

Anna FEICHTNER

Zur Ermittlung von Windbelastungen auf Bauwerke mittels CFD-Berechnungen

MASTERARBEIT

eingereicht an der

LEOPOLD-FRANZENS-UNIVERSITÄT INNSBRUCK
FAKULTÄT FÜR TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN



zur Erlangung des akademischen Grades

DIPLOM-INGENIEURIN

Beurteiler:

Univ.-Prof. DI Dr. Gerhard LENER

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften
Arbeitsbereich für Stahlbau und Mischbautechnologie

Innsbruck, September 2017

Betreuer: Univ.-Prof. DI Dr. Gerhard LENER,
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften,
Arbeitsbereich für Stahlbau und Mischbautechnologie

Mitbetreuer: DI Dr. Ralph TIMMERS,
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften,
Arbeitsbereich für Stahlbau und Mischbautechnologie

Kurzfassung

Diese Masterarbeit ist im ersten Teil eine Sammlung von Grundlagenwissen über CFD inklusive der notwendigen strömungsmechanischen Basics und deren Anwendung auf Umströmungen einfacher Gebäudegeometrien bzw. stumpfer Körper. Mit diesem Wissen und entsprechenden Best Practice Guidelines werden im zweiten Teil CFD-Simulationen mit ANSYS CFX durchgeführt. Dabei werden rechteckige Gebäude mit Flachdächern im Hinblick auf die resultierenden Oberflächendrücke und c_{pe} -Beiwerte untersucht, wobei zuerst vertikale Wände und dann in bzw. entgegen der Strömungsrichtung geneigte Wände vorgegeben wurden. Die Ergebnisse der Modelle mit vertikalen Wänden können direkt mit der Windlast-Norm ÖNORM EN 1991-1-4 verglichen werden, da diese c_{pe} -Beiwerte für vorgegebene Teilflächen der Gebäudeoberfläche liefert. Die Windlast-Norm enthält jedoch keine Angaben für Gebäude mit geneigten Wänden, weshalb der Einfluss des Neigungswinkels auf die Oberflächendrücke untersucht wird. Am Ende der Arbeit wird ein Vorschlag gemacht, wie auf Basis der c_{pe} -Beiwerte für vertikale Wände laut Norm, c_{pe} -Beiwerte für Gebäude mit geneigten Wänden ermittelt werden können.

Abstract

The first part of this Master's thesis is a collection of basic knowledge concerning fluid dynamics and CFD as well as its application to external flows around simple building geometries and bluff bodies respectively. With this knowledge and appropriate Best Practice Guidelines, parametric CFD-simulations have been conducted with ANSYS CFX. The geometries consist of rectangular buildings with flat roofs and vertical or inclined walls, whereas only the front and back walls are inclined. The resulting surface pressures, as well as c_{pe} - pressure coefficients, have been evaluated. The results of the models with vertical walls can be compared directly with specifications of the wind load - standard ÖNORM EN 1991-1-4, which provides c_{pe} -coefficients for specified surface areas for buildings with vertical walls. But for inclined walls, the standard doesn't provide any specifications. Therefore the impact of the angle of inclination on the surface pressure is evaluated. At the end of the thesis, a proposal for the choice of c_{pe} - coefficients on the basis of the coefficients for vertical walls due to the standard is given.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Abstract	7
Abkürzungen.....	14
1. Einleitung	15
1.1 Motivation.....	15
1.2 Ziele	16
1.3 Abgrenzung.....	17
1.4 Verwendete Software.....	18
2. Theorie der Strömungsmechanik und der CFD	20
2.1 Allgemeines Wissen über Strömungen	20
2.1.1 Kompressible / inkompressible Strömung	20
2.1.2 Subsonische / supersonische Strömung.....	20
2.1.3 Newton'sche Fluide	21
2.1.4 Reynoldszahl	22
2.1.5 Laminare / turbulente Strömung	24
2.1.5.1 Turbulente Grenzschicht	25
2.2 Die Erhaltungsgleichungen.....	29
2.2.1 Die Erhaltungsgleichungen in Differentialform.....	30
Massenerhaltungsgleichung (mass conservation).....	30
Impulserhaltungsgleichung (conservation of momentum) in x-Richtung.....	30
Impulserhaltungsgleichung in y-Richtung.....	31
Impulserhaltungsgleichung in z-Richtung.....	31
Energieerhaltungsgleichung (energy conservation).....	31
2.2.2 Die Erhaltungsgleichungen in Integralform	34
Massenerhaltung.....	34
Impulserhaltung	34
Energieerhaltung.....	34
2.2.3 Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen (discretisation of model equations)	35
2.2.3.1 Arten der Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen.....	35
2.2.3.2 Methoden für die räumliche Diskretisierung (domain discretisation)	36
2.3 Lösungsmethoden	38
2.3.1 Lösung der vollständigen NS-Gleichungen (DNS).....	38
2.3.2 Lösung der RANS-Gleichungen	38

2.3.3.	Lösung mittels LES-Simulation	39
2.3.4.	Lösung mittels DES-Simulation.....	39
2.4	Rechennetz (domain discretisation)	40
2.4.1.	Arten von Gittern	40
2.4.2.	Netzqualität	42
2.4.3.	Prismenschichten (Inflations)	43
2.4.3.1	Anzahl der Prismenschichten	44
2.4.3.2	y^+ - Wert	45
2.4.3.3	Wachstumsrate der Prismenschichten	49
2.5	Randbedingungen (boundary conditions).....	50
2.5.1.	Arten von Ränder bzw. Gebietsgrenzen.....	50
2.5.2.	Randbedingungen an den Rändern.....	51
2.6	Turbulenzmodelle	52
2.6.1.	Arten von Turbulenzmodellen	53
2.6.1.1	Wirbelviskositätsmodelle (eddy viscosity models).....	53
2.6.1.2	Reynolds-Spannungs-Modelle (RSM)	54
2.6.1.3	Wirbelsimulationsmodelle (für LES, DES, DNS).....	54
2.6.2.	Turbulenzmodelle und y^+	54
2.7	Berechnungsverfahren und Einstellungen	55
2.7.1.	Lösungsalgorithmen (solution algorithm).....	55
2.7.2.	Konvergenz-Kriterien	57
2.7.2.1	Residuen der Erhaltungsgleichungen	57
2.7.2.2	Monitor Points und Imbalances	57
2.7.3.	Wahl initialer Einstellungen.....	58
2.8	Stationäre / Instationäre Strömung	58
2.9	Fehler und Genauigkeit einer CFD-Simulation.....	58
2.9.1.	Numerische Fehler	59
2.9.1.1	Lösungsfehler (discretisation error)	59
2.9.1.2	Numerische Diffusion	59
2.9.1.3	Diskretisierungs- und Abbruchfehler.....	59
2.9.1.4	Rundungsfehler	60
2.9.1.5	Iterationsfehler.....	60
2.9.2.	Modellfehler	60
2.9.3.	Anwenderfehler.....	60
2.9.4.	Softwarefehler	61

2.9.5.	Anwendungsunsicherheiten	61
2.9.6.	Fehlerkontrolle	61
2.9.6.1	Validierung	61
2.9.6.2	Verifikation	61
2.9.6.3	Kalibrierung	61
2.9.6.4	Netz-Konvergenzstudie (Generalisierte Richardson-Extrapolation und GCI)	61
3.	Best Practice Guidelines	66
4.	Modellerstellung mit ANSYS CFX	69
4.1	Erstellen des Rechengebietes	69
4.2	Erstellung eines qualitativ hochwertigen Rechengitters	71
4.2.1.	Globale Netzeinstellungen	71
4.2.2.	Inflations-Einstellungen	73
4.2.3.	„Surface-grid-extrusion-technique“	74
4.3	Anwenden passender Rauheitsparameter	74
4.4	Festlegen der Randbedingungen	76
4.4.1.	Einströmrand (Inlet)	77
4.4.2.	Ausströmrand (Outlet)	81
4.4.3.	Objektoberfläche (wall)	81
4.4.4.	Bodenoberfläche (ground)	81
4.4.5.	Seitliche und obenliegende Domain-Grenzen	82
4.4.6.	Symmetrie (symmetry)	82
4.5	Auswahl von Diskretisierungsverfahren höherer Ordnung	82
4.6	Konvergenz-Kriterien und Vorsehen vor oszillatorischer Konvergenz	83
4.7	Überprüfen der horizontalen Homogenität des Geschwindigkeitsprofils	86
4.8	Ausführen einer Netz-Konvergenzstudie und Angabe vom GCI	87
4.9	Ausführen einer Validierungs-Studie	87
4.10	Dokumentieren essentieller Elementen des Modellierungs-Prozesses	87
5.	Vergleich zwischen CFD und Norm EN 1991-1-4 und B 1991-1-4	88
5.1	Randbedingungen	90
5.2	Flächeneinteilung	90
5.3	Auswertung	92
6.	CFD-Simulationen	94
6.1	Grundlegende Einstellungen	94
6.2	Referenzmodelle	95
6.2.1.	3D-Referenzmodell	95

6.2.1.1	Kontrolle der leeren Domain.....	96
6.2.1.2	Vergleich Halbsystem / Vollsystem.....	98
6.2.1.3	Geschwindigkeitsprofile mit v_{min}/V_p	101
6.2.2.	2D-Referenzmodell	101
6.2.2.1	ELS.....	102
6.2.2.2	Mit / ohne Inflations am Boden	104
6.2.2.3	Mit / ohne z_{min} bei den Geschwindigkeitsprofilen.....	105
6.2.2.4	Mit / ohne Rauheitshöhen k_s in Kombination mit / ohne z_{min}	106
6.2.3.	Zusammenfassung der Vorstudien am 2D- und 3D-Referenzmodell.....	107
6.3	Netz-Konvergenzstudie.....	107
6.3.1.	Netz-Konvergenzstudie – vertikale Wände.....	108
6.3.2.	Netz-Konvergenzstudie – geneigte Wände	110
6.3.2.1	Wände in Strömungsrichtung geneigt (+30°).....	111
6.3.2.2	Wände entgegen der Strömungsrichtung geneigt (-30°)	112
6.3.3.	Generalisierte Richardson-Extrapolation und GCI.....	113
6.4	Parameterstudie.....	116
6.4.1.	Hexaeder mit vertikalen Wänden	116
6.4.1.1	Untersuchung anhand der c_{pe} -Druckbeiwerte	116
6.4.2.	Hexaeder mit geneigten Wänden	118
6.4.2.1	Untersuchung anhand der c_{pe} -Druckbeiwerte	120
6.4.3.	Auswertung der c_{pe} -Beiwerte in Abhängigkeit des Neigungswinkels	121
6.4.4.	Statistische Auswertung der Drücke mit Grenzwertbetrachtung	123
6.4.5.	Resümee der Parameterstudie	125
7.	Fazit und Ausblick	127
8.	Verzeichnisse	128
8.1	Literatur	128
8.2	Abbildungen.....	131
8.3	Tabellen	133
A.	Anhang.....	134
A.1	Parameterstudie c_{pe} -Druckbeiwerte	134
A.1.1	Vertikale Wände	134
A.1.2	Geneigte Wände.....	138
A.1.2.1	c_{pe} -Werte - in Strömungsrichtung geneigt (PLUS +).....	138
A.1.2.2	c_{pe} -Werte - entgegen der Strömungsrichtung geneigt (MINUS -).....	141
A.1.3	c_{pe} -Beiwerte in Abhängigkeit von der Wandneigung.....	144

A.1.3.1	Seitenflächen (A, B, BB, C).....	144
A.1.3.2	Front- und Rückseite (D, E).....	147
A.1.3.3	Dachflächen (F, G, H, I)	149
A.1.4	Statistische Auswertung der normierten Druckwerte mit Grenzwertbetrachtung	153

Abkürzungen

AB	<i>Arbeitsbereich</i>
ABL	<i>Atmospheric Boundary Layer</i>
AIJ	<i>Architectural Institute of Japan</i>
BPG	<i>Best Practice Guidelines</i>
BSL	<i>Baseline k-ω-Turbulenzmodell</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
COST	<i>European Cooperation in Science and Technology</i>
DES	<i>Detached-Eddy-Simulation</i>
DNS	<i>Direkte Numerische Simulation (Direct Numerical Simulation)</i>
ECORA	<i>Evaluation of Computational Fluid Dynamics Methods for Reactor Safety Analysis</i>
ELS	<i>Eddy Length Scale</i>
ERCOFTAC	<i>European Research Community in Flow, Turbulence and Combustion</i>
GCI	<i>Grid Convergence Index</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MA	<i>Masterarbeit</i>
MP	<i>Monitor Point</i>
NS	<i>Navier-Stokes</i>
QNET-CFD	<i>Network for Quality and Trust in the Industrial Application of CFD</i>
RANS	<i>Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Gleichungen</i>
RB	<i>Randbedingung(en)</i>
RSM	<i>Reynolds-Spannungs-Modell</i>
SAS	<i>Scale-Adaptive-Simulation</i>
SST	<i>Shear Stress Transport - Turbulenzmodell</i>
UDS	<i>Upwind-Difference-Scheme</i>
URANS	<i>Unsteady Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Gleichungen</i>

1. Einleitung

1.1 Motivation

Um ein Bauwerk dimensionieren zu können, sind Annahmen bzgl. der zukünftigen einwirkenden Lasten zu treffen. Solche Lasten sind zum Beispiel das Eigengewicht, Nutzlasten, Verkehrslasten, Schnee oder Wind. Für viele Arten von Lasten gibt es eine europaweit einheitliche Normgebung, die Reihe des Eurocode 1: „Einwirkungen auf Tragwerke“ (EN 1991), die statistische Werte für Belastungsannahmen liefert. Jede Nation kann einzelne Bereiche des Eurocode mit ihrem eigenen nationalen Anwendungsdokument ergänzen oder abändern bzw. anpassen.

Der Eurocode 1 Teil 1-4: „Allgemeine Einwirkungen – Windlasten“ ([1], [2]) behandelt den Lastfall Wind auf einige ausgewählte Bauwerks-Geometrien. So behandelt die Norm zum Beispiel Gebäude mit rechteckigem Grundriss, verschiedene Dachvarianten oder ein freistehendes Schild. Im Allgemeinen kann man sagen, dass die „Windlast-Norm“ zu wenig verschiedene Geometrien abdeckt – z.B. enthält sie keine Angaben für geneigte Wände oder stehende zylindrische Formen, geschweige denn jegliche Art von Freiformen. Andererseits liegen die Winddruck-Angaben aus der Norm i. A. auf der sicheren Seite, was in der Regel zu einer Überdimensionierung des Bauwerks führt (falls der Wind ein maßgebender Lastfall ist) [3]. Aus diesen Gründen werden in der Praxis für andere Geometrien häufig Windkanaltests durchgeführt um passende Winddrücke zu erhalten. Versuche im Windkanal sind jedoch aufwändig, meist langwierig (Modellerstellung usw.) und kostenintensiv.

Eine alternative wäre, auf Windkanaltests verzichten zu können, stattdessen die Windlast-Annahmen aus CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) zu erhalten oder zumindest die Versuche einzuschränken und mit CFD-Simulationen zu ergänzen. Das wäre deutlich kostengünstiger und spart Zeit.

Da Wind aber ein sehr komplexes Phänomen ist, gestaltet es sich als äußerst schwierig exakte Werte zu erhalten. Sowohl Versuchsergebnisse als auch CFD-Ergebnisse werden niemals exakt mit den realen Strömungsverhältnissen übereinstimmen. Dafür haben zu viele Faktoren Einfluss auf die Modellierung der Strömungssimulation. Das beginnt z.B. bei der statistischen Ermittlung der Winddrücke und -geschwindigkeiten, den Messstationen, den Annahmen der Druck- und Geschwindigkeitsprofile, der Kategorisierung der Topographieverhältnisse, Wechselwirkungen aus Nachbargebäuden oder Bewuchs, bis hin zu Maßstabsfehlern, Geschwindigkeitsvorgaben im Versuch, Art des Windkanals und Versuchsaufbau oder Rechenmethoden, Turbulenzmodelle, numerische Fehler in der CFD-Berechnung usw.

Nichtsdestotrotz wurden im Zuge der industriellen Weiterentwicklung (v.a. der Automobilindustrie, der Raumfahrt und im Luftfahrzeugbau) einige hervorragende Strategien zur Abbildung von Wind bzw. zu

Strömungen entwickelt, die sich bewährt haben. Hauptsächlich beschäftigt man sich auf diesem Gebiet aber mit aerodynamischen Formen, und nicht wie im gegenständlichen Fall mit stumpfen Körpern (bluff bodies). Für stumpfe Körper, wie es Gebäude üblicherweise sind, ist die Forschung weit weniger fortgeschritten als z.B. auf dem Gebiet der Tragflügelentwicklung. Mit stumpfen Körpern gehen v.a. sehr turbulente Strömungsbereiche (mit sehr großen Reynolds-Zahlen) einher, deren softwaretechnische Abbildung sich als besonders schwierig darstellt. Seit den späten 70-er und 80-er Jahren werden CFD-Programme auch für „Wind Engineering“ u.a. im Hinblick auf stumpfe Körper eingesetzt. Einige Forscher und Institutionen haben im Zuge ihrer Forschung dazu Best Practice Guidelines (BPGs) herausgegeben, welche auch hier als wichtiger Ausgangspunkt verwendet werden.

Bei vielen Begriffen wird die englische Übersetzung bzw. der englische Begriff verwendet oder in Klammern angegeben. Einerseits um den direkten Bezug zum internationalen Jargon zu haben, andererseits weil die Benutzung der Software auf Englisch hinsichtlich der Handbücher und Dokumentationen einfacher ist.

1.2 Ziele

Diese Masterarbeit (MA) ist ein Grundlagenwerk, das vom Wind belastete einfache Gebäude-Geometrien behandelt. Die Arbeit soll einen Abgleich mit der aktuellen Windlast-Norm EN 1991-1-4 [1] und eine Praxisanleitung für CFD-Simulationen zur Ermittlung von quasi-statischen Winddrücken sein. Dafür wird so wenig wie möglich, jedoch so viel wie nötig, auf die Theorie der Strömungsmechanik eingegangen. Daher ist der erste Teil der Arbeit (Kapitel 2 bis 5) eine Wissenssammlung, um die Grundlagen bzw. Zusammenhänge der Strömungsmechanik und der CFD zu verstehen. Der zweite Teil der Arbeit beinhaltet dann konkrete Strömungssimulationen mit Auswertungen und Ergebnissen zu einer klar definierten Problemstellung.

Das allgemeine Ziel der Untersuchungen ist es, CFD-Ergebnisse für die durchschnittlichen Drücke an den entsprechenden Gebäude-Oberflächen mit den Vorgaben des Eurocode „EN 1991-1-4 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten“ [1] unter Berücksichtigung des nationalen Anwendungsdokuments für Österreich [2] zu vergleichen und Annahmen für Geometrien, die der Eurocode nicht enthält, zu treffen.

Die erste Geometrie, die im Zuge der MA untersucht wird, ist ein rechteckiges Gebäude mit Flachdach und vertikalen Wänden (Wandneigung 0°). Die Norm deckt diese Geometrie ab und liefert c_{pe} -Beiwerte für definierte Lastansatzflächen, die mit den CFD-Ergebnissen direkt verglichen werden können.

Mit den gewonnenen Kenntnissen werden im zweiten Schritt die Wände an zwei Seiten parallel geneigt, wobei für die Wandneigung in Strömungsrichtung Winkel von $+15^\circ$, $+30^\circ$, -15° und -30° verwendet

werden. Das Flachdach wird beibehalten und die zwei seitlichen bzw. zur Strömungsrichtung parallelen Wände bleiben vertikal.

Die Validierung der Ergebnisse erfolgt somit im Abgleich mit der Windlast-Norm. Üblicherweise werden numerische Daten mit theoretischen und/oder experimentellen Daten verglichen. Solche Daten sind aber aktuell nicht verfügbar. Trotzdem soll die MA erste Erkenntnisse liefern.

1.3 Abgrenzung

I. A. werden für die Dimensionierung von Bauwerken die maximalen Windgeschwindigkeiten, welche einmal in 50 Jahren zu erwarten sind, verwendet (HUCHO [3] S.372). Diese resultieren in maßgebende Windlasten für eine Bemessung. Daher werden für die Berechnungen und den Vergleich die maximalen (v_p und q_p) und nicht die mittleren (v_m und q_m) Werte für die Winddrücke und -geschwindigkeiten verwendet.

Jedes Modell wird **dreidimensional** modelliert, da Umströmungen aufgrund von Ablösungen, Turbulenzen usw. sehr komplex sein können und ein zweidimensionales Modell diese Vorgänge nicht ausreichend erfassen kann (HUCHO [3] S.381). Ausnahmen bilden Bauwerke, die sich im Vergleich zu den anderen Abmessungen stark in eine einzige Richtung erstrecken, wie z.B. die mittleren Abschnitte einer Brücke oder eines Hochhauses. Dabei sollte das Verhältnis Breite zu Höhe bzw. Höhe zu Breite nicht kleiner als 100 sein (HUCHO [3] S.381). Die Brückenränder bzw. das Dach und der Gebäudefuß sind bei einer zweidimensionalen Berechnung auf jeden Fall gesondert zu betrachten.

Es wird jeweils nur das **Einzelbauwerk** untersucht und umstehende Gebäude, Bewuchs usw. werden vernachlässigt. Auf die Topographieform mit entsprechender Geländerauheit wird eingegangen, indem die der Norm entsprechenden Geländekategorien (GK) je nach Standort untersucht werden. In Österreich kommt die GK1 nicht vor, daher werden nur die GK2, GK3 und GK4 berücksichtigt. Jeder GK entspricht ein Windgeschwindigkeitsprofil $v(z)$, ein Turbulenzintensitätsprofil $I(z)$ und eine Rauheitslänge z_0 für den Boden. Anzumerken ist, dass für eine Simulation eines Bauwerks in realer Umgebung immer die unmittelbaren rundherum angeordneten Gebäude, Bäume usw. mitmodelliert werden sollten. Weiter entfernte Objekte werden durch die Rauheitslänge z_0 ausreichend abgedeckt [4].

Obwohl das Bauwerk in Realität aus beliebiger Richtung angeströmt wird, erfolgt die Anströmung in den Simulationen **immer unter 90°**. Verschiedene Anströmwinkel würden den Umfang der MA sprengen.

Es wird davon ausgegangen, dass das **Bauwerk starr** ist bzw. sich nicht verformen kann. Es findet keine Interaktion zwischen Wind und Bauwerk statt, dynamische Probleme werden nicht behandelt.

Alle Berechnungen werden **stationär mit der RANS-Methode** (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) durchgeführt. Im Vergleich zu anderen Methoden, wie zum Beispiel LES (Large-Eddy-Simulations), sind die zwei wesentlichen Vorteile von RANS (siehe auch Abschnitt 2.3):

- der geringere Aufwand im Hinblick auf Rechenzeit und Datenvolumen
- die vorhandene Literatur und Best Practice Guidelines

Nachteile sind v. a. die physikalische Vereinfachung, wie z.B. durch die zeitliche Mittelung oder durch Turbulenzmodelle. RANS ist eine stationäre Methode, die aber auch instationär (unsteady/ transient) als sogenannte URANS verwendet werden kann. Bei transienten URANS-Simulationen steigt aufgrund der Zeitabhängigkeit ebenfalls der Rechenaufwand, der aber im Vergleich zu LES immer noch geringer ist.

Für die gegenständliche Fragestellung der MA sind steady RANS-Berechnungen durchaus vorteilhaft und ausreichend.

1.4 Verwendete Software

Für die Berechnungen wird die kommerzielle Software ANSYS in der aktuellen Version 17.2, welche am AB für Stahlbau und Mischbautechnologie der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck zur Verfügung steht, verwendet. Generell stehen in ANSYS zwei Programme für CFD bzw. zwei praxisbewährte Strömungslöser zur Verfügung: CFX und FLUENT.

CFX und FLUENT wurden ursprünglich unabhängig voneinander entwickelt, haben also gewisse Unterschiede und trotzdem einige Gemeinsamkeiten. Sie verwenden beide die Finite-Volumen-Methode, haben aber unterschiedliche Solver-Strategien. CFX benutzt für die Datenspeicherung die Eckpunkte der Rechennetzelemente (vertex-centred) und FLUENT die Zentren der Netzelemente (cell-centred) für die Ermittlung der gesuchten Variablen (siehe dazu Abbildung 1). Aus diesem Grund ist CFX im Stande, dieselben Ergebnisse eines Strömungsproblems auf einem größeren Netz zu erhalten. Die Flüsse von Masse, Impuls und Energie werden über mehrere Flächen - entlang eines allgemeinen Polyeders - bilanziert, was eine höhere Genauigkeit mit sich bringt. Ein Nachteil kann sein, dass CFX dadurch weniger Elementarten erfassen kann (z.B. polyedrale bzw. vielflächige Elemente).

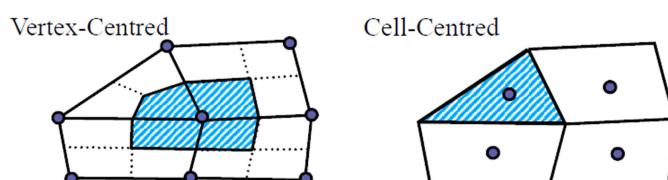


Abbildung 1: Speicherung der Daten- links: in den Eckpunkten, rechts: in Zellmitte, aus [5].

CFX konzentriert sich auf eine einzige Lösungsstrategie (gekoppelte Lösung der Druck- und Geschwindigkeitsgleichungen), während FLUENT mehrere verschiedene Varianten anbietet (getrennte oder gekoppelte Lösung der Druck- und Geschwindigkeitsgleichungen, Lösung der Dichtegleichungen). Bei gekoppeltem Lösen werden die Gleichungen für Druck und Geschwindigkeit in einem Matrizenstystem simultan gelöst, es findet ein Rechenschritt pro Iteration statt. Bei getrenntem Lösen werden die Gleichungen für Druck und Geschwindigkeit separat nacheinander gelöst und über diverse Methoden aneinander angepasst, es finden mehrere Rechenschritte pro Iteration statt. Der Vorteil der gekoppelten Lösungsstrategie ist, dass das Strömungsproblem generell in weniger Iterationsschritten konvergiert, die einzelnen Schritte jedoch von längerer Dauer sind, vgl. [6]. Für Probleme, die schwer konvergieren, kann gekoppeltes Lösen hilfreich sein (z.B. bei Mehrphasenproblemen), vgl. [6].

Aufgrund der Bedienungsfreundlichkeit von CFX in der ANSYS WORKBENCH-Umgebung wird dieses Programm verwendet.

2. Theorie der Strömungsmechanik und der CFD

In diesem Abschnitt wird grundlegendes Wissen zur Strömungslehre und der CFD-Simulationen angeführt.

2.1 Allgemeines Wissen über Strömungen

2.1.1. Kompressible / inkompressible Strömung

Theoretisch ist Luft ein kompressibles Medium, d.h. die Dichte verändert sich im Strömungsfeld. Zur Vereinfachung nimmt man jedoch üblicherweise eine inkompressible Strömung an. FRANKE (COST) [7] gibt dazu an, dass es völlig zulässig ist, mit konstanter Luftdichte zu rechnen, wenn nur die tiefsten 200m der Atmosphäre untersucht werden. Die Folge dieser Annahme ist eine Entkopplung von Dichte und Druck.

2.1.2. Subsonische / supersonische Strömung

Die Geschwindigkeit einer subsonischen (subsonic) Strömung liegt unterhalb der Schallgeschwindigkeit, jene einer supersonischen (supersonic) Strömung über der Schallgeschwindigkeit. Bei einer supersonischen Strömung breitet sich eine Störung nur kegelförmig in Unterstromrichtung aus- siehe Abbildung 2 - bzw. empfängt sie Signale nur kegelförmig (hyperbolische Strömung).

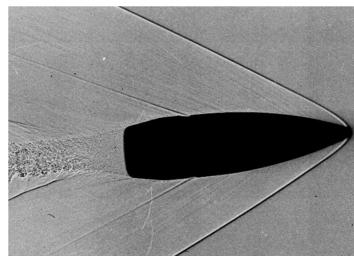


Abbildung 2: Supersonische Strömung um ein Projektil , aus [8].

Subsonische Strömungen können elliptisch oder parabolisch sein. Bei einer elliptischen Strömung finden Signalempfang und – ausbreitung in alle Richtungen statt, bei einer parabolischen Strömung breiten sich Signale nur unterstrom aus und werden nur oberstrom empfangen, siehe Abbildung 3.

Windströmungen um stumpfe Körper sind in der Regel subsonisch elliptisch.

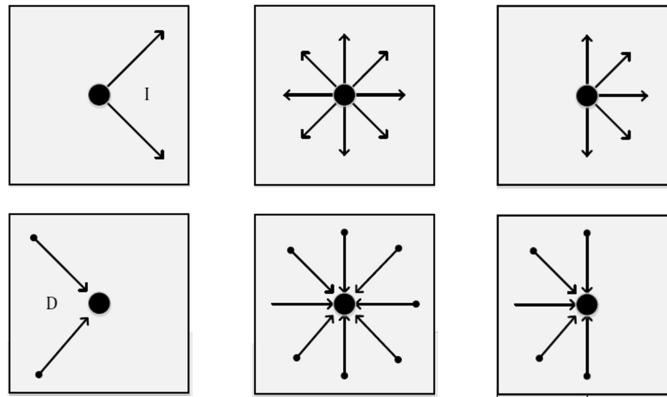


Abbildung 3: Hyperbolische, elliptische und parabolische Strömung (oben Signalausbreitung, unten Signalempfang), aus [8].

2.1.3. Newton'sche Fluide

Bei Newton'sche Fluiden, wie z.B. bei Wasser und Gasen, besteht mit der dynamischen Viskosität μ eine lineare Beziehung zwischen der Wandschubspannung τ und dem Geschwindigkeitsgradienten $\frac{du}{dz}$:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dz} \quad (1)$$

Der Zusammenhang wird über die sog. Couette-Strömung hergeleitet, bei der sich in eindimensionaler Form zwischen einer unteren ruhenden Platte und einer oberen mit konstanter Geschwindigkeit U bewegten Platte eine konstante Scherrate einstellt, vgl. [9] S.47. An den Plattenoberflächen gilt jeweils die Haftbedingung, wobei unten $u=0$ und oben $u=U$ gilt und sich dazwischen ein lineares Geschwindigkeitsprofil $u(z)$ ausbildet (siehe Abbildung 4).

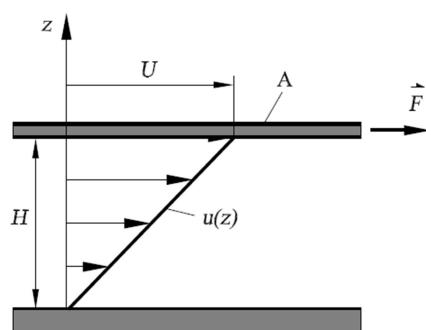


Abbildung 4: Definition der Schubspannung τ (mittels der sog. Couette-Strömung), aus OERTEL [9], S.47.

Die aufzuwendende Kraft \vec{F} ist proportional der Schleppgeschwindigkeit $\vec{U} \sim U$, proportional der Plattenfläche $\vec{A} \sim A$ und umgekehrt proportional der Spalthöhe $\vec{H} \sim 1/H$:

$$|\vec{F}| \sim \frac{U \cdot A}{H} \quad (2)$$

bzw. mit der dynamischen Viskosität μ als Proportionalitätsfaktor:

$$|\vec{F}| = \mu \cdot \frac{U \cdot A}{H} \quad (3)$$

Für die Schubspannung τ gilt dann:

$$\tau = \frac{|\vec{F}|}{A} = \mu \cdot \frac{U}{H} = \mu \cdot \frac{du}{dz} \quad (4)$$

Bei Nicht-Newton'schen Fluide ist der Zusammenhang zwischen der Wandschubspannung und der Strömungsgeschwindigkeit nicht linear. In Abbildung 5 sind die Zusammenhänge für Newton'sche und Nicht-Newton'sche Fluide dargestellt.

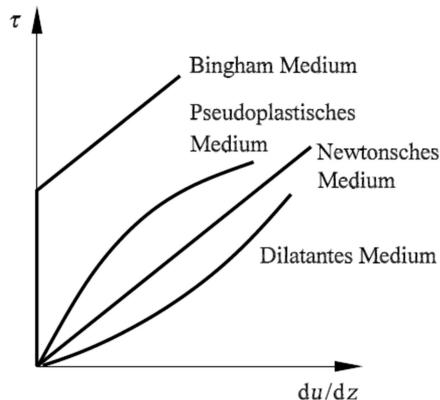


Abbildung 5: Schubspannung τ für Newton'sche und Nicht-Newton'sche Fluide, aus OERTEL [9], S.49.

In idealen Flüssigkeiten und Gasen reiben die Fluidelemente nicht aneinander und ihre Wirkung ist ausschließlich senkrecht zur Wand. Dementsprechend gibt es keine Schubspannungen im Fluid und die Wandschubspannung ist stets Null.

2.1.4. Reynolds-Zahl

Um abschätzen zu können, ob eine Strömung laminar oder turbulent ist, wird die Reynolds-Zahl Re verwendet:

$$Re_L = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} = \frac{U \cdot L}{\nu} = \frac{"Trägheitskräfte"}{"Zähigkeitskräfte (Reibung)} = \frac{"Strömungstransport"}{"molekularer Transport"} \quad (5)$$

mit ρ ... Dichte des Fluids [kg/m^3]

U ... Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

L ... charakteristische Länge (eddy length scale ELS) [m]

μ ... dynamische Viskosität des Fluids [kg/ms]

ν ... kinematische Viskosität des Fluids [m^2/s], wobei $\nu = \mu/\rho$.

Für die Ermittlung von Re werden charakteristische Größen für die Geschwindigkeit U und die length scale L verwendet, siehe Abbildung 6. I.A. gilt, dass die length scale der Größe der größten turbulenten Wirbel entsprechen soll. Daher wird bei einem Rohr der Durchmesser als length scale gewählt, da die größten Wirbel genau so groß werden. Bei einem umströmten Objekt ist es üblich, die Objektlänge als charakteristische Länge L einzugeben.

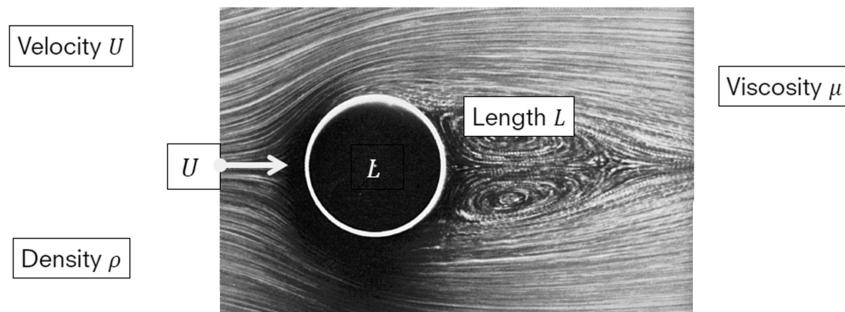


Abbildung 6: Eingangswerte für die Ermittlung der Re-Zahl, aus [8].

Die kinematische Viskosität ν von trockener Luft bei einem atmosphärischen Druck auf Meereshöhe von $p=1\text{bar}$ und einer Temperatur von $T=25^\circ\text{C}$ beträgt $\nu=1,558 \cdot 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$. Die Luftpumpe lässt sich in Abhängigkeit der Meereshöhe und der Temperatur exakt berechnen. Da jedoch in der ÖNORM B 1991-1-4 [2] die Dichte mit $\rho=1,25 \text{kg}/\text{m}^3$ angenommen wird, wird diese Annahme für die gegenständlichen Berechnungen beibehalten.

Für die Re -Zahl gelten folgende groben Größenordnungen:

- $Re \ll 1$: kriechende Strömung (Reibungskräfte bzw. molekulare Flussterme dominieren)
- $Re = 1$: laminare Strömung (Reibungskräfte entsprechen den Trägheitskräften)
- $Re \gg 1$: turbulente Strömung (Trägheitskräfte bzw. Strömungsterme dominieren).

Der Umschlag von laminarer zu turbulenter Strömung findet bei der kritischen Reynoldszahl Re_{krit} statt, welche von der Art der Strömung abhängt. Bei der frei überströmten Platte beträgt Re_{krit} ca. 500.000 und bei Rohrströmungen ca. 2320.

Für die gegenständlichen Strömungsprobleme wird die *Re*-Zahl hinter einem 10m langen Objekt ($L=10m$) und einer Windgeschwindigkeit von 100 km/h beispielhaft abgeschätzt:

$$Re_L = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} = \frac{1,25 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 27 \left[\frac{m}{s} \right] * 10[m]}{1,25 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 1,558 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]} \cong 17.300.000 \gg 1$$

→ turbulente Strömung

2.1.5. Laminare / turbulente Strömung

Eine Strömung ist laminar, wenn keine sichtbaren Turbulenzen vorhanden sind und das Fluid in Schichten, die sich nicht miteinander vermischen, geordnet strömt (kleine *Re*-Zahlen). Eine turbulente Strömung ist unstrukturiert und besitzt Verwirbelungen in allen Größenbereichen (große *Re*-Zahlen). Abbildung 7 zeigt beide Formen inkl. des Übergangsbereichs dazwischen.

