen sind somit circa 600 Tagen zu veranschlagen, exklusive Vernetzungsaufwand. Es ist ersichtlich, dass eine solche Optimierung nur bei weniger komplexen Untersuchungsgebieten möglich ist. [22]

Bei der vorliegenden Untersuchung ist es die Aufgabe, primär Tendenzen aufzuzeigen, welche Maßnahme den größten positiven Effekt zur Folge haben könnte. Nach Tabelle 6.2 liegt die Temperatur an Gebläse eins aufgrund des geometrischen Abstandes zur Heißgaseinspeisung deutlich unter der Durchschnittstemperatur. Die Beförderung eines Anteils des Heißgases in Richtung Gebläse eins wird daher als Optimierungsansatz verfolgt. Wie in Abb. 6.3 gezeigt, reicht die kinetische Energie des Heißgasstromes nicht aus, um in Richtung Gebläse eins zu strömen. Der Großteil des Heißgases wird spätestens an Gebläse zwei abgesaugt.

Ziel ist es, deckennah eine Strömung in Richtung Gebläse eins zu etablieren. Äquivalent ist eine kalte Rückströmung in Richtung Gebläse zwei am Boden der Mischkammer notwendig. Das Heißgas wird beim Verlassen des Strömungsteilers durch den Abgasstrom (Ofen3Dach2) signifikant in Richtung Mischkammerboden umgelenkt. Eine Strömung unter der Mischkammerdecke ist damit nicht möglich. Durch eine Modifikation des Deckenbleches des Strömungsteilers ist die Umlenkung durch den Abgasstrom (Ofen3Dach2) zu verhindern, ohne den Strömungswiderstand signifikant zu vergrößern. Abb. 6.8 zeigt den benannten Bereich im Original und optimierten Zustand. Zusätzlich wurden im Deckenblech des Strömungsteilers drei kreisförmige Öffnungen mit einer

Gesamtfläche von $0,377 \text{ m}^2$ eingelassen. Die lokale Vermischung wird somit erhöht, der Strömungswiderstand herabgesetzt, siehe Abb. 6.9 und 6.11.

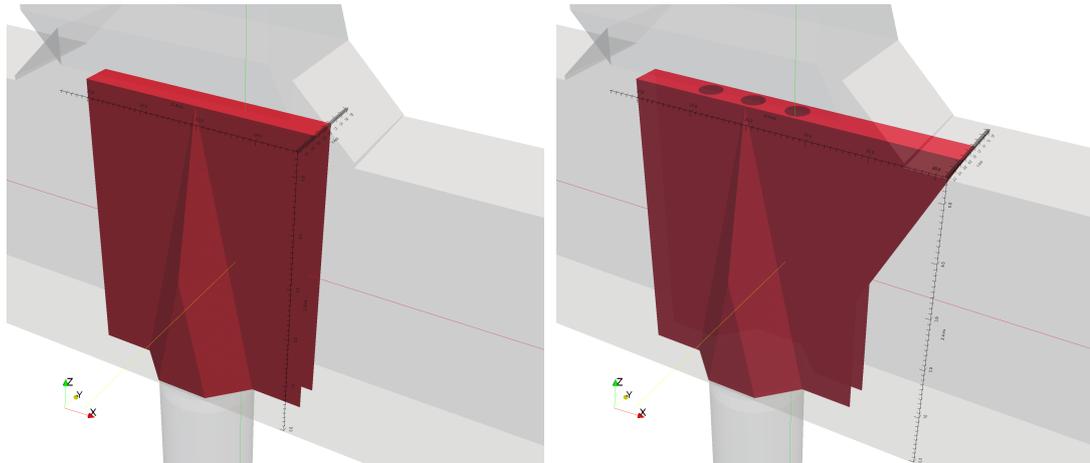


Abbildung 6.8: Original- und optimierte Geometrie des Strömungsteilers, Original (links), Optimierung (rechts)

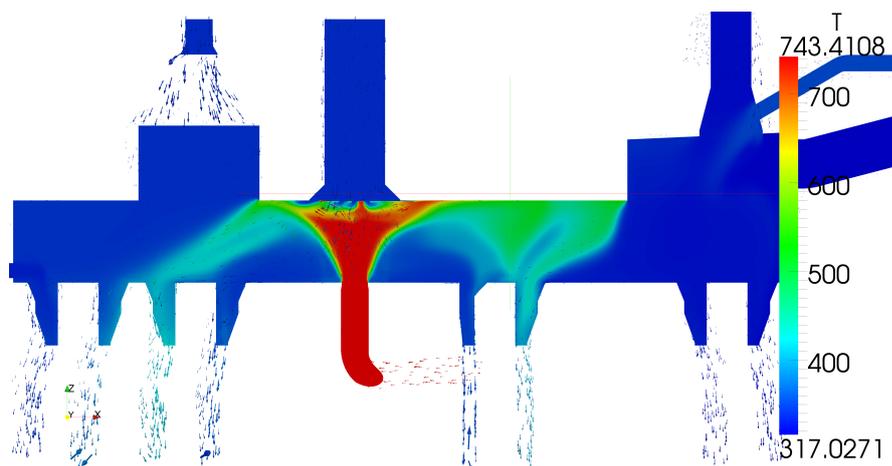


Abbildung 6.9: Temperaturfeld mit optimiertem Strömungsteiler, die Temperatur an Gebläse eins bleibt weitestgehend unbeeinträchtigt