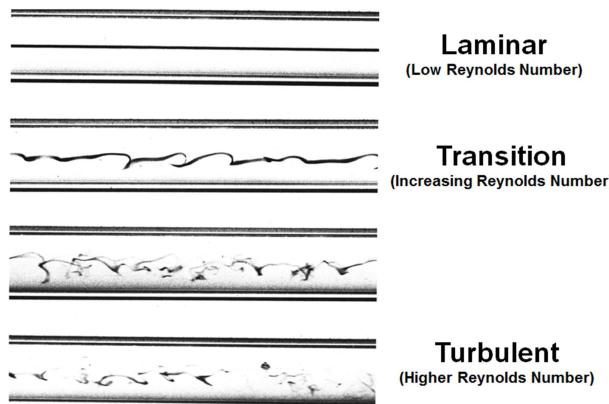


Abbildung 7: Reynolds' Experiment: laminare und turbulente Strömung mit Übergangsbereich, vgl. [10].

Bei einer vollständig entwickelten turbulenten Strömung mit großen *Re*-Zahlen tritt folgendes Phänomen, auch als Energiekaskade bezeichnet, auf:

Aufgrund der Instabilität einer turbulenten Strömung entwickeln sich ausgehend von einem ursprünglichen Energieeintrag (z.B. durch diverse Randbedingungen) zuallererst großräumige langwellige Wirbel mit niedriger Frequenz, welche viel Energie enthalten. Auch diese großen Wirbel sind instabil und zerfallen in Kleinere, die wiederum weiter zerfallen. Dabei nimmt der Energiegehalt mit abnehmender Wirbelgröße linear ab (Trägebereich). Die sehr kleinskaligen Wirbel werden dann durch Reibung abgebaut bzw. in Wärme dissipiert bzw. in innere Energie umgewandelt. Der Energiegehalt nimmt dabei noch stärker ab (Dissipationsbereich). In Abbildung 8 ist der Energiegehalt E in Abhängigkeit von der Wirbelgröße a dargestellt.

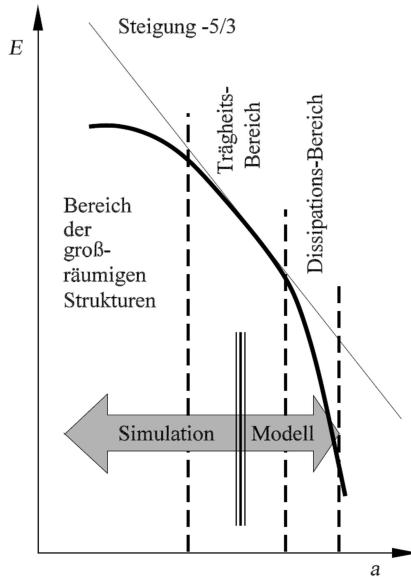


Abbildung 8: Energiekaskade (Energiegehalt E in Abhängigkeit von der Wirbelgröße a), aus OERTEL [9], S.244.

2.1.5.1 Turbulente Grenzschicht

Wenn eine Strömung entlang einer Oberfläche streicht, tritt eine turbulente Grenzschicht (boundary layer) auf. Innerhalb dieser Schicht findet ein Übergang von der Geschwindigkeit $v=0$ an der Wand, der sog. Haftbedingung (weil die Fluidteilchen an der Wand haften), zur Geschwindigkeit im freien Strömungsgebiet statt. Es resultiert ein Geschwindigkeitsprofil, welches eine wichtige Rolle für Druckverluste (durch Reibungsverluste hervorgerufen), Ablösezonen, Rezirkulationseffekte und Scherwirkungen spielt.

Die turbulente Grenzschicht mit Dicke δ wird in folgende Schichten unterteilt, vgl. [11] (Abbildung 9):

- innere Schicht (inner layer)
 - o viskose Unterschicht (viscous sublayer)
 - o Übergangsschicht (buffer layer/ blending region)
 - o völlig turbulente Schicht (fully-turbulent region/ log-law-region)
- äußere Schicht (outer layer).

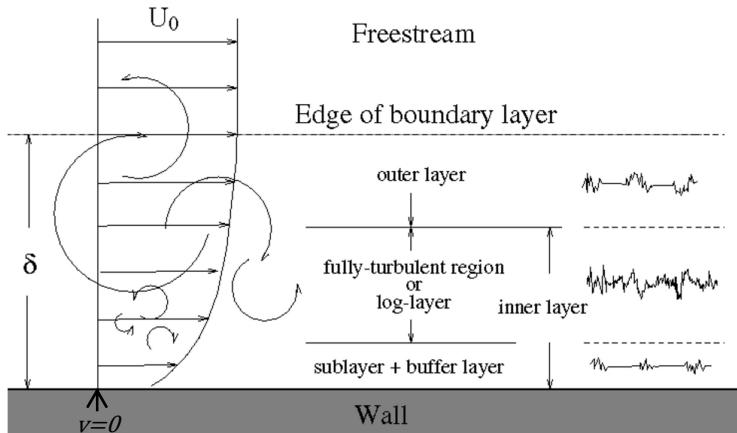


Abbildung 9: Turbulente Grenzschicht, aus [11].

In der Vergangenheit wurden experimentelle Daten von Geschwindigkeitsprofilen mithilfe der dimensionslosen Geschwindigkeit u^+ und der dimensionslosen Distanz von der Wand y^+ skaliert, wobei festgestellt wurde, dass für eine große Bandbreite an Strömungen die Form des Profils annähernd gleich ist. Aus diesen empirischen Daten ist das sog. universelle Wandgesetz der turbulenten Grenzschicht entstanden (siehe Abbildung 10), vgl. SCHWARZE [12] S.150. Die Geschwindigkeitsverteilung hat in der viskosen Unterschicht (viscous sublayer) bis zu einem Wandabstand von ca. $y^+=5$ einen näherungsweise linearen Verlauf und es gilt

$$u^+ = y^+. \quad (6)$$

Zwischen $5 < y^+ < 70$ befindet sich die Übergangsricht (buffer layer), die ab $y^+ > 70$ in den vollturbulenten Bereich übergeht, wo ein logarithmischer Zusammenhang besteht. Dort kann die Geschwindigkeitsverteilung durch das logarithmische Wandgesetz

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln(y^+) + C \quad (7)$$

beschrieben werden. Darin ist $\kappa=0,41$ die Karman-Konstante und C die Integrationskonstante, die für glatte Oberflächen $C \approx 5,5$ beträgt und die Oberflächenrauheit wiedergibt. Beide Konstanten wurden empirisch ermittelt.

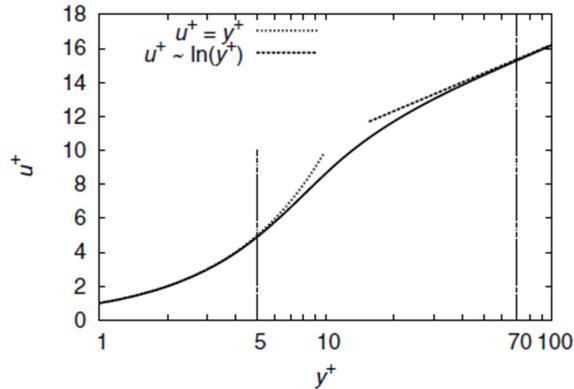


Abbildung 10: Universelles Wandgesetz: Geschwindigkeitsverteilung u^+ in Abhängigkeit von y^+ , aus SCHWARZE [12], S.151.

In SCHWARZE [12] (S. 150) ist zu finden, wie man die dimensionslose Darstellung erhält. Mithilfe der Wandschubspannung τ_w bzw. der Wandschubspannungsgeschwindigkeit u_τ werden die wandnormale Koordinate y und die mittlere wandparallele Geschwindigkeit \bar{u} entdimensionalisiert:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad \text{in} \quad y^+ = \frac{y \cdot u_\tau}{v} \quad \text{und} \quad u^+ = \frac{\bar{u}}{u_\tau} \quad (8)$$

Die Grenzschicht besitzt eine Grenzschichtdicke δ , die sich mit den folgenden Formeln für die Strömung entlang einer ebenen Platte abschätzen lässt (HUCHO [3] verweist auf SCHLICHTING/GERSTEN [13]):

- laminare Grenzschicht: $\delta(x) = \frac{5,0 \cdot x}{\sqrt{Re_x}}$ (9)

- turbulente Grenzschicht: $\delta(x) = \frac{0,37 \cdot x}{\sqrt[5]{Re_x}}$. (10)

Dabei ist zu beachten, dass die Dicke $\delta(x)$ mit der Lauflänge bzw. x -Koordinate zunimmt bzw. sich erst entwickelt, wobei die Stärke der Zunahme von zwei Faktoren abhängt: erstens von der Re -Zahl bzw. dem Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Reibungskräften und zweitens vom Verlauf des statischen Drucks an der Wand. In Abbildung 11 ist die Entwicklung der turbulenten Grenzschicht an a) der ebenen Platte und b) an der gekrümmten Wand abgebildet.

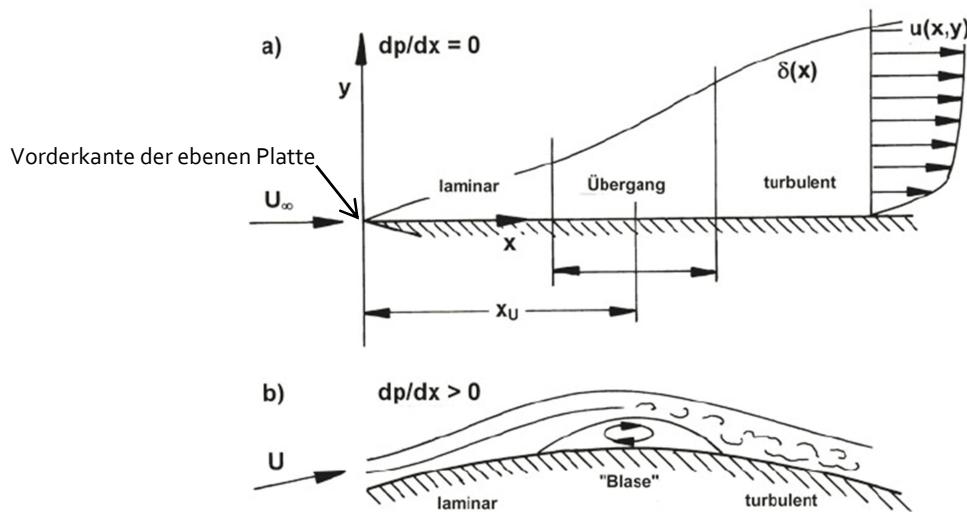


Abbildung 11: Grenzschicht a) an der ebenen Platte und b) an der gekrümmten Wand, aus HUCHO [3], Bild 2.10.

Bei einer atmosphärischen Grenzschicht (atmospheric boundary layer ABL) am Boden wird jedoch davon ausgegangen, dass sie turbulent und voll ausgebildet ist und sich im Gleichgewicht befindet (HUCHO [3], Abbildung 12). Daher ist am Boden nur die Formel für die turbulente Grenzschicht mit L als der charakteristischen Länge (z.B. der Länge des Körpers in Strömungsrichtung) relevant:

$$\delta = \delta(L) = \frac{0,37 \cdot L}{\sqrt[5]{Re_L}} \quad (11)$$

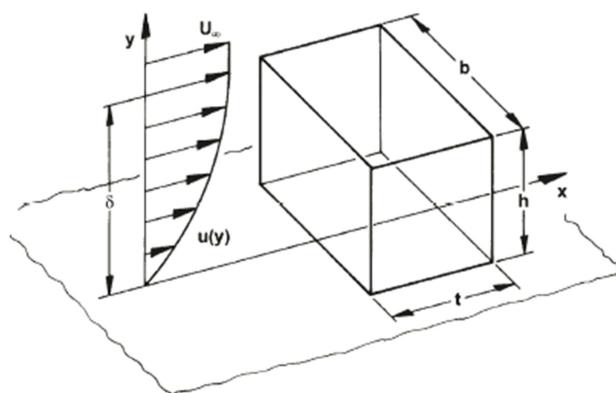


Abbildung 12: Grenzschicht am Boden, aus HUCHO [3] Bild 3.59.

ANSYS empfiehlt zur Abschätzung der Grenzschichtdicke folgenden Ansatz ([14], S.174):

$$1) \text{ allgemeine Beziehung} \quad Re_\delta = \delta(x) \cdot \frac{Re_x}{L} = 0,14 \cdot Re_x^{6/7} \quad (12)$$

2) Umformung auf die Dicke: $\delta(x) = \frac{0,14 \cdot Re_x^{\frac{6}{7}} \cdot L}{Re_L} = \frac{Re_\delta \cdot L}{Re_L}$ (13)

3) Annahme für einen stumpfen Körper, dass Re_δ einem bestimmten Prozentsatz von Re_L entspricht (lt. ANSYS [14] z.B. 25%) → Faktor F

4) Einsetzen: $\delta(x) = \frac{F \cdot 0,14 \cdot Re_L^{\frac{6}{7}} \cdot L}{Re_L} = \frac{F \cdot 0,14 \cdot L}{Re_L^{1/7}}$ (14)

Dabei ist Re_δ die Reynolds-Zahl am Grenzschichtrand und Re_L die Reynolds-Zahl zufolge L .

Um die Ansätze von ANSYS [14] und SCHLICHTING/GERSTEN [13] zu vergleichen, wird eine beispielhafte Berechnung mit denselben Eingangsparametern durchgeführt. Für die Formel von ANSYS wird jedoch davon ausgegangen, dass $Re_\delta=Re_L$ bzw. dass der Faktor $F=1,0$ ist, was einer vollentwickelten turbulenten Grenzschicht entspricht. Die Ergebnisse für die Grenzschichtdicke unterscheiden sich nur gering:

$$Re_L = \frac{\rho \cdot U \cdot L}{\mu} = \frac{U \cdot L}{\nu} = \frac{27 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 10[m]}{1,558 \cdot 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]} = 17.329.910 \quad \text{mit} \quad \nu \text{ bei 1 bar und } 25^\circ\text{C}$$

$$\delta_{SCHLICHTING/GERSTEN} = \frac{0,37 \cdot L}{\sqrt[5]{Re_L}} = \frac{0,37 \cdot 10[m]}{\sqrt[5]{17.329.910}} = 131,96[mm]$$

$$\delta_{ANSYS} = \frac{F \cdot 0,14 \cdot L}{Re_L^{1/7}} = \frac{1,0 \cdot 0,14 \cdot 10[m]}{17.329.910^{1/7}} = 129,42[mm]$$

2.2 Die Erhaltungsgleichungen

Die Grundlage für die Strömungsmechanik bildet das Erhaltungsprinzip bzw. die Erhaltung von Masse, Impuls und Energie in Form von 5 Erhaltungsgleichungen:

- Massenerhaltung
- Impulserhaltung in x -Richtung
- Impulserhaltung in y -Richtung
- Impulserhaltung in z -Richtung
- Energieerhaltung

Die Impulserhaltung basiert auf dem zweiten Gesetz von Newton: „Kraft ist Masse mal Beschleunigung“ bzw. $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ und die Energieerhaltung auf dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik.

Jede Gleichung besitzt Strömungsterme (flow transport – Konvektion/Advektion), molekulare Terme (molecular transport - Diffusion) und Quellen- und Senkenterme (sources and sinks), die innerhalb eines Kontrollvolumens bilanziert werden. Sind keine Quellen-/Senkenterme (wie z.B. Energieeintrag durch einen Propeller oder eine Heizquelle) vorhanden, beträgt die Änderungsrate gleich Null.

2.2.1. Die Erhaltungsgleichungen in Differentialform

Im Folgenden sind die entsprechenden Gleichungen in Differentialform in kartesischen Koordinaten für ortsfeste Kontrollvolumina (Euler-System) dargestellt. Die genaue Herleitung ist z.B. in LECHELER [15] oder OERTEL [9] zu finden.

Massenerhaltungsgleichung (mass conservation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w) = 0 \quad (15)$$

- Änderung der Dichte ρ mit der Zeit t im Volumenelement (Änderungsrate)
- Änderung des Massenstroms $\rho \cdot u$ (Konvektion) in x -Richtung (Strömungstransport)
- Änderung des Massenstroms $\rho \cdot v$ (Konvektion) in y -Richtung (Strömungstransport)
- Änderung des Massenstroms $\rho \cdot w$ (Konvektion) in z -Richtung (Strömungstransport)

Erhaltungsgröße: Massendichte ρ

Änderung der Massendichte durch: Konvektion $\rightarrow \rho \cdot u, \rho \cdot v, \rho \cdot w$

Impulserhaltungsgleichung (conservation of momentum) in x -Richtung

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot u^2 + p - \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot u \cdot v - \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot u \cdot w - \tau_{zx}) - \rho \cdot g_x = 0 \quad (16)$$

- Änderung des Massenstroms mit der Zeit t im Volumenelement (Änderungsrate)
- Strömungstransport
- Druckkräfte (molekularer Transport)
- Spannungen (molekularer Transport)
- Volumenkräfte (Quellen- und Senken)

Erhaltungsgröße: Impulsdichte $\rho \cdot u$

Änderung des Impulses durch: - Konvektion $\rightarrow \rho \cdot u$

- Oberflächenkräfte (Druck, Reibung,...) $\rightarrow p, \tau_{xx}, \tau_{yx}, \tau_{zx}$

- Volumenkräfte (Gravitation, elektro-magnet. Kräfte,...) $\rightarrow \rho \cdot g_x$

Impulserhaltungsgleichung in y-Richtung

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot v \cdot u - \tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot v^2 + p - \tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot v \cdot w - \tau_{zy}) - \rho \cdot g_y = 0 \quad (17)$$

Impulserhaltungsgleichung in z-Richtung

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot w) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho \cdot w \cdot u - \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho \cdot w \cdot v - \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho \cdot w^2 + p - \tau_{zz}) - \rho \cdot g_z = 0 \quad (18)$$

Energieerhaltungsgleichung (energy conservation)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}[\rho \cdot E] &+ \frac{\partial}{\partial x}\left[\rho \cdot u \cdot \left(h + \frac{1}{2} \cdot \vec{u}^2\right) - (u \cdot \tau_{xx} + v \cdot \tau_{xy} + w \cdot \tau_{xz}) - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}\right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial y}\left[\rho \cdot v \cdot \left(h + \frac{1}{2} \cdot \vec{u}^2\right) - (u \cdot \tau_{yx} + v \cdot \tau_{yy} + w \cdot \tau_{yz}) - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y}\right] \\ &+ \frac{\partial}{\partial z}\left[\rho \cdot w \cdot \left(h + \frac{1}{2} \cdot \vec{u}^2\right) - (u \cdot \tau_{zx} + v \cdot \tau_{zy} + w \cdot \tau_{zz}) - \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z}\right] \\ &- \rho \cdot (u \cdot g_x + v \cdot g_y + w \cdot g_z) - \rho \cdot \dot{q}_S = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

- die zeitliche Ableitung der totalen Energie $E = \rho \cdot I + \rho \cdot \frac{1}{2} \cdot \vec{u}^2$
- die räumlichen Ableitungen der Wärmeleitungsterme mit λ
- die räumlichen Ableitungen der Reibungsterme mit den Spannungen τ (Arbeit der molekularen Terme)
- die räumlichen Ableitungen der konvektiven Terme mit $\rho \cdot \vec{u}$ (Strömungstransport)
- die Schwerkraft mit der Gravitationskonstante \vec{g} (Arbeit der Volumenkräfte)
- die Wärmestrahlung \dot{q}_S (Wärmetransport)

Erhaltungsgröße:

Impulsdichte e (Gesamtenergie pro Einheitsvolumen)

Änderung der Energie durch:

- Konvektion $\rightarrow \rho \cdot \vec{u}$
- Arbeit durch Druckkräfte, Reibung $\rightarrow \tau$
- Arbeit durch Volumenkräfte $\rightarrow u \cdot g_x, v \cdot g_y, w \cdot g_z$

- Wärmeleitung $\rightarrow \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y}, \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z}$

- Wärmezufuhr $\rightarrow \dot{q}_s$

Die Variablen in den Gleichungen (analog [15]) bedeuten Folgendes:

$\rho = f(x,y,z,t)$... Dichte des Fluides (in Abhängigkeit der Raumkoordinaten x, y, z u. der Zeit t)

$u, v, w = f(x,y,z,t)$.. Strömungsgeschwindigkeiten in x -, y -, z -Richtung

\vec{u} ... Geschwindigkeitsvektor

$p = f(x,y,z,t)$... Druck des Fluides

$\tau_{xx} = f(x,y,z,t)$... Normalspannung in x -Richtung normal zur $x=konst$ -Fläche $dy \cdot dz$

$\tau_{yx} = f(x,y,z,t)$... Normalspannung in x -Richtung entlang der $y=konst$ -Fläche $dx \cdot dz$

$\tau_{zx} = f(x,y,z,t)$... Normalspannung in x -Richtung entlang der $z=konst$ -Fläche $dx \cdot dy$

Diese 5 Gleichungen werden auch Navier-Stokes-Gleichungen (NS-Gleichungen) genannt. Sie bilden ein gekoppeltes nichtlineares Differentialgleichungssystem, welches analytisch nur für Spezialfälle gelöst werden kann. Für allgemeine Fälle muss es numerisch gelöst werden, wobei CFD-Programme diese Gleichungen iterativ lösen. Dafür sind zusätzliche Gleichungen nötig, weil die 5 Erhaltungsgleichungen mehr Unbekannte als Gleichungen besitzen. Daher werden zusätzlich 1 thermische Zustandsgleichung, 2 kalorische Zustandsgleichungen für das Fluid und 9 Stokes'sche Beziehungen für die Normal- und Schubspannungen verwendet - vgl. LECHELER [15], woraus auch die nächsten Absätze entnommen wurden.

Die thermische Zustandsgleichung, auch allgemeine Gasgleichung genannt, koppelt Druck p , Dichte ρ und Temperatur T miteinander und lautet für ein ideales Gas mit R als Gaskonstante:

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (20)$$

Die kalorischen Zustandsgleichungen koppeln die spezifische innere Energie e und die spezifische Enthalpie h mit der Temperatur T . Für ein ideales Gas lautet sie mit c_v als spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen und c_p als spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck z.B.:

$$de = c_v \cdot dT \quad (21)$$

$$dh = c_p \cdot dT \quad (22)$$

Die Stokes'schen Beziehungen koppeln bei Newton'schen Fluiden die Spannungen τ mit den Geschwindigkeiten u, v, w :

$$\tau_{xx} = -\frac{2}{3}\mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \quad (23)$$

$$\tau_{yy} = -\frac{2}{3}\mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \quad (24)$$

$$\tau_{zz} = -\frac{2}{3}\mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + 2\mu \cdot \frac{\partial w}{\partial z} \quad (25)$$

$$\tau_{xy} = \mu \cdot \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (26)$$

$$\tau_{xz} = \mu \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (27)$$

$$\tau_{yz} = \mu \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (28)$$

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} \quad (29)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (30)$$

$$\tau_{zy} = \tau_{yz} \quad (31)$$

Mit diesen zusätzlichen 12 Gleichungen resultieren insgesamt 17 Unbekannte bei $5+1+2+9 = 17$ Gleichungen und das Gleichungssystem kann gelöst werden. Bei manchen Stoffwerten, wie z.B. bei der dynamischen Viskosität μ besteht eine Abhängigkeit von der Temperatur, vgl. LECHELER [15] S.23.

2.2.2. Die Erhaltungsgleichungen in Integralform

Die obigen Gleichungen sind in Differentialform angegeben. Die zweite Möglichkeit und die bei Finite Volumen verwendete Methode ist die Integralform, die im Folgenden im direkten Vergleich zur Differentialform (in Tensornotation) dargestellt ist.

Massenerhaltung

Differentialform: $\rho_t + \nabla(\rho v) = 0$ (32)

Integralform: $\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = - \int_{\partial V} (\rho v) \bar{n} dS$ (33)

Impulserhaltung

Differentialform: $(\rho v)_t + \nabla((\rho v) \circ v) + \nabla p = \nabla \tau + f$ (34)

Integralform: $\frac{d}{dt} \int_V \rho v dV = - \int_{\partial V} ((\rho v) \circ v) \bar{n} dS - \int_{\partial V} (pI) \bar{n} dS + \int_{\partial V} \tau \bar{n} dS + \int_V f v dV$ (35)

Energieerhaltung

Differentialform: $e_t + \nabla(v(e + p)) = \nabla \tau v + f v - \nabla q + Q$ (36)

Integralform: $\frac{d}{dt} \int_V e dV = - \int_{\partial V} v e \bar{n} dS - \int_{\partial V} v p \bar{n} dS + \int_{\partial V} \tau v \bar{n} dS + \int_V f v dV - \int_{\partial V} q \bar{n} dS + \int_V Q dV$ (37)

Bei der Integralform können die einzelnen Terme als Flüsse angesehen werden, die an den Zellrändern bilanziert werden.

2.2.3. Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen (discretisation of model equations)

Die numerische Umsetzung der Erhaltungsgleichungen in den CFD-Programmen, die sog. Diskretisierung, erfolgt i. A. nach den obigen zwei Varianten.

2.2.3.1 Arten der Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen

Bei der Differentialform werden die Differentiale durch endliche Differenzen ersetzt (Finite-Differenzen-Verfahren) und bei der Integralform werden die Integrale durch endliche Summen ersetzt (Finite-Volumen-Verfahren bzw. FV-Verfahren). Theoretisch gäbe es noch eine dritte Möglichkeit – die Finite-Elemente-Methode -, welche aber für CFD üblicherweise nicht verwendet wird.

LECHELER ([15] S.8) fasst die wichtigsten Punkte der Integral- bzw. Differentialform im Vergleich zusammen, siehe Abbildung 13.

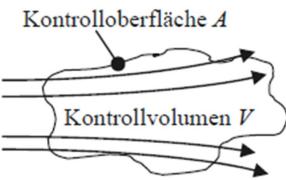
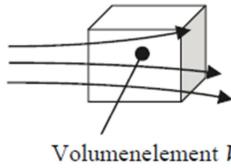
	Integralform	Differentialform
Fluid strömt durch	ein endliches Kontrollvolumen V 	ein infinitesimal kleines Volumenelement V 
Erhaltungsgleichungen	in Integralform	in Differentialform
Diskretisierung	als Finite-Volumen-Verfahren (FV)	als Finite-Differenzen-Verfahren (FD)
Vorteile	Physikalisch anschaulicher: Zeitliche Änderung der Strömungsgröße im Inneren des Kontrollvolumens V entspricht der Änderung der Flüsse durch die Kontrolloberfläche A . Ist bei unstetigen Verläufen wie bei Verdichtungsstößen genauer.	Mathematisch anschaulicher, da keine Integrale auftauchen.
Nachteile	Mathematisch komplexer, da Integrale auftauchen.	Physikalisch unanschaulicher, da Volumen gegen Null geht.

Abbildung 13: Vergleich Integral- und Differentialform, aus LECHELER [15], S.8.

Wie die meisten CFD-Programme verwendet auch ANSYS CFX die Integralform bzw. das FV-Verfahren. Dabei werden Flüsse über die FV-Oberfläche bilanziert und für jedes finite Volumen (FV) die diskretisierten Erhaltungsgleichungen ausgewertet. Für jedes FV werden die Mittelwerte in den Knoten gespeichert, wobei das z.B. in den Eckknoten (vertex-centred) oder Mittelpunkten (cell-centred) erfolgen kann (siehe auch Abschnitt 1.4). Für die Auswertung der Flüsse über die Grenzflächen zwischen den FV hinweg werden Approximationsschriften verwendet:

- Um die gesuchten Variablen an anderen Punkten als den Knotenpunkten zu erhalten, werden verschiedene Interpolationsvorschriften verwendet.
- Flächenintegrale werden durch numerische Quadratur angenähert, wobei es verschiedene Möglichkeiten bzw. Arten gibt.

2.2.3.2 Methoden für die räumliche Diskretisierung (domain discretisation)

Für die räumliche Diskretisierung der Erhaltungsgleichungen gibt es mehrere numerische Verfahren, welche z.B. in LECHELER [15] (ab S.39) genauer erklärt sind. Im Folgenden sind die Grundverfahren aufgelistet:

- Vorwärtsdifferenz 1. Ordnung
- Vorwärtsdifferenz 2. Ordnung
- Rückwärtsdifferenz 1. Ordnung
- Rückwärtsdifferenz 2. Ordnung
- Zentrale Differenz 2. Ordnung.

In Abbildung 14 sind die Vorgangsweisen der Vorwärts-, Rückwärts- und zentralen Differenz abgebildet.

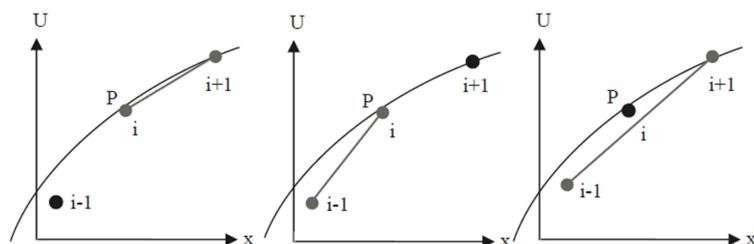


Abbildung 14: Vorwärts-, Rückwärts- und zentrale räumliche Differenz, aus LECHELER [15], S.42.

Die räumliche Diskretisierung betrifft allgemein gesagt die Terme mit 1. und 2. Ableitungen in den Erhaltungsgleichungen, wobei die partiellen Ableitungen $\frac{\partial}{\partial x_i}$ und $\frac{\partial^2}{\partial x_i^2}$ in endliche Differenzen umgewandelt werden. Die folgenden Formeln sind beispielhaft für die Erhaltung in x -Richtung angeführt, wobei hier U allgemein für jede Strömungsgröße gilt.

Diskretisierung der 1. Ableitungen:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{i,j} = \begin{cases} \frac{U_{i+1,j} - U_{i,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) & \text{Vorwärts 1. Ordnung} \\ \frac{-3 \cdot U_{i,j} + 4 \cdot U_{i+1,j} - U_{i+2,j}}{2 \cdot \Delta x} + O(\Delta x)^2 & \text{Vorwärts 2. Ordnung} \\ \frac{U_{i,j} - U_{i-1,j}}{\Delta x} + O(\Delta x) & \text{Rückwärts 1. Ordnung} \\ \frac{3 \cdot U_{i,j} - 4 \cdot U_{i-1,j} + U_{i-2,j}}{2 \cdot \Delta x} + O(\Delta x)^2 & \text{Rückwärts 2. Ordnung} \\ \frac{U_{i+1,j} - U_{i-1,j}}{2 \cdot \Delta x} + O(\Delta x)^2 & \text{Zentral 2. Ordnung} \end{cases} \quad (38)$$

Diskretisierung der 2. Ableitungen:

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \right)_{i,j} = \frac{U_{i+1,j} - 2 \cdot U_{i,j} + U_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x)^2 \quad (39)$$

Theoretisch gibt es auch numerische Verfahren höherer Ordnung, wobei dann aber mehr Netzpunkte miteinbezogen werden.

In Abbildung 15 (aus LECHELER [15], S.57) sind die Vor- u. Nachteile der verschiedenen Methoden für die räumliche Diskretisierung zusammengefasst. Für transiente Berechnungen kommen auch noch Verfahren für die zeitliche Diskretisierung mit ins Spiel.

Räumliche Diskretisierung	
Upwind 1. Ordnung genau	Einseitige Differenzen 1. Ordnung Genauigkeit schlecht, da nur 1. Ordnung Stöße zu stark gedämpft Sehr stabil
Zentral 2. Ordnung genau	Zentrale Differenzen 2. Ordnung Genauigkeit gut, da 2. Ordnung Oszillationen an Stößen Stabil durch Addition der numerischen Viskosität
High Resolution 2. Ordnung genau	Einseitige Differenzen 2. Ordnung Genauigkeit gut, da 2. Ordnung Stoßauflösung gut Stabil

Abbildung 15: Berechnungsverfahren für die räumliche Diskretisierung im Vergleich, aus LECHELER [15], S. 57.

2.3 Lösungsmethoden

Für die Lösung der Erhaltungsgleichungen gibt es verschiedene Strategien bzw. Methoden, welche im Folgenden kurz erklärt werden.

2.3.1. Lösung der vollständigen NS-Gleichungen (DNS)

Die aufwändigste Variante ist die Lösung der vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen, d.h. es ist eine exakte Berechnung der NS-Gleichungen, auch Direkte Numerische Simulation (DNS) genannt. Dabei wird die Strömung in all ihren Größenordnungen – von den größten bis zu den kleinsten Wirbeln bzw. Frequenzen – direkt aufgelöst und berechnet. Es werden keine Modelle oder Vereinfachungen verwendet. Daher ist ein extrem feines Rechennetz notwendig und die Rechenzeiten sind enorm, somit ist die Methode in der Praxis nicht sinnvoll einsetzbar. DNS findet hauptsächlich Anwendung bei laminaren Problemen mit sehr kleinen Re -Zahlen oder im Zuge von Grundlagenforschung. Eine Vereinfachung stellen z.B. die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) dar.

2.3.2. Lösung der RANS-Gleichungen

Bei der RANS-Methode wird die Strömung in einen Mittelwert und eine Schwankungsgröße aufgespalten. In Abbildung 16 ist dieser Reynolds-Ansatz für die u -Komponente (x -Richtung) der Geschwindigkeit dargestellt, wobei \bar{u} den Mittelwert und u' den zeitlich veränderlichen Schwankungswert darstellt.

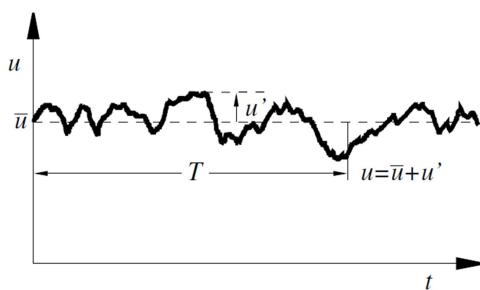


Abbildung 16: Reynolds-Ansatz für die u -Komponente der Geschwindigkeit, aus OERTEL [9], S. 128.

Folglich bedeutet das, dass in den NS-Gleichungen die exakten Terme durch die Mittelwerte und Schwankungsterme ersetzt werden, wodurch die RANS-Gleichungen entstehen. Durch diese Aufteilung entstehen zusätzliche Terme in den Erhaltungsgleichungen: 6 Geschwindigkeitskorrelationen (die sog. Reynolds-Spannungen) und 3 turbulente Temperaturkorrelationen (turbulent heat fluxes), vgl. [8]. Zur Lösung dieser zusätzlichen 9 Unbekannten sind Turbulenzmodelle notwendig. Es gibt verschiedene Turbulenzmodelle, welche auf unterschiedliche empirische Ansätze basieren. Die Lösung hängt entscheidend vom verwendeten Modell ab, denn jedes Modell ist normalerweise auf eine bestimmte Anwendung kalibriert.

Aufgrund der Mittelung kann das Rechennetz i. A. deutlich größer sein, wodurch der Rechenaufwand deutlich sinkt.

Weil die RANS-Methode in der Praxis - v.a. auch im Zusammenhang mit Windkanalversuchen - am häufigsten eingesetzt wird, am besten erforscht ist und einen angemessenen Rechenaufwand erfordert, wird sie auch in der gegenständlichen MA verwendet.

2.3.3. Lösung mittels LES-Simulation

Bei der Large-Eddy-Simulation (LES) wird die Strömung quasi gefiltert. Die Hauptströmung und größere Turbulenzen werden direkt berechnet, während kleinere Turbulenzen (kleiner als die Netzelemente) herausgefiltert und modelliert werden. Der Großteil der Turbulenzen wird also direkt aufgelöst, was wiederum ein feineres Netz, v.a. im Grenzschichtbereich voraussetzt und in größerem Rechenaufwand resultiert. LES werden bis jetzt vor allem im akademischen Bereich verwendet, haben sich noch nicht in der Praxis durchgesetzt und auch Best Practice Guidelines (BPGs) gibt es dazu noch kaum.

Abbildung 17 zeigt einen Vergleich beispielhafter Ergebnisse zufolge DNS, LES und RANS, wobei der Grad der Turbulenzauflösung gut erkennbar ist.

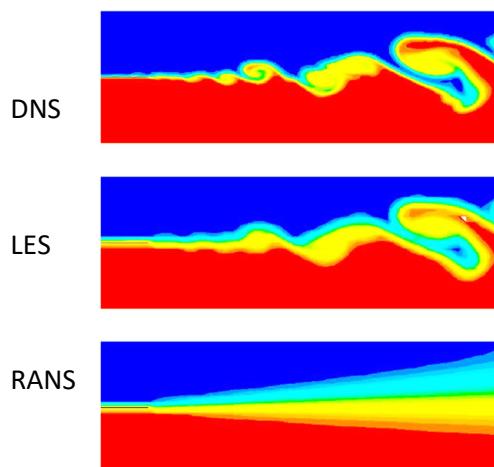


Abbildung 17: Vergleich zwischen DNS, LES und RANS, aus [16].

2.3.4. Lösung mittels DES-Simulation

Die Detached-Eddy-Simulation (DES) ist die Kombination aus RANS und LES. Sie verwendet in wandnahen Bereichen RANS und wechselt im restlichen Strömungsgebiet auf LES. Dabei ist aber sehr Vieles in der Programmeingabe zu beachten, da die beiden Varianten insbesondere unterschiedliche Voraussetzung an das Rechennetz stellen und dabei leicht Fehler gemacht werden können.

2.4 Rechennetz (domain discretisation)

2.4.1. Arten von Gittern

Um das Rechengebiet zu diskretisieren, gibt es mehrere Möglichkeiten der Gittergenerierung bzw. der Art der Gitter-Topologie:

- strukturierte Gitter (Vierecke bzw. Hexaeder) - Abbildung 18:
 - o O-Gitter
 - o C-Gitter
 - o H-Gitter
- unstrukturierte Gitter (Dreiecke bzw. Tetraeder und gemischte Zellen) - Abbildung 19
- blockstrukturierte Gitter - Abbildung 20
- hybride Gitter (inkl. Multi-Block-Gitter v. a. für komplexe Geometrien) - Abbildung 20

Die Wahl der Gitterart hängt hauptsächlich von der umströmten Objektgeometrie und der Fragestellung ab, wobei generell versucht werden soll, eine optimale Konturangepassung zu erzielen.

Bei den strukturierten Gittern eignen sich O-Gitter v. a. für dicke runde Hinterkanten (z.B. Turbinenprofile) und C-Netze für schmale spitze Hinterkanten (z.B. Verdichterprofile). Bei Problemen, wo der Strömungsnachlauf untersuchungsrelevant ist, sind C-Gitter den O-Gittern überlegen. Die Grenzschichten werden mit beiden Methoden gut aufgelöst.

H-Netze sind ideal für den Raum zwischen zwei oder mehreren Objekten, wie z.B. der Raum zwischen zwei Tragflügeln. Sie eignen sich daher gut für periodische Geometrien.

Bei blockstrukturierten Gittern wird das Gebiet in mehrere Blöcke von meist strukturierten Gittern unterteilt. So können die jeweiligen Vorteile der O-, C- und H-Gitter optimal kombiniert werden. Durch richtige Kombination können die Schiefwinkligkeit der Zellen verbessert, die Abbruchfehler reduziert und die Genauigkeit der Lösung verbessert werden. Hybride Gitter sind eine Sonderform der blockstrukturierten Gitter, wobei strukturierte und unstrukturierte Gitter kombiniert werden.

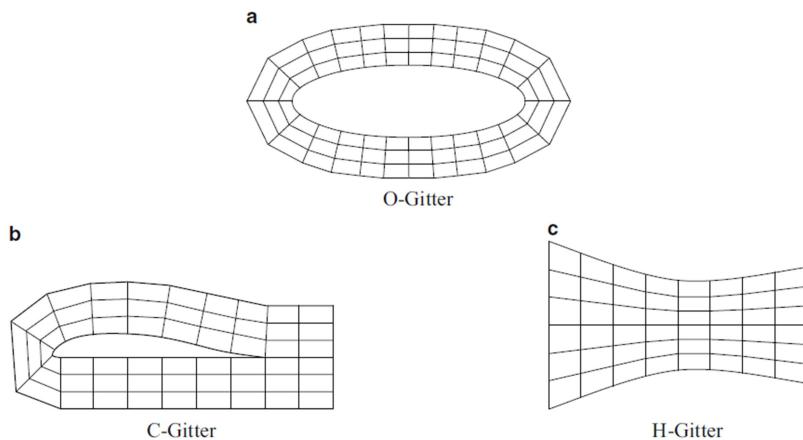


Abbildung 18: Topologie bei Körperangepassten strukturierten Gittern, aus SCHWARZE [12], s. 26.

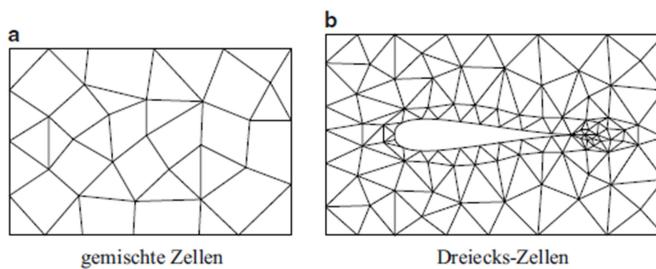


Abbildung 19: Unstrukturierte Gitter, aus SCHWARZE [12], s. 26.

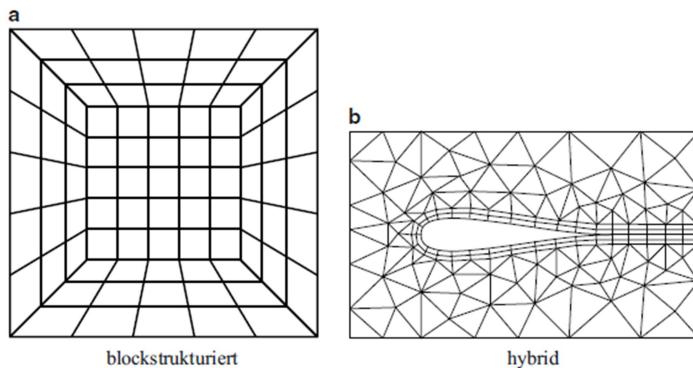


Abbildung 20: Blockstrukturierte und hybride Gitter, aus SCHWARZE [12], s. 26.

Die größten Vorteile von strukturierten Gittern sind neben der einfachen Generierung (für einfache Geometrien) der geringere Speicherbedarf und die geringere Rechenzeit im Vgl. zu unstrukturierten Gittern. Ein Hexaeder entspricht 6 Tetraedern bei gleicher kleinster Kantenlänge.

Unstrukturierte Gitter haben jedoch Vorteile bei der Modellierung komplexer Geometrien und der einfacheren Gitterverfeinerung durch lokales Hinzufügen von Punkten mit wählbaren Einflussradien in Bereichen starker Gradienten.

ANSYS bietet ein eigenes Programm namens ICEM CFD um v. a. für komplexere Geometrien qualitativ hochwertige (v. a. blockstrukturierte) Netze zu erstellen. Im Zuge dieser MA wird ICEM aber aufgrund der einfachen Objektgeometrien nicht verwendet.

2.4.2. Netzqualität

Ein qualitativ hochwertiges Rechennetz ist ausschlaggebend für den Erfolg und die Aussagekraft einer CFD-Simulation - v.a. in Bezug auf die Genauigkeit bzw. den Abbruchfehler der Diskretisierung, das Konvergenzverhalten und die Zeitschrittgröße (bei transienten Simulationen).

MENTER [17] listet innerhalb seiner BPGs folgende Empfehlungen bzgl. der Netzqualität auf:

- Ein großes Verhältnis der Kantenlängen (aspect ratios) zueinander soll vermieden werden.
 - Die Kantenlängen-Verhältnisse sollten in Rand-fernen Bereichen nicht größer als 1 zu 20 bis 50 sein.
 - In unwichtigen Bereichen und bei Grenzschichten kann das Verhältnis auch größer sein.
- Die Netz-Wachstumsrate (growth rate) soll weniger als 1,4 betragen, damit keine großen Sprünge in der Netzdichte auftreten.
- Die Möglichkeit, das Gitter in beliebigen Bereichen zu verdichten, soll in der Software vorhanden sein.
- Große (Wind-)Schiefheit (skewness) der Elemente soll vermieden werden.
- V.a. in Grenzschichten soll das Netz orthogonal sein. Dies kann durch das Verwenden von Hexaeder-Elementen und gleichzeitiges Vermeiden von unstrukturierten Netzen (Tetraeder) in diesen Bereichen erreicht werden.
- In kritischen Bereichen, wie z.B. in Bereichen mit großen Gradienten, soll das Netz verfeinert werden und möglichst regelmäßig sein.
- Vor der Gittergenerierung soll das verwendete Turbulenzmodell berücksichtigt werden und dementsprechend sollen die Abstände der Gitterpunkte zu umströmten Oberflächen in den Grenzschichten gewählt werden (y^+).
- I. A. soll ein möglichst orthogonales Gitter erstellt werden. Bei Elementen, die nicht orthogonal zur Strömung sind, erhöht sich die numerische Diffusion (siehe dazu auch Abschnitt 2.9).

FRANKE (COST) [7] verweist auf FERZIGER/PERIC [18], die ein zusätzliches Kriterium für die FV-Methode angeben: Die Oberflächennormalen einer Zelle und die Linie, die die Mittelpunkte zweier benachbarter Zellen verbindet, sollten idealerweise parallel sein.

In ANSYS CFX kann im MESH-Modul unter STATISTICS – MESH METRICS die Qualität über viele der oben erwähnten Werte einfach überprüft werden.

2.4.3. Prismenschichten (Inflations)

An den wandnahen Bereichen eines umströmten Objekts tritt wie bereits erwähnt eine Grenzschicht auf, die passend aufzulösen ist. Deren akkurate Auflösung ist v.a. für den Reibungswiderstand, das Ablöseverhalten und die Turbulenzentstehung wichtig. Es gibt zwei Möglichkeiten, die Grenzschicht aufzulösen (siehe Abbildung 21):

- unter Verwendung von Wandfunktionen
- mittels direkter Berechnung über ein sehr feines Rechennetz in Wandnähe (low- Re -model).

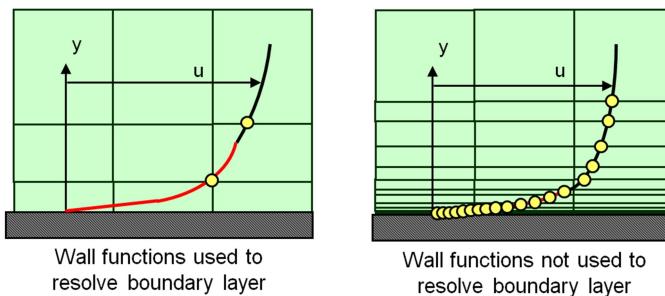


Abbildung 21: Auflösung der Grenzschicht mit Wandfunktionen oder mit direkter Auflösung, aus [10].

Bei der Verwendung von Wandfunktionen nutzt man die Kenntnis der Form des Geschwindigkeitsprofils an der Grenzschicht aus (siehe auch Abschnitt 2.1.5.1). Da man weiß, dass das Profil zuerst linear und dann logarithmisch geformt ist, kann man es mit Funktionen annähern und spart sich so eine feine Anordnung der Gitterknoten normal zur Wand. Der Vorteil ist somit eine geringere Zellanzahl und folglich ein geringerer Rechenaufwand. Ein Nachteil kann aber sein, dass manche Strömungssituationen, wie z.B. Ablösezonen nicht akkurat abgebildet werden können (siehe Abbildung 22). Bei manchen Strömungsproblemen wird deshalb versucht, die wandnahen Schichten mittels einer sehr dichten Knotenanordnung direkt aufzulösen. Je nach Strömungsproblem und Turbulenzmodell eignet sich eine Methode besser bzw. schlechter.

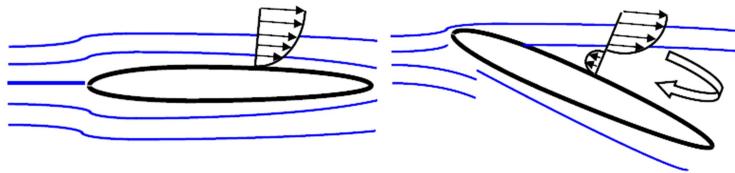


Abbildung 22: Ablösezonen bei einem Tragflügelprofil, aus [10].

In beiden Fällen müssen dort wo Grenzschichten auftreten, immer - unter Berücksichtigung des gewählten Turbulenzmodells – Prismenschichten (Inflations) angeordnet werden. Dabei werden parallel zur Oberfläche feine Schichten erstellt, wodurch an der Oberfläche ausschließlich prismatische Elemente entstehen, siehe dazu Abbildung 23.

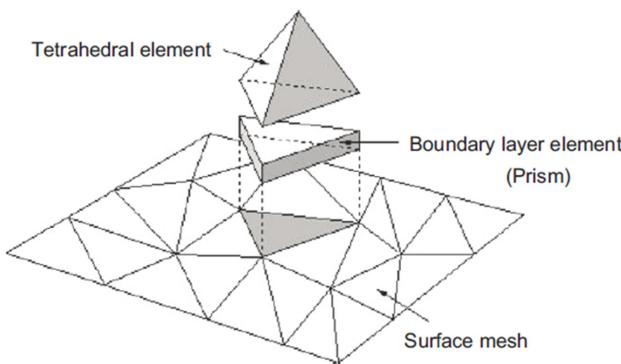


Abbildung 23: Prismatisches Element zufolge Inflation-Layer, aus TOMINAGA [19].

Die Anordnung von Inflations ist insbesondere bei Tetraeder-Elementen sehr wichtig um die Genauigkeit der Berechnung zu erhöhen und den Abbruchfehler zu verringern. Grund dafür ist die deutlich geringere Schiefwinkligkeit der Inflations im Vergleich zu Tetraedern, vgl. LECHELER [15].

Die charakteristischen und gleichzeitig entscheidenden Einstellungen für die Inflations entlang einer Oberfläche sind:

- die Dicke der ersten Prismenschicht Δy (first layer thickness)
- die Anzahl der Schichten
- die Wachstumsrate (growth rate) der Schichten.

2.4.3.1 Anzahl der Prismenschichten

ANSYS [14] empfiehlt bzgl. der Anzahl der Inflations i. A.

- 10 Schichten bei Verwendung von Wandfunktionen und
- 15 Schichten bei direkter Auflösung

zu verwenden, wobei das die minimale Schichtanzahl bzw. die minimale Anzahl an Knoten innerhalb der Grenzschicht normal zur Oberfläche ist.

2.4.3.2 y^+ - Wert

Neben der minimalen Anzahl der Prismenschichten ist der maximale Abstand zwischen der Oberfläche und dem ersten Gitterknoten Δy ein zweites wichtiges Kriterium. Um die bereits erwähnten charakteristischen Einstellungen für die Inflations vernünftig eingeben zu können, muss man sich zuerst im Klaren sein, welches Turbulenzmodell (siehe Abschnitt 2.6) man verwenden und welchen Bereich der Grenzschicht (siehe Abschnitt 2.1.5.1) man abbilden möchte bzw. sollte. Daraus resultiert ein anzustrebender y^+ -Wert, der im Vorhinein abgeschätzt werden kann. y^+ ist wie bereits in Abschnitt 2.1.5.1 erklärt, der dimensionslose Abstand des ersten Gitterpunktes von der Oberfläche bzw. Wand (siehe Abbildung 24). y^+ stellt gleichzeitig das Verhältnis der turbulenten zu den laminaren Einflüssen einer Strömung dar, ähnlich wie die Re -Zahl, vgl. SALIM [20].

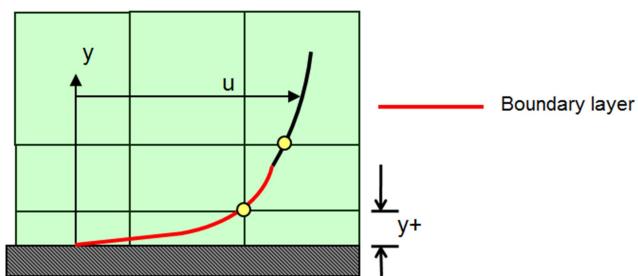


Abbildung 24: y^+ , aus [10].

Folgende y^+ - Werte entsprechen den jeweiligen Schichten der Grenzschicht (Abbildung 25):

- innere Schicht (inner layer)
 - träge bzw. viskose Unterschicht (viscous sublayer): $y^+ < 5$
 - Übergangsschicht (buffer layer / blending region): $5 < y^+ < 30$
 - voll-turbulente Schicht (fully-turbulent region / log-law-region): $y^+ > 30 \text{ bis } 60$
- äußere Schicht (outer layer): $y^+ > 60 \text{ bis } 300$

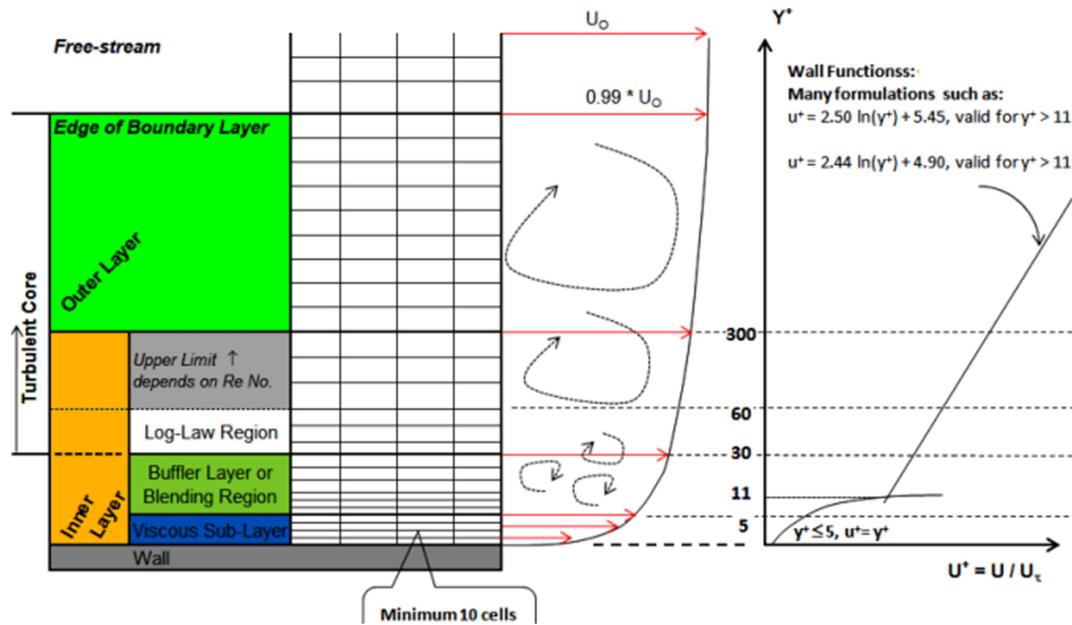


Abbildung 25: Einteilung der wandnahen Grenzschicht, aus [21].

Dabei ist zu beachten, dass Wandfunktionen theoretisch nur innerhalb bestimmter y^+ -Werte optimal funktionieren, d.h. in der Theorie: Wenn y^+ zu groß gewählt wird, liegt der erste Knoten außerhalb der Grenzschicht und die Wandfunktion reicht zu weit in das Strömungsgebiet hinein. Wenn y^+ zu klein gewählt wird, liegt der erste Knoten in der viskosen Unterschicht, wo Wandfunktionen nicht gültig sind. Weder im einen, noch im anderen Fall kann die Grenzschicht theoretisch richtig abgebildet werden. Praktisch benutzt ANSYS CFX jedoch skalierbare Wandfunktionen (scalable wall functions) und ignoriert Gitterpunkte außerhalb des gültigen Bereichs der Wandfunktionen, d.h. wandnahe zu dicht angeordnete Knoten werden ignoriert. Die Ergebnisse sind somit richtig, nur das Netz ist unnötig fein, vgl. [6].

SALIM [20] empfiehlt je nach Turbulenzmodell bzw. Handhabung der wandnahen Schichten folgende anzustrebenden y^+ -Werte:

- Verwendung von Wandfunktionen $\rightarrow y^+ \approx 30 \text{ bis } 60$
- direkte Auflösung $\rightarrow y^+ \approx 1$.

Diese Werte sind allgemein gültig bzw. beziehen sich nicht auf ein bestimmtes Turbulenzmodell und gewährleisten lt. SALIM [20] ein Auflösen der vollturbulenten Schicht (fully-turbulent region/ log-law-region), was völlig ausreichend ist. SALIM [20] und SCHWARZE [12] betonen sogar, dass man es vermeiden soll, die Übergangsschicht (buffer region) aufzulösen ($y^+ < 20$), da weder Wandfunktionen noch eine direkte Auflösung pauschal optimale Ergebnisse erzielen und (Konvergenz-)Probleme auftreten könnten. FRANKE (COST) [7] gibt an, dass bei Verwendung von Wandfunktionen für glatte Wände y^+ zw. 30 und 500 liegen soll. Das entspricht auch in etwa den Angaben von SCHWARZE [12] (S. 155), der von y^+ -Werten zw. 20 und 30 spricht und klarstellt, dass Wandmodelle bis zu $y^+=300$

vernünftige Ergebnisse liefern. Eine feinere Auflösung resultiert meist in einem erhöhten Rechenaufwand ohne ein besseres Ergebnis zu erzielen.

Ausgehend von einem angestrebten y^+ -Wert kann man den Abstand Δy des ersten Knotens zur Wand abschätzen. Dabei geht man folgendermaßen vor ([22], [14]):

1. Berechnung der Re -Zahl:

$$Re_x = \frac{\rho \cdot U \cdot x}{\mu} \quad (40)$$

2. Berechnung des Oberflächenreibungs-Koeffizient (skin friction coefficient) C_f , der i. A. folgendermaßen definiert ist:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2} \quad (41)$$

→ eine Abschätzung kann z.B. mit der Formel nach SCHLICHTING [23] für die turbulente Grenzschicht entlang der ebenen Platte erfolgen:

$$C_f = [2 \cdot \log_{10}(Re_x) - 0,65]^{-2,3} \quad \text{für} \quad Re_x < 10^9 \quad (42)$$

3. Ermittlung der Oberflächen-Schubspannung:

$$\tau_w = C_f \cdot \frac{\rho \cdot U^2}{2} \quad (43)$$

4. Berechnung der Reibungsgeschwindigkeit:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (44)$$

5. Ermittlung des Wandabstands in Abhängigkeit eines angestrebten y^+ -Wertes:

$$\Delta y = \frac{y^+ \cdot \mu}{\rho \cdot u_*} = \frac{y^+ \cdot \nu}{u_*} \quad (45)$$

Im Internet finden sich zur Abschätzung von y^+ auch Online-Hilfstools. Oft wird in der Literatur u^* auch als u_τ geschrieben.

ANSYS [14] schlägt für kleine Re -Zahlen eine Formel vor, die für die Abschätzung von C_f jedoch auf einem Ansatz von WHITE [24] basiert:

$$\Delta y = L \cdot y^+ \cdot \sqrt{74} \cdot Re_L^{-13/14} \quad (46)$$

$$\text{mit } C_f = 0,027 \cdot Re_x^{-1/7} \quad (47)$$

Die genaue Herleitung ist in der ANSYS Dokumentation (CFX Solver Modeling Guide) [14] zu finden.

Der y^+ -Wert ist z.B. bei Tragflügelumströmungen oder Rohrinnenströmungen sehr stark von Bedeutung, da dort der Umschlagpunkt von der laminaren zur turbulenten Grenzschicht in Abhängigkeit der Re -Zahl entscheidend ist. Bei stumpfen Körpern mit scharfen Kanten sind die Ablösezonen aber ohnehin immer an den Kanten und Ecken, unabhängig von der Re -Zahl. Aus diesem Grund stehen Modelle mit Wandfunktionen jenen ohne Wandfunktion bei der Genauigkeit um nichts nach und der y^+ -Wert verliert etwas an Bedeutung. SALIM [20] merkt im Zuge seiner Untersuchungen bzgl. y^+ auch an, dass die unterschiedlichen Netzfeinheiten inkl. der y^+ -Werte vor allem großen Einfluss auf die Wandreibung bzw. den Wandreibungscoefficienten haben, sich jedoch kaum auf das Geschwindigkeitsprofil auswirken.

Außerdem wurde bei den Simulationen der MA (siehe Abschnitt 6) festgestellt, dass bei einer zu feinen Auflösung, die Konvergenzverläufe und die Verläufe der Oberflächen-Druckpunkte eher extremer ausschlagen. Ursachen sind vermutlich Singularitäten an den wandnahen Prismenschichten. Zusätzlich steigen bei sehr feiner Auflösung der Rechenaufwand und die Rechenzeit sehr stark an.

Bei allen Modellen der MA wird die erste Inflations-Schicht auf einen Wert von ca. $y^+ = 45$ bis 60 angepasst, was einem Wandabstand Δy von ca. 0,5 mm entspricht. Siehe dazu folgende beispielhafte Berechnung:

$$Re_L = 25.673.941$$

$$\Delta y_{ANSYS-White} = L \cdot y^+ \cdot \sqrt{74} \cdot Re_L^{-\frac{13}{14}} = 10[m] \cdot 45 \cdot \sqrt{74} \cdot 25.673.941^{-\frac{13}{14}} = 0,5100[mm]$$

$$C_f = [2 \cdot \log_{10}(Re_L) - 0,65]^{-2,3} = [2 \cdot \log_{10}(25.673.941) - 0,65]^{-2,3} = 0,00225$$

$$\tau_w = C_f \cdot \frac{\rho \cdot U^2}{2} = 0,00225 \cdot \frac{1,25 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 40^2 \left[\frac{m^2}{s^2} \right]}{2} = 2,2486 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{2,2486 \left[\frac{N}{m^2} \right]}{1,25 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}} = \sqrt{\frac{2,2486 \left[\frac{kg \cdot m}{m^3 \cdot s} \right]}{1,25 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}} = 1,3412 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\Delta y_{CFD-ONLINE-Schlichting} = \frac{y^+ \cdot \mu}{\rho \cdot u_*} = \frac{y^+ \cdot \nu}{u_*} = \frac{45 \cdot 1,558 \cdot 10^{-5} [\frac{m^2}{s}]}{1.3412 [\frac{m}{s}]} = 0,5227 [mm]$$

In ANSYS CFX ist es im Zuge des Postprocessings unter RESULTS möglich, sich die y^+ -Werte anzeigen zu lassen, wobei sich Contour-Plots an den Oberflächen des umströmten Objekts sehr gut dafür eignen. Auf jeden Fall sollte y^+ nach jeder Berechnung kontrolliert werden und bei Bedarf das Netz angepasst werden.

2.4.3.3 Wachstumsrate der Prismenschichten

Ausgehend von der berechneten Grenzschichtdicke δ stimmt man also folgende Werte miteinander ab, um die Inflations akkurat einzustellen:

- die maximale Dicke der ersten Prismenschicht Δy
- die minimale Anzahl der Schichten innerhalb der gesamten Grenzschicht
- die Wachstumsrate der Schichten (<1,3).

Im folgenden Flussdiagramm (Abbildung 26) ist die Vorgangsweise abgebildet.

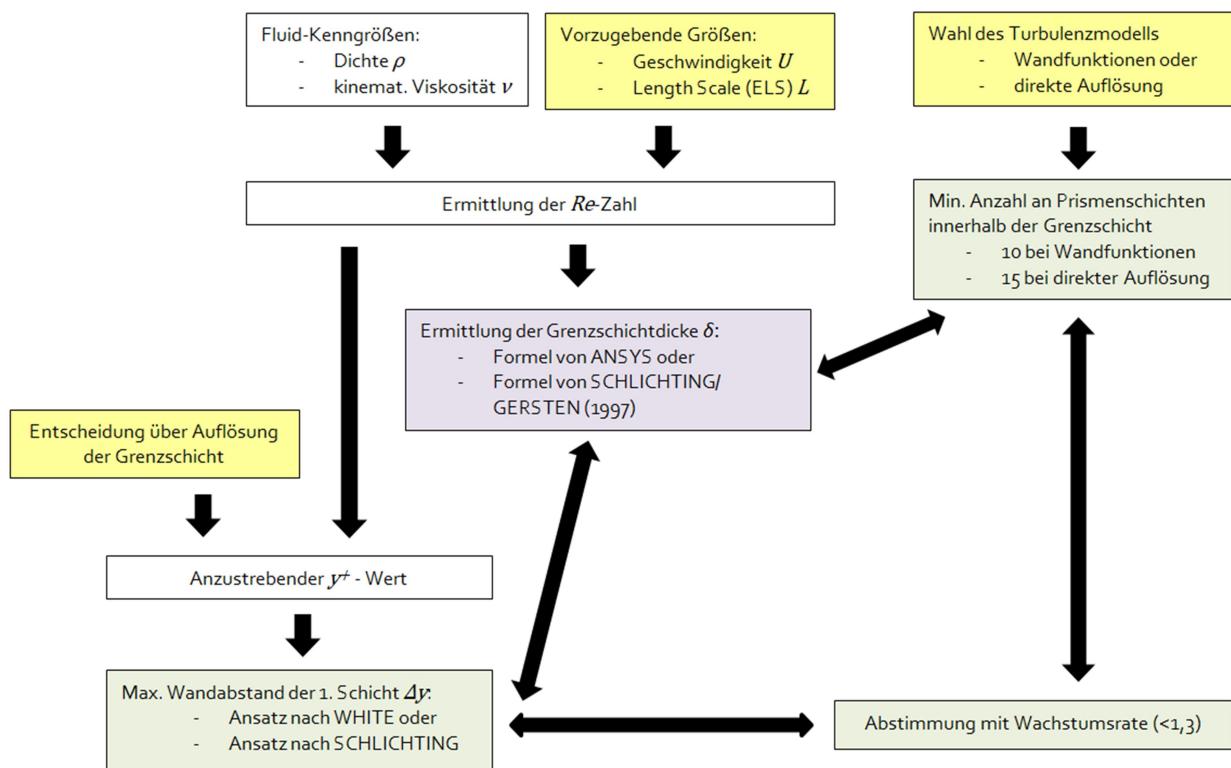


Abbildung 26: Flussdiagramm für die Einstellungen der Inflations

2.5 Randbedingungen (boundary conditions)

Die Erhaltungsgleichungen gelten für alle Strömungsprobleme. Um ein konkretes Problem lösen zu können sind bestimmte Randbedingungen (RB bzw. BC für boundary conditions) nötig. Da das umströmte Objekt nicht als Volumen vernetzt wird, sondern nur dessen Oberfläche und dessen umgebendes Volumen, beziehen sich die RB auf die Grenzen des Strömungsgebietes.

2.5.1. Arten von Rändern bzw. Gebietsgrenzen

Innerhalb eines Strömungsgebiets können folgende Ränder auftreten, siehe auch Abbildung 27:

- der Einströmrand (Inlet – nur Einströmung ist erlaubt)
- der Ausströmrand (Outlet – nur Ausströmung ist erlaubt)
- der Festkörperrand bzw. Wände (walls)
- Symmetrieebenen (symmetry), wenn z.B. nur am Halbsystem gerechnet wird
- Öffnungen (opening - dabei sind Ein- und Ausströmung erlaubt).

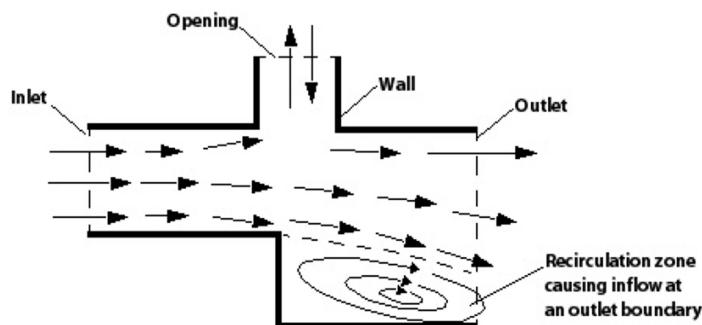


Abbildung 27: Mögliche Ränder in ANSYS CFX, aus [14], S.66.

Inlet und Outlet sind bei freien Umströmungen (external flows) meist klar definiert. Je nach Problemstellung oder vorhandener physikalischer Situation können die Gebietsgrenzen oben und seitlich entweder als Symmetrieebenen (symmetries), als reibungsfreie Wände (free slip walls) oder als periodische Ränder definiert werden. Für z.B. einen Tragflügel eignen sich periodische Ränder (in ANSYS CFX über sog. Domain interfaces erzielbar) sehr gut, da in der Luft mit einer wiederkehrenden Strömungssituation gerechnet werden kann. Für ein umströmtes Haus werden die obenliegenden und seitlichen Grenzen entweder als Symmetrieebenen oder als reibungsfreie Wände modelliert. Wenn der Abstand zwischen Objekt und jener Grenzen ausreichend groß ist, sollte es keinen Unterschied zwischen symmetries und free slip walls geben. Der Boden und die Objektwände werden als reibungsbehaftete Wände (slip walls) eingegeben. Dabei gilt die bereits erwähnte Haftbedingung, d.h. die Geschwindigkeiten an den Wänden sind Null, vgl. u.a. LECHELER [15], S.28.

Wenn Inlet und Outlet verwendet werden, müssen die Gebietsgrenzen weit genug vom Objekt entfernt liegen, damit keine Beeinflussung der Gebietsränder auf das Innere des Strömungsgebiets stattfinden kann. Falls das Rechengebiet für bestimmte Anwendungen nicht so groß gewählt werden kann (z.B. aus Gründen der Rechnerleistung), muss statt einem Outlet ein Opening verwendet werden um Reflexionen auszuschließen.

Bei der Verwendung von Symmetrieebenen ist darauf zu achten, dass sich die Strömung auch wirklich symmetrisch verhält – und nicht nur die untersuchte Geometrie symmetrisch ist. Bei einem symmetrischen, (recht)eckigen Gebäude mit scharfen Kanten kann die Berechnung in der Regel am Halbsystem erfolgen, denn die Strömung löst definitiv an den Kanten ab und bildet sich symmetrisch aus.

Bei anderen Objektformen kann aber z.B. der sog. Coanda-Effekt auftreten, bei dem ein strömendes Fluid einer festen Kontur folgt, d.h. es tritt ein Wandhaftungs-Effekt auf. Ein Beispiel dafür ist ein rotationssymmetrisches Rohr in dessen Mitte ein Strahl einströmt. Der Strahl wird sich an eine Rohrseite anlegen wodurch sich eine asymmetrische Strömung einstellt (siehe Abbildung 28).

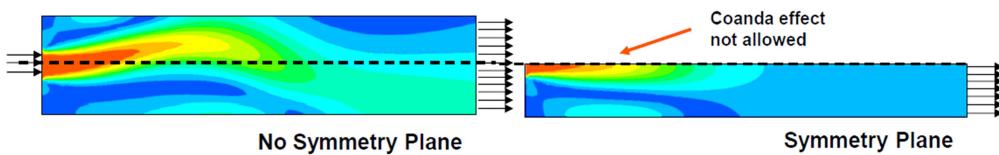


Abbildung 28: Coanda-Effekt wenn Strahl in Rohrmitte eintritt, aus [25].

2.5.2. Randbedingungen an den Rändern

Ausschlaggebend für den Erfolg einer numerischen Strömungssimulation sind die Vorgaben respektive die RB an den einzelnen Rändern. In jedem Fall müssen für ein dreidimensionales Problem 5 RB zur Verfügung stehen, da in den Erhaltungsgleichungen 5 Werte unbekannt sind: die Fluid-Dichte ρ , die Strömungsgeschwindigkeiten in alle Richtungen u, v, w und die spezifische innere Energie e . Dabei wird ein Teil der 5 RB als physikalische RB vorgegeben, der andere Teil wird als sog. numerische RB berechnet. Die physikalischen RB resultieren aus theoretischen Grundlagen oder Versuchsdaten und sind i. A. Drücke, Temperaturen, Geschwindigkeiten oder Massenströme. Die numerischen RB verknüpfen die Ränder mit dem Inneren eines Strömungsgebiets. Die genauen Vorgaben hängen hauptsächlich von der Art des Randes und davon ab, ob die Strömung im subsonic oder supersonic Bereich liegt, siehe auch Abschnitt 2.1. In LECHELER [15] findet man dazu detaillierte Informationen und es wird erläutert, wie man mithilfe der sog. Charakteristiken-Methode auf die nötigen RB kommt.

In dieser MA werden hauptsächlich die Empfehlungen von ANSYS [25] umgesetzt, da die Software auf bestimmte RB-Konstellationen mehr oder weniger robust reagiert:

- am robustesten: Vorgabe der Geschwindigkeit oder des Massenstroms am Inlet und des statischen Drucks am Outlet, wobei der Totaldruck am Inlet dann ein implizites Resultat daraus ist
- robust: Vorgabe des Totaldrucks am Inlet und Geschwindigkeit oder Massenstrom am Outlet, wobei der statische Druck am Outlet und die Geschwindigkeit am Inlet Teil der Lösung sind
- empfindlich bzgl. der Anfangsvorgabe: Vorgabe des Totaldrucks am Inlet und des statischen Drucks am Outlet, wobei der Massenstrom Teil der Lösung ist
- sehr unzuverlässig: Bei einer Vorgabe des statischen Drucks am Inlet und des statischen Drucks am Outlet reagiert das System sehr unzuverlässig, weshalb diese Kombination zu vermeiden ist. Dabei sind der Totaldruck am Inlet und der Massenstrom implizite Ergebnisse.

Falls man seine Ergebnisse mit Windkanal-Ergebnissen vergleichen möchte, sollten die RB der Situation im Windkanal entsprechend angepasst werden. Das bezieht sich auf die Abstände zwischen dem Objekt und den Gebietsgrenzen, auf die Art der RB, auf Rauheiten von Objekt und Gebietsgrenzen, auf Geschwindigkeits- und Turbulenzintensitätsprofile u.v.m. Beispielsweise sollten die obenliegende und die seitlichen Domain-Grenzen als Wände mit der dem Windkanal entsprechenden Rauheit modelliert werden.

2.6 Turbulenzmodelle

Wie oben bereits erwähnt, wird die Hauptströmung bei der RANS-Methode direkt berechnet, die hochfrequenten Anteile, die sogenannten *Re*-Spannungen müssen durch ein Turbulenzmodell ersetzt werden. Dafür gibt es verschiedene Ansätze, die im Folgenden erklärt werden, vgl. u. a. LECHELER [15] (S.31).

Falls eine laminare Strömung mit kleinen *Re*-Zahlen vorliegt, wird kein Turbulenzmodell benötigt (da keine zusätzlichen Spannungsterme in den Erhaltungsgleichungen auftreten) und die NS-Gleichungen werden direkt gelöst. Für turbulente Strömungen ist die Wahl des Turbulenzmodells entscheidend für das Ergebnis der Simulation. Turbulenzmodelle sind für spezielle Problemstellungen besser oder schlechter geeignet. So wurde z.B. das Baldwin-Lomax-Null-Gleichungsmodell für Tragflügelströmungen entwickelt, vgl. LECHELER [15].