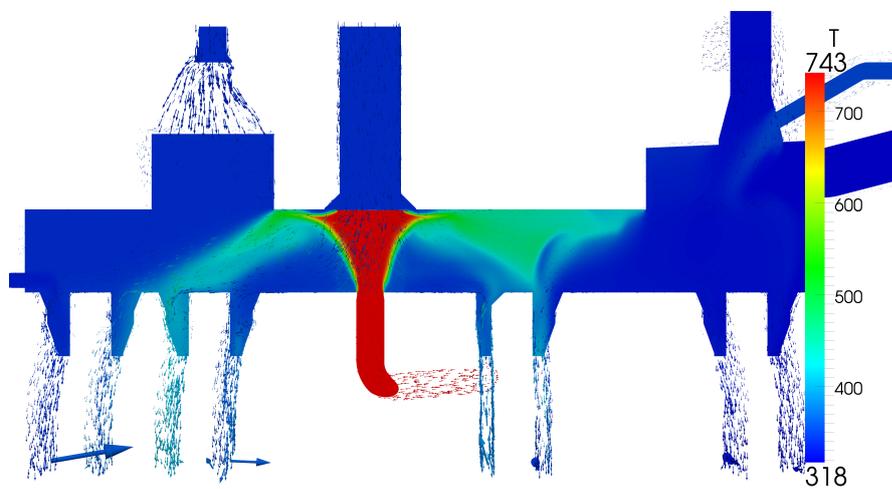


Abbildung 6.10: Temperaturfeld mit Original-Strömungsteiler

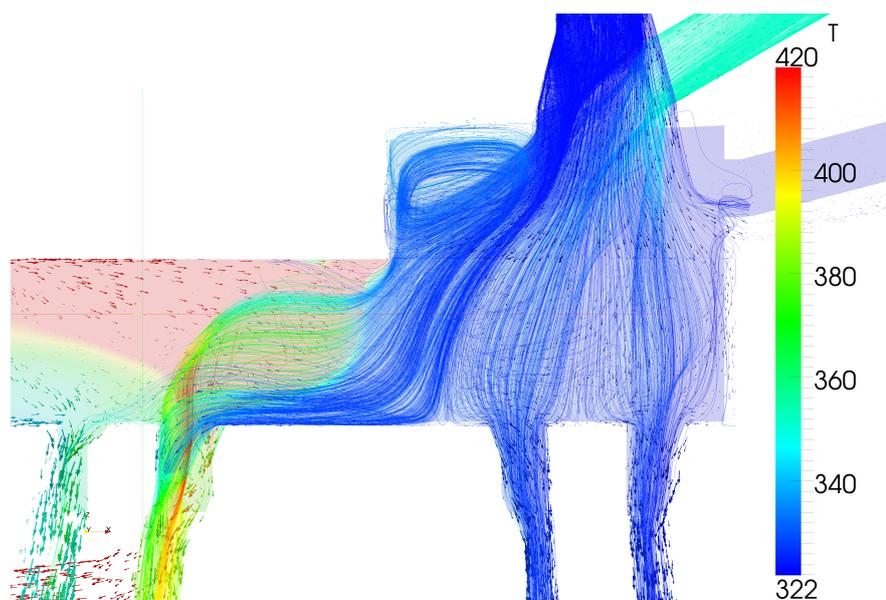


Abbildung 6.11: Heißgasumlenkung vor Gebläse eins mit optimiertem Strömungsteiler

6.3.4 Modifikationen in der saugseitigen Mischkammer

Wie in Abb. 6.9, 6.11 und 6.4 ersichtlich, bilden sich beim Verlassen des Strömungsteilers primär zwei Strömungen des Heißgases in der Mischkammer aus. Eine Durchmischung mit den Gasen der Dachabsaugungen findet nur im Randbereich statt. Besonders in Richtung Gebläse drei wird dieser Effekt sichtbar. Das Heißgas wird hier zwar durch das abgesaugte Volumen von `Ofen3Dach1` umgelenkt, aber nicht gänzlich vermischt. Der Kernbereich des Heißgasstrahles wird geschlossen durch Gebläse drei erfasst. Am Gebläse zwei ist eine ähnliche Konstellation vorhanden.

Es gilt zu prüfen, ob durch Umbauten in der Mischkammer eine Vergleichmäßigung der Temperatur an den vier Gebläsen erreicht werden kann. Hierbei ist der Druckverlust, welcher durch die Fluidumlenkung erhöht wird, zu beachten. Eine Beeinflussung der Strömung ist somit nur in Grenzen möglich.

Im Laufe der Optimierung wurde die Auswirkung verschiedener Blechanordnungen in relevanten Bereichen der Strömung analysiert. Zwei der betrachteten Modifikationen sollen vorgestellt werden. Die Ergebnisse der Temperaturverteilung der Varianten sind in Tabelle 6.5 zusammengefasst. Die genannten Optimierungsansätze bauen auf dem Sekundärmodell mit dem optimierten Strömungsteiler aus Kapitel 6.3.3 auf.

Variante A

Unterstützend zum modifizierten Strömungsteiler soll der Transport eines Anteils des Heißgases bis Gebläse eins verfolgt werden. Ansatz eins der Optimierung beinhaltet die Umlenkung des kalten Abgases durch ein horizontales Blech. Das Trennblech wird zwischen Oberkannte Mischkammer und den Aufbau über Gebläse eins montiert, siehe Abb. 6.12. Die resultierende Einengung erhöht die Turbulenz und den damit verbundenen Mischeffekt. Der Transport des Heißgases bis zum Gebläse soll durch die zusätzliche Abschirmung ermöglicht werden. Durch den reduzierten Querschnitt wird jedoch der Druckverlust im vorliegenden Bereich erhöht.

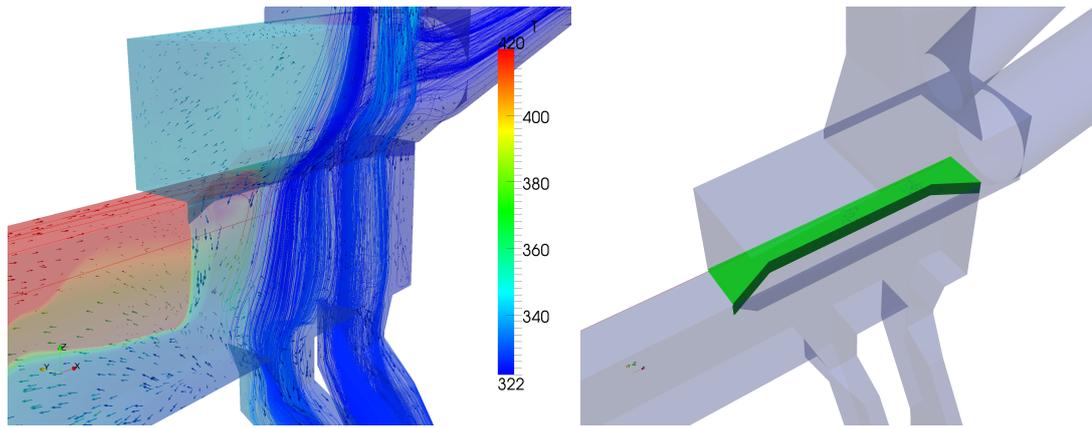


Abbildung 6.12: Strömungsfeld der Variante A an Gebläse eins (Streamlines) (links), geometrische Übersicht des zusätzlichen horizontalen Trenn- mit vertikalem Gurtblech (grün) (rechts)

Variante B

In der Variante B wird an der deckennahen Strömung bis über Gebläse eins festgehalten. Im Gegensatz zu Variante A wird jedoch eine Führung des Heißgases direkt nach dem Verlassen des Strömungsteilers installiert. Über ein Trennblech in der XZ-Ebene der Mischkammer wird eine offene Kanalführung bis über Gebläse eins eingeführt. Zusätzlich werden zur Erhöhung der Durchmischung fünf kreisförmige Öffnungen mit einem Durchmesser von jeweils 0,50 m direkt über dem Gebläse in das Trennblech eingelassen, siehe Abb. 6.13. Ziel ist es, einerseits das Heißgas weitestgehend ungehindert bis an das Gebläse eins zu bringen. Andererseits soll das „kalte“ Abgas der gießseitigen Absaugung in Richtung Gebläse zwei gelenkt werden. Die nach unten geöffnete Kanalführung ermöglicht einen geringfügigen Austausch mit dem umgebenen Gas. Ebenfalls ist die offene Bauweise hinsichtlich der Staub- Fracht und Ablagerung vorteilhaft (keine zusätzliche Wartung/Reinigung). Durch die Queranströmung über Gebläse eins soll es verstärkt zu Turbulenz und damit zur Vermischung mit kaltem Abgas kommen.