In ANSYS CFX steht eine ganze Palette an Turbulenzmodellen zur Verfügung (siehe Abbildung 29), wobei man verstehen sollte, welches Modell für welche Anwendung geeignet ist.

RANS Eddy-viscosity Models:	RANS Reynolds-Stress Models:
1) Zero Equation model.	1) LRR Reynolds Stress
2) Standard $k-\varepsilon$ model.	2) QI Reynolds Stress
3) RNG $k-\varepsilon$ model.	3) Speziale, Sarkar and Gatski Reynolds Stress
4) Standard $k-\omega$ model.	4) SMC- ω model
5) Baseline (BSL) zonal $k-\omega$ based model.	5) Baseline (BSL) Reynolds' Stress model
6) SST zonal $k-\omega$ based model.	
7) $(k-\varepsilon)_{1E}$ model.	
Eddy Simulation Models:	
	1) Large Eddy Simulation (LES) [transient]
	2) Detached Eddy Simulation (DES)* [transient]
	3) Scale Adaptive Simulation SST (SAS)* [transient]

* Not available in the ANSYS CFD-Flo product

Abbildung 29: Zur Verfügung stehende Turbulenzmodelle in ANSYS CFX, aus [10].

2.6.1. Arten von Turbulenzmodellen

2.6.1.1 Wirbelviskositätsmodelle (eddy viscosity models)

Wirbelviskositätsmodelle ersetzen die Re -Spannungen durch eine künstlich eingeführte turbulente Zähigkeit respektive Wirbelviskosität μ_t (turbulent (eddy) viscosity). Je nachdem durch welche Anzahl an Differentialgleichungen μ_t abgebildet wird, unterscheidet man, vgl. u.a. OERTEL [9]:

- Null-Gleichungsmodelle (z.B. Baldwin-Lomax-Modell): Annäherung der Wirbelviskosität durch eine einfache algebraische Gleichung
- Ein-Gleichungsmodelle (z.B. Spalart-Allmaras-Modell): Berechnung der Wirbelviskosität mit einer Differentialgleichung für den Transport der turbulenten kinetischen Energie k
- Zwei-Gleichungsmodelle ($k-\varepsilon$ -, $k-\omega$ -, BSL- und SST-Modell (Shear Stress Transport)): Bestimmung der Wirbelviskosität aus zwei Differentialgleichungen unter Verwendung der turbulenten kinetischen Energie k , der turbulenten Dissipation ε und der turbulenten Frequenz ω , wobei ε und ω in direktem Zusammenhang stehen: $\omega = \varepsilon/k$.

Bei den Zwei-Gleichungsmodellen sind zuerst das Standard $k-\varepsilon$ - und das Standard- $k-\omega$ -Modell entstanden. Danach folgten diverse Weiterentwicklungen und Modifikationen, wie z.B. das Renormalization Group (RNG) $k-\varepsilon$ -Modell, das realizable $k-\varepsilon$ -Modell (nicht in CFX vorhanden), das Baseline (BSL) $k-\omega$ -Modell und das SST-Modell.

Das $k-\varepsilon$ -Modell liefert gute Ergebnisse im Inneren eines Strömungsgebietes und hat Probleme in Wandnähe, wo es Ablösezonen nicht akkurat wiedergeben kann. Genau umgekehrt verhält es sich mit dem $k-\omega$ -Modell, das aber sehr empfindlich auf Eingangsparameter der freien Strömung reagiert. Das Baseline (BSL) $k-\omega$ -Modell kombiniert die jeweils guten Eigenschaften des $k-\varepsilon$ - und $k-\omega$ -Modells, liefert

somit gute Ergebnisse in Wandnähe und im Strömungsinneren. Ein sog. Blending-Faktor sorgt für ein Umschalten zwischen diesen zwei Modellen in Abhängigkeit vom Wandabstand. Die Weiterentwicklung davon ist das SST-Modell, bei dem ein sog. Limiter zusätzlich hilft, die Wirbelviskosität (eddy viscosity) nicht zu überschätzen. Vorteile des SST-Modells sind somit eine verbesserte Berechnung von Ablösezonen und, dass es auf die Eingangsparameter der freien Strömung nicht empfindlich reagiert.

Aufgrund des automatischen Umschaltens zwischen Wandfunktion und direkter Auflösung, ist der y^+ -Wert weit weniger wichtig als für diverse andere Turbulenzmodelle. Das SST-Modell verwendet je nach Re -Zahl eine Wandfunktion oder berechnet die Grenzschicht direkt. ANSYS [6] / [16] empfiehlt für das SST-Modell einen y^+ -Wert < 1 anzustreben. Entscheidend ist aber v.a. inwieweit die turbulente Grenzschicht abgebildet werden soll bzw. um welche Art Strömungsproblem es sich handelt, siehe auch Abschnitt 2.1.5.

Aufgrund all dieser Vorteile wird für die gegenständliche MA das SST-Modell im Zuge der RANS-Methode verwendet und in Anlehnung an die Ergebnisse von SALIM [20] wird ein y^+ -Wert von 45 bis 60 angestrebt (siehe Abschnitt 2.4.3.2).

2.6.1.2 Reynolds-Spannungs-Modelle (RSM)

RSM (Reynolds-stress-models), auch bekannt als Second Moment Closure (SMC) oder Second Order Closure, berechnen die einzelnen Re -Spannungen direkt und berücksichtigen die Richtungsabhängigkeit der Turbulenz, sind also vorzugsweise für anisotrope Turbulenzen oder Nicht-Gleichgewichtseffekte einzusetzen. Für urbane Strömungen werden sie normalerweise nicht eingesetzt.

2.6.1.3 Wirbelsimulationsmodelle (für LES, DES, DNS)

Wenn wie bei der RANS-Lösungsmethode keine Mittelung der Strömungsgrößen angewendet wird, wie es bei der DNS, LES oder DES der Fall ist, werden sogenannte Wirbelsimulationsmodelle eingesetzt. Darauf wird hier aber nicht näher eingegangen.

2.6.2. Turbulenzmodelle und y^+

Wie bereits erwähnt, ist zu beachten, dass je nach Berechnungsmethode und Turbulenzmodell ein entsprechendes Rechennetz erstellt werden muss. Entscheidend ist v. a. wie die Grenzschicht entlang einer Oberfläche behandelt wird – mit Wandfunktionen oder durch direkte Auflösung - und was für ein y^+ -Wert angestrebt wird. Siehe dazu auch Abschnitt 2.4.3.

So werden beim $k-\varepsilon$ -Modell immer Wandfunktionen verwendet und y^+ sollte mindestens < 300 sein, vgl. [16]. Das $k-\omega$ -, das BSL- und das SST-Modell wechseln zwischen einer direkten Auflösung bei kleinen y^+ -Werten und verwenden Wandfunktionen bei größeren y^+ -Werten. Für eine direkte Auflösung der zähen

laminaren Unterschicht verlangen diese Modelle $y^+ \leq 2$, für die Verwendung von Wandfunktionen $y^+ < 300$, vgl. [16].

2.7 Berechnungsverfahren und Einstellungen

2.7.1. Lösungsalgorithmen (solution algorithm)

Wenn das Gleichungssystem geschlossen ist bzw. die Anzahl der Gleichungen mit der Anzahl der Unbekannten übereinstimmt, kann es gelöst werden. Beispiele für numerische Lösungsalgorithmen sind z.B. diverse Multi-Grid-Verfahren, die Jacobi Iteration, die Gauß-Seidel Iteration, die Successive Over-Relaxation (SOR) oder die unvollständige Dreieckszerlegung (ILU-Zerlegung). Letztere wird in CFX verwendet. Auf diese numerischen Verfahren wird hier jedoch nicht näher eingegangen.

Bei CFD-Programmen ist mittlerweile die Upwind-Diskretisierung Standard (Upwind-Difference-Scheme UDS). Dieses Verfahren schaltet im Bereich von Unstetigkeiten bzw. Stoßen automatisch von meist Zentraler Differenz 2. Ordnung auf einseitige Differenzen (1. oder 2. Ordnung) um, d.h. je nach physikalischer Ausbreitungsrichtung wird die einseitige Vorwärts- bzw. Rückwärtsdifferenz verwendet. Werden beim Upwind-Verfahren Differenzen 2. Ordnung verwendet, spricht man auch vom sog. High-Resolution Verfahren. Es ist anzumerken, dass bei Gebietsändern natürlich nur einseitige Differenzen verwendet werden.

In ANSYS CFX kann man in den Solver-Einstellungen (CFX PRE) die numerischen Berechnungsverfahren für die Advektionsterme bzw. Strömungsterme und für die Turbulenzen in den Erhaltungsgleichungen explizit auswählen, denn diese zwei Terme sind die zwei maßgebenden in einer turbulenten Strömung. Siehe dazu auch Abschnitt 2.2.2 über die Erhaltungsgleichungen in Integralform.

Die folgenden 3 Klassen von numerischen Diskretisierungsverfahren stehen dabei für beide Terme jeweils zur Verfügung, wobei die Wahl für den nichtlinearen Advektions-Term am relevantesten ist, vgl. [26]:

- Upwind (1. Ordnung genau)
- High Resolution (Upwind 2. Ordnung genau)
- Specified Blend.

In ANSYS besteht mit der letztgenannten Variante die Möglichkeit, den Einfluss der Berechnung 2. Ordnung mit dem sog. Specified-Blend-Faktor β zu steuern. Dabei gilt $\beta=0$ für Berechnung mit Upwind 1. Ordnung und $\beta=1$ für Upwind 2. Ordnung. Bei einer Einstellung von einem Specified-Blend-Faktor von $\beta=1$ kann es jedoch passieren, dass physikalisch realistische Ergebnisse über- oder unterschritten werden und somit unphysikalische Zustände auftreten (unbounded). Beim High-Resolution-Verfahren in

ANSYS wird die Lösung eingegrenzt (bounded). Abbildung 30 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Berechnungsverfahren.

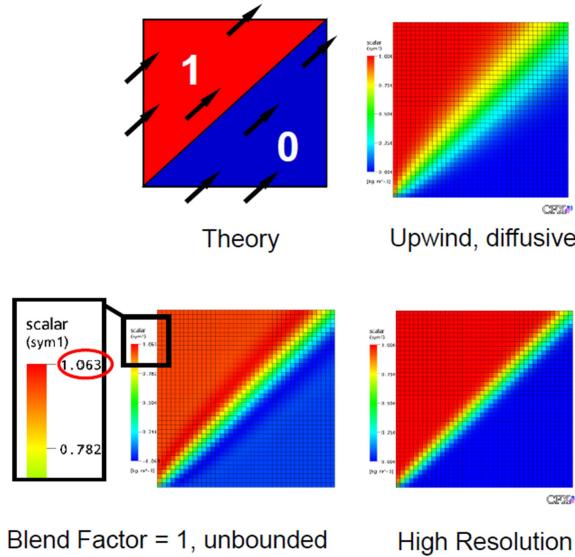


Abbildung 30: Vgl. der Ergebnisse versch. numerischer Berechnungsverfahren, aus [26].

Grundsätzlich sollte man daher immer High Resolution verwenden, da der Specified-Blend-Faktor hier automatisch optimiert wird und normalerweise kein Grund besteht sich dagegen zu entscheiden. Es ist fortgeschritten Expertise notwendig um andere Einstellungen begründet verwenden zu können. In Abbildung 31 sind die Vor- und Nachteile zusammengefasst.

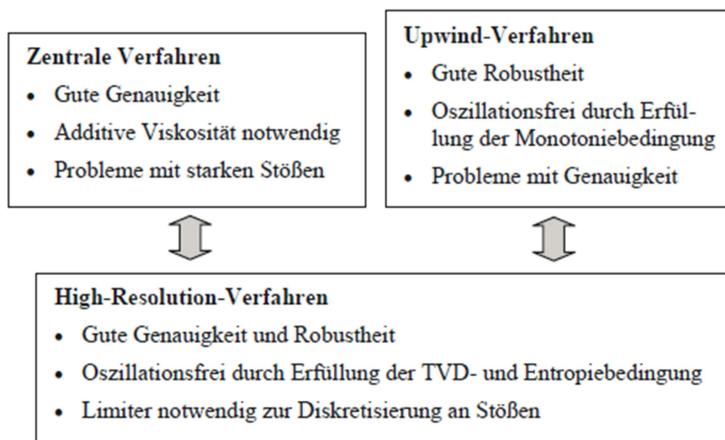


Abbildung 31: Eigenschaften der drei Klassen von Lösungsalgorithmen, aus LECHELER [15].

2.7.2. Konvergenz-Kriterien

2.7.2.1 Residuen der Erhaltungsgleichungen

Wie bereits erwähnt, werden die Erhaltungsgleichungen iterativ gelöst, d.h. ausgehend von einem Startwert werden sie immer wieder neu gelöst, bis der benutzerdefinierte Abbruchfehler erreicht ist. Das Abbruchkriterium einer iterativen Lösung wird normalerweise für die Residuen der Erhaltungsgleichungen angegeben.

Die Residuen werden vom sog. Iterationsfehler (siehe auch Abschnitt 2.9.1.4) abgeleitet und geben wieder, inwieweit die aktuelle Lösung des aktuellen Iterationsschrittes von der exakten Lösung entfernt ist. Sie tendieren gegen 0 bzw. gegen 10^{-12} , was bei doppelter Genauigkeit der theoretischen Maschinengenauigkeit entspricht. Sie können als maximale Werte (MAX) oder als quadratische Mittelwerte (root mean square - RMS) angezeigt werden, vgl. MENTER [17]. Sie werden normalerweise nach der ersten Iteration skaliert bzw. auf eine dimensionslose Form gebracht (normalisierte Residuenvektoren), wobei zu beachten ist, dass unterschiedliche CFD-Software dabei unterschiedlich vorgeht. Deshalb kann man nicht pauschal von einem angestrebten Wert sprechen. I.A. wird eine Reduktion der Residuen um mind. vier Größenordnungen empfohlen, vgl. u.a. FRANKE (COST) [7]. Für industrielle Anwendungen wird üblicherweise ein Wert von 10^{-3} verwendet, was aber für eine konvergente Lösung normalerweise ein zu hoher Wert ist, vgl. BLOCKEN [27].

2.7.2.2 Monitor Points und Imbalances

Neben den Residuen sollte das Hauptaugenmerk auf die gesuchten Größen gelegt werden. In ANSYS CFX können dazu Monitor Points (MPs) verwendet werden, wobei sowohl ein Punkt im Raum, wie z.B. der Druck an einem bestimmten Punkt, als auch eine Funktion (expression) – z. B. der Durchschnittswert einer Fläche oder ein direkt berechneter Wert - definiert werden und während des Solver-Prozesses beobachtet werden kann.

Wenn der Verlauf dieser MPs konstant wird oder um einen konstanten Wert oszilliert, kann die Lösung als konvergent betrachtet werden, vgl. BLOCKEN [27].

Zusätzlich sollten die (Un-)Gleichgewichte (imbalances) von Masse, Impuls und Energie beobachtet werden. Für stationäre Berechnungen sollten diese Werte in etwa konstant verlaufen, vgl. FRANKE (COST) [7], der auf den VDI [28] verweist.

Bei instationären Berechnungen gelten für die Residuen, die MPs und die Imbalances dieselben Empfehlungen. Bei impliziten Berechnungsmethoden sollten die Verläufe dann innerhalb jeden Zeitschritts konvergieren.

2.7.3. Wahl initialer Einstellungen

Für stationäre RANS-Berechnungen sind vor allem die Einstellungen an den Gebietsgrenzen maßgebend für den Erfolg einer Simulation, weniger die initialen Einstellungen (initialisations). Im Gegensatz dazu sind bei transienten Simulationen aufgrund ihrer zeitabhängigen Strömungsentwicklung die Anfangseinstellungen logischerweise von größerer Bedeutung. Genaueres dazu ist z.B. in FRANKE (COST) [7] ab S. 22 zu finden.

2.8 Stationäre / Instationäre Strömung

Die oben genannten Berechnungsmethoden und Turbulenzmodelle beziehen sich auf stationäre Strömungen (steady state). Theoretisch ist aber jede Art von turbulenter Strömung ein instationärer Zustand (transient/ unsteady), d.h. die Strömung ändert sich mit der Zeit bzw. hängt von ihr ab. Für gewisse Anwendungen, wie die Winddruck-Ermittlung infolge der Umströmung eines Hauses, reicht eine vereinfachte stationäre Betrachtung völlig aus.

Bei instationären Problemen kommen weitere Dinge zu tragen, wie z.B. die zeitliche Diskretisierung oder andere Turbulenzmodelle. Im Hinblick auf Turbulenzmodelle ist das Ergebnis der Anpassung der RANS-Methode dann die URANS-Methode (Unsteady Reynolds-Averaged-Navier-Stokes). Es gibt auch eine Kombination aus URANS und LES (hybrid URANS/LES), bei welcher in Wandnähe URANS verwendet wird und im restlichen Strömungsgebiet auf LES umgeschaltet wird. Ein letztes Beispiel ist die Scale-Adaptive-Simulation (SAS), die wie DES - jedoch unabhängiger von den Netzeinstellungen - funktioniert. Auf transiente Simulationen wird hier jedoch nicht weiter eingegangen.

2.9 Fehler und Genauigkeit einer CFD-Simulation

Bei CFD-Simulationen können folgende Fehler auftreten, vgl. u. a. FRANKE (COST) [7] und MENTER [17]:

- Numerische Fehler
 - Lösungsfehler (solution error = discretisation error)
 - Numerische Diffusion
 - Diskretisierungsfehler (räumlich und zeitlich) und Abbruchfehler
 - Rundungsfehler
 - Iterationsfehler
- Modellfehler
- Anwenderfehler

- Softwarefehler
- Anwendungsunsicherheiten

2.9.1. Numerische Fehler

Numerische Fehler ergeben sich aus der Differenz zwischen den exakten analytischen Gleichungen und den diskretisierten vom CFD Code zu lösenden Gleichungen. Sie können v. a. durch ein hochwertiges Rechennetz (und bei transienten Berechnungen durch kleinere Zeitschritte) verringert werden.

2.9.1.1 Lösungsfehler (discretisation error)

Von den numerischen Fehlern ist der Lösungsfehler (solution error), der sehr oft als discretisation error bezeichnet wird, am relevantesten und kann global durch die Anwendung passender Normen formuliert werden. Das Ziel ist, diesen Fehler bis zu einem akzeptablen Limit zu reduzieren. Da die exakte Lösung jedoch nicht bekannt ist, kann man diesen Fehler nicht direkt berechnen, sondern nur abschätzen. Dafür wird häufig eine systematische Netzverfeinerung (und bei transienten Simulationen auch eine Zeitschrittverfeinerung) durchgeführt. z.B. werden die Element-Seitenlängen um einen bestimmten Faktor vergrößert bzw. verkleinert, siehe auch Abschnitt 2.9.6.4.

2.9.1.2 Numerische Diffusion

Der Abbruchfehler des numerischen Diskretisierungsverfahrens verursacht die sog. numerische bzw. unphysikalische Diffusion. Numerische Diffusion ist notwendig damit ein Lösungsverfahren numerisch stabil ist und ohne Oszillationen funktioniert. Dabei werden Gradienten der Strömungsgrößen verschmiert. Umso größer die Gradienten, umso größer ist die numerische Diffusion, d.h. direkt entlang eines umströmten Körpers, wo große Gradienten auftreten, wirkt sich dieser Effekt deutlich aus und Scher- und Grenzschichten sind in der Simulation z.B. dicker als sie tatsächlich sind. Im freien Strömungsgebiet in ausreichender Entfernung vom umströmten Körper kommt dieser Effekt nicht zum Tragen, vgl. u. a. LAURIEN/OERTEL [29], S. 75, 122, 223).

So kann man z.B. mit einem strukturierten Hexaeder-Netz die numerische Diffusion verringern, wenn - wie v. a. an Wänden - eine ausgeprägte Hauptströmungsrichtung vorhanden ist. Unstrukturierte Gitter produzieren im Vergleich dazu immer größere numerische Fehler, vgl. dazu Abbildung 15.

2.9.1.3 Diskretisierungs- und Abbruchfehler

Räumliche oder zeitliche Diskretisierungsfehler (\neq discretisation error !) entstehen durch die Verwendung von numerischen Lösungsschemata um Integrale anzunähern. Diese Schemata besitzen jeweils einen bestimmten Abbruchfehler (truncation error) bzw. eine bestimmte Fehlerordnung (1. oder 2. Ordnung). So besitzt z.B. die Zentrale Differenz bei der räumlichen Diskretisierung einen Abbruchfehler 2. Ordnung

und ist somit 2. Ordnung genau. Bei z.B. dem Rückwärts-Euler-Verfahren für die zeitliche Diskretisierung bei einer transienten Berechnung ist der Abbruchfehler 1. Ordnung. I. A. kann nur mit einem Abbruchfehler 2. Ordnung eine ausreichende Genauigkeit erreicht werden.

2.9.1.4 Rundungsfehler

Bzgl. Rundungsfehler ist anzumerken, dass die meisten CFD-Programme dem Anwender die Wahl zwischen einfacher und doppelter Berechnungs-Genauigkeit (single/ double precision) lassen. Bei einfacher Genauigkeit werden die Zahlen in 32bit (6-7 Dezimalstellen) und bei doppelter Genauigkeit in 64 Bit (14-15 Dezimalstellen) gespeichert. Auch wenn bei doppelter Genauigkeit doppelt so viel Speicher belegt wird, gibt es normalerweise keinen Grund, darauf zu verzichten. Lt. FRANKE (COST) [7] (S.25) sollte immer double precision verwendet werden. Ansonsten sei nachzuweisen, dass kein negativer Einfluss zufolge des Rundungsfehlers entsteht.

2.9.1.5 Iterationsfehler

Der Iterationsfehler tritt immer bei iterativen Methoden auf. Er ist die Differenz zwischen der Lösung des aktuellen Iterationsschrittes und der vollkonvergierten Lösung. Er ist das Residuum der Berechnung, dessen Verlauf beobachtet wird und kann als maximaler Wert (MAX) oder als quadratischer Mittelwert (root mean square - RMS) quantifiziert werden.

2.9.2. Modellfehler

Modellfehler resultieren aus der Anwendung von Modellen, wie z.B. durch das Verwenden von Turbulenzmodellen anstatt DNS. Sie können sehr groß werden, d.h. es kann zu Abweichungen in Größenordnungen von bis zu 100% kommen, vgl. MENTER [17]. Deshalb ist genau darauf zu achten, welches Modell für welche Anwendung verwendet wird, da jedes einzelne Modell i. A. für eine bestimmte Anwendung kalibriert wurde. Aus diesem Grund kann z.B. in BPGs nicht verallgemeinernd ein Turbulenzmodell empfohlen werden.

Weitere Modellfehler können die Wahl unpassender Randbedingungen, unpassender Initialisierungs-Einstellungen oder eine zu starke Vereinfachung sein.

2.9.3. Anwenderfehler

Durch unzulängliche Anwendung von CFD-Software, z.B. Schlampigkeit, Versehen, fehlende Erfahrung des Benutzers, etc. können ebenfalls Fehler entstehen. BPGs können dazu positiv beitragen. Aber es können auch unzureichende Hardware oder inadäquate Modelle in der Software zu Fehlern führen.

2.9.4. Softwarefehler

Softwarefehler können durch mangelhafte Implementierung der anzuwendenden Gleichungen in das Programm entstehen und sind somit Programmierfehler.

2.9.5. Anwendungunsicherheiten

Anwendungunsicherheiten entstehen aufgrund mangelnder Informationen über das zu lösende Problem, z.B. über Randbedingungen oder Objektgeometrien.

2.9.6. Fehlerkontrolle

Um die oben genannten Fehler abschätzen zu können, werden versch. Methoden verwendet, vgl. u.a. LAURIEN/OERTEL [29].

2.9.6.1 Validierung

Um Modellfehler zu vermeiden bzw. den Modellfehler richtig abzuschätzen, ist eine Validierung der verwendeten Modelle notwendig. So sollte z.B. mit Versuchen validiert werden, ob sich ein bestimmtes Turbulenzmodell für eine bestimmte Anwendung eignet. Bei Unsicherheiten diesbezüglich sollten versch. Modelle verwendet und verglichen werden, vgl. u.a. MENTER [17].

2.9.6.2 Verifikation

Die Verifikation gibt Auskunft über den numerischen Fehler, indem die richtige Lösung der Gleichungen, auf welche die Modelle basieren, kontrolliert wird.

2.9.6.3 Kalibrierung

Mangelt es an detaillierterem Wissen über bestimmte Parameter einer Software, wie z.B. Parameter eines Turbulenzmodells, werden die Einstellungen so gewählt, dass sich das Ergebnis mit vorhandenen (Versuchs-)Daten deckt. Diese Methode ist nicht empfehlenswert, da sie auf keine physikalischen oder mathematischen Grundlagen beruht. Jedoch ist diese Vorgangsweise oft die einzige Möglichkeit.

2.9.6.4 Netz-Konvergenzstudie (Generalisierte Richardson-Extrapolation und GCI)

Mit einer Gitter-Konvergenzstudie (grid convergence analysis) lässt sich der Lösungsfehler (discretisation error), der eine Folge des numerischen Abbruchfehlers (truncation error) ist, vom Modellfehler trennen, indem die Gesamtauflösung des Rechennetzes analysiert wird. Weitere Informationen dazu sind in Abschnitt 4.8 zu finden.

Im Zuge der Netz-Konvergenzstudie sollte man u. a. lt. FRANKE (COST) [7], wo im Anhang A1 auch die detaillierte Methodik dazu zu finden ist, eine sog. generalisierte Richardson-Extrapolation durchführen,

womit sich der discretisation error (siehe Abschnitt 2.9.1.1) abschätzen lässt. Dabei kann von drei Ergebnissen zufolge dreier Netzfeinheiten auf ein theoretisches Netz mit einer unendlichen Anzahl an Gitterpunkten - bzw. wenn die Elementlänge gegen Null geht ($h \rightarrow 0$) - auf das exakte Ergebnis geschlossen werden, obwohl eine solche Berechnung niemals durchgeführt werden kann, vgl. OERTEL [29]. Diese Extrapolation kann für jede Zielgröße und sowohl für räumliche als auch zeitliche Diskretisierung im Anschluss an die Simulationen angewendet werden.

Generalisierte Richardson-Extrapolation:

Es sind drei Ergebnisse f_1 , f_2 , und f_3 zufolge dreier unterschiedlich feiner Netze vorhanden, wobei Netz 3 das größte und Netz 1 das feinste Netz ist.

1. Aus den vorhandenen Elementlängen der drei Netze h_1 , h_2 und h_3 berechnet man jeweils den Verfeinerungsfaktor r :

$$r_{21} = \frac{h_2}{h_1} \quad \text{und} \quad r_{32} = \frac{h_3}{h_2} \quad (48)$$

Bei Tetraedern oder unstrukturierten Netzen kann r auch über die Anzahl der Knoten oder Zellen N_k und der Dimension im Raum D ermittelt werden (ROACHE [30]):

$$r_{21} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{1/D} \quad \text{und} \quad r_{32} = \left(\frac{N_2}{N_3} \right)^{1/D} \quad (49)$$

2. Dann berechnet man sich das Verhältnis der Ergebnisdifferenzen R :

$$R = \frac{f_2 - f_1}{f_3 - f_2} \quad (50)$$

Anhand von R können drei verschiedene Konvergenz-Verhaltensweisen unterschieden werden

$0 < R < 1$: monotone Konvergenz

$R < 0$: oszillatorische Konvergenz

$|R| > 1$: Divergenz

Für Divergenz kann keine Lösung extrapoliert werden und für oszillatorische Konvergenz sind weitere Untersuchungen bzw. mehr als drei Lösungen notwendig. Somit funktioniert die generalisierte Richardson-Extrapolation ausschließlich für monotone Netz-Konvergenz.

3. Wenn man also von monotoner Konvergenz ausgeht, kann im nächsten Schritt die Genauigkeits-Ordnung p mit einer iterativen Methode ermittelt werden:

$$p = \frac{\ln[(f_3 - f_2)]/(f_2 - f_1)}{\ln(r_{21})} - \frac{[\ln(r_{32}^p - 1) - \ln(r_{21}^p - 1)]}{\ln(r_{21})} \quad (51)$$

4. Die Abschätzung der exakten Lösung ergibt sich als eine Korrektur vom feinsten Netz zu:

$$f_{ex} = f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r_{21}^p - 1} \quad (52)$$

5. Die discretisation errors zu den jeweiligen Netzen ergeben sich dann aus der Differenz zu:

$$DE_1 = f_1 - f_{ex} = \frac{f_2 - f_1}{r_{21}^p - 1} \quad (53)$$

$$DE_2 = f_2 - f_{ex} = \frac{r_{21}^p \cdot (f_2 - f_1)}{r_{21}^p - 1} = r_{21}^p DE_1 \quad (54)$$

$$DE_3 = f_3 - f_{ex} = \frac{r_{32}^p \cdot r_{21}^p \cdot (f_2 - f_1)}{r_{21}^p - 1} = (r_{32} r_{21})^p DE_1 \quad (55)$$

Mit den discretisation errors kann überprüft werden, ob die jeweiligen Lösungen im asymptotischen Bereich liegen bzw. sich einem Wert annähern:

$$DE_1 = \frac{DE_2}{r_{21}^p} = \frac{DE_3}{(r_{32} r_{21})^p} \quad (56)$$

Wenn die Ergebnisse nicht im asymptotischen Bereich liegen, kann die Lösung nicht als netzunabhängig eingestuft werden.

Häufig verwendet man einen konstanten Verfeinerungsfaktor mit $r=r_{21}=r_{32}$ zwischen den Netzen. Dadurch vereinfachen sich die obigen Formeln zu:

$$p = \frac{\ln[(f_3 - f_2)]/(f_2 - f_1)}{\ln(r)} \quad (57)$$

$$f_{ex} = f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r^p - 1} \quad (58)$$

$$DE_1 = f_1 - f_{ex} = \frac{f_2 - f_1}{r^p - 1} \quad (59)$$

$$DE_2 = f_2 - f_{ex} = \frac{r^p \cdot (f_2 - f_1)}{r^p - 1} = r^p DE_1 \quad (60)$$

$$DE_3 = f_3 - f_{ex} = \frac{r^{2p} \cdot (f_2 - f_1)}{r^p - 1} = r^{2p} DE_1 \quad (61)$$

Weitere Informationen zur generalisierten Richardson-Extrapolation sind unter FRANKE (COST) [7] zu finden. In Abschnitt 6.3 wurde im Zuge der Netz-Konvergenzstudie eine generalisierte Richardson-Extrapolation am Referenzmodell durchgeführt.

Um einheitliche Angaben machen zu können, ist im Anschluss an die generalisierte Richardson-Extrapolation die Berechnung des Grid Convergence Index (GCI) nach ROACHE [31] eine standardisierte Methode.

Grid Convergence Index (GCI) nach ROACHE [31]:

Der Ausgangspunkt für die Berechnung des GCI ist die Größe des relativen Fehlers $|E|$ zwischen den Netzen:

$$|E_1| = \frac{1}{(r_{21}^p - 1)} \frac{|f_2 - f_1|}{|f_1|} \quad (62)$$

$$|E_2| = \frac{1}{(r_{32}^p - 1)} \frac{|f_3 - f_2|}{|f_2|} \quad (63)$$

$|E|$ definiert dabei ein Fehlerband um die Lösung des feineren Netzes ($f_1 \pm |E_1|$). Jedoch liegt die Lösung nur mit 50%-iger Sicherheit innerhalb dieses Bandes (vgl. ROY [32]), weshalb diese Schätzung üblicherweise mit einem Sicherheitsfaktor F_s multipliziert wird:

$$GCI_{21} = \frac{F_s}{(r_{21}^p - 1)} \frac{|f_2 - f_1|}{|f_1|} \quad (64)$$

$$GCI_{32} = \frac{F_s}{(r_{32}^p - 1)} \frac{|f_3 - f_2|}{|f_2|} \quad (65)$$

F_s soll gewährleisten, dass die Lösung mit größerer Wahrscheinlichkeit innerhalb des Fehlerbandes liegt. ROACHE [7] nennt diese Definition den GCI und schlägt vor, F_s folgendermaßen zu wählen:

- $F_s = 1,25$ wenn p aus Lösungen zufolge dreier Netze berechnet wurde
- $F_s = 3$ wenn p aus Lösungen zufolge zweier Netze berechnet wurde.

In FRANKE (COST) [7] sind auch alternative Ansätze für F_s zu finden.

Wenn r konstant ist, kann Mithilfe des GCI ebenfalls schnell überprüft werden, ob sich die Lösungen im asymptotischen Bereich befinden:

$$\frac{GCI_{32}}{r^p \cdot GCI_{21}} \approx 1 \quad (66)$$

Zum besseren Verständnis wurde Abbildung 32 aus BLOCKEN [27] entnommen, wo eine Netz-Konvergenzstudie anhand eines durchlüfteten Gebäudes durchgeführt wurde.

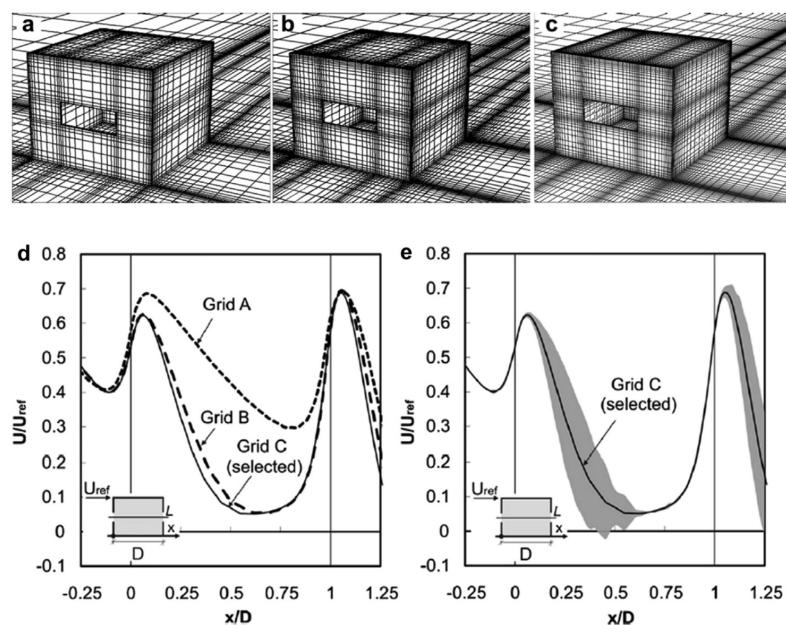


Fig. 19. (a–c) Perspective view of three computational grids for grid convergence analysis: (a) Coarse grid A with 144,696 cells; (b) Middle grid B with 314,080 cells; (c) Fine grid C with 575,247 cells (reference case). (d) Comparison of wind speed ratio U/U_{ref} along centerline through the window openings for the three grids. (e) Result on grid C with indication of band of $1.25 \times$ Grid Convergence Index by Roache [200,201]. (modified from Ref. [73]; ©Elsevier, reproduced with permission).

Abbildung 32: Beispiel einer grid convergence study inklusive GCI, aus BLOCKEN [27].

3. Best Practice Guidelines

In einem CFD-Programm müssen viele Einstellungen getroffen werden, die alle großen Einfluss auf das Ergebnis haben können. Einige Forscher und Institutionen haben sich bereits mit dem Thema CFD für urbane Strömungsprobleme auseinander gesetzt, woraus einige Best Practice Guidelines (BPGs) entstanden sind. BLOCKEN [27] fasst jene hervorragend zusammen, wobei die Relevantesten hier aufgelistet sind:

- Die European Research Community in Flow, Turbulence and Combustion (ERCOFTAC) verfasste im Jahr 2000 umfassende BPGs für industrielle CFD-Anwendungen, v.a. speziell für RANS-Simulationen. In der gegenständlichen MA werden diese jedoch nicht verwendet, da die Guidelines nur käuflich erwerblich sind und sie vermutlich konkret im Bereich von urbanen Strömungsproblemen nicht weiterhelfen können.
- Im Zuge des Projekts ECORA (Evaluation of Computational Fluid Dynamics Methods for Reactor Safety Analysis) baut MENTER et al. (2002, [17]) auf die ERCOFTAC Guidelines auf.
- Innerhalb der COST (European Cooperation in Science and Technology) Action C14 „Impact of wind and storm in city life and built environment“ gibt FRANKE et al. (2004) Ratschläge für CFD im Wind Engineering heraus. Später wird mit der COST Action 732 „Quality assurance and improvement of microscale meteorological models“ (SCHATZMANN, BRITTER, 2007) eine Erweiterung der Action C14 veröffentlicht: „Best Practice Guideline for CFD simulation of flows in the urban environment“ [7]. Beide Guidelines beziehen sich hauptsächlich auf stationäre RANS-Simulationen.
- In Japan hat eine Arbeitsgruppe des Architectural Institute of Japan (AIJ) ebenfalls BPGs erstellt. YOSHIE et al. (2007, [33]) trägt einen Teil mit seinem „Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the AIJ“ bei. TOMINAGA et al. veröffentlichen 2008 die „AIJ Guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings“ ([19], speziell für RANS) und TAMURA et al. den „AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings“ (2008, [34], speziell für LES).
- JAKEMAN et al. gibt 2006 die allgemeinen „Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models“ heraus, welche später von ROBSON et al. (2008), BLOCKEN und GUALTIERI (2012, [35]) und BLOCKEN et al. (2012) weiterentwickelt wurden.
- Tipps für Windströmungen und Dispersion bzw. Ausbreitung im Zusammenhang mit Wärmetransport, Luftaustausch und Ähnlichem liefert das Network for Quality and Trust in the

Industrial Application of CFD (QNET-CFD). Das wird an dieser Stelle erwähnt, für die MA ist es jedoch nicht relevant.