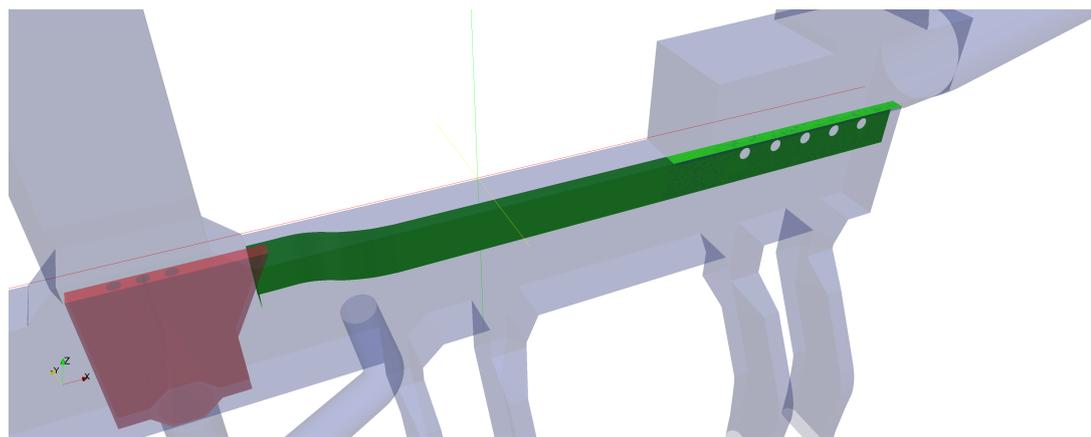


Abbildung 6.13: Modifikation der Variante B (grün) im Einflussbereich von Gebläse eins und zwei mit optimiertem Strömungsteiler (rot)

Die Temperaturverteilung an Gebläse drei und vier soll ebenfalls optimiert werden. Wie die Analyse des Istzustandes zeigt, wird ein Großteil des Heißgasstrahls durch Gebläse drei erfasst. Eine Durchmischung findet nur begrenzt statt. Anders als bei der Herangehensweise für Gebläse eins, ist es hier erforderlich das Heißgas direkt nach dem Austritt aus dem Strömungsteiler zu durchmischen. Diese Notwendigkeit entsteht, weil der Weg

zu Gebläse drei kurz ist. Durch die erhöhte Erzeugung turbulenter Bereiche, soll das kältere Gas der Dachabsaugung in den Heißgasstrahl induziert werden. Wie die Simulation des Istzustandes zeigt, siehe Abb. 6.4, drückt der kalte Abgasstrom der Dachabsaugung die Heißgasschicht in Richtung der Gebläse drei und vier. Die lokale Turbulenz reicht nicht aus, um eine ausreichende Vermischung beider Schichten zu generieren. Eine ausreichende Turbulenz kann nur unter der Verwendung von zusätzlichen Hindernissen in der Strömung erzeugt werden. Der damit verbundene Druckverlust muss bei dieser Herangehensweise durch geeignete Formen der Einbauten klein gehalten werden. Die Turbulenzerzeugung soll auf dem Prinzip der *Kármánschen Wirbelstraße*, das heißt dem hoch turbulenten Nachlauf eines Hindernisses in einer Strömung, aufbauen. [13] Im Nachströmbereich der Einbauten ist mit einem niedrigeren Druck als in der Hauptströmung zu rechnen. In diesen Gebieten kann das kalte Abgas der Dachabsaugung tief in die Heißgasschicht eindringen. Die Oberfläche der Heißgasschicht kann somit durchbrochen werden. Eine Vermischung mit der gesamten Strömung wird ermöglicht. Um den Effekt besser abzubilden, wird die Netzauflösung lokal deutlich erhöht (lokal zusätzliche $2 \cdot 10^6$ Zellen). Da die Wirbelausbildung nach Kármán hoch instationär ist, ist mit einer schlechteren Konvergenz zu rechnen. Der Aufbau wird in Abb. 6.14 illustriert.

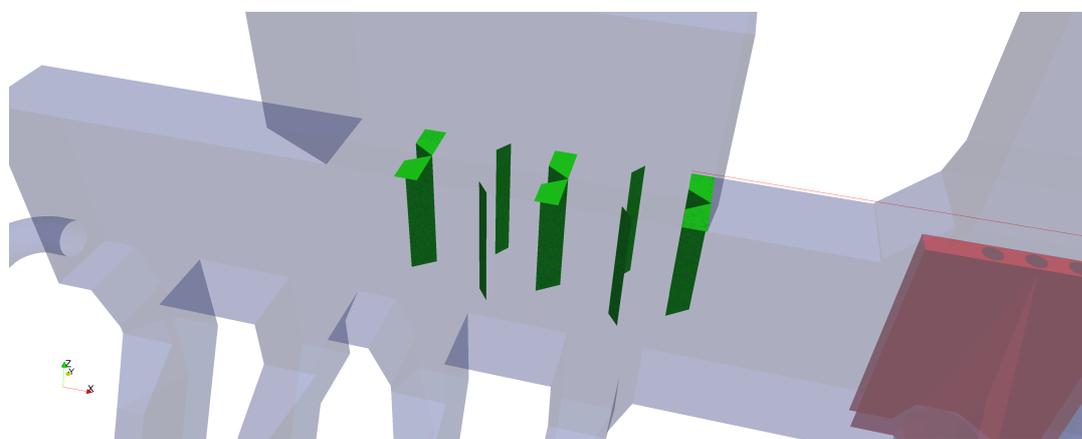


Abbildung 6.14: Modifikation der Variante B (grün) im Einflussbereich von Gebläse drei und vier mit optimiertem Strömungsteiler (rot)

6.3.5 Analyse der optimierten Strömungsfelder

Die durchgeführten Optimierungsansätze sollen in diesem Kapitel bewertet werden. Die Ergebnisse der CFD-Rechnungen der Optimierung sind in Tabelle 6.5 zusammengefasst. Alle Optimierungen wurden bei 470°C Heißgastemperatur berechnet.

Die reine Drosselung der Gebläse zwei und drei zeigt in beiden Berechnungsvarianten keine signifikante Verbesserung hinsichtlich der Temperaturverteilung. Aufgrund des direkten Einflusses auf alle Inlets bleibt das Temperaturfeld in der Mischkammer qualitativ ähnlich. Abweichungen der zwei Varianten zeigen sich besonders an Gebläse zwei bei einer zehnpromzentigen Reduktion der Absaugmenge. Bei der linearen Verteilung der Massenstromänderung auf die Inlets ist der Heißgasstrom zwar größer, die Reduktion der Massenströme an der Ofen drei Dachhaube jedoch deutlich geringer. Die Folge ist eine Abkühlung wie in Tabelle 6.5 aufgezeigt. Welcher der Ansätze die realen Verhältnisse besser abbildet, bleibt offen und muss über Vergleichsmessungen verifiziert werden. Diese Untersuchung ist als zweitrangig einzustufen, da gezeigt werden konnte, dass die Temperaturverteilung auf diesem Weg nicht hinreichend verbessert werden kann.

Die komplette Reinigung der CEAG (Sekundärmodell) erbringt ohne weitere Maßnahmen nur geringfügige Verbesserungen hinsichtlich der Temperaturverteilung. Gebläse vier

weist ein leicht erhöhtes Temperaturniveau gegenüber dem Primärmodell auf. Dieser Effekt wird vor allem durch die nicht vorhandenen Kettenvorhänge (kleiner Strömungswiderstand) hervorgerufen.