Des Weiteren erwähnt BLOCKEN noch BPGs bzgl. Verifikation, Validierung, Modellierung der atmosphärischen Grenzschicht, qualitativ hochwertiger Netzerstellung und Validierung mittels Labor-und Felduntersuchungen. Auf jene wird hier aber ebenfalls nicht genauer eingegangen, weitere Informationen sind z.B. in BLOCKEN [27] zu finden.

Die obigen Guidelines und eigene Forschungsergebnisse sind die Grundlage für BLOCKENS „Ten tips and tricks towards accurate and reliable CFD simulations“ unter Punkt 5 in dem Bericht von 2015 „Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations“ [27]. Die Modelle der gegenständlichen MA sind hauptsächlich in Anlehnung an diese 10 Tipps und Tricks in Kombination mit den BPGs vom AIJ [19] erstellt:

1. Erstellen eines Rechengebietes basierend auf dem richtungsbezogenen Verhältnis zwischen verstellter und freier Fläche (create a computational domain based on the directional blockage ratio)
2. Erstellen eines qualitativ hochwertigen Rechennetzes mit ausschließlich prismatischen Zellen (creating a high-quality computational grid consisting only of prismatic cells)
3. Bestimmen und Aufbringen geeigneter Rauheitsparameter (determining and imposing the appropriate roughness parameters)
4. Einstellen geeigneter Inlet-Randbedingungen (setting appropriate inlet boundary conditions)
5. Auswählen von Diskretisierungs-Schemata höherer Ordnung (selecting higher-order discretization schemes)
6. Setzen von stringenten Konvergenzkriterien und Vorsehen vor möglichem oszillatorischen Konvergenzverhaltens (setting stringent iterative convergence criteria and beware of oscillatory convergence)
7. Testen der horizontalen (In)homogenität in einem leeren Rechengebiet (testing horizontal (in)homogeneity in an empty computational domain)
8. Durchführen einer Netz-Konvergenzstudie inkl. Darstellung mit dem Netz-Konvergenz-Index (performing a grid convergence analysis and reporting it with the grid convergence index GCI from ROACHE ([31] 1994, [36] 1997))

9. Durchführen einer geeigneten Validierungsstudie (performing an appropriate validation study)
10. Dokumentieren von essentiellen Elementen des Modellierungs-Prozesses (reporting essential elements of the modeling process)

4. Modellerstellung mit ANSYS CFX

Die Modellerstellung für die MA in ANSYS CFX erfolgt wie bereits erwähnt hauptsächlich auf Basis der 10 Tipps und Tricks von Bert BLOCKEN [27] in Abstimmung mit den Guidelines des AIJ [19] für ein einzelnes Gebäude.

Ein Großteil der Grundlagen wurde bereits in Abschnitt 2 erklärt, deshalb finden sich in diesem Kapitel hauptsächlich ergänzende Informationen.

4.1 Erstellen des Rechengebietes

Es gibt zwei Varianten zur Bestimmung der Größe des Rechengebietes (computational domain):

- Bestimmung der Abstände der Gebietsgrenzen ausgehend vom Objekt als Vielfaches charakteristischer Abmessungen, wie z.B. der Höhe H
- Bestimmung mittels des Verhältnisses von Objekt- zu Gebietsquerschnitt (blockage ratio) (wird vorwiegend bei Windkanal-Versuchen verwendet)

Hier wird eine Kombination von beiden Varianten angewendet, wobei - wie in Abbildung 33 ersichtlich - folgende Abstände gewählt wurden:

- seitlich $5 \cdot H$
- oberhalb $5 \cdot H$
- stromaufwärts $6 \cdot H$ (mind. $5 \cdot H$)
- stromabwärts $10 \cdot H$.

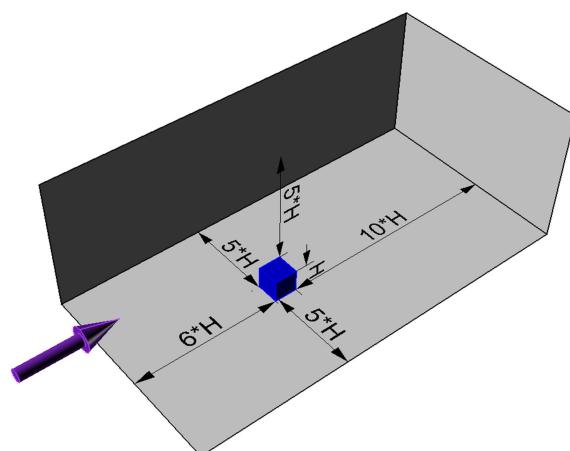


Abbildung 33: Abstände der Gebietsgrenzen vom umströmten Objekt in Abhängigkeit der Objekthöhe H

Für den Abstand stromabwärts werden versch. Empfehlungen ausgesprochen. FRANKE (COST) [7] empfiehlt nach dem Gebäude $15 \cdot H$, was lt. TOMINAGA [19] aber unnötig groß sein könnte. YOSHIE [33] merkt dazu an, dass ein zu großes Gebiet ohne jegliche Arten von Rauheitselementen zu unrealistischen Ergebnissen führen kann.

Mit den gewählten Abmessungen wird die Einhaltung des blockage ratios nach BLOCKENS Empfehlungen überprüft und eingehalten (siehe Abbildung 34):

Blockage ratio:

$$BR = \frac{A_{building}}{A_{domain}} < 3\% \quad (67)$$

$$BR = \frac{A_{building}}{A_{domain}} = \frac{10m \cdot 10m}{(11 \cdot 10m) \cdot (6 \cdot 10m)} = \frac{1}{66} = 1,52\% < 3\%$$

Directional blockage ratio:

$$BR_L = \frac{L_{building}}{L_{domain}} < 17\% \quad (68)$$

$$BR_H = \frac{H_{building}}{H_{domain}} < 17\% \quad (69)$$

$$BR_L = \frac{L_{building}}{L_{domain}} = \frac{10m}{11 * 10m} = \frac{1}{11} = 9,09\% < 17\%$$

$$BR_H = \frac{H_{building}}{H_{domain}} = \frac{10m}{6 * 10m} = \frac{1}{6} = 16,67\% < 17\%$$

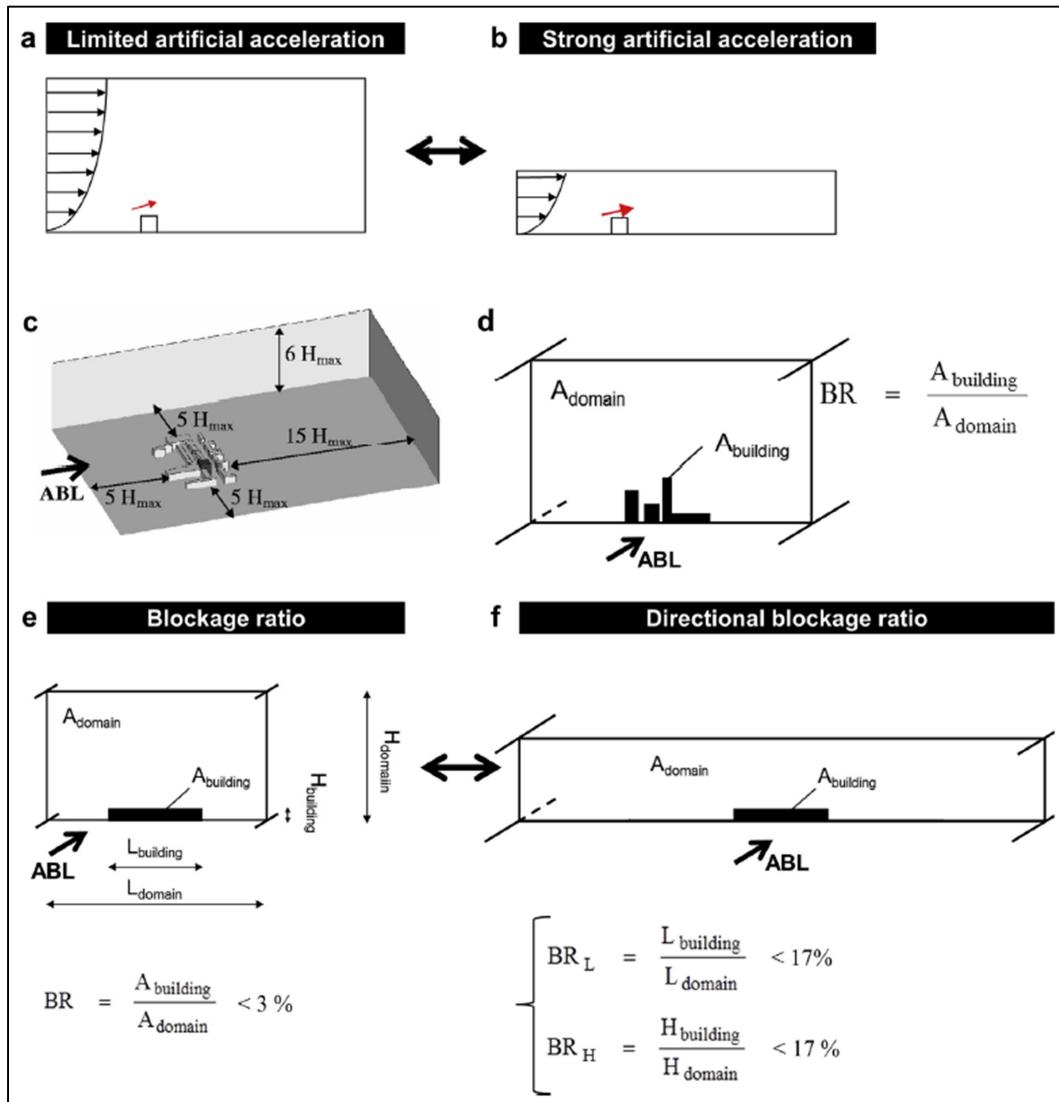


Abbildung 34: Erklärung des blockage ratios, aus BLOCKEN [27].

4.2 Erstellung eines qualitativ hochwertigen Rechengitters

4.2.1. Globale Netzeinstellungen

BLOCKEN [27] schreibt, dass ausschließlich Hexaeder und prismatische Elemente verwendet werden sollten, da diese eine deutlich bessere Konvergenz und geringere Abbruchfehler erzielen. Dieses Verhalten wird bei den ersten Test-Simulationen mit Tetraedern im Zuge der MA bestätigt. Vor allem an den Wänden sollten die Netzlinien rechtwinklig auf die Wände stehen, weshalb Tetraeder-Elemente an der Wand ohnehin nicht in Frage kommen.

I. A. sollte viel Wert auf die Netzerstellung gelegt werden. Zusätzlich zu den allgemeinen Anforderungen eines qualitativ hochwertigen Netzes (siehe 2.4) wird für Gebäudeumströmungen Folgendes empfohlen, vgl. BLOCKEN [27], TOMINAGA [19] und FRANKE (COST) [7]:

- Wie bereits erwähnt sollten hauptsächlich Hexaeder-Elemente verwendet werden.
- Für eine global ausreichende Netzfeinheit bzw. Auflösung sollen mind. 10 Zellen pro Gebäudeseite und 10 Zellen pro Kubikwurzel des Gebäudevolumens verwendet werden und die Elementgröße sollte im Bereich von 1/10 der Größenordnung des Gebäudes liegen (ca. 0,5 bis 5,0m).
- Für einen sanften Größenübergang der Elemente und um den Abbruchfehler zu minimieren, sollte die Wachstumsrate (growth rate/stretching ratio/expansion ratio) unter 1,3 liegen.
- Entlang der unmittelbaren Grenzschicht um das umströmte Objekt sollten Inflations angeordnet werden. Wenn das SST Turbulenzmodell verwendet wird, sollten mind. 10 Schichten bei Verwendung von Wandfunktionen und mind. 15 Schichten bei direkter Auflösung verwendet werden, vgl. [14].
- An Kanten und Ecken sollten die Elemente verdichtet werden, da dort große Gradienten auftreten, welche akkurat aufgelöst werden sollten.

Die Netzverdichtung an Kanten und Ecken kann auf verschiedene Arten erfolgen. Eine Möglichkeit ist z.B. die Auswahl einer Linie oder eines Punktes mit der Vorgabe eines Einflussradius und einer Elementgröße. Bei den Modellen mit vertikalen Wänden der MA wurden die Objektkanten mit einer sog. Bias-Funktion eingeteilt, wobei z.B. beim Referenzmodell mit dem mittleren Netz folgende Einstellungen getroffen wurden, siehe Abbildung 35:

- Type: Number of Divisions: 30, d.h. die Kanten werden in 30 Abschnitte geteilt
- Bias Type: grading elements on both ends, d.h. die Elemente werden zu den Enden der Kanten hin kleiner
- Bias Option: Bias Factor 3, d.h. das Verhältnis des größten zum kleinsten Element ist 3/1

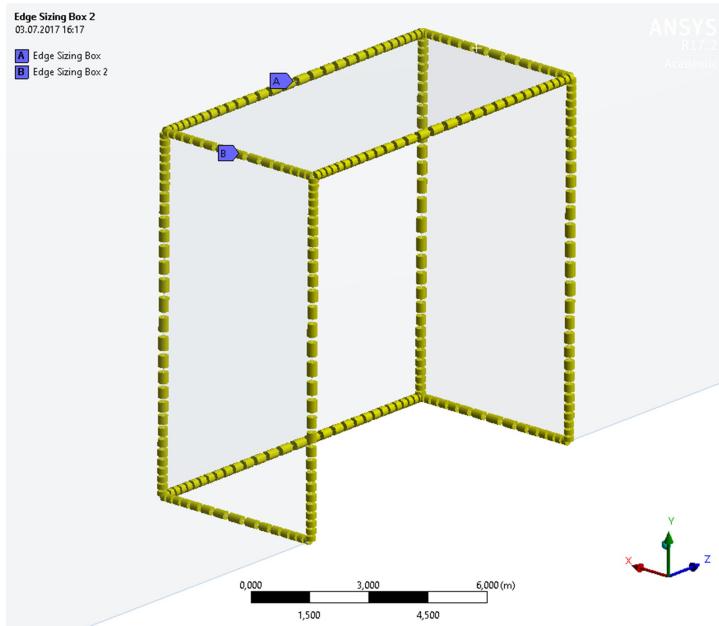


Abbildung 35: Netz-Einstellung mittels Bias an den Objektkanten (am 10x10x10m Referenz-Hexaeder)

4.2.2. Inflations-Einstellungen

Theoretisch müssten an allen überströmten Flächen aufgrund der Haftbedingung Inflations angeordnet werden, d.h. sowohl an der Objektoberfläche als auch am Boden. Da Inflations am Boden jedoch keinen Einfluss auf die Oberflächendrücke haben (siehe Kapitel 6.2), werden die Inflations am Boden weggelassen, wodurch gleichzeitig die Elementanzahl und somit der Rechenaufwand sinkt.

Für die MA werden bei den Modellen mit schrägen Wänden statt 10 bzw. 15 erforderlichen Schichten 35 Inflations-Schichten verwendet, um einen sanfteren Übergang zum restlichen Netz sicherzustellen. Die erste Schicht wird mit $\Delta y = 0,5\text{mm}$ und die Wachstumsrate mit 1,2 voreingestellt. Diese Eingaben resultieren aus einem angestrebten y^+ -Wert von 45 bis 60.

Bei den ersten Simulationen am Referenzmodell, dem 10x10x10m-Würfel, wo anfänglich noch Tetraeder-Elemente verwendet wurden, wurde festgestellt, dass das Upwind-Verfahren (numerisches Verfahren 1. Ordnung) deutlich besser konvergiert als das High-Resolution Lösungsverfahren (Upwind 2. Ordnung). Genau dieses Verhalten weist lt. BLOCKEN [27] auf ein schlechtes Rechennetz hin. Man soll aus diesem Grund keinesfalls auf ein Lösungsverfahren niedrigerer Ordnung ausweichen, sondern versuchen, die Netzqualität zu verbessern.

Bei Vergleichsrechnungen, bei denen die Inflations feiner eingestellt werden ($y^+ = 30$), wird ersichtlich, was SALIM [20] bei seinen Untersuchungen auch festgestellt hat: Wird die Grenzschicht zu fein aufgelöst bzw. reichen die Inflations bis zum buffer layer hinein, können Konvergenzprobleme auftreten. Es fällt bzgl. sehr feiner Grenzschicht-Auflösung Folgendes auf:

1. Möglichkeit: Die MP-Druckverläufe schlagen deutlich mehr aus bzw. oszillieren extremer, wobei der jeweilige Mittelwert dem Wert der ursprünglichen Modelle mit größerer Grenzschichtauflösung entspricht.
2. Möglichkeit: Die MP-Druckverläufe schlagen sehr extrem in unrealistische Werte aus und es ist kein Mittelwert erkennbar.
3. Möglichkeit: Die MP-Verläufe oszillieren weniger extrem bzw. die Amplituden sind geringer, wobei der Mittelwert dem Wert der ursprünglichen Modelle mit größerer Grenzschichtauflösung entspricht.

Alle drei Möglichkeiten kommen vor und es kann keine klare Aussage darüber getroffen werden, wann eine Auflösung zu fein sein könnte.

4.2.3. „Surface-grid-extrusion-technique“

BLOCKEN/VAN HOFF [4] haben eine Methode entwickelt, Netze mit ausschließlich prismatischen Elementen von hoher Qualität zu erstellen, die sog. „Surface-grid-extrusion technique“. Diese ist v.a. für komplexe Geometrien oder ganze Gebäudeanordnungen zu empfehlen.

Da bei der gegenständlichen MA geometrisch sehr einfache Einzelgebäude untersucht werden, wird diese Technik jedoch nur vom allgemeinen Prinzip her und nicht im Detail angewendet.

4.3 Anwenden passender Rauheitsparameter

Bei Oberflächen wird zwischen großkaligen und kleinskaligen Rauheiten unterschieden. Großkalige Rauheiten kann man sich als Bäume, Autos, Schilder, kleine Gebäude usw. vorstellen, welche mit aerodynamischen Rauheitslängen z_0 beschrieben werden. Im Gegensatz dazu ist die Gebäudeoberfläche (Fassade usw.) eine kleinskalige Rauheit, die üblicherweise mit äquivalenten Sandkorn-Rauheitshöhen k_s beschrieben wird. In Abbildung 36 sind beide Varianten schematisch dargestellt.

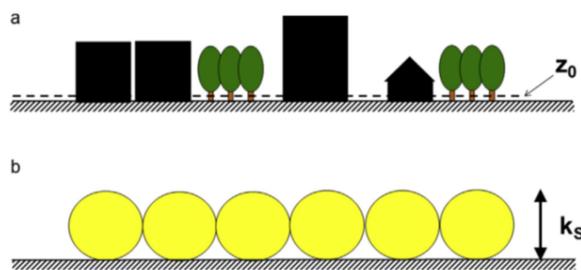


Abbildung 36: Schematische Darstellung der aerodynamischen Rauheitslänge z_0 und der korrespondierenden Sandkorn-Rauheitshöhe k_s , aus BLOCKEN [27].

Es ist zu beachten, welche Einstellungen im CFD-Programm möglich sind bzw. welchen Wert das Programm verwendet. Dabei sollten k_s und z_0 nicht verwechselt werden, denn k_s ist meist um eine Ordnung größer als z_0 . ANSYS CFX verwendet ausschließlich k_s -Werte, da es ursprünglich für Anwendungen im Maschinenbau – wo meistens k_s verwendet wird – entwickelt wurde.

BLOCKEN [27] hat aus diesem Grund für verschiedene CFD-Programme (ANSYS FLUENT und CFX, OpenFOAM) eine Beziehung zwischen k_s und z_0 hergeleitet, was FRANKE (COST) [7] bestätigt. Die entsprechenden Beziehungen lauten:

$$\text{CFX: } k_s = 29,6 \cdot z_0 \quad (70)$$

$$\text{FLUENT und OpenFOAM: } k_s = \frac{9,739 \cdot z_0}{C_s} \quad \text{mit } C_s \text{ als Rauheits-Konstante.} \quad (71)$$

Angaben für z_0 kann man z.B. der „Updated Davenport-Wieringa roughness classification“ (Abbildung 38) in Abhängigkeit von der Landschaftsklassifikation bzw. Geländekategorie entnehmen, oder wie bei dieser MA direkt aus den Vorgaben der ÖNORM EN 1991-1-4 [2] (Abbildung 37).

Geländekategorie	z_0 m	z_{\min} m
0 See, Küstengebiete, die der offenen See ausgesetzt sind	0,003	1
I Seen oder Gebiete mit niedriger Vegetation und ohne Hindernisse	0,01	1
II Gebiete mit niedriger Vegetation wie Gras und einzelne Hindernisse (Bäume, Gebäude) mit Abständen von min. 20-facher Hindernishöhe	0,05	2
III Gebiete mit gleichmäßiger Vegetation oder Bebauung oder mit einzelnen Objekten mit Abständen von weniger als der 20-fachen Hindernishöhe (z. B. Dörfer, vorstädtische Bebauung, Waldgebiete)	0,3	5
IV Gebiete, in denen mindestens 15 % der Oberfläche mit Gebäuden mit einer mittleren Höhe größer als 15 m bebaut sind.	1,0	10
Die Geländekategorien sind in Anhang A.1 illustriert.		

Abbildung 37: Geländekategorien und Geländeparameter, aus ÖNORM EN 1991-1-4:2013 4.3.2 Tab. 4.1 [2].

z_0 (m)	Landscape description
1 0.0002 sea	Open sea or lake (irrespective of the wave size), tidal flat, snow-covered flat plain, featureless desert, tarmac, concrete, with a free fetch of several kilometers.
2 0.005 smooth	Featureless land surface without any noticeable obstacles and with negligible vegetation; e.g. beaches, pack ice without large ridges, morass, and snow-covered or fallow open country.
3 0.03 open	Level country with low vegetation (e.g. grass) and isolated obstacles with separations of at least 50 obstacle heights; e.g. grazing land without windbreaks, heather, moor and tundra, runway area of airports.
4 0.10 roughly open	Cultivated area with regular cover of low crops, or moderately open country with occasional obstacles (e.g. low hedges, single rows of trees, isolated farms) at relative horizontal distances of at least 20 obstacle heights.
5 0.25 rough	Recently-developed "young" landscape with high crops or crops of varying height, and scattered obstacles (e.g. dense shelterbelts, vineyards) at relative distances of about 15 obstacle heights.
6 0.50 very rough	"Old" cultivated landscape with many rather large obstacle groups (large farms, clumps of forest) separated by open spaces of about 10 obstacle heights. Also low large vegetation with small interspaces such as bush land, orchards, young densely-planted forest.
7 1.0 closed	Landscape totally and quite regularly covered with similar-size large obstacles, with open spaces comparable to the obstacle heights; e.g. mature regular forests, homogeneous cities or villages.
8 ≥ 2.0 chaotic	Centers of large towns with mixture of low-rise and high-rise buildings. Also irregular large forests with many clearings.

Abbildung 38: Updated DAVENPORT-WIERINGA-Rauheitsklassifikation, aus BLOCKEN [27].

TOMINAGA [19] empfiehlt, alle Gebäude rund um das Ziel-Objekt (mind. bis zu einem radialen Abstand von 1 bis $2 \cdot H$) genau mit zu modellieren. Zusätzlich sollten alle Gebäude in der näheren Umgebung grob modelliert werden, damit die Rauheit der umliegenden Elemente akkurater wiedergegeben wird. Alles Weitere kann laut dem AIJ über äquivalente Sandkorn-Rauheitshöhen k_s oder über aerodynamische Rauheitslängen z_0 berücksichtigt werden.

Bei den Modellen der MA werden die Einzelbauwerke mit ihrer Geometrie und mit einer glatten Oberfläche (non slip wall - smooth wall) modelliert und die Rauheit des umliegenden Gebiets bzw. des Bodens wird der jeweiligen GK entsprechend mit einem k_s -Wert eingegeben. Die Rauheit außerhalb des Rechengebiets wird ebenfalls entsprechend GK über die Turbulenz als Randbedingung für das Inlet eingegeben. Dafür wird der Verlauf der Turbulenzintensität $I(z)$ und die Eddy Length Scale (ELS) vorgegeben (siehe Abschnitt 4.4.1).

4.4 Festlegen der Randbedingungen

Für die gegenständliche MA wird die robusteste Variante der möglichen RB-Kombinationen verwendet (siehe auch Abschnitt 2.5.2):

- Geschwindigkeitsprofil am Inlet
- Statischer Druck am Outlet.

4.4.1. Einströmrand (Inlet)

Für das Inlet wird also ein Geschwindigkeitsprofil vorgegeben. Dieses setzt sich aus dem Profil der mittleren (Spitzen-)Geschwindigkeiten $U(z)$ und der sog. Turbulenzintensität $I(z)$ zusammen. Dabei ist die Turbulenzintensität als die Standardabweichung der Turbulenz geteilt durch die Windgeschwindigkeit definiert, vgl. ÖNORM EN 1991-1-4 [1] und TOMINAGA [19]:

$$I(z) = \frac{\sigma_u(z)}{U(z)} \quad (72)$$

Üblicherweise wird für das Geschwindigkeitsprofil $U(z)$ ein Potenzgesetz verwendet:

$$U(z) = U_G \cdot \left(\frac{z}{z_G} \right)^\alpha \quad (73)$$

mit U_G als der Geschwindigkeit bei der Referenzhöhe z_G und α als Exponent, der von der GK abhängig ist.

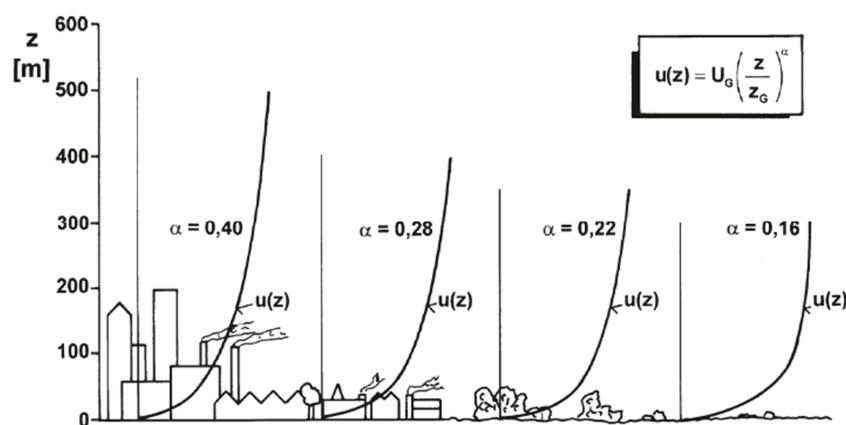


Abbildung 39: Profile der atmosphärischen Grenzschicht über versch. Landschaftsformen mit den zugehörigen Exponenten α nach DAVENPORT (1960), aus HUCHO [3] Bild 5.6.

Für die MA werden die Spitzengeschwindigkeits- und Turbulenzintensitäts-Profil $U(z)=v_p(z)$ und $I(z)$ aus der ÖNORM B 1991-1-4 [2] (Abbildung 40) verwendet, da auch ein direkter Vergleich mit der Norm stattfinden soll:

$$v_p(z) = v_{b,0} \cdot \sqrt{\frac{q_p}{q_{b,0}}} \quad \text{z.B. für GK2} \quad v_{p,GK\ II}(z) = v_{b,0} \cdot \sqrt{2,1 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,24}}. \quad (74)$$

Beide Profile können in CFX als Expressions (CFX Expression Language - CEL) eingegeben werden.

Gelände-kategorie	$\frac{q_p}{q_{b,0}} = \left(\frac{v_p}{v_{b,0}} \right)^2$	$\frac{q_m}{q_{b,0}} = \left(\frac{v_m}{v_{b,0}} \right)^2$	$I_v(z)$	z_{\min}
	m			
II	$2,1 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,24}$	$\left(\frac{z}{10} \right)^{0,3}$	$0,18 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{-0,15}$	5
III	$1,75 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,29}$	$0,593 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,42}$	$0,29 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{-0,21}$	10
IV	$1,2 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,38}$	$0,263 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{0,64}$	$0,46 \cdot \left(\frac{z}{10} \right)^{-0,32}$	15

Es bedeutet:

q_p Spitzengeschwindigkeitsdruck
 q_m mittlerer Geschwindigkeitsdruck (10-min-Mittel)
 $q_{b,0}$ Referenzwert des Geschwindigkeitsdruckes (10-min-Mittel in 10 m Höhe, Gelände II)
 $I_v(z)$ Turbulenzintensität
 z Höhe über Grund
 z_{\min} minimale Höhe, bis zu der das jeweilige Profil gilt; darunter ist der Wert für z_{\min} zu nehmen

Abbildung 40: Geländekategorien und Geländeparameter, aus ÖNORM B 1991-1-4: 2013-05-01, Tab. 1 [2].

In BLOCKEN [27] (S.237) und TOMINAGA [19] (S.1754) sind alternative Angaben sowohl zu $v(z)$ und $I(z)$, als auch zur Eingabe über die turbulente kinetische Energie $k(z)$ und die turbulente Dissipation $\varepsilon(z)$ zu finden.

Dabei stehen alle Eingabevarianten über die folgenden Gleichungen für eine atmosphärische Grenzschicht in direktem Zusammenhang, vgl. TOMINAGA [19], S. 1754 und SCHWARZE [12], S.149:

$$k(z) = \frac{\sigma_u^2(z) + \sigma_v^2(z) + \sigma_w^2(z)}{2} \cong \sigma_u^2(z) \cong (1,00 \div 1,50) \cdot I(z)^2 \cdot U(z)^2 \quad (75)$$

$$\varepsilon(z) \cong C_\mu^{\frac{1}{2}} \cdot k(z) \cdot \frac{dU(z)}{dz} \cong (0,16 \div 1,00) \cdot \frac{k(z)^{3/2}}{L} \quad (76)$$

$$\text{bzw. } \omega(z) = \frac{\varepsilon(z)}{k(z)} \cong 1,8 \cdot \frac{\sqrt{k(z)}}{L} \quad (77)$$

$$\text{und } v(z) \cong \sqrt{1,5} \cdot U(z) \cdot I(z) \cdot L \quad (78)$$

mit $I(z)$...spezifische Turbulenzintensität

$U(z)$...mittlere Spitzen-Geschwindigkeit

LLänge der größten Turbulenzelemente (ELS)

$\omega(z)$...turbulente Frequenz

$\nu(z)$...kinematische Wirbelviskosität.

Für die Eingabe der Turbulenzintensität in ANSYS CFX steht eine ganze Palette an Varianten zur Verfügung, wobei für ein frei umströmtes Objekt nachfolgende in Frage kommen, vgl. [14], S. 76:

- Low 1% (Turbulenzintensität von 1% und Eddy Viscosity Ratio von 1)
- Medium 5% (Turbulenzintensität von 5% und Eddy Viscosity Ratio von 10)
- High 10% (Turbulenzintensität von 10% und Eddy Viscosity Ratio von 100)
- Intensity and (Eddy) Length Scale (ELS)
- Specified Intensity and Eddy Viscosity Ratio
- k and ε

Es wird die Variante „Intensity and Length scale“ verwendet, da hier auch Turbulenzwerte über 10% und Profile eingegeben werden können. Als Intensity wird das Turbulenzintensitätsprofil $I(z)$ je nach GK entsprechend der Norm eingegeben. Die ELS ist im Grunde eine physikalische Größe mit der Einheit [m] und soll die Größenordnung der größten Turbulenzballen (large eddies) einer turbulenten Strömung wiedergeben, vgl. u.a. YOSHIE [37].

Je nach Problemstellung und Turbulenzmodell gibt es verschiedene Ansätze für die Abschätzung der ELS. Es ist allgemein üblich, die ELS von einer charakteristischen Größe des Strömungsproblems abzuleiten, vgl. [5]:

- Bei einem Inlet zu einer Turbinenstufe (einen Kranz von Laufschaufeln mit dem zugehörigen Kranz von Leitschaufeln nennt man eine Stufe) ist die ELS z.B. 5% der Kanalhöhe [5].
- In Rohrströmungen wird die ELS aus dem hydraulischen Durchmesser abgeschätzt. Bei voll entwickelter Rohrströmung beträgt die ELS ca. 3,8% des hydraulischen Durchmessers, wobei dieser bei einem Kreisrohr dem Durchmesser des Rohres entspricht [5].
- Bei Verwendung des $k-\varepsilon$ Turbulenzmodells kann die ELS aus folgender Formel mit der Modellkonstante $C_\mu = 0,09$ abgeschätzt werden [5]:

$$l = C_\mu \cdot \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (79)$$

Dabei ist aber ebenso ein hydraulischer Radius für die Ermittlung von ε nötig, der bei freien Umströmungen nicht einfach zu definieren ist.

- Wenn die Eintrittsströmung durch Wände mit turbulenten Grenzschichten begrenzt wird, kann die ELS über die Dicke der Eintrittsgrenzschicht abgeschätzt werden → 22% der Dicke der Einlassgrenzschicht [5].
- Bei Umströmungen mit einer turbulenten Grenzschicht der Dicke δ_{Ein} am Einströmrand beträgt die ELS ca. $L = 0,5 \cdot \delta_{Ein}$ (SCHWARZE [12], S.149).
- Bei entwickelten Durchströmungen mit dem hydraulisch gleichwertigen Durchmesser $D_{H,ein}$ des durchströmten Einlassquerschnitts beträgt die ELS ca. $L = 0,1 \cdot D_{H,ein}$ (SCHWARZE [12], S.149).

Auch für die freie Strömung sollte man eine length scale verwenden, die aus der Größenordnung des umströmten Objekts abgeleitet wird. In Abschnitt 6.2.2 wird am 2D-Referenzmodell (10x10m- Würfel) eine Vorstudie zu verschiedenen ELS-Größenordnungen durchgeführt, wobei festgestellt wird, dass die ELS so gut wie keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Die verwendeten ELS-Werte betragen für alle Modelle zw. 15 und 60m und entsprechen in etwa den größten Turbulenzballen hinter dem umströmten Gebäude.

Wenn keine genauen Angaben bzgl. der Turbulenzintensität vorhanden sind, ist Medium (5%) die von ANSYS [25] empfohlene Einstellung, wobei diese Empfehlung für freie Umströmungen vermutlich nicht zutreffend ist.

Bei der Verwendung von CFD-Software ist zudem darauf zu achten, wie die length scale im jeweiligen Programm definiert ist. Bei ANSYS CFX basiert sie auf der Größe der größten Turbulenzballen (eddy length), wohingegen sie z.B. bei ANSYS FLUENT, PHOENICS oder CFD-ACE auf der sog. mixing-length basiert, welche ca. zwei Größenordnungen größer ist. So ändert sich der Prozentsatz bei Rohrströmungen von 3,8% auf 7%, die oben genannte Formel für die ELS wird zu $l = C_\mu^{3/4} \cdot \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$ [5] und bei Wand-begrenzten Insets wird die ELS 40% der Dicke der Eintrittsgrenzschicht.

Eine andere Möglichkeit zur Vorgabe der Inlet-RB ist die Eingabe über das Eddy-Viskositäts-Verhältnis (turbulent eddy viscosity ratio), was das Verhältnis von turbulenter Viskosität zu molekularer Viskosität darstellt. Das Eddy-Viscosity-Ratio μ_t/μ lässt sich ebenfalls aus k und ε ermitteln, wobei sich die turbulente Eddy-Viskosität mit $C_\mu=0,09$ als Konstante und der molekularen dynamischen Viskosität μ zu $\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot \frac{k}{\varepsilon}$ ergibt. Vorwiegend wird das Eddy-Viscosity-Ratio für Strömungsprobleme mit geringer Turbulenz und schwierig einzuschätzender length scale, wie z.B. Strömungen um Autos, U-Boote oder Flugzeuge, verwendet.

4.4.2. Ausströmrand (Outlet)

Im Outlet wird der statische Druck vorgegeben. Das kann als Vorgabe mit einem fixen Wert (static pressure) oder wie hier über den durchschnittlichen statischen Druck (average pressure) erfolgen. Bei der Einstellung mit dem durchschnittlichen Druck ist es dem statischen Druck erlaubt, lokal zu variieren bzw. ist das Druckprofil nicht fix vorgegeben. Es gibt mehrere Varianten für die Mittelung, wobei die Default-Einstellung bzw. Mittelung über das gesamte Outlet (average over whole outlet) verwendet wird.

Bei einem nicht klar definierten Druckprofil kann es zu Konvergenzproblemen kommen, weshalb es in den Einstellungen einen zusätzlichen Wert, den sog. Pressure Profile Blend -Faktor gibt. Dieser Wert führt zu einem Wechsel zwischen einem nicht-definierten und einem voll-definierten Druckprofil. Ein Wert von 0% bedeutet, dass ausschließlich der angegebene Druck für die Mittelung herangezogen wird. Der Default-Wert für den Pressure Profile Blend -Faktor beträgt 5% [14]. Wäre die Strömung sehr turbulent und es könnte überhaupt keine Aussage über das Druckprofil gemacht werden, wäre es physikalisch zutreffender die Vermischung auszuschalten bzw. den Wert auf 0% zu setzen.

Bei einem frei umströmten Gebäude muss der (durchschnittliche) statische Druck am Outlet auf jeden Fall 0 Pa betragen. Man könnte daher die Einstellung auch auf static pressure $p=0 \text{ Pa}$ setzen, es sollte sich jedoch gleich bleiben.