Die erreichten Ergebnisse mit dem modifizierten Strömungsteiler sind in Tabelle 6.5 hinterlegt. Wie in Abb. 6.9 gezeigt wird, kommt es in der Mischkammer in Richtung Gebläse eins zu einer weitläufigeren Ausbreitung des Heißgases. Die eingelassenen Löcher in der Decke des Strömungsteilers bewirken eine Kühlung der oberen Fluidschichten, welche allerdings lokal begrenzt ist. Das Heißgas wird jedoch weiterhin vor dem Erreichen des Einflussfeldes von Gebläse eins umgelenkt, siehe Abb. 6.11. Das kältere Abgas von der gießseitigen Dachhaube und vom Inlet `Ofen12` stoppen den Heißgasstrahl und lenken diesen um. Auch in Verbindung mit Variante A kann keine Verbesserung der Temperaturverteilung erreicht werden.

Die entwickelte Variante B zeigt deutliche Verbesserungen hinsichtlich der Temperaturverteilung an den Gebläsen eins und zwei, siehe Tabelle 6.5. Durch die offene Blechführung an der Decke der Mischkammer gelangt ein Teil des Heißgases bis über Gebläse eins. An der Abrisskante der Führung entsteht beim Queranströmen durch die Inlets `Gießshaube` und `Ofen12` ein Unterdruckgebiet. Das heiße Gas wird, bedingt durch die sich erhöhende Turbulenz im Nachströmbereich der Führung (Rand des Unterdruckgebietes), weit in den kalten Abgasstrom induziert. Die zusätzlich eingelassenen Öffnungen erhöhen, wie konzipiert, die Durchmischung. Abb. 6.15 zeigt die turbulente kinetische Energie k stellvertretend für die erhöhte Turbulenz über Gebläse eins (links). Ebenfalls wird der Temperaturverlauf exemplarisch abgebildet (rechts). Das gesamte Temperaturfeld über Gebläse eins ist in Abb. 6.16 dargestellt. Die signifikant erhöhte Temperatur wird ersichtlich, Vergleich Abb. 6.11.

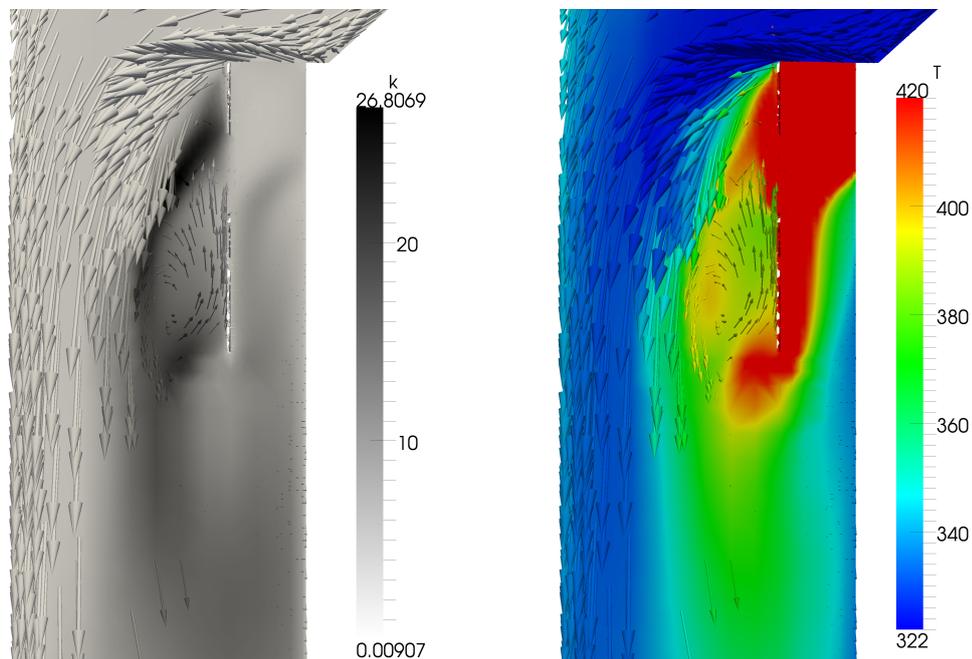


Abbildung 6.15: Strömungsfelder der Variante B im Einflussbereich von Gebläse eins, ersichtlich wird die erhöhte Turbulenz nach der Abrisskante über Gebläse eins, Visualisierung von k (links), Temperaturfeld (rechts)

Auf der Seite von Gebläse drei und vier kann ebenfalls eine Temperaturvergleichmäßigung durch die Variante B nachgewiesen werden. Die Erhöhung der Turbulenz durch die eingebrachten Hindernisse in der Mischkammer zeigen eine stärkere Durchmischung der Fluidschichten. Die Induktion von kaltem Abgas in die entstehenden Unterdruck-

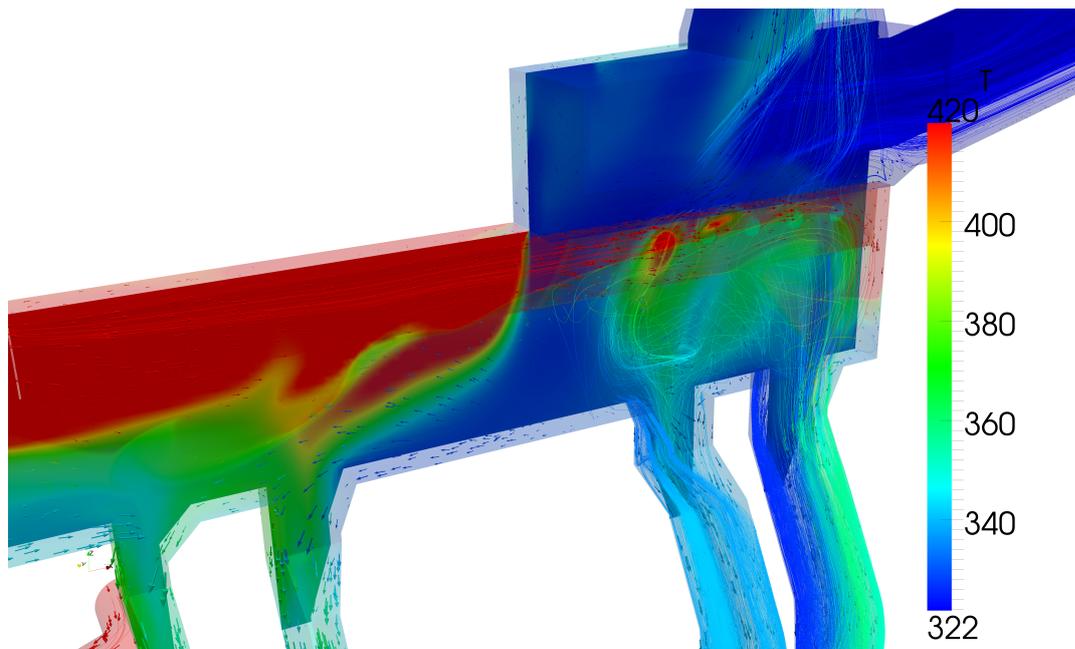


Abbildung 6.16: Temperaturfeld der Variante B im Einflussbereich von Gebläse eins und zwei (Streamlines), die erhöhte Temperaturbelastung an Gebläse eins wird ersichtlich