In allen Modellen der MA wird der average static pressure auf 0 Pa gesetzt, und der Default-Wert des Blend-Faktors von 5% beibehalten.

4.4.3. Objektoberfläche (wall)

Die Gebäude-Oberfläche wird als glatte reibungsbehaftete Oberfläche eingegeben (slip wall – smooth wall). Waren genauere Kenntnisse der Oberfläche, z.B. Rauheiten von Gebäudefassaden, vorhanden, könnten diese wie in Abschnitt 4.3 beschrieben als Sandkorn-Rauheitshöhen k_s berücksichtigt werden.

4.4.4. Bodenoberfläche (ground)

Wie in Abschnitt 4.3 erwähnt, wird die Rauheit des Bodens mit einem k_s -Wert eingegeben, der sich über die Rauheitslänge z_0 entsprechend der jeweiligen GK ermitteln lässt.

Da laut Windlast-Norm EN 1991-1-4 [1] bei den Geschwindigkeitsprofilen in Bodennähe immer Mindestgeschwindigkeiten bis zu einer Höhe von z_{min} (in Abhängigkeit der GK) vorgegeben werden und die Profile am Boden nicht gegen 0 m/s gehen, werden in Abschnitt 6.2 Voruntersuchungen zur Kombination von Mindestgeschwindigkeiten mit Rauheiten durchgeführt.

Des Weiteren werden ebenfalls in Abschnitt 6.2 Untersuchungen zu Inflations am Boden durchgeführt.

4.4.5. Seitliche und obenliegende Domain-Grenzen

Die seitlichen und obenliegenden Grenzen des Strömungsgebiets werden als reibungsfrei (free slip wall) eingegeben.

4.4.6. Symmetrie (symmetry)

Alle Berechnungen erfolgen am Halbsystem, weshalb sich durch die Objektmitte eine Symmetrieebene zieht. In Abbildung 41 ist das in Strömungsrichtung linke Halbsystem mit allen Randbedingungen dargestellt.

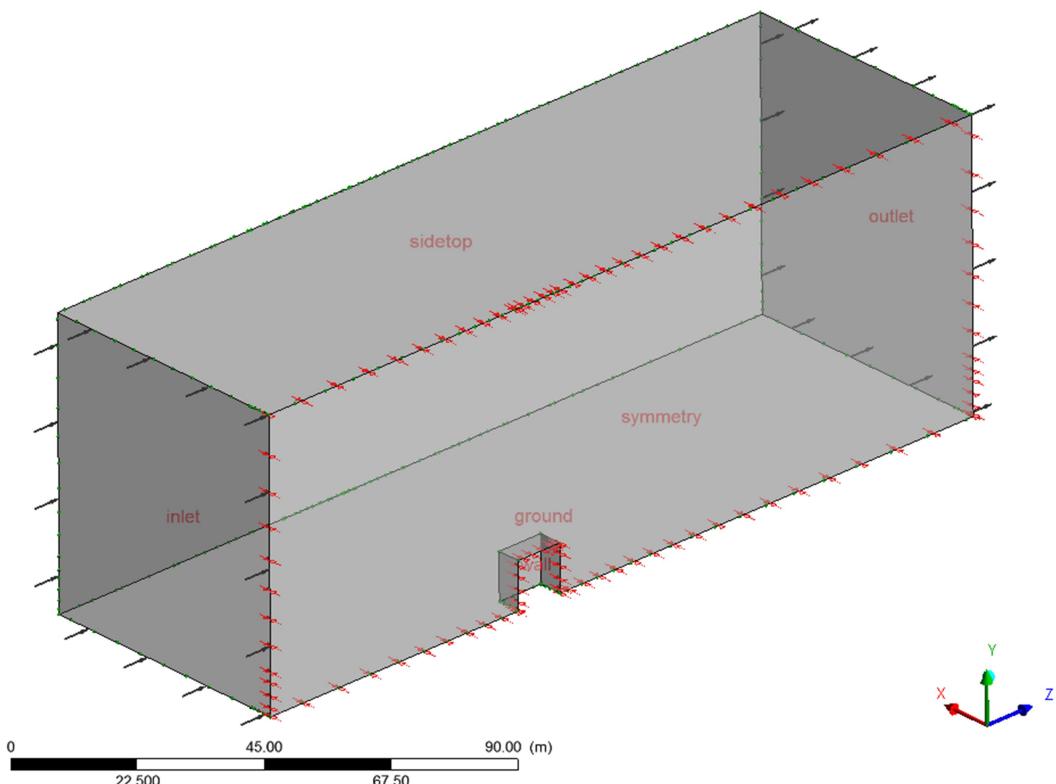


Abbildung 41: Halbsystem des 3D-Referenzmodells mit allen Randbedingungen
(Hexaeder mit vertikalen Wänden mit 10x10x10m)

In Abschnitt 6.2 werden Untersuchungen am Halb- und Vollsystem des Referenz-Hexaeders durchgeführt. Es wird bestätigt, dass die Simulationen der gegenständlichen Strömungsprobleme an Halbsystemen zulässig sind.

4.5 Auswahl von Diskretisierungsverfahren höherer Ordnung

Wie bereits in Abschnitt 2.7.1 erklärt wird, sollten für die Berechnung der Advektions- bzw. Konvektions-Terme in den Erhaltungsgleichungen und der Turbulenzen numerische Verfahren höherer Ordnung

verwendet werden. Daher wird für die gegenständlichen Simulationen jeweils das High Resolution-Verfahren gewählt.

4.6 Konvergenz-Kriterien und Vorsehen vor oszillatorischer Konvergenz

Wie bereits in Abschnitt 2.7.2 erklärt wird, müssen sinnvolle Konvergenz-Kriterien gewählt werden. Dazu werden während des iterativen Lösungsprozesses folgende Konvergenzverläufe beobachtet:

- die mittleren Werte der Residuen der 5 Erhaltungsgleichungen → RMS (root-mean-square) bzw. die quadratischen Mittelwerte $RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}}$
- die maximalen Werte der Residuen der 5 Erhaltungsgleichungen → MAX
- lokal definierte Punkte an der Objektoberfläche als MPs für Druckverläufe
- Imbalances von Masse, Impuls und Energie.

Das angestrebte Konvergenzkriterium der RMS-Residuen hängt sehr stark vom Strömungsproblem und der verlangten Genauigkeit ab, i. A. sind jedoch folgende Werte anzustreben:

- $> 10^{-4}$: ausreichend für eine qualitative Einschätzung des Strömungsverhaltens
- 10^{-4} : lose Konvergenz, aber für industrielle Anwendungen oft ausreichend
- 10^{-5} : gute Konvergenz und für die meisten Anwendungen leicht ausreichend
- 10^{-6} : strenge Konvergenz, die v. a. bei Geometrie-empfindlichen Problemen notwendig sein kann; oft ist dieses Konvergenz-Niveau – v.a. bei Berechnungen mit einfacher Genauigkeit (single precision) – nicht erreichbar

Es ist üblich, v. a. den Verlauf der RMS-Residuen zu analysieren. Die MAX-Residuen können z.B. zusätzlich dafür verwendet werden, lokale Stellen bzw. Singularitäten ausfindig zu machen. I. A. geht man davon aus, dass die MAX-Werte um zwei Größenordnungen über den RMS-Werten liegen. Ist der Unterschied jedoch deutlich größer, kann man davon ausgehen, dass die Netzqualität in gewissen Bereichen unzureichend ist. Diese Bereiche sind meist instabile Strömungsbereiche, z.B. dort wo die Strömung abreißt oder sich wiederanlegt.

In ANSYS POST kann man sich die Residuen graphisch, wie z.B. als Isoflächen, ausgeben lassen und so kritische Stellen – meist im Hinblick auf das Netz - ausfindig machen.

BLOCKEN [27] merkt an, dass vor allem die Ziel-Variablen, wie hier z.B. die Oberflächendrücke, beobachtet werden sollten. Wenn diese Variablen konstant sind oder um einen konstanten Wert oszillieren, kann die Simulation als konvergent angesehen werden, auch wenn das gewünschte Konvergenzkriterium nicht erreicht wird. Dieses Verhalten kann als ein transientes Strömungsverhalten bei einer stationären Berechnung interpretiert werden.

Für die Simulationen der MA wurde anfänglich versucht, RMS-Residuen von 10^{-4} zu erzielen. Da die RMS-Residuen jedoch niemals konvergieren, sondern sehr stark oszillieren, wird später pauschal 10^{-6} eingegeben um ein frühzeitiges Abbrechen der Berechnung zu verhindern. Der Fokus wird auf das Konvergenzverhalten der Verläufe der Punkte der Oberflächendrücke (MPs) gelegt. Die Druckverläufe an den in Abbildung 42 mit gelben Kreuzen dargestellten Punkten (MPs) oszillieren je nach Turbulenzintensität bzw. GK mehr oder weniger stark um einen Mittelwert. Daher sind die MP-Verläufe das ausschlaggebende Kriterium und die Simulationen können als konvergent angesehen werden.

In Abbildung 43 und Abbildung 44 ist dieses Konvergenzverhalten am Beispiel des 3D-Referenzmodells (siehe Abschnitt 6.2), dem Hexaeder mit vertikalen Wänden und Abmessungen von $10 \times 10 \times 10$ m, sehr gut erkennbar.

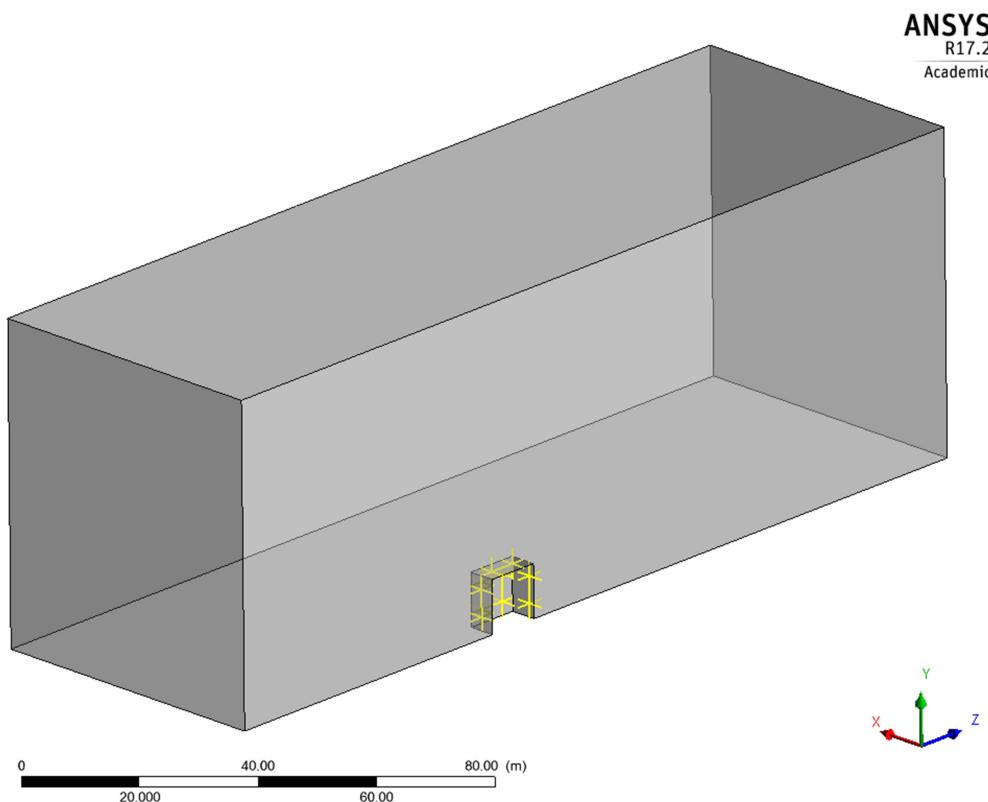


Abbildung 42: MPs der Oberflächendrücke am Objekt des 3D-Referenzmodells
(Hexaeder mit vertikalen Wänden mit $10 \times 10 \times 10$ m) – gelbe Kreuze

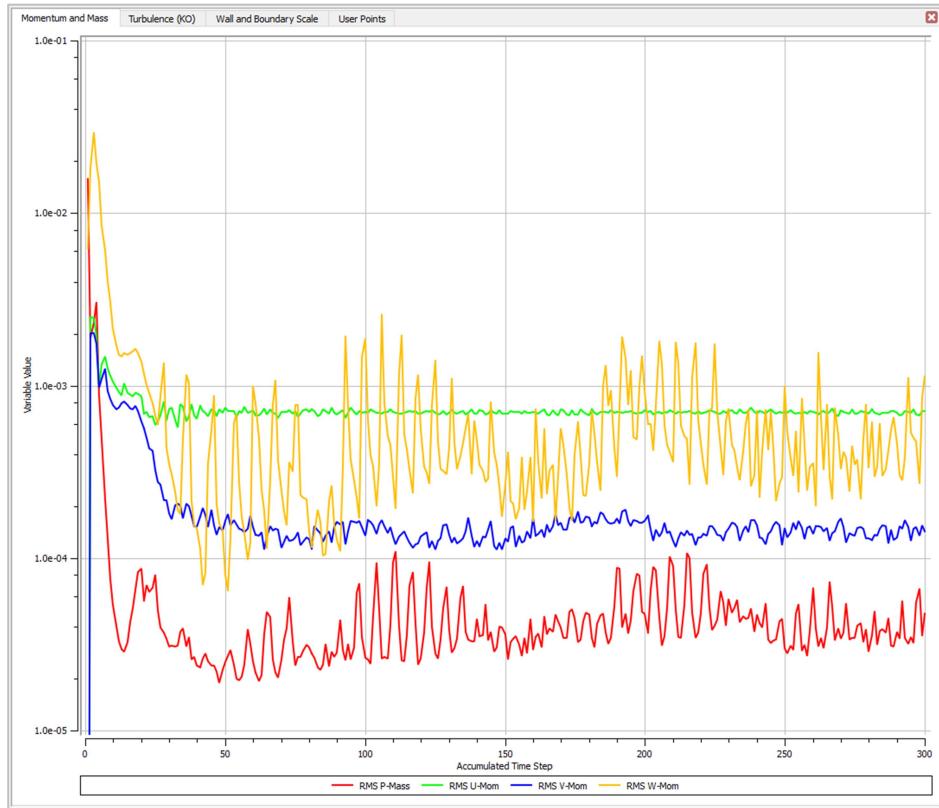


Abbildung 43: Konvergenzverlauf der Residuen der Erhaltungsgleichungen des 3D-Referenzmodells
(Hexaeder mit vertikalen Wänden mit 10x10x10m)

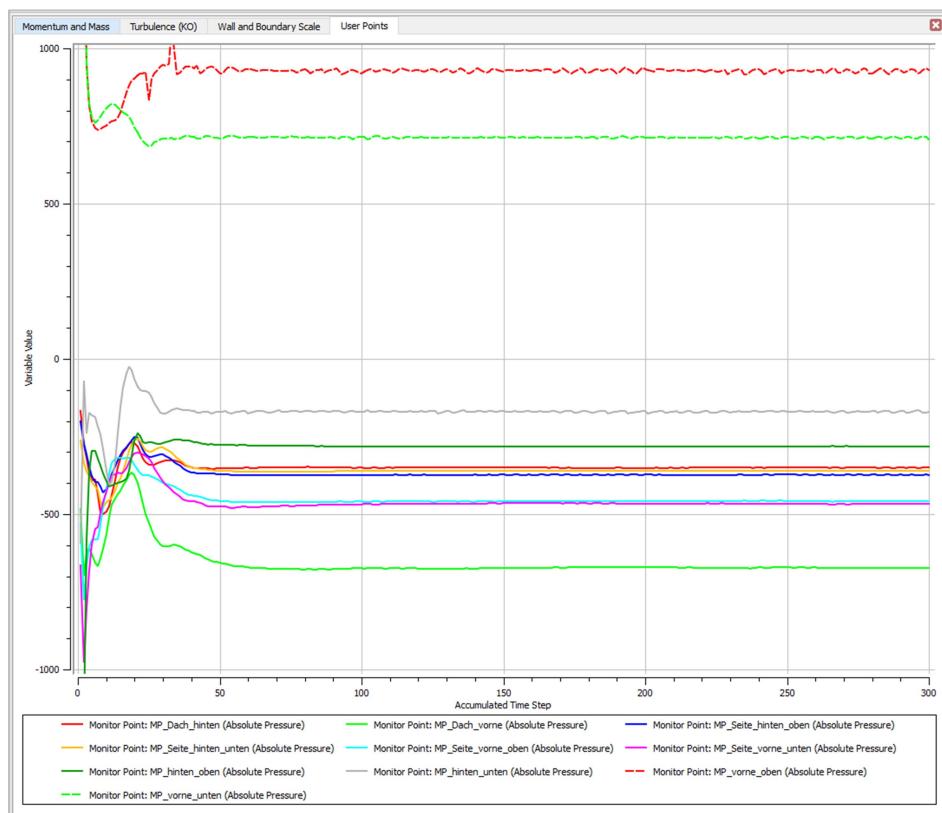


Abbildung 44: Konvergenzverlauf der Oberflächendrücke an den MPs des 3D-Referenzmodells
(Hexaeder mit vertikalen Wänden mit 10x10x10m)

Für die Auswertung der Zielwerte wurde jeweils jener Iterationsschritt herangezogen, der für möglichst alle MPs den Mittelwert repräsentiert. Mit dieser Vorgehensweise ist vorauszusehen, dass nicht jeder resultierende c_p -Wert genau dem jeweiligen Mittelwert entspricht, weshalb in den Ergebnissen eine gewisse Ungenauigkeit enthalten ist.

So wurde z.B. für das 20x20x20m Modell mit um 30° in Strömungsrichtung geneigten Wänden und der GK4 der 126. Iterationsschritt für die Auswertung der Daten verwendet, siehe Abbildung 45. In dieser Abbildung kann man gut erkennen, dass für die Dachfläche G wahrscheinlich nicht der exakte Mittelwert erfasst wurde, alle anderen Werte aber sehr gut getroffen werden konnten.

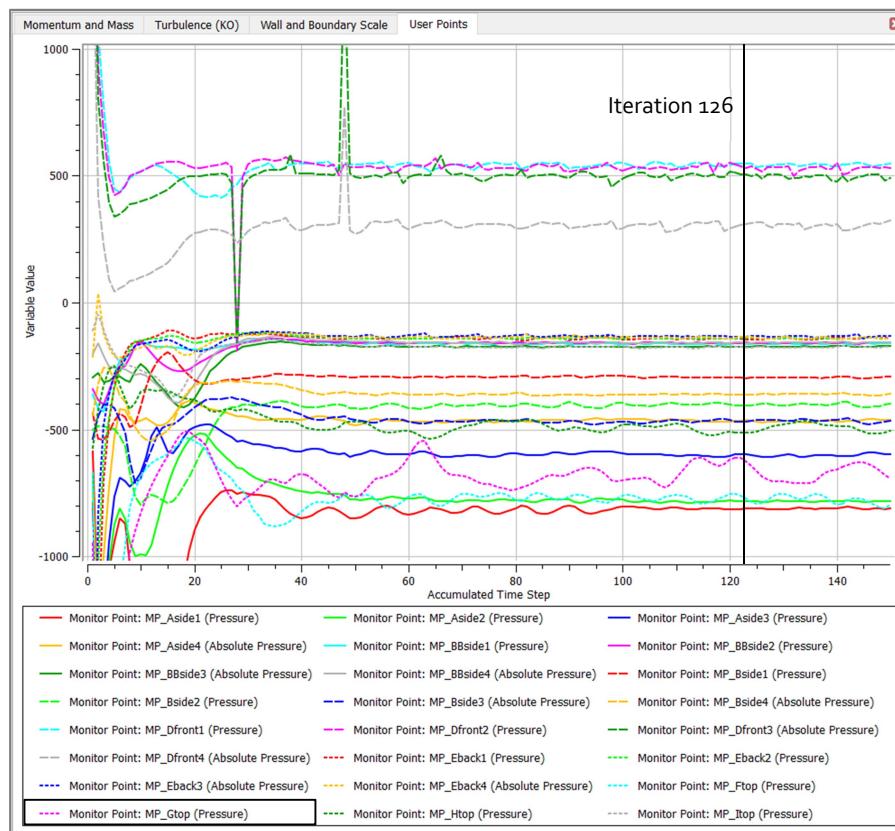


Abbildung 45: Konvergenzverlauf der MPs des Modells: $+30^\circ$ geneigte Wände - 20x20x20m – GK4

Theoretisch müssten die Werte über einen längeren Iterationszeitraum gemittelt werden, was aber den Rahmen dieser MA bzgl. Datenmenge und Auswertungsaufwand sprengen würde.

4.7 Überprüfen der horizontalen Homogenität des Geschwindigkeitsprofils

Vor den eigentlichen Berechnungen ist es lt. FRANKE (COST) [7] und BLOCKEN [27] ratsam, eine Analyse bzgl. der Einstellungen für das Netz und die Randbedingungen durchzuführen. Eine Methode dafür ist, die Berechnung mit einem leeren Rechengebiet ohne das umströmte Objekt durchzuführen. Bei konsistenten Einstellungen bleibt das im Inlet vorgegebene Geschwindigkeitsprofil über die ganze Länge

hindurch annähernd konstant. Ausschlaggebend dafür sind die Rauheiten der Bodenoberflächen und der Fläche an der Domain-Oberseite. In Abschnitt 6.2 wird eine Simulation mit leerer Domain durchgeführt.

4.8 Ausführen einer Netz-Konvergenzstudie und Angabe vom GCI

Wie bereits in Abschnitt 2.9.6.4 erwähnt, wird in der Literatur empfohlen, immer eine Netz-Konvergenzstudie durchzuführen. Dafür sollen lt. BLOCKEN [27] mind. drei Netze mit einem Verfeinerungs-Faktor von mind. 3,4 verglichen werden. Der Wert 3,4 ist die Kombination von allen drei Koordinatenrichtungen: $3,4^{\frac{1}{3}} = 1,50$. Daraus resultiert ein Verfeinerungs-Faktor von 1,50 je Richtung.

Im Zuge der Netz-Konvergenzstudie wird üblicherweise eine generalisierte Richardson-Extrapolation auf ein unendlich feines Netz durchgeführt und sich der Grid Convergence Index (GCI) nach ROACHE [38] ermittelt – siehe auch Abschnitt 2.9.6.4.

Die Ergebnisse bzw. resultierenden Zielgrößen, wie hier die Oberflächendrücke, sollten in Abhängigkeit der Netzfeinheit graphisch dargestellt werden. Die Netz-Konvergenzstudie ist bei den Untersuchungen am 3D-Referenzmodell in Abschnitt 6.2.2 zu finden.

FRANKE (COST) [7] merkt dazu Folgendes an: Sollte eine globale Netzverfeinerung aufgrund limitierter Rechnerleistung nicht möglich sein, soll zumindest eine lokale Verfeinerung in den relevanten Bereichen durchgeführt werden.

4.9 Ausführen einer Validierungs-Studie

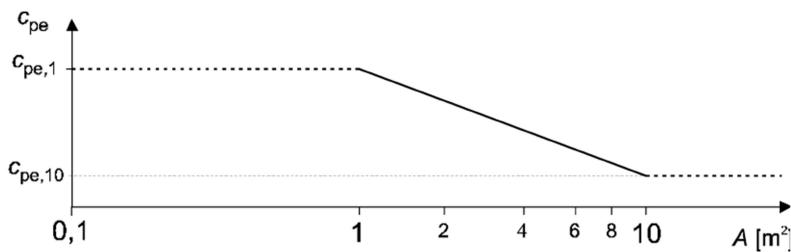
Im Zuge der MA wird keine ausführliche Validierungs-Studie durchgeführt. Stattdessen wird versucht, die BPGs und das gewonnene Wissen bestmöglich anzuwenden. Jedoch werden bei Unsicherheiten bzgl. gewisser Parameter, wie z.B. bei den Einstellungen der Inflations und der ELS, vereinfachte Simulationen am 2D-Modell durchgeführt, um den Einfluss einschätzen zu können. Mehr zu diesen Untersuchungen an den Referenzmodellen ist im Abschnitt 6.2 zu finden.

4.10 Dokumentieren essentieller Elementen des Modellierungs-Prozesses

In diesem Fall sind die kompletten Abschnitte 4 und 6 eine ausführliche Dokumentation der Modellierung der gegenständlichen Strömungssimulationen.

5. Vergleich zwischen CFD und Norm EN 1991-1-4 und B 1991-1-4

Ein Ziel der MA ist es, die Druckbeiwerte aus der Norm $c_{pe,Norm}$ mit den mit CFD ermittelten Werte $c_{pe,CFD}$ zu vergleichen. Die Norm unterscheidet dabei zwischen kleinen (1m^2) und großen Lasteinflussflächen (10m^2) und gibt dementsprechend unterschiedliche Beiwerte vor: $c_{pe,1}$ und $c_{pe,10}$. Die Druckbeiwerte für Lasteinflussflächen zwischen 1m^2 und 10m^2 können wie in Abbildung 46 dargestellt interpoliert werden.



Das Bild liefert folgenden Zusammenhang:

$$\text{für } 1 \text{ m}^2 < A < 10 \text{ m}^2 \quad c_{pe} = c_{pe,1} - (c_{pe,1} - c_{pe,10}) \log_{10} A$$

Abbildung 46: Außendruckbeiwerte c_{pe} in Abhängigkeit von der Lasteinflussfläche A ,
aus ÖNORM EN 1991-1-4 [1], Bild 7.2.

Für die Auswertungen im Zuge der MA werden ausschließlich die Druckbeiwerte $c_{pe,10}$ für große Einflussflächen herangezogen, denn $c_{pe,10}$ -Werte werden i. A. für die Bemessung von gesamten Tragwerken verwendet. Zur Vereinfachung wird $c_{pe,10}$ fortan als c_p oder c_{pe} bezeichnet.

Für einen direkten Vergleich zwischen Norm- und CFD-Ergebnissen werden einerseits dieselben Randbedingungen verwendet, d.h. es werden dieselben Geschwindigkeits-, Turbulenzintensitätsprofile und Bodenrauheiten verwendet. Andererseits werden die Gebäudeoberflächen für die CFD-Auswertung entsprechend der Norm eingeteilt, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen.

Man könnte in weiteren Schritten auch die Flächeneinteilung in Frage stellen oder anpassen, da die Einteilung nicht unbedingt der Druckverteilung der CFD-Simulationen entspricht, wie es z.B. in Abbildung 47 und Abbildung 48 für den 3D-Referenz-Hexaeder erkennbar ist. Für diese MA wird jedoch die ursprüngliche Einteilung beibehalten.

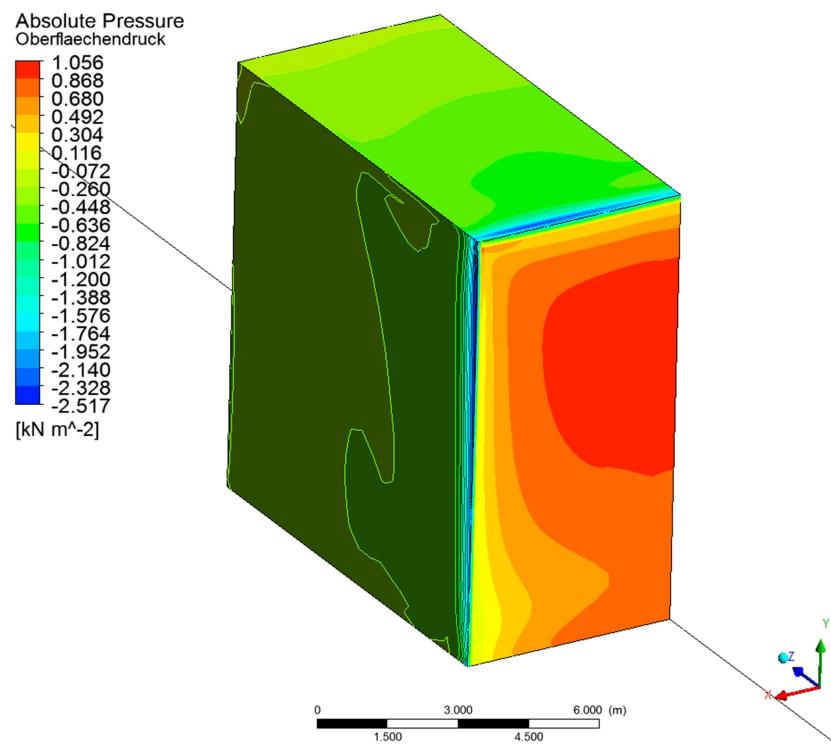


Abbildung 47: Druckverteilung am 3D-Referenzmodell in Strömungsrichtung gesehen

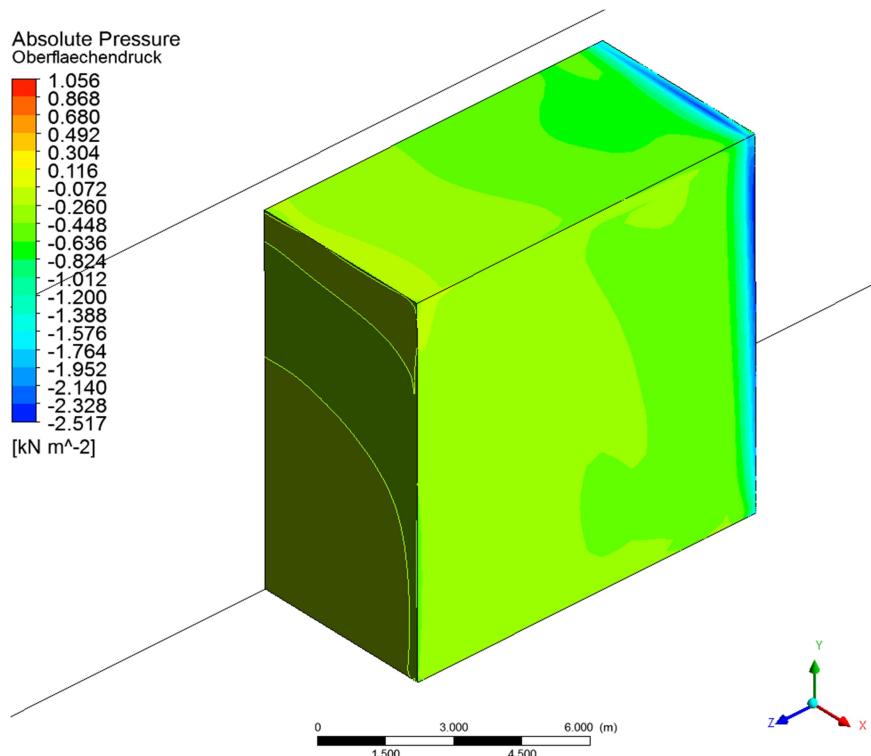


Abbildung 48: Druckverteilung am 3D-Referenzmodell entgegen der Strömungsrichtung gesehen

5.1 Randbedingungen

Theoretisch ist aufgrund der Rückrechnung auf dimensionslose c_p -Beiwerte der lokale Standort für den Grundwert der Basisgeschwindigkeit irrelevant. Es muss jedoch ein Wert festgelegt werden. Daher wird für alle Berechnungen, sowohl für die Ermittlung der Druckbeiwerte c_p nach Norm als auch als Eingabewerte in ANSYS, der Standort Innsbruck (573m ü.A.) verwendet, dessen Grundwerte dem Nationalen Anwendungsdokument der ÖNORM 1991-1-4 [2] entnommen werden:

- Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0} = 27,1 \text{ m/s}$
- Referenzwert des Geschwindigkeitsdruckes $q_{b,0} = 0,46 \text{ kN/m}^2$
- Innsbruck Stadt entspricht der GK4, trotzdem werden auch die anderen Geländekategorien GK2 und GK3 mit diesen Basiswerten berechnet.

Da der Richtungsfaktor c_{dir} und der Jahreszeitenbeiwert c_{season} in Österreich jeweils mit 1,0 angenommen werden, entspricht die Basisgeschwindigkeit v_b dem Grundwert $v_{b,0}$:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot v_{b,0}. \quad (8o)$$

5.2 Flächeneinteilung

Für einen direkten Vergleich werden die Gebäudeoberflächen in den CFD-Modellen der Norm entsprechend eingeteilt, siehe dazu Abbildung 49 und Abbildung 50.

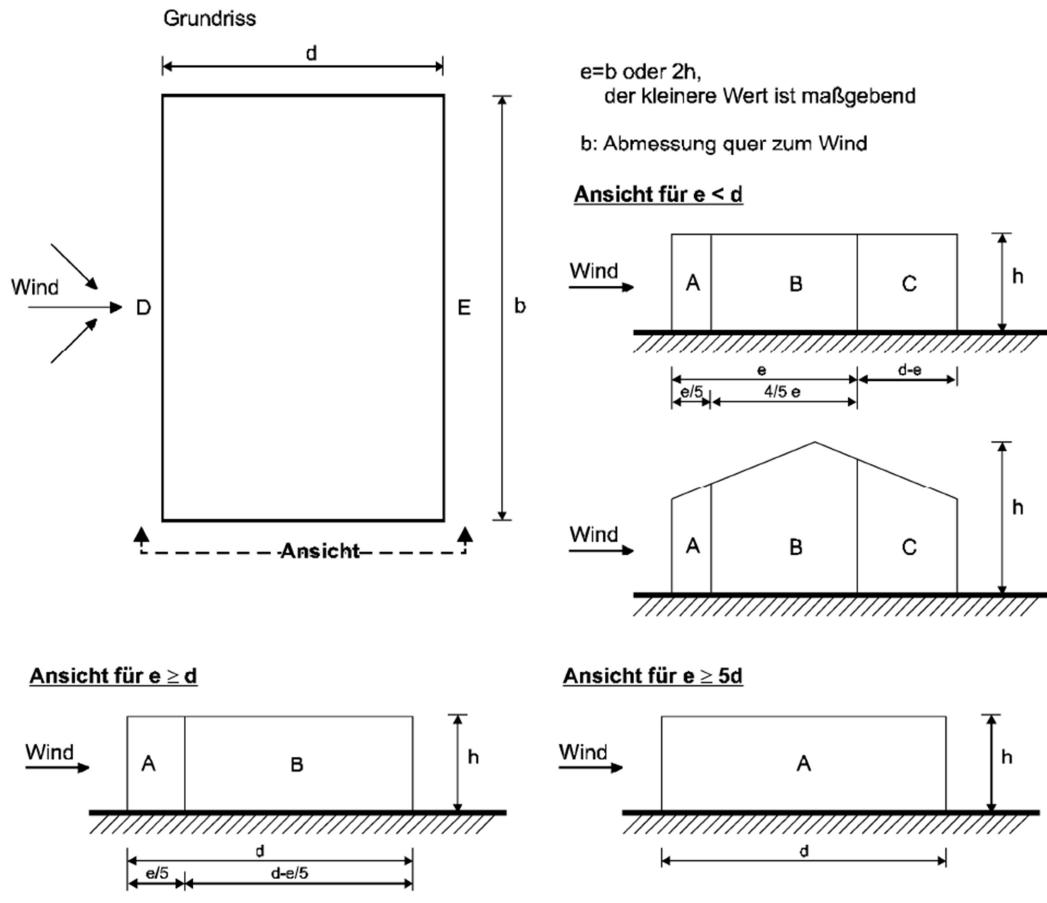


Abbildung 49: Einteilung der Seitenflächen lt. ÖNORM B 1991-1-4:2013 7.2.2 [2], Bild 7.5.

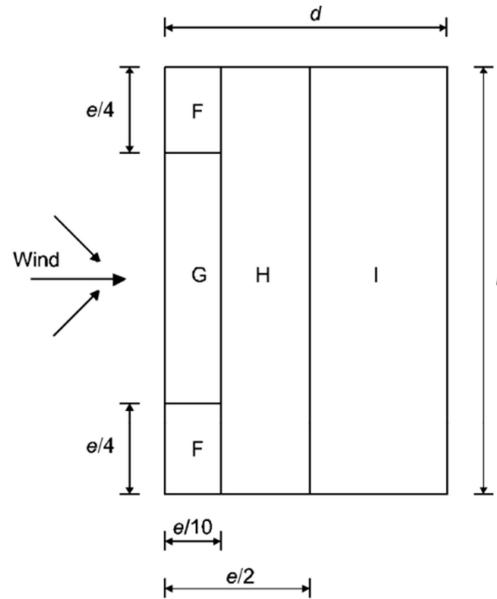


Abbildung 50: Einteilung der Dachflächen lt. ÖNORM B 1991-1-4:2013 7.2.3 [2], Bild 7.6.

5.3 Auswertung

Mittels CFD-Simulationen werden die durchschnittlichen Oberflächendrücke für die oben genannten Flächen berechnet → $w_{e,CFD}$. In ANSYS können mittels Expressions (CEL) in CFD-POST die durchschnittlichen Drücke auf ausgewählte Flächen ausgegeben werden.

Mit den Formeln aus Tab.1 der ÖNORM B 1991-1-4: 2013 [2], (Abbildung 40) werden je nach GK die Spitzengeschwindigkeitsdrücke in Abhängigkeit der Höhe z ermittelt → $q_p(z)$.