gebiete, hinter den zusätzlichen Einbauten, durchbricht die getrennten Fluidschichten (Heißgas und kaltes Abgas der Dachabsaugung), siehe Abb. 6.18. Die sich erhöhende Turbulenz an den installierten Hindernissen wird in Abb. 6.17 anhand eines Schnittes dokumentiert. Der Druckverlust beim Umströmen der Hindernisse (circa 200 Pa) hat zur Folge, dass sich ein Teil des Heißgases unter den Bereich der neuen Einbauten bewegt. Abb. 6.18 zeigt dieses Phänomen. Eine komplette Durchmischung kann auch mit der Variante B nicht erreicht werden. Es sind weitere Rechnungen notwendig, um die optimalen Formen und Maße der zusätzlichen Einbauten zu bestimmen. Als Beispiel ist die Verlängerung der Hindernisse bis auf den Mischkammerboden zu nennen. Der Mischungsgrad beim Umströmen der Hindernisse und die damit ansteigende Turbulenz sowie der Druckverlust müssen als *konkurrierende Ziele* aufgefasst werden. Ein hinreichend ausgeglichener Kompromiss zwischen diesen Zielen ist somit unabdingbar. Die Weiterentwicklung von Variante B wird daher empfohlen.

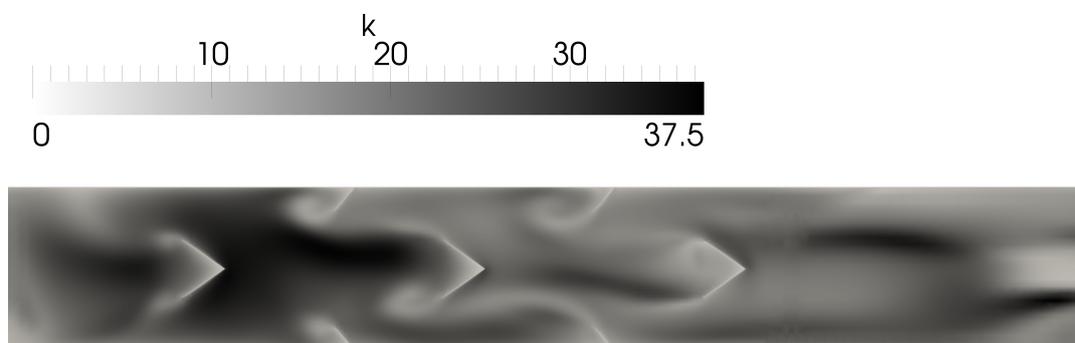


Abbildung 6.17: Strömungsfeld von k der Variante B im Einflussbereich von Gebläse drei und vier, erhöhte Turbulenz in Nachstromgebiet der neuen Einbauten (Draufsicht)

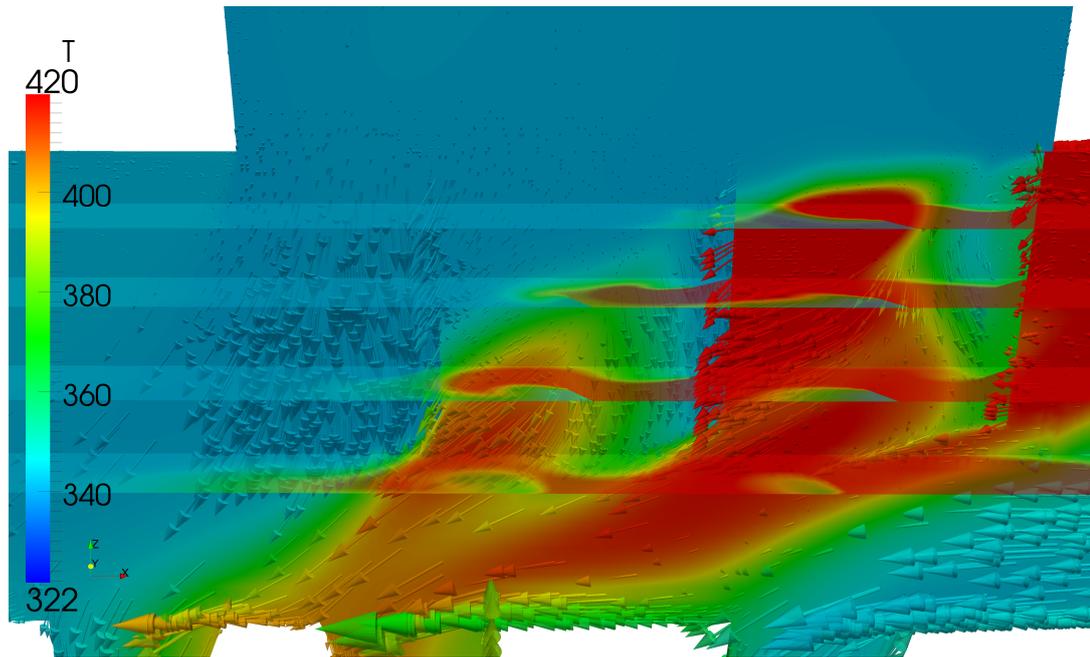


Abbildung 6.18: Temperaturfeld der Variante B im Einflussbereich von Gebläse drei und vier (mehrfacher 3D-Schnitt)

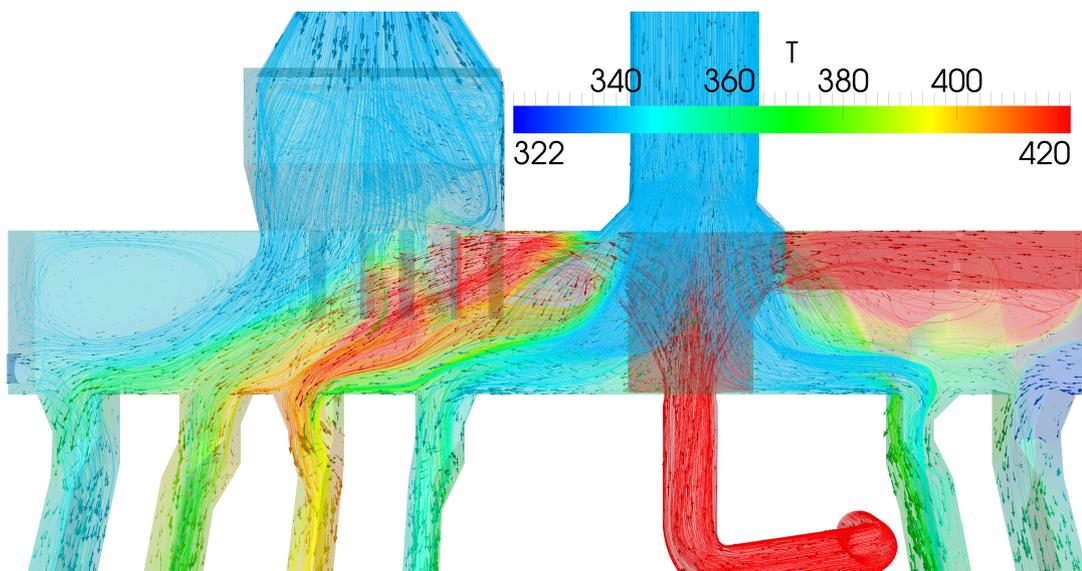


Abbildung 6.19: Übersicht des Strömungsfeldes der Variante B im Einflussbereich von Gebläse drei und vier (Streamlines), Vergleich zum Istzustand siehe Abb. 6.4

Tabelle 6.5: Vergleich der Temperaturverteilung der untersuchten Optimierungsansätze

Daten	Gebläse 1	Gebläse 2	Gebläse 3	Gebläse 4
	°C	°C	°C	°C
Messdaten (2012):	51	102	106	73
<i>CFD-Optimierungsansätze (Primärmodell):</i>				
<i>CFD-Istzustand (Primärmodell Variante 4):</i>	53,1	95,8	113,3	79,9
95 % Absaugmenge nach Tabelle 6.3:	52,6	88,8	112,2	82,4
Absolute Abweichung zu Variante 4:	-0,5	-7,0	1,1	2,5
Relative Abweichung zu Variante 4:	-0,2 %	-1,9 %	-0,3 %	0,7 %
90 % Absaugmenge nach Tabelle 6.3:	51,9	76,4	110,5	84,9
Absolute Abweichung zu Variante 4:	-1,2	-19,4	-2,9	5,1
Relative Abweichung zu Variante 4:	-0,4 %	-5,3 %	-0,7 %	1,4 %
95 % Absaugmenge nach Tabelle 6.4:	53,1	97,7	114,0	81,5
Absolute Abweichung zu Variante 4:	0,0	1,9	0,7	1,6
Relative Abweichung zu Variante 4:	0,0 %	0,5 %	0,2 %	0,4 %
90 % Absaugmenge nach Tabelle 6.4:	53,2	100,4	115,0	82,7
Absolute Abweichung zu Variante 4:	0,1	4,6	1,7	2,8
Relative Abweichung zu Variante 4:	0,0 %	1,2 %	0,4 %	0,8 %
<i>CFD-Optimierungsansätze (Sekundärmodell):</i>				
Sekundärmodell, CEAG gereinigt:	52,9	96,1	110,1	81,4
Absolute Abweichung zu Variante 4:	-0,2	0,3	-3,2	1,5
Relative Abweichung zu Variante 4:	-0,1 %	0,1 %	-0,8 %	0,4 %
Optimierter Strömungsteiler:	53,1	99,1	107,7	83,9
Absolute Abweichung zu Variante 4:	0,1	3,3	-5,6	4,0
Relative Abweichung zu Variante 4:	0,0 %	0,9 %	-1,4 %	1,1 %
Variante A:	56,2	96,0	105,4	83,1
Absolute Abweichung zu Variante 4:	3,1	0,2	-7,9	3,2
Relative Abweichung zu Variante 4:	0,9 %	0,1 %	-2,0 %	0,9 %
Variante B:	68,0	84,1	102,5	87,4
Absolute Abweichung zu Variante 4:	14,9	-11,7	-10,9	7,6
Relative Abweichung zu Variante 4:	4,6 %	-3,2 %	-2,8 %	2,1 %

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Laufe des Projektes sollte das Strömungsfeld in der saugseitigen Mischkammer einer Stahlwerkseinstaubungsanlage analysiert werden. Zu diesem Zweck wurde eine CFD-Simulation mit dem Tool OpenFOAM konzipiert. Auf Basis dieser Simulation sind verschiedene Optimierungsansätze zur Temperaturvergleichmäßigung an den Gebläsen der Anlage entwickelt und untersucht worden. Ziel war es zu analysieren, über welche potentiellen Ansätze der größte positive Effekt erzielt werden kann.

Für die Umsetzung der Simulation sind verschiedene Vereinfachungen bei der Geometrieapproximation erforderlich. Über den Vernetzer *snappyHexMesh* wurde die Diskretisierung des Untersuchungsgebietes mit einem gemischten Netz (*mixed*) generiert. Unter der Verwendung der RANS-Gleichungen in Verbindung mit dem $k-\omega$ -SST-Tubulenzmodell konnte eine gute Konvergenz erzielt werden. Die Simulation zeigt, dass eine Durchmischung des Heißgases der Direktabsaugung am Elektrolichtbogenofen nur bedingt erreicht wird. Die Geometrie bewirkt eine ungleichmäßige Verteilung des Gases, was durch die Messdaten bestätigt werden konnte. Eine Validierung des berechneten Istzustandes der Simulation war somit über die vorliegenden Temperaturdaten der Gebläse eins bis vier hinreichend möglich. Die Abweichungen der CFD-Ergebnisse zu den messtechnisch erfassten Werten kann mit 2,0 % beziffert werden.

Die erstellte Simulation dient somit als Plattform, mit der Änderungen an der CEAG simuliert werden können. Auf Basis des Istzustandes der Simulation sind verschiedene Optimierungsansätze untersucht worden. Neben der reinen Drosselung der Absaugmenge an den Gebläsen zwei und drei wurden zudem Varianten mit angepassten Einbauten in der saugseitigen Mischkammer analysiert. Die gedrosselte Absaugleistung an den Gebläsen zwei und drei wurde hierbei über zwei Näherungsansätze auf die Inlets der CEAG übertragen. Die Untersuchung ergab, dass über die reine Drosselung der Gebläse keine signifikante Verbesserung hinsichtlich der Temperaturverteilung an den Outlets der Mischkammer erreicht werden kann. Jedoch konnte gezeigt werden, dass die konzipierte Modifikation des Strömungsteilers zu einer verbesserten Verteilung der Temperatur in der Mischkammer führt. Die Auswirkungen an den Gebläsen ist dabei minimal, weshalb der Ansatz als alleinige Lösung ungeeignet ist. In Kombination mit den aufgezeigten Blechanordnungen in der saugseitigen Mischkammer konnte nachgewiesen werden, dass eine Temperaturvergleichmäßigung auch an den Gebläsen erreicht werden kann. Durch die zusätzlichen Einbauten ist jedoch mit einer Erhöhung des Druckverlustes zu rechnen, wodurch die Absaugleistung negativ beeinflusst werden kann.