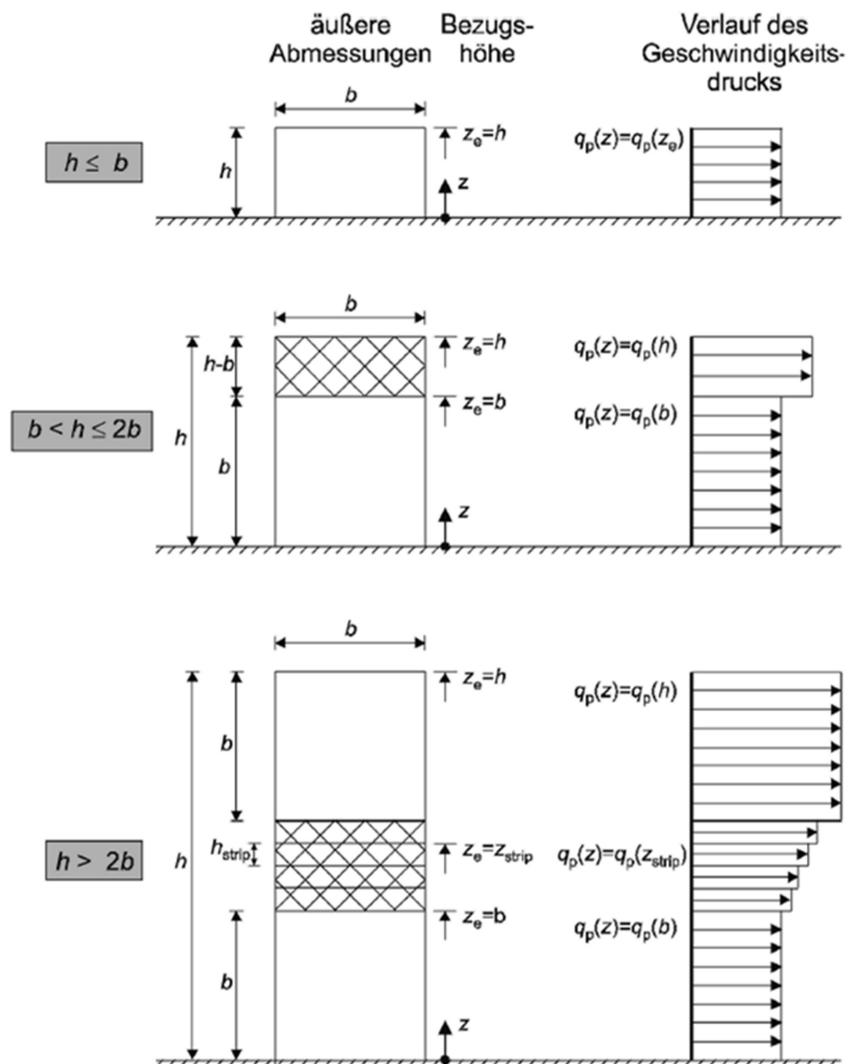
Die aerodynamischen Druckbeiwerte zufolge der CFD-Berechnungen ergeben sich dann zu:

$$c_{pe,CFD} = \frac{w_{e,CFD}}{q_p(z)} \quad (81)$$

wobei der Index e für extern - also für die Außendrücke - steht.

Da der Spitzengeschwindigkeitsdruck von der Höhe z abhängt, wird lt. Norm ein vereinfachter Ansatz gewählt, bei dem der anzusetzende Winddruck in horizontale Streifen eingeteilt wird, siehe dazu Abbildung 51. Analog zu dieser Vorgehensweise werden bei den CFD-Ergebnissen die Seitenflächen in 5m-Streifen eingeteilt und auch die Spitzengeschwindigkeitsdrücke in 5m-Abständen ausgewertet. Um den Aufwand bei der Auswertung geringer zu halten, wird auf eine feinere Einteilung verzichtet. Umso kleiner die Streifenhöhe ist, umso genauer nähert man sich dem Druckprofil an, jedoch steigt damit gleichzeitig der Aufwand. Mit größeren Streifenhöhen erhält man konservativere Ergebnisse, da der Wert an der Streifenoberkante konstant für den gesamten Streifen verwendet wird.

Somit werden die $c_{pe,CFD}$ -Werte an den Seitenflächen für alle 5m ausgewertet und danach gemittelt. So wird ein über die Höhe gemittelter $c_{pe,CFD}$ -Wert mit dem Norm-Wert $c_{pe,Norm}$ verglichen.



ANMERKUNG: Der Geschwindigkeitsdruck ist für jeden horizontalen Streifen gleichmäßig verteilt anzunehmen.

Abbildung 51: Einteilung des Geschwindigkeitsdruckes in horizontale Streifen,
aus ÖNORM B 1991-1-4: 2013-05-01 [2], Bild 7.4.

6. CFD-Simulationen

Nach erfolgter Literaturrecherche gliedert sich die weitere Vorgehensweise bzgl. der Simulationen konkret in folgende Abschnitte:

- Modellerstellung 3D lt. BPGs bzw. wie in Abschnitt 4 beschrieben
- Durchführen einer Netz-Konvergenzstudie am 3D-Modell
- Kontrolle mit leerer Domain
- Vergleich Halbsystem - Vollsystem
- Untersuchung von Einstellungs-Unsafeheiten am entsprechenden 2D-Modell
- Parameterstudie am Hexaeder mit vertikalen Wänden
 - Variation der Geometrie bzw. der Länge, Breite und Höhe des Gebäudes
 - Untersuchung mit allen drei in Österreich vorkommenden GK (GK₂, GK₃ u. GK₄)
- Vergleich der Druckbeiwerte zwischen CFD-Ergebnissen und Norm-Werten
- Parameterstudie am Hexaeder mit geneigten Wänden
 - Variation der Geometrie analog zum Hexaeder mit vertikalen Wänden
 - Untersuchung mit GK₂ und GK₄ (da sich später herausstellt, dass die Ergebnisse der GK₃ immer zwischen den Ergebnissen von GK₂ und GK₄ liegen)
- Auswertung und Vergleich der Ergebnisse aller Modelle und der Norm-Werte

6.1 Grundlegende Einstellungen

Für ein symmetrisches Gebäude mit symmetrischer Strömungssituation kann die Symmetrie ausgenutzt werden. Auch in den folgenden Modellen wird nur jeweils das Halbsystem modelliert, um Rechenzeit und Speicherplatz zu sparen.

Fixe Einstellungen sind, d.h. sie bleiben in allen Modellen unverändert:

- Der Referenzdruck wird auf 0 Pa gesetzt, somit wird immer der absolute Druck berechnet.
- Das Material ist Luft bei 25°C mit einer konstanten Dichte von 1,25 kg/m³.
- Da kein Wärmetransport stattfindet, wird die Heat Transfer Option als Isothermal bei 25°C eingestellt. Die Wände werden als adiabatisch eingestellt, d.h. es findet kein Wärmeübergang statt.

- Es wird immer das SST-Turbulenzmodell verwendet.
- Für die Advektions-Terme und die Turbulenz-Terme wird immer das High-Resolution-Verfahren verwendet.
- Das Konvergenzkriterium wird auf 10^{-6} RMS gesetzt.

6.2 Referenzmodelle

Anhand der 10 Tipps und Tricks von BLOCKEN [27] wird zuallererst ein 3D-Referenzmodell, der Hexaeder mit vertikalen Wänden mit einer Größe von $10 \times 10 \times 10$ m mit der GK2 und einer ELS von 30m erstellt. An diesem 3D-Referenzmodell werden verschiedene Einstellungen analysiert und die Empfehlungen der BPGs überprüft.

Da bzgl. einiger Einstellungen Unsicherheiten bestehen bzw. in der Literatur teilweise keine konkreten Angaben dazu zu finden sind, werden manche Untersuchungen auch an einem 2D-Referenzmodell durchgeführt. Der Vorteil von den 2D-Modellen liegt in den deutlich kürzeren Rechenzeiten. Und obwohl freie Umströmungen theoretisch dreidimensionaler Natur sind, können auch am 2D-Modell eindeutige Aussagen über die Einflüsse der jeweiligen Parameter getroffen werden.

6.2.1. 3D-Referenzmodell

Bei den Voruntersuchungen am 3D-Referenzmodell erfolgt der Vergleich anhand der mittleren Oberflächendrücke der jeweiligen Flächen. In Abbildung 52 sind die der Norm entsprechenden Flächen dargestellt.

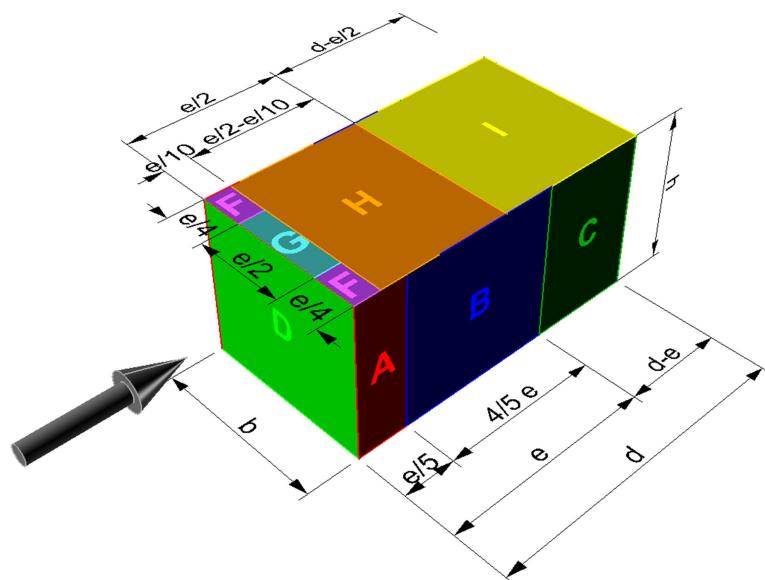


Abbildung 52: 3D-Ansicht der Unterteilung der Gebäudeoberflächen lt. Norm

6.2.1.1 Kontrolle der leeren Domain

Wie bereits in Abschnitt 4.7 erwähnt, sollten die Randbedingungen (Inlet-Profile und Rauheiten) anhand einer Berechnung mit leerer Domain überprüft werden. Im Gegensatz zu allen anderen Simulationen werden hier keine Oberflächendrücke verglichen, da kein umströmtes Objekt vorhanden ist. Stattdessen wird die Veränderung des Geschwindigkeitsprofils über die Domain-Länge in Strömungsrichtung untersucht. Das Profil sollte sich lt. BLOCKEN [27] über die Länge in Strömungsrichtung nicht wesentlich verändern, detaillierte Informationen werden jedoch nicht genannt.

Bei der Simulation mit dem 3D-Referenzmodell ohne umströmtes Objekt bzw. mit leerer Domain werden in der Querschnittsmitte (Höhe $h=30m$) in Abständen von 15-20m über die Domainlänge d insgesamt 9 MPs angeordnet, bei denen die Geschwindigkeit ausgewertet wird.

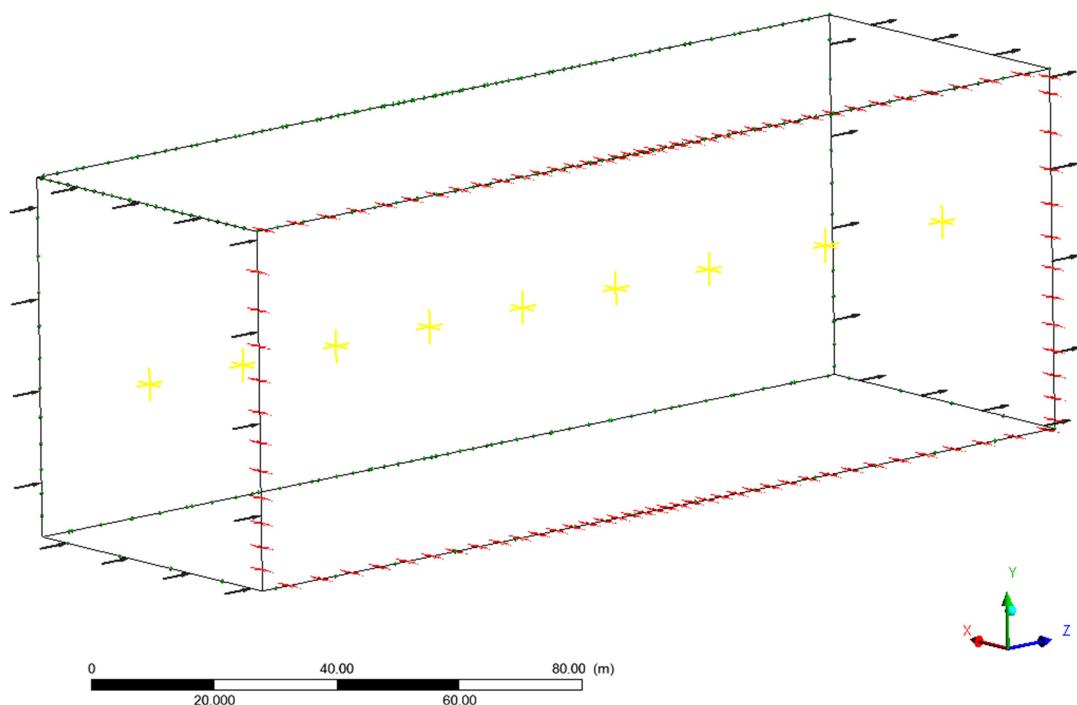


Abbildung 53: Anordnung der MPs (gelbe Kreuze) innerhalb der leeren Domain

Bei der Untersuchung der Strömungssituation sind zwei Dinge zu erkennen:

- Die Geschwindigkeiten an den MPs nehmen mit der Länge in etwa konstant zu, wobei die Werte zwischen 44,7 und 45,3 m/s betragen. Der Norm-Wert ergibt zum Vergleich bei einer Höhe von 30m eine Geschwindigkeit von 44,8 m/s (GK 2).
- Die Geschwindigkeit nimmt in Bodenlänge mit der Lauflänge leicht ab.

Es wird vermutet, dass Ursachen bzw. mögliche Einflüsse für diese kleinen Abweichungen des Geschwindigkeitsprofils fehlende Inflations am Boden oder die von der Norm vorgegebene

Mindestgeschwindigkeit in Bodennähe sind (z_{min}). Daher wurden zwei weitere Simulationen mit den folgenden veränderten Einstellungen untersucht:

- Modell ohne Inflations am Boden und ohne Mindestgeschwindigkeit (ohne z_{min}).
- Modell mit Inflations am Boden (mit z_{min}): 0,4mm first layer height, 1,1 growth rate, 15 layers

Auch mit diesen Einstellungen kann nicht erreicht werden, dass das Geschwindigkeitsprofil über die gesamte Domainlänge konstant bleibt. Bei der Simulation mit Inflations fällt auf, dass die Berechnung nicht konvergiert, sondern oszilliert und sich die MPs auch nicht ganz konstant einschwingen. Bei der Simulation ohne Mindestgeschwindigkeit bleibt das Geschwindigkeitsprofil qualitativ konstant, quantitativ nimmt die Geschwindigkeit mit zunehmender Lauflänge jedoch auch hier minimal zu. In Abbildung 54, Abbildung 55 und Abbildung 56 sind die jeweiligen Geschwindigkeitsverteilungen der Mittelebenen dieser drei zusätzlichen Varianten dargestellt.

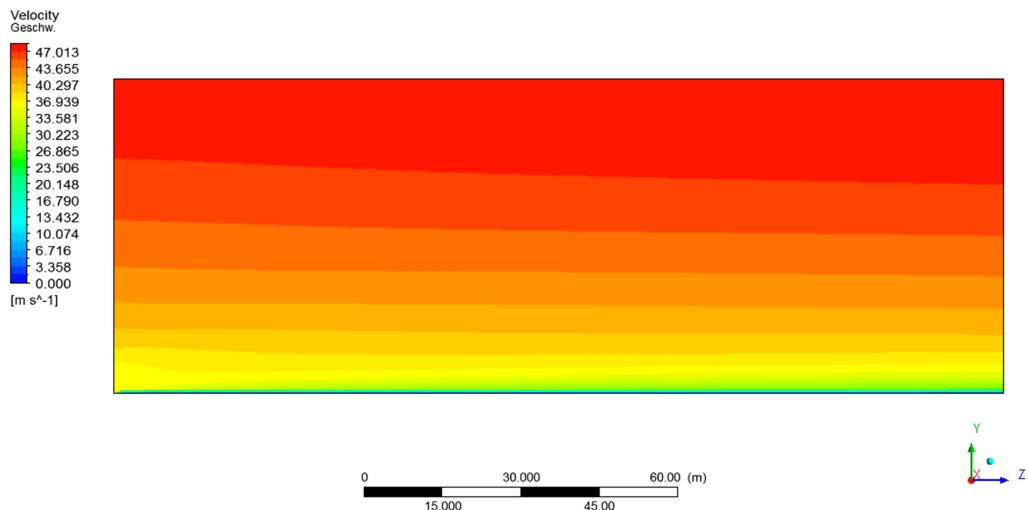


Abbildung 54: Geschwindigkeitsverteilung in der leeren Domain mit z_{min} und ohne Inflations (REF)

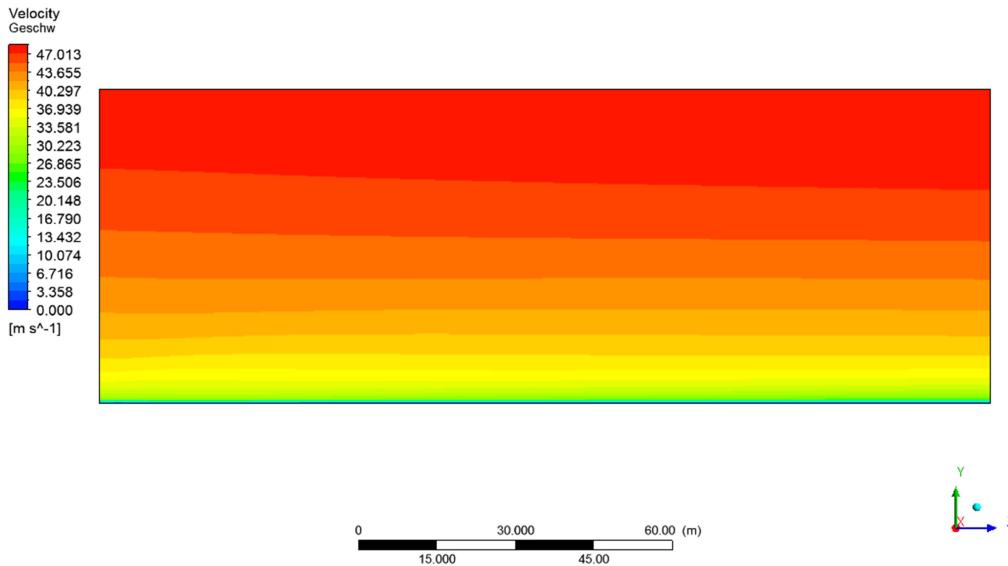


Abbildung 55: Geschwindigkeitsverteilung in der leeren Domain ohne z_{min} und ohne Inflations

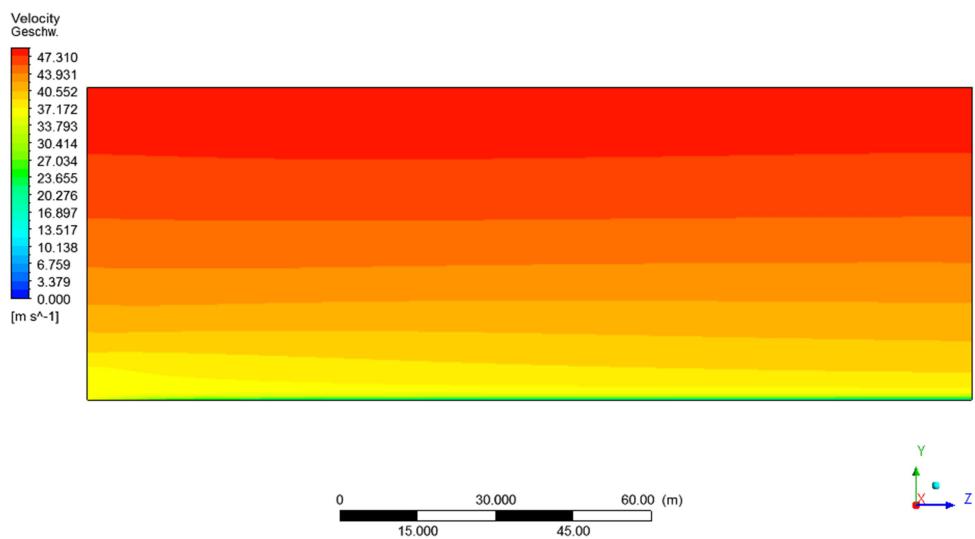


Abbildung 56: Geschwindigkeitsverteilung in der leeren Domain mit z_{min} und mit Inflations

Für die Parameterstudie wird die Veränderung des Geschwindigkeitsprofils über die Lauflänge als vernachlässigbar und ohne relevante Auswirkungen eingestuft, womit die Randbedingungen der Domain erfolgreich überprüft wurden.

6.2.1.2 Vergleich Halbsystem / Vollsystem

In der Theorie müsste aufgrund der symmetrischen Gebäudegeometrie und der scharfen Ablösekanten an der Gebäudefront auch eine symmetrische Strömungssituation entstehen. Am 3D-Referenzmodell wird trotzdem kontrolliert, ob die Berechnung am Halbsystem zulässig ist.

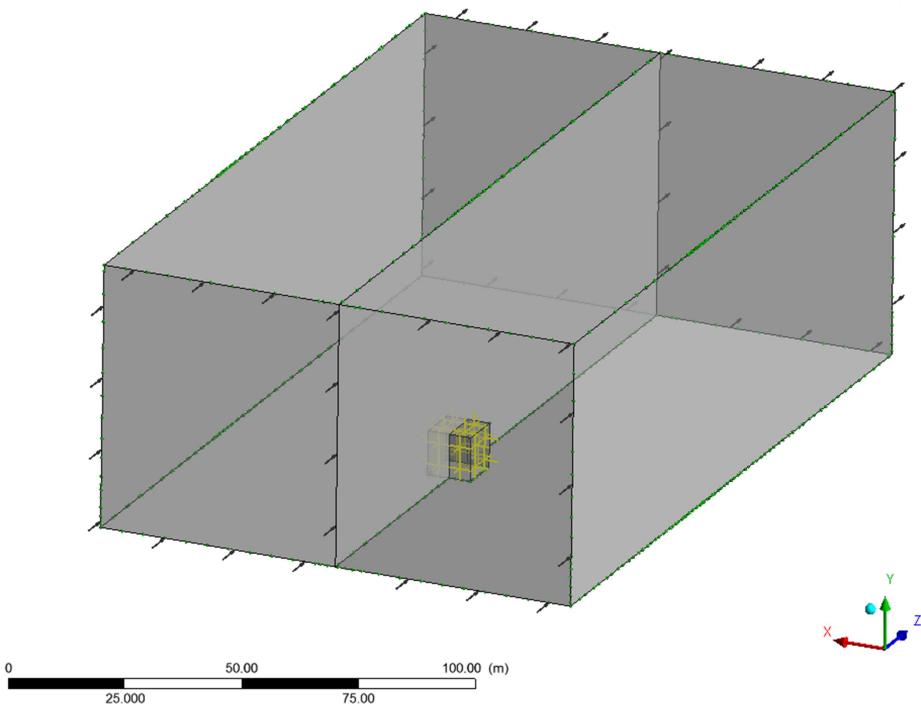


Abbildung 57: Das Vollsystem mit Randbedingungen und MPs

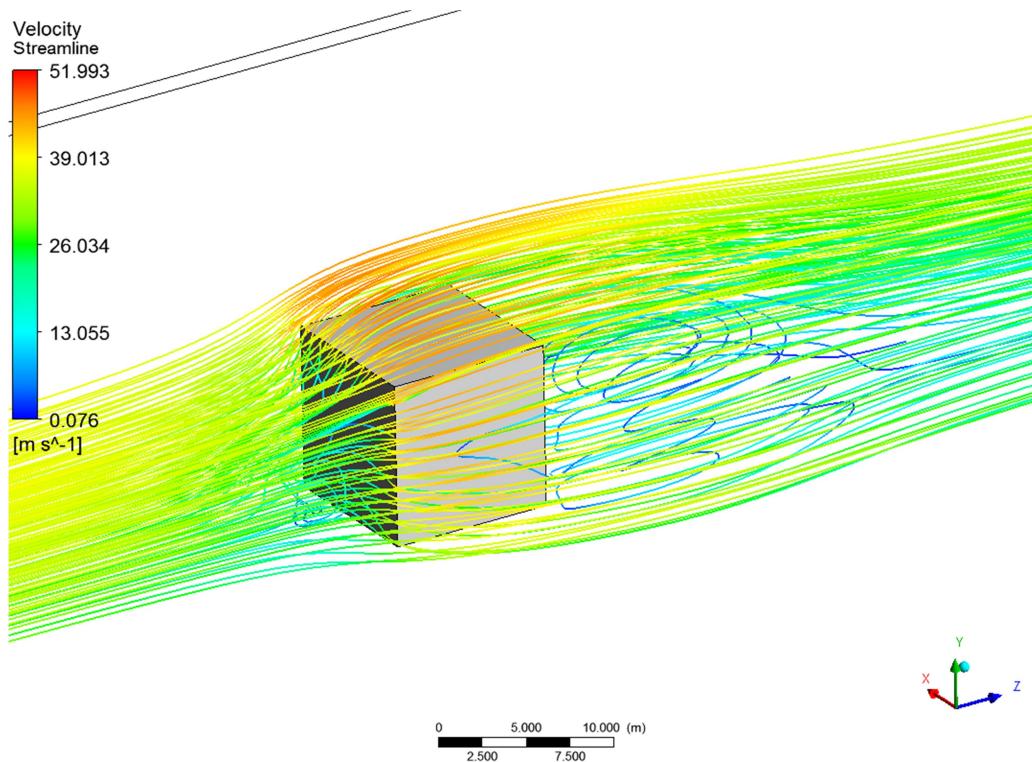


Abbildung 58: Stromlinien um den 10x10x10m Hexaeder des Vollsystems

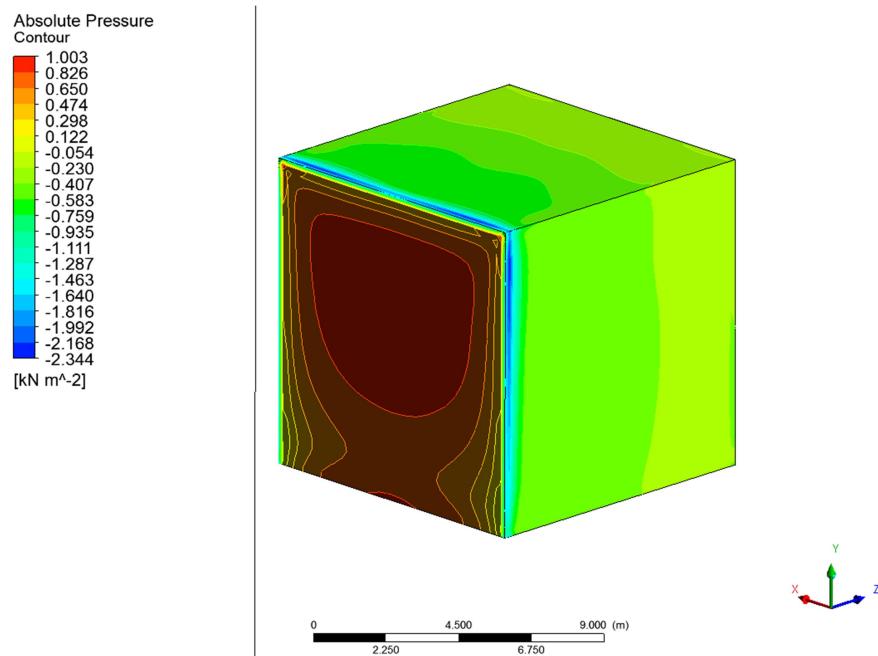


Abbildung 59: Druckverteilung des 10x10x10m Hexaeders des Vollsystems

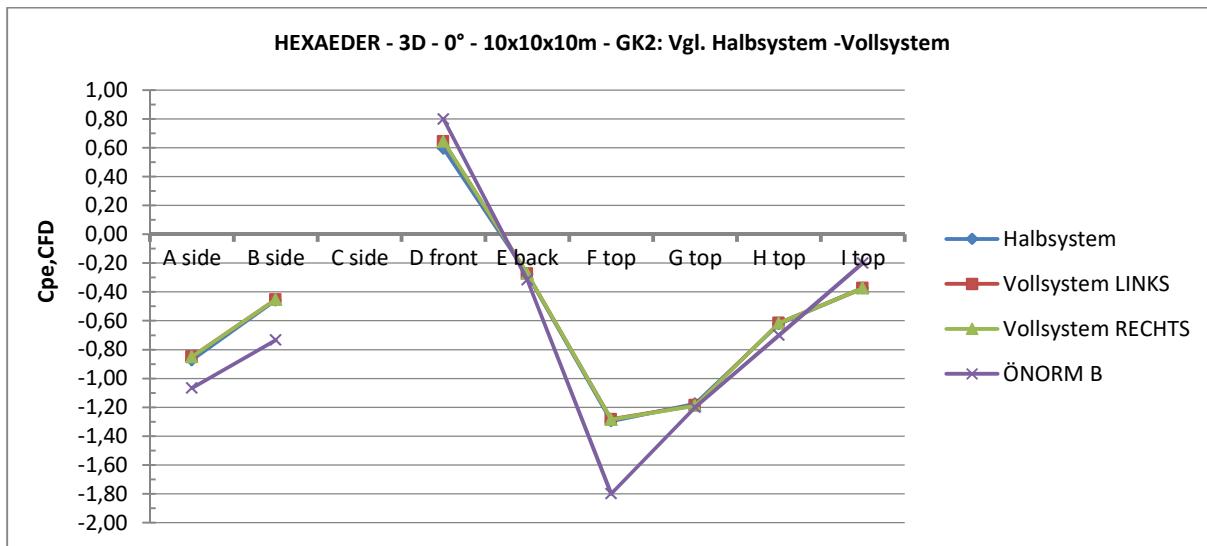


Abbildung 60: Vergleich der c_{pe} -Beiwerte am Halbsystem zum Vollsystem

Vergleicht man die beiden Hälften des Vollsystems miteinander, unterscheiden sich die c_p -Beiwerte erst ab der dritten oder vierten Kommastelle. Die Ergebnisse bestätigen somit ein symmetrisches Strömungsverhalten. Im Vergleich zum Halbsystem sind jedoch geringfügige Abweichungen erkennbar. Am ausgeprägtesten ist der Unterschied an der Frontfläche D, wo c_{pe} am Vollsystem ca. 7% größer im Vergleich zum Halbsystem ist.

Da der Unterschied von 7% an der Front als gering eingestuft wird, der Wert noch immer unter dem Norm-Wert liegt und aufgrund des enormen Rechenaufwands bei Vollsystemen, wird entschieden, alle weiteren Simulationen an Halbsystemen durchzuführen.

6.2.1.3 Geschwindigkeitsprofile mit v_{min}/v_p

Bei der Eingabe der Geschwindigkeitsprofile ist es anfangs nicht eindeutig, ob die mittleren oder die Spitzen-Geschwindigkeitswerte aus der Norm einzugeben sind. In der Literatur ist häufig von mittleren Geschwindigkeiten bzw. mean velocities zu lesen, was Verwirrung verursacht. Zur Sicherheit werden am 3D-Referenzmodell beide Varianten untersucht und es wird festgestellt, dass die Simulationen mit v_{min} eindeutig viel zu geringe Drücke liefern. Die mit v_p ermittelten Drücke liegen im Bereich der Werte zufolge Norm (Abbildung 61).

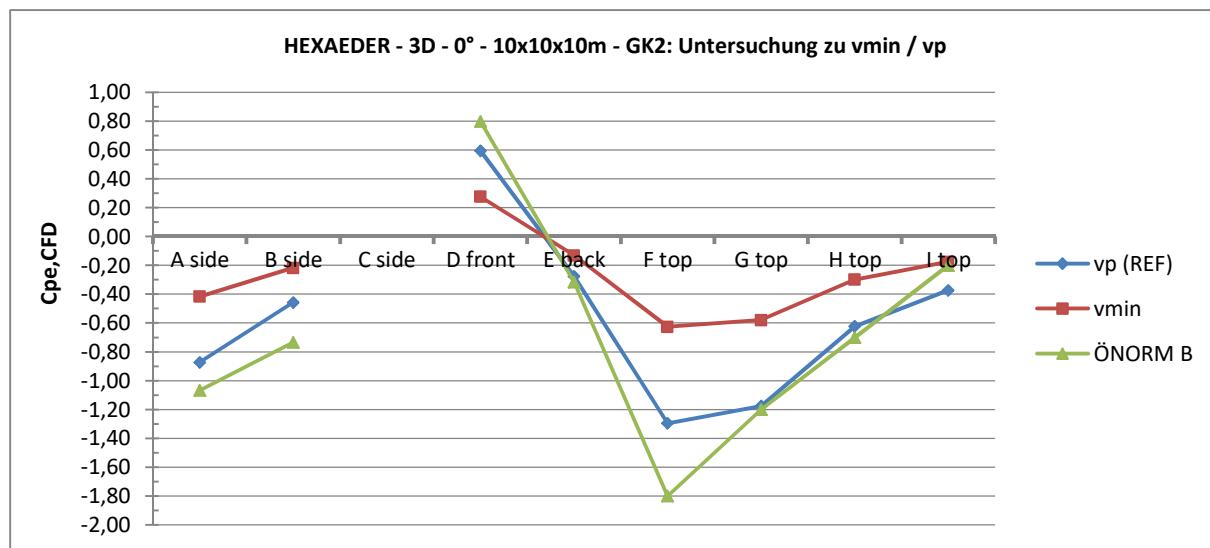


Abbildung 61: Untersuchung zum Geschwindigkeitsprofil am 3D-Referenzmodell

Daraus wird geschlossen, dass mit den mittleren Werten in diesem Fall die mittleren Spitzengeschwindigkeiten gemeint sind. Das entspricht auch dem üblichen Vorgehen, Spitzenwerte für die Bauwerksbemessung zu verwenden. Die Turbulenzintensität definiert folglich den Grad der Abweichungen vom definierten Profil bzw. die Schwankungen der Spitzengeschwindigkeiten.

6.2.2. 2D-Referenzmodell

Das 2D-Referenzmodell wird in Anlehnung an das 3D-Referenzmodell erstellt, indem gedanklich ein schmaler Streifen entlang der Symmetrieebene herausgeschnitten wird. Bei der Auswertung der Drücke ist zu beachten, dass der Bereich F, der sich an der Dachecke befindet, entfällt und nur der Bereich G in Dachmitte zu tragen kommt. Ansonsten werden die Oberflächen analog zum 3D-Modell erstellt, siehe Abbildung 62.

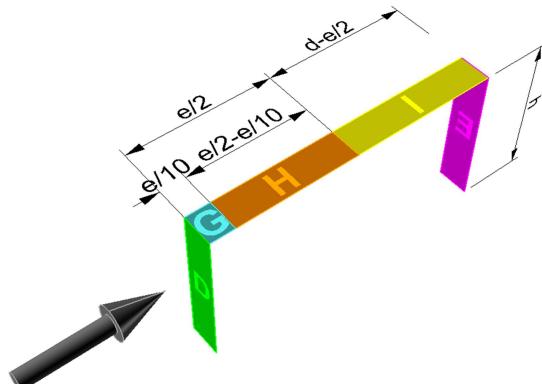


Abbildung 62: Flächeneinteilung des 2D-Modells

Bei den Ergebnissen des 2D-Modells fällt als erstes auf, dass sich aufgrund fehlender dreidimensionaler Strömungsentwicklung die Strömung erst deutlich weiter hinter dem Objekt wieder an den Boden anlegt. Aus diesem Grund wird der Abstand hinter dem Objekt versuchsweise von $10 \cdot H$ auf $15 \cdot H$ erhöht. Auf die Oberflächendrücke wirkt sich das aber in keinster Weise aus, weshalb für alle weiteren Berechnungen weiterhin ein Abstand von $10 \cdot H$ verwendet wird.

Im Solver-File wird aus diesem Grund gewarnt, dass im Outlet teilweise eine Wand platziert wird, um den Lösungsprozess zu verbessern, weil in einer Outlet-RB keine Rückströmung stattfinden darf: „A wall has been placed at portion(s) of an OUTLET boundary condition to prevent fluid from flowing into the domain. [...] If this situation persists, consider switching to an Opening type boundary condition instead.“ Es könnte statt dem Outlet ein Opening definiert werden, welches sowohl Ein- als auch Ausströmungen erlaubt. Die Warnung kann hier aber ignoriert werden, da es keinen Einfluss auf die Oberflächendrücke hat.

Am 2D-Referenzmodell werden folgende Parameter bzw. Einstellungen näher untersucht:

- ELS
- mit / ohne Inflations am Boden
- mit / ohne z_{min} bei den Geschwindigkeitsprofilen
- mit / ohne Rauheitshöhen in Kombination mit / ohne z_{min} bei den Geschwindigkeitsprofilen

6.2.2.1 ELS

Wie bereits in Abschnitt 4.4.1 erwähnt, sollte die ELS in der Größenordnung der large eddies abgeschätzt werden, eine exakte Vorgabe kann aber nicht getroffen werden. Um den Einfluss der ELS zu untersuchen wurden Varianten mit einer ELS von 0,05m/0,5m/1m/5m/10m/30m/60m miteinander verglichen. Dabei entspricht ELS=0,05m in etwa dem Vorschlag von SCHWARZE [12], sie als die halbe Grenzschichtdicke

im Inlet anzusetzen. ELS=10m entspricht der Bauteilabmessung in Strömungsrichtung, was oft bei frei umströmten Objekten, wie z.B. Tragflügeln, angesetzt wird. ELS=30m entspricht zirka der Größenordnung des turbulenten Bereichs hinter dem Objekt, d.h. in etwa dem Abstand zwischen Objekthinterkante und der Stelle, an der sich die Strömung wieder am Boden anlegt.