Bevor Umbauten auf Basis der CFD-Simulation durchgeführt werden können, ist eine weitere Untersuchung beziehungsweise Validierung des Strömungsfeldes in der Mischkammer empfehlenswert. Als Beispiel sei eine visuelle Analyse an verschiedenen Messpunkten genannt. Der Umbauaufwand zur Durchführung solcher Versuche ist dabei erheblich. Die Sichtbarmachung der einzelnen Abgasströme, zum Beispiel des Heißgases, ist über eine Raucheinblasung realisierbar. Zur Dokumentation sind zudem Sichtfenster an strömungstechnisch relevanten Stellen erforderlich (für Videoaufzeichnungen). Damit auswertbares Bildmaterial in der saugseitigen Mischkammer aufgezeichnet werden

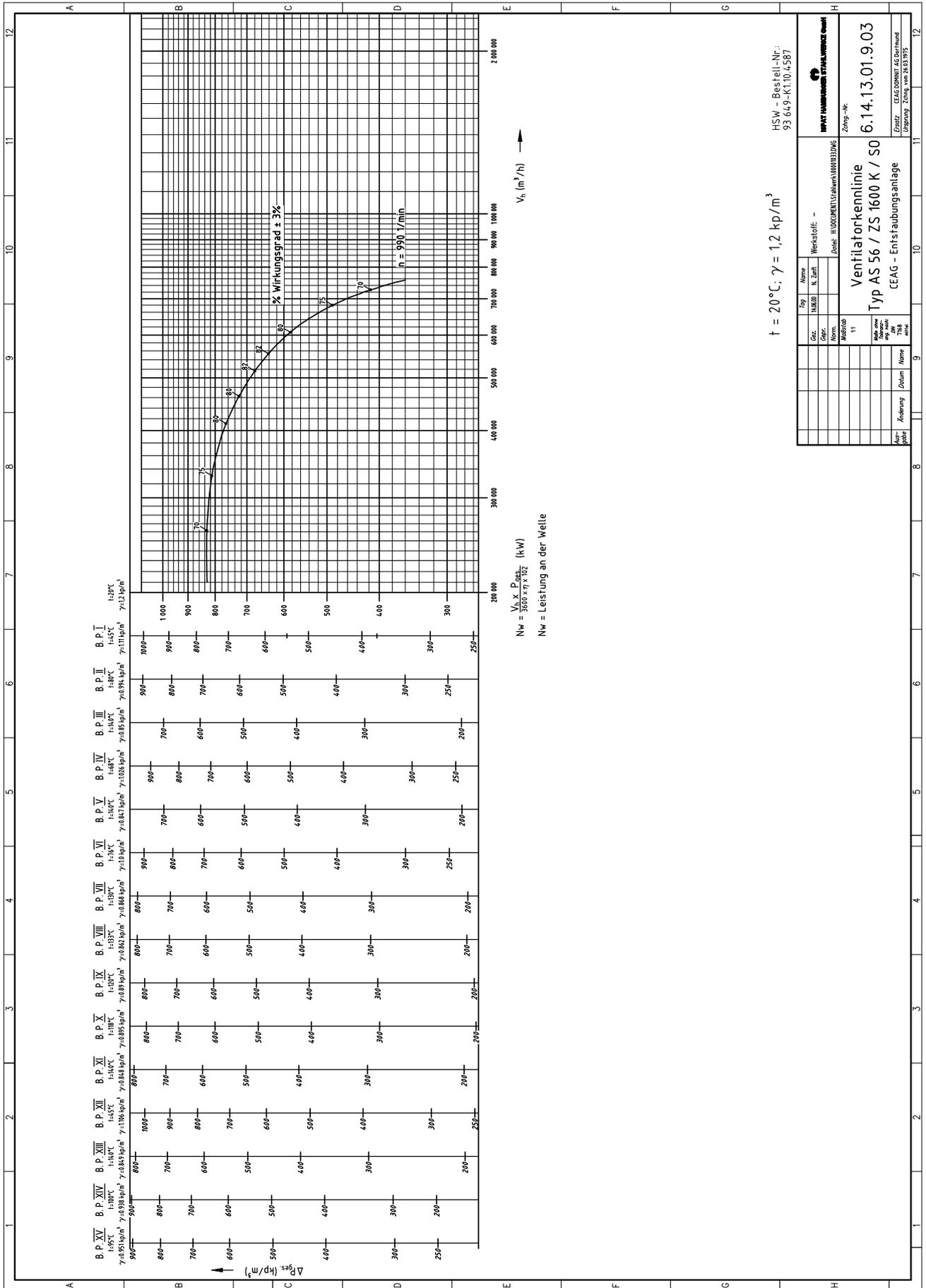
kann, ist eine entsprechende Ausleuchtung unabdingbar. Alle Komponenten sind dabei der Staubbeladung und der Temperatur des Abgases ausgesetzt. Temporäre Messungen in verschiedenen Stillständen werden daher als empfehlenswert angesehen.

Neben der direkten Begutachtung der Strömung ist eine Auswertung der Temperaturverteilung über eine Thermo-Kamera möglich. Durch die Lage, das heißt den stark eingebauten Bereich der CEAG, wird eine solche Analyse maßgeblich erschwert. Eine Messung auf die Seitenflächen der saugseitigen Mischkammer ist nicht möglich (direkte Angrenzung an die Stahlwerkshalle und die druckseitige Mischkammer). Der Deckenbereich der CEAG ist die einzige Fläche, welche analysiert werden kann. Als alleinige Messung ist die Aussagekraft hier jedoch begrenzt. Wird eine Optimierung, wie in Kapitel 6, mit einem modifizierten Strömungsteiler umgesetzt, lässt sich die Ausbildung der deckennahen Heißgasströmung auf diesem Wege prüfen.

Aufgrund der hohen Messunsicherheit der Volumenströme sowie Temperaturen ist die Installation stationärer Messtechnik an den Hauptkanälen der CEAG in Erwägung zu ziehen. Über ein hinreichendes Messraster und die synchrone Erfassung der Hauptströmungen kann die Aussagekraft über die realen Fluidbewegungen deutlich verbessert werden. Eine Analyse der Daten durch die Aufzeichnung im Prozessleitsystem ist umsetzbar. Dieser Ansatz schafft ebenfalls die Möglichkeit, Rückschlüsse über den Verschmutzungsgrad der Kanäle zu ziehen. Durch eine Anpassung der Randbedingungen ist die Simulation schnell auf die neuen Messdaten einstellbar. Mess- und Simulationsdaten wären somit parallel vorhanden und könnten eventuelle Probleme in der Anlage aufzeigen. Eine Installation geeigneter Messtechnik ist momentan in Planung.

8 Anhang

1. Ventilator Kennlinie der CEAG - Radialgebläse, Seite 89



$t = 20^\circ\text{C}; \gamma = 1,2 \text{ kp/m}^3$
 HSW - Bestell-Nr.: 93 649-KI.10.4587

Typ		Name		Werkstoff: -
Gr.	HRGR	Nr.	Zusatz	
				Zusatz: IIUCORRETS StahlwerkVMM033196
				Zählgr.-Nr. 11
Ventilatorerkennung Typ AS 56 / ZS 1600 K / S0 CEAG - Entstaubungsanlage				
Zählgr.-Nr. 6.14.13.01.9.03 Ersatz: CEAG DOWNET AG Dortmund Ursprung: Zeich. vom 8.9.1975				

Optimierung der Mischkammer einer Stahlwerkentstaubung

Elektronischer Anhang

1. Masterthesis - Hannes Martens - digitale Fassung

Technische Zeichnungen

1. CEAG Übersicht 1 - 6_14_13_99_9_01d.tif
2. CEAG Übersicht 2 - 6_14_13_99_9_09.tif

OpenFOAM - Dateien

1. snappyHexMeshDict
2. Residuen - Log - File (der Variante vier des Istzustandes)

Skripte und Dokumente

1. Technische Spezifikationen CEAG 1974
2. OpenFOAM - User's Guide - Version 1.6
3. OpenFOAM - Programmer Guide - Version 1.6
4. Wulf, Peter: CFDM Skript 7 - LGS-Loesungsverfahren
5. www.CFD-Online.com - How to plot Residuals in OpenFOAM
6. Wulf, Peter: CFDM Skript 9 - Fehleranalyse
7. Wulf, Peter: CFDM Skript 4 - Finite Volumen Methode
8. Wulf, Peter: CFDM Skript 2a./b. - Strömungsmechanik
9. Wulf, Peter: CFDM Skript 3 - Klassifikation & Randbedingungen
10. Grundmann, Reinhard - Grundlagen der Ventilatortechnik
11. Wulf, Peter: CFDM Skript 10 - Turbulenzmodelle
12. T. Ring, L. Xue, J.Yan - Numerische Methoden der Thermo- und Fluidodynamik
13. www.CFD-Online.com - Turbulence free-stream boundary conditions
14. Wulf, Peter: CFDM Skript 8 - Netzerstellung
15. Andrew Jackson - A Comprehensive Tour of snappyHexMesh - 7th OpenFOAM Workshop
16. www.OpenFoam.com - OpenFOAM® v2.2.0/ Changes to snappyHexMesh
17. Wulf, Peter: CFDM Skript 5 - Druck-Geschwindigkeits-Kopplung
18. VentiOelde - Messbericht - 2009
19. Datenblatt - GREISINGER - GDH200
20. Datenblatt - KIMO - MP 200

21. Datenblatt - KIMO - Druckmodul MDP 10000
22. Datenblatt - Electro-Mation - Staurohr Typ - S
23. Datenblatt - Electro-Mation - Staurohr Typ - L
24. Datenblatt - Electro-Mation - Thermo - Element

Ergebnis - Plots

Folgende Abbildungen sind zur besserten Visualisierung in hoher Auflösung hinterlegt.

- 6.2: Temperaturverteilung an den Outlets - Variante 4
- 6.3: Temperaturfeld um die Heißgasleitung - Variante 1 und 2
- 6.4: Temperaturfeld um die Heißgasleitung - Variante 3 und 4
- 6.5: Temperaturfeld um die Heißgasleitung - Variante 5 und 6
- 6.6: Temperaturfeld um die Heißgasleitung, bei fünfprozentiger Drosselung der Gesamt - Absaugleistung
- 6.7: Temperaturfeld in der ideal gereinigten Mischkammer
- 6.9: Temperaturfeld mit optimiertem Strömungsteiler
- 6.10: Temperaturfeld mit Original-Strömungsteiler
- 6.11: Heißgasumlenkung vor Gebläse eins mit optimiertem Strömungsteiler
- 6.12a: Strömungsfeld der Variante A an Gebläse eins (links)
- 6.12b: Strömungsfeld der Variante A an Gebläse eins (rechts)
- 6.13: Modifikation der Variante B im Einflussbereich von Gebläse eins und zwei
- 6.14: Modifikation der Variante B im Einflussbereich von Gebläse drei und vier
- 6.15a: Strömungsfelder der Variante B im Einflussbereich von Gebläse eins (k, links)
- 6.15b: Strömungsfelder der Variante B im Einflussbereich von Gebläse eins (T, links)
- 6.16: Temperaturfeld der Variante B im Einflussbereich von Gebläse eins und zwei
- 6.18: Temperaturfeld der Variante B im Einflussbereich von Gebläse drei und vier
- 6.17: Strömungsfeld von k der Variante B im Einflussbereich von Gebläse drei und vier
- 6.19: Übersicht des Strömungsfeldes der Variante B im Einflussbereich von Gebläse drei und vier

Literaturverzeichnis

- [1] KORE Engineering GmbH: Technische Spezifikation - Entstaubungsanlage für 3 LBO in dem Hamburger Stahlwerk GmbH, 17.07.1974, siehe elektronischer Anhang.
- [2] www.OpenFOAM.com: OpenFOAM User Guide, Version 1.6, siehe elektronischer Anhang.
- [3] www.OpenFOAM.com: OpenFOAM Programmer Guide, Version 1.6, siehe elektronischer Anhang.
- [4] Wulf, Peter: CFDM Skript 7 - LGS-Loesungsverfahren. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, 2012, siehe elektronischer Anhang.
- [5] Joel H. Ferziger, Milovan Perić: Numerische Strömungsmechanik, Springer-Verlag, Berlin, 2008, ISBN 978-3-540-67586-0.
- [6] www.CFD-Online.com: How to plot Residuals in OpenFOAM, <http://www.cfd-online.com/Forums/openfoam/70186-plotting-residuals.html>, siehe elektronischer Anhang.
- [7] Wulf, Peter: CFDM Skript 9 - Fehleranalyse. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, 2012, siehe elektronischer Anhang.
- [8] Wulf, Peter: CFDM Skript 4 - Finite Volumen Methode. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, 2012, siehe elektronischer Anhang.
- [9] Schwarze, Rüdiger: CFD-Modellierung - Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen. Springer-Verlag, Berlin, 2013, ISBN 978-3-642-24377-6.
- [10] Wulf, Peter: CFDM Skript 2a./b. - Strömungsmechanik. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, 2012, siehe elektronischer Anhang.
- [11] Wulf, Peter: CFDM Skript 3 - Klassifikation & Randbedingungen. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, 2012, siehe elektronischer Anhang.
- [12] Grundmann, Reinhard: Grundlagen der Ventilatortechnik. Aachen, siehe elektronischer Anhang.
- [13] Wulf, Peter: CFDM Skript 10 - Turbulenzmodelle. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, 2012, siehe elektronischer Anhang.
- [14] Laurien, Eckart; Oertel jr., Herbert: Numerische Strömungsmechanik, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011, ISBN 978-3-8348-1503-3.
- [15] Ring, T. ; et alii: Numerische Methoden der Thermo- und Fluidodynamik. Technische Universität Berlin, vorläufige Version 2002.

- [16] Versteeg, H K; Malalasekera, W: An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method. PEARSON, Prentice Hall, Harlow England, second edition 2007, ISBN 978-0-13-127498-3
- [17] www.CFD-Online.com/Wiki/Turbulent_length_scale: Turbulence free-stream boundary conditions, Version 2013, siehe elektronischer Anhang.
- [18] Wulf, Peter: CFDM Skript 8 - Netzerstellung. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, 2012, siehe elektronischer Anhang.
- [19] Jackson, Andrew: A Comprehensive Tour of snappyHexMesh - 7th OpenFOAM Workshop, 2012, siehe elektronischer Anhang.
- [20] www.OpenFOAM.com: OpenFOAM® v2.2.0 - Changes to snappyHexMesh, <http://www.openfoam.org/version2.2.0/snappyHexMesh.php>, siehe elektronischer Anhang.
- [21] Wulf, Peter: CFDM Skript 5 - Druck-Geschwindigkeits-Kopplung. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, 2012, siehe elektronischer Anhang.
- [22] Kost, Bernd: Optimierung mit Evolutionsstrategien. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2003, ISBN 3-8171-1699-3.



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Hamburg University of Applied Sciences

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: **Martens**

Vorname: **Hannes**

dass ich die vorliegende Masterarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Optimierung der Mischkammer einer Stahlwerkseinstaubung

ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten:

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Masterarbeit ist erfolgt durch ...

Ort

Datum

Unterschrift im Original