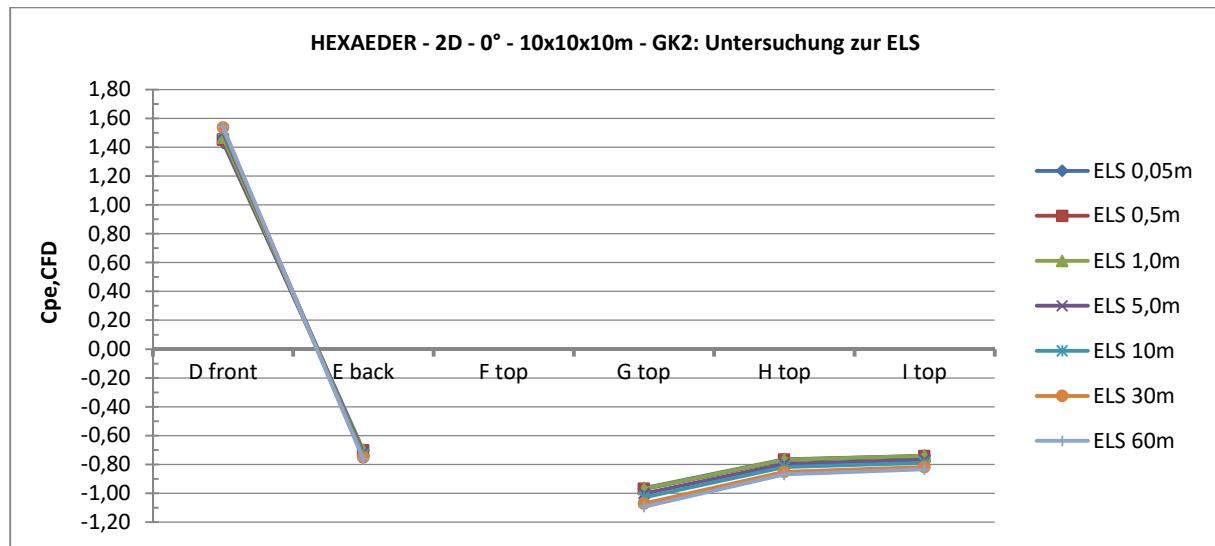


Abbildung 63: Untersuchung zur ELS am 2D-Referenzmodell

Es lässt sich die Tendenz erkennen, dass die Druckbeiwerte mit der Länge der ELS eher zunehmen, der Unterschied jedoch vernachlässigbar gering ist. Es ist davon auszugehen, dass die Vorgabe im Inlet nicht wirklich relevant ist und sich die Strömung im Verlauf der iterativen Berechnung erst entwickelt und im Gleichgewicht einpendelt. Mit einer guten ELS-Vorgabe im Inlet hilft man dem Solver lediglich schneller zu konvergieren.

Für das Referenzmodell wird somit eine ELS von 30m beibehalten und für alle weiteren Modelle der Parameterstudie wird versucht, die ELS so einzustellen, dass sie in etwa der Größe des turbulenten Bereichs hinter dem umströmten Objekt entspricht, wie beispielhaft in Abbildung 64 und Abbildung 65 für das 3D-Referenzmodell ersichtlich ist. Stellt sich im Postprocessing heraus, dass die ELS von dieser Größenordnung abweicht, wird teilweise eine erneute Berechnung mit angepasster ELS durchgeführt.

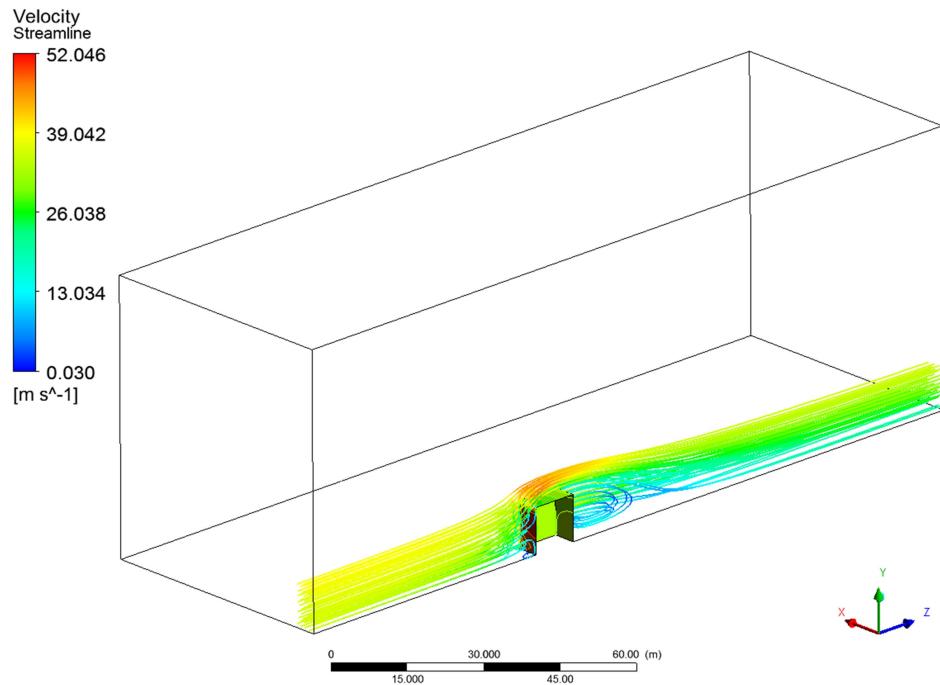


Abbildung 64: Isometrie der Stromlinien des 3D-Referenzmodell

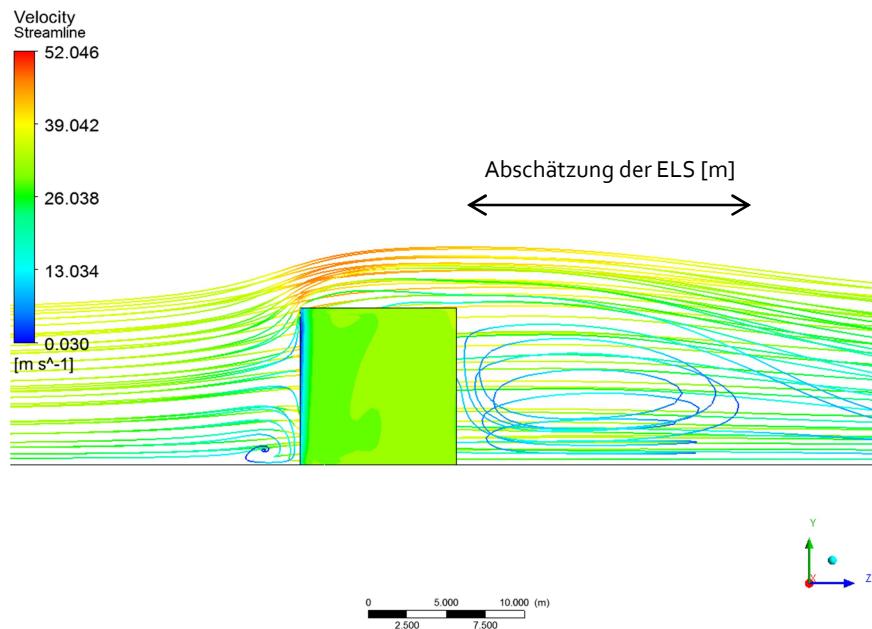


Abbildung 65: Seitenansicht der Stromlinien des 3D-Referenzmodell

6.2.2.2 Mit / ohne Inflations am Boden

Da an jeder umströmten Oberfläche aufgrund der Haftbedingung ($v=0$) eine Grenzschicht auftritt, müssten theoretisch an jeder Oberfläche Inflations angeordnet werden, um diese akkurat auflösen zu können. Somit müssten nicht nur um das umströmte Objekt, sondern auch am Boden Inflations angeordnet werden. Da sich Inflations am Boden aufgrund der großen Fläche aber enorm auf die Anzahl

der Netzzellen und gleichzeitig auf den Rechenaufwand auswirken, wäre es vorteilhaft, sie am Boden vermeiden zu können.

Einerseits kann man sagen, dass für das gegenständliche Ziel – die Ermittlung der Oberflächendrücke – die Strömung am Boden irrelevant ist, jedoch ist der Einfluss auf das restliche Strömungsfeld bzw. die Zielgrößen zu überprüfen. Aus diesem Grund wurden 2D-Simulationen mit und ohne Inflations am Boden miteinander verglichen. Es stellt sich - wie in Abbildung 66 erkennbar ist - heraus, dass Inflations am Boden keinen Einfluss auf die Oberflächendrücke haben, weshalb sie bei allen folgenden Simulationen weggelassen wurden.

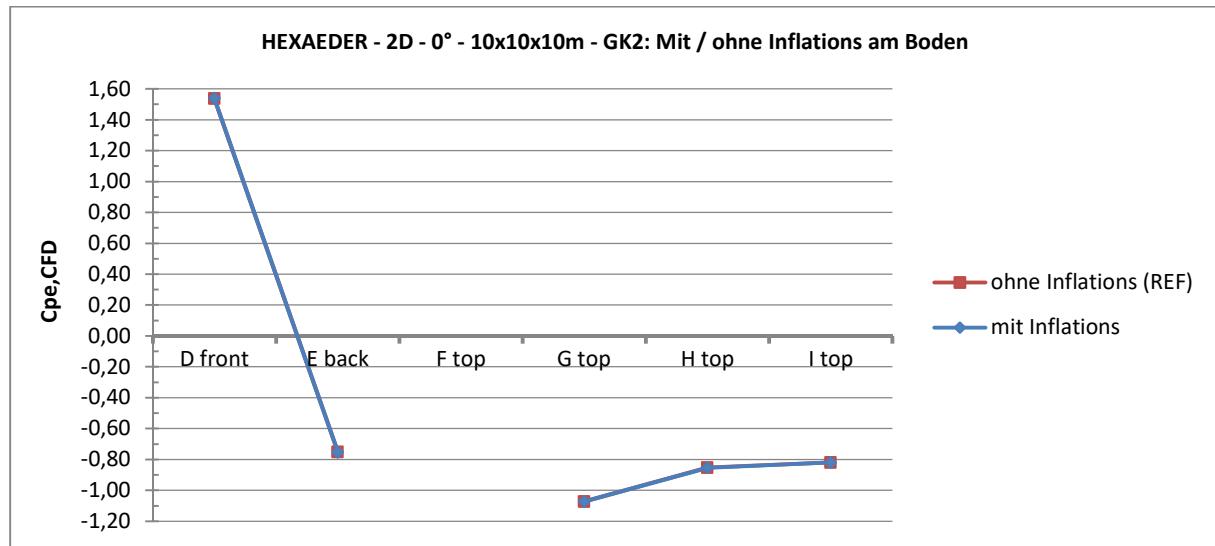


Abbildung 66: Untersuchung zu den Inflations am Boden am 2D-Referenzmodell

6.2.2.3 Mit / ohne z_{min} bei den Geschwindigkeitsprofilen

Da in der Norm die Geschwindigkeitsprofile am Boden nicht mit 0 m/s beginnen (was der Haftbedingung entsprechen würde), sondern je nach GK bis zu einer gewissen Höhe (z_{min}) eine Mindestgeschwindigkeit angesetzt wird, stellen sich zwei Fragen: Welchen Einfluss hat eine Mindestgeschwindigkeit in Bodennähe auf die Oberflächendrücke? Und inwieweit ist damit eine gewisse Bodenrauheit bereits berücksichtigt?

Um die erste Fragestellung zu untersuchen, werden Varianten mit und ohne Mindestgeschwindigkeiten bzw. mit und ohne z_{min} miteinander verglichen. Die Auswertung ergibt (Abbildung 67), dass die Drücke an der Objektfront etwas größer sind, die Drücke aller anderen Bereiche aber unverändert bleiben. Dieses Verhalten beschreibt die Tatsache, dass bei größeren Geschwindigkeiten logischerweise auch größere Drücke auftreten.

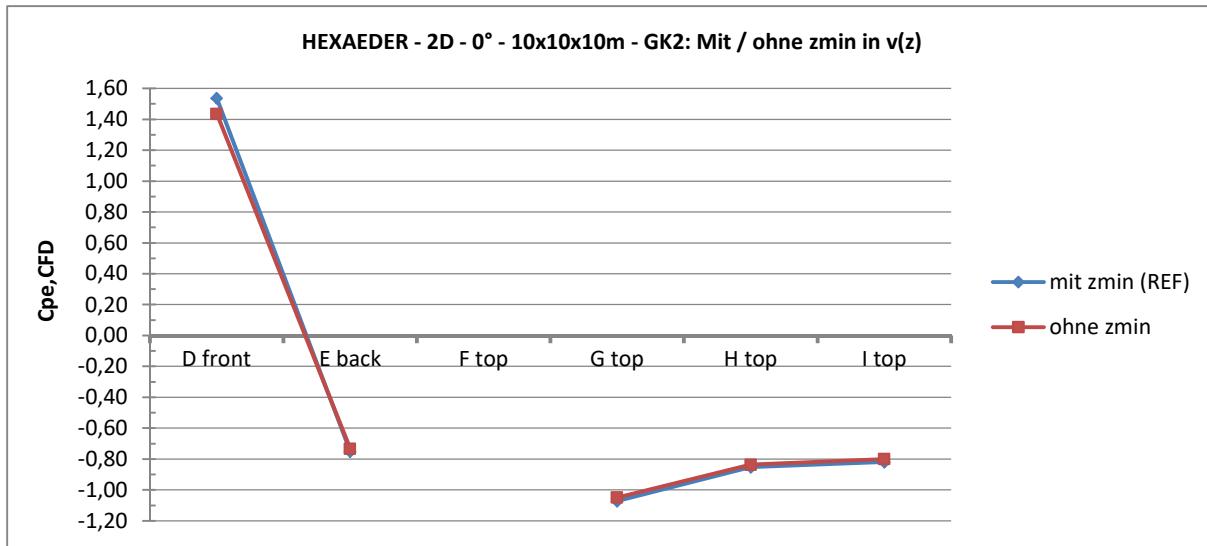


Abbildung 67: Untersuchungen zum Geschwindigkeitsprofil am 2D-Referenzmodell

Da also Mindestgeschwindigkeiten mit z_{min} konservativere Werte ergeben, werden alle Simulationen der Parameterstudie mit einer Mindestgeschwindigkeit bzw. mit z_{min} durchgeführt.

6.2.2.4 Mit / ohne Rauheitshöhen k_s in Kombination mit / ohne z_{min}

Die oben erwähnte zweite Fragestellung bzgl. der Kombination aus Mindestgeschwindigkeit und Rauheitshöhe k_s wird untersucht, indem zwei Varianten miteinander verglichen werden:

- ohne z_{min} und mit k_s
- mit z_{min} und ohne k_s

Man könnte vielleicht denken, dass beide Varianten das gleiche Ergebnis liefern, wenn man davon ausgeht, dass z_{min} eine gewisse Rauheit beinhaltet. Bei der Auswertung (Abbildung 68) stellt sich heraus, dass bei der zweiten Variante ohne Bodenrauheiten an der Objektfront deutlich größere Drücke resultieren. An allen anderen Bereichen sind die Drücke in etwa gleich. Dieses Verhalten erscheint aus physikalischer Sicht aufgrund fehlender Rauheitselementen durchaus logisch.

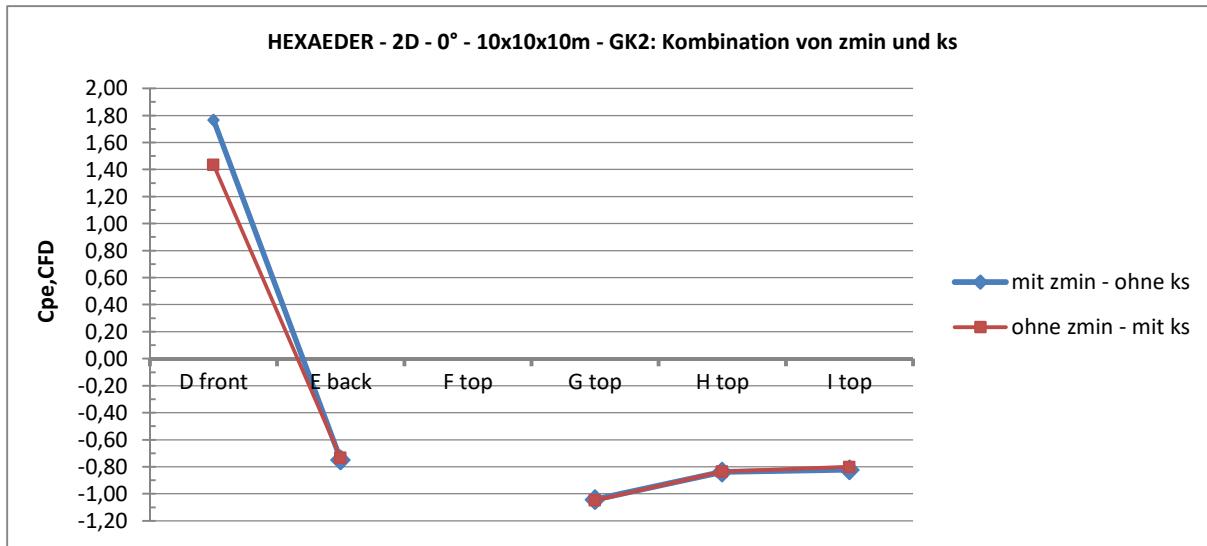


Abbildung 68: Untersuchung zur Kombination von z_{min} und k_s

Da der GK entsprechend zufolge der Norm immer Rauheitselemente vorhanden sind, wird die Parameterstudie auch mit einer Rauheit k_s durchgeführt.

6.2.3. Zusammenfassung der Vorstudien am 2D- und 3D-Referenzmodell

Zusammenfassend können zu den Voruntersuchungen an den beiden Referenzmodellen folgende Aussagen gemacht werden:

- Simulationen am Halbsystem sind zulässig
- für die Geschwindigkeitsprofile im Inlet werden die Spitzenwerte v_p verwendet
- die ELS im Inlet hat auf die endgültigen Werte keinen Einfluss
- am Boden sind keine Inflations nötig, da sie sich nicht auf die Oberflächendrücke auswirken
- die Geschwindigkeitsprofile werden der Norm entsprechend mit z_{min} eingegeben
- am Boden wird die Sandkorn-Rauheitshöhe k_s eingegeben.

Mit diesen Erkenntnissen bzw. Einstellungen wird die gesamte Parameterstudie durchgeführt.

6.3 Netz-Konvergenzstudie

Um die Auswirkungen der Netzfeinheit zu überprüfen, muss eine Netz-Konvergenzstudie durchgeführt werden. Zuerst wird das Netz anhand des 3D-Referenzmodells mit vertikalen Wänden untersucht. Aufgrund von Unsicherheiten der Werte an der Dachvorderkante (Flächen F und G) werden in einem

späteren Schritt auch Netz-Konvergenzstudien mit den Modellen mit in und entgegen der Strömungsrichtung geneigten Wänden durchgeführt.

6.3.1. Netz-Konvergenzstudie – vertikale Wände

Die Netz-Konvergenzstudie wird am 3D-Referenzmodell mit vertikalen Wänden mit 4 Netzen durchgeführt. Bei der Netzerstellung werden die Objekts- und Domainkanten in eine bestimmte Anzahl unterteilt um die gewünschten Elementgrößen zu erhalten. Vom groben zum mittleren zum feinen und zum sehr feinen Netz hin nimmt die Unterteilungsanzahl an allen Kanten jeweils um den Verfeinerungsfaktor 1,5 zu. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Daten zu den einzelnen Netzen zusammengefasst. Bei den Elementgrößen wird der durchschnittliche Wert angegeben, da bei der Unterteilung der Gebäudekanten die Anzahl der Unterteilungen mit einem Bias-Faktor voreingestellt wird, d.h. zu den Ecken hin verfeinert sich das Netz und in den mittleren Bereichen der Wände vergröbert sich das Netz. Das Netz des 3D-Referenzmodells (mittel/REF) ist in Abbildung 69 und Abbildung 70 abgebildet.

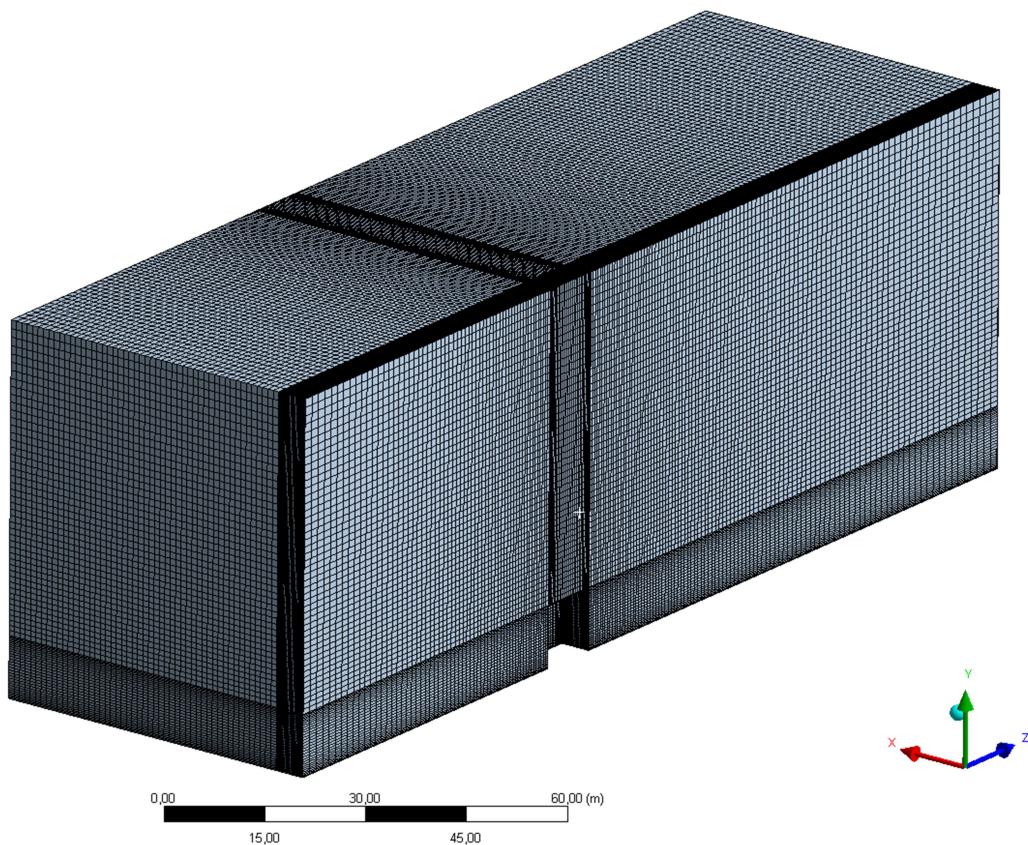


Abbildung 69: Isometrie des Netzes des 3D-Referenzmodells der MA

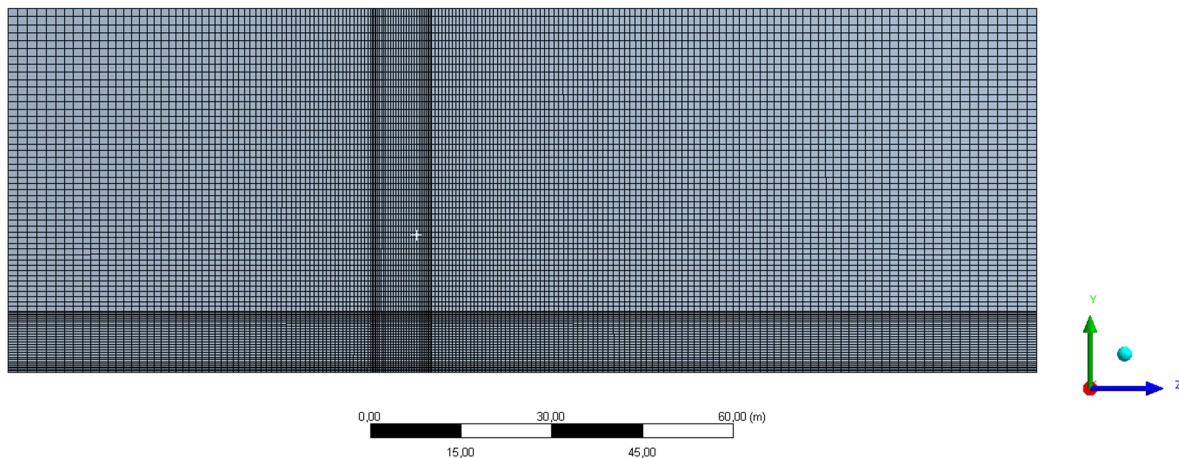


Abbildung 70: Seitenansicht des Netzes des 3D-Referenzmodells der MA

Netz	Anzahl Knoten	Anzahl Elemente	Anzahl der Unterteilungen der 10m-Kanten	Elementgröße an Gebäudeoberfläche [cm]
sehr fein	10.999.530	10.832.795	67	ca. 15
fein	3.325.120	3.250.125	45	ca. 22
mittel (REF)	1.127.548	1.179.400	30	ca. 33
grob	307.220	292.000	20	ca. 50

Tabelle 1: Daten zu den einzelnen Netzen (0°)

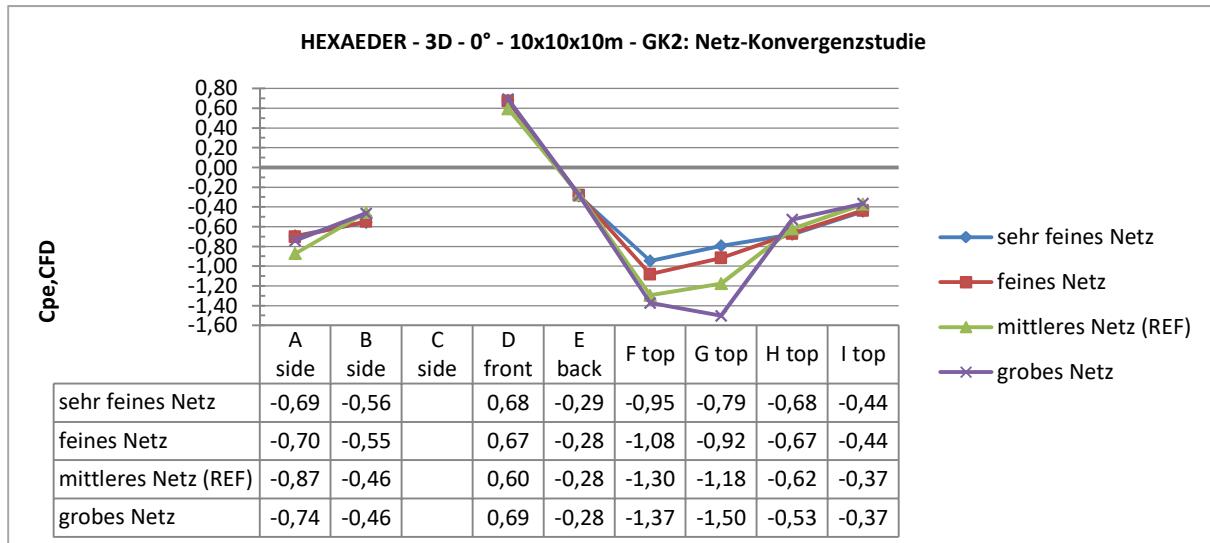


Abbildung 71: Netz-Konvergenzstudie am 3D-Referenzmodell bei vertikalen Wänden (0°)

Die Netz-Konvergenzstudie (Abbildung 71) ergibt, dass theoretisch eine noch feinere Auflösung nötig wäre, um konstante Ergebnisse an allen Objektflächen zu erhalten. Bei den Flächen an der Dach-Vorderkante F und G ist keine Netz-Konvergenz erkennbar. Die Differenzen zwischen mittlerem (REF) und sehr feinem Netz betragen an der Fläche F 26,9% und an der Fläche G 33,1% (bezogen auf das mittlere Netz).

Bei der Vorderseite D und Rückseite E ergeben alle Netze sehr ähnliche Ergebnisse. An den Seiten A und B und am hinteren Dachbereich H und I liegen die durchschnittlichen Drücke auch noch vertretbar nahe beieinander.

Die Konvergenz der Residuenverläufe wird durch unterschiedliche Netzfeinheiten nicht beeinflusst. Die Residuen pendeln bei allen Feinheiten in etwa zwischen 10^{-3} und 10^{-4} . Somit wird angenommen, dass ein anderes bzw. optimiertes Netz sich nicht positiv auf den Konvergenzverlauf auswirken würde.

Aufgrund der sehr langen Rechenzeiten bei den Berechnungen mit dem 3D-Referenzmodell mit dem feinen und sehr feinen Netz wird trotz unzureichender Netzfeinheit entschieden, die Berechnungen am mittleren Netz durchzuführen. Mit einem feineren Netz wären die angestrebten Parameterstudien nicht wirklich durchführbar respektive praktikabel, zumal sich bei größeren Gebäudehöhen die Domain-Abmessungen stark vergrößern.

6.3.2. Netz-Konvergenzstudie – geneigte Wände

Aufgrund der Unsicherheit der Druckwerte an den Flächen F und G wird auch bei den Modellen mit geneigten Wänden eine Netz-Konvergenzstudie durchgeführt. Um die Anzahl der Berechnungen etwas einzuschränken, werden nur die Neigungen $+30^\circ$ und -30° mit den Referenzabmessungen von $10 \times 10 \times 10$ m untersucht.

Bei den Modellen mit schrägen Wänden wird analog zu jenen mit vertikalen Wänden ein Verfeinerungsfaktor von jeweils ca. 1,5 verwendet. Im Gegensatz zu den Modellen mit vertikalen Wänden, wo die Domainkanten unterteilt wurden, werden hier jeweils die Elementgröße an der Objektoberfläche und die Elementgrößen des inneren und äußeren Volumens vorgegeben.

Diese Vorgangsweise ist eine Folge davon, dass bei den Modellen mit schrägen Wänden ein innerer Volumenbereich direkt um das Gebäude vom äußeren Volumen separiert wird. Wie in Abbildung 72 zu sehen ist, befinden sich im äußeren Volumen ausschließlich Hexaeder-Elemente und das Innenvolumen wurde als Hex-dominant definiert, d.h. dort befinden sich hauptsächlich Hexaeder, jedoch auch Tetraeder und Pyramiden. Nur mit dieser Vorgangsweise konnte eine zufriedenstellende Netzqualität erzielt werden. Besonders im Bereich scharfer Kanten haben sich die Übergänge von den Inflations zum übrigen Gebiet mit ausschließlich Hexaedern als schwierig gestaltet. In Tabelle 2 und Tabelle 3 sind die wichtigsten Daten zu den einzelnen Netzen zusammengefasst.

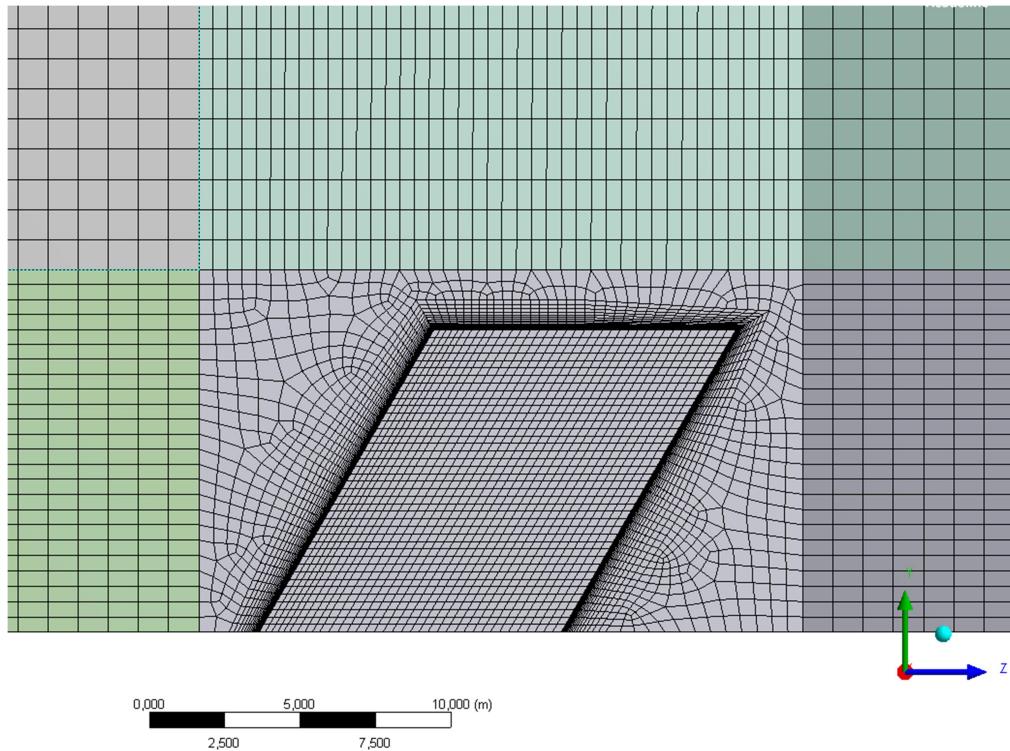


Abbildung 72: Innerer Netz-Bereich des Modells 10x10x10m mit in Strömungsrichtung geneigten Wänden (+30°)

6.3.2.1 Wände in Strömungsrichtung geneigt (+30°)

In Tabelle 2 sind die Daten zu den 4 Netzen der Modelle mit in Strömungsrichtung geneigten Wänden abgebildet.

Netz	Anzahl Knoten	Anzahl Elemente	Elementgröße an Objektoberfläche [cm]	Elementgröße inneres Volumen [cm]	Elementgröße äußeres Volumen [cm]
sehr fein	9.752.001	10.071.297	15	25	45
fein	2.920.479	3.049.865	20	35	70
mittel (REF)	1.060.300	1.101.347	30	50	100
grob	304.480	316.468	45	80	160

Tabelle 2: Daten zu den einzelnen Netzen (+30°)

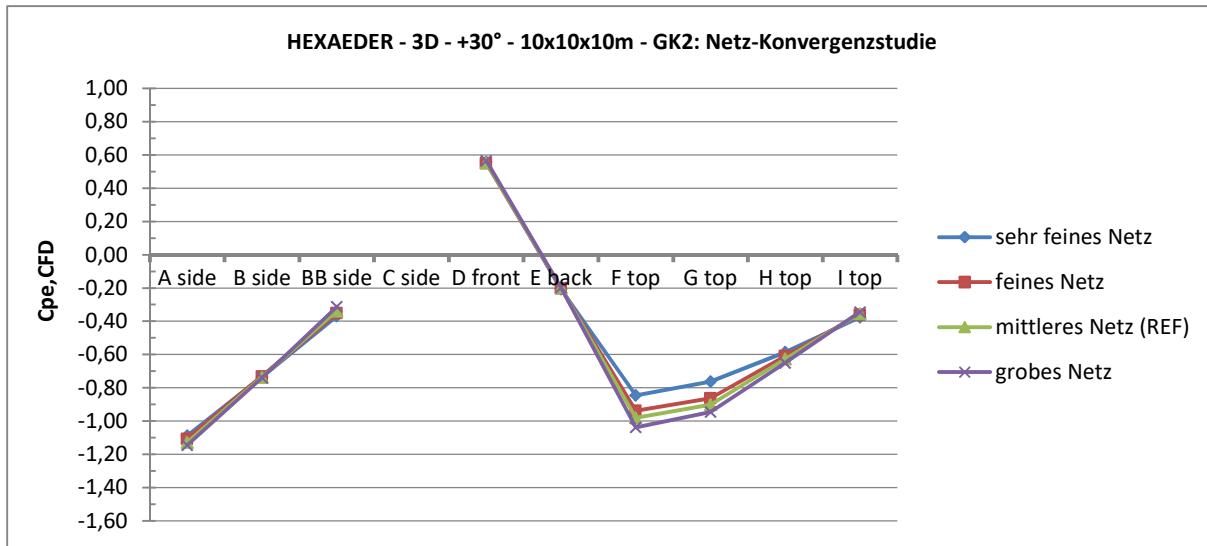


Abbildung 73: Netz-Konvergenzstudie am 3D-Referenzmodell mit in Strömungsrichtung geneigten Wänden (+30°)

Wie auch bei den Modellen mit den vertikalen Wänden befinden sich bei den Modellen mit in Strömungsrichtung geneigten Wänden die größten Unterschiede an der vorderen Dachkante bzw. den Flächen F und G. Hier sind die Unterschiede zwischen mittlerem (REF) und sehr feinem Netz mit 13,3% (F) und 15,6% (G) jedoch geringer (bezogen auf das mittlere Netz).

6.3.2.2 Wände entgegen der Strömungsrichtung geneigt (-30°)

In Tabelle 3 sind die Daten zu den 4 Netzen der Modelle mit entgegen der Strömungsrichtung geneigten Wänden abgebildet.

Netz	Anzahl Knoten	Anzahl Elemente	Elementgröße an Objektoberfläche [cm]	Elementgröße inneres Volumen [cm]	Elementgröße äußeres Volumen [cm]
sehr fein	9.564.565	10.100.482	15	25	45
fein	2.988.551	3.200.292	20	35	70
mittel (REF)	1.051.347	1.121.554	30	50	100
grob	375.210	409.260	45	80	160

Tabelle 3: Daten zu den einzelnen Netzen (-30°)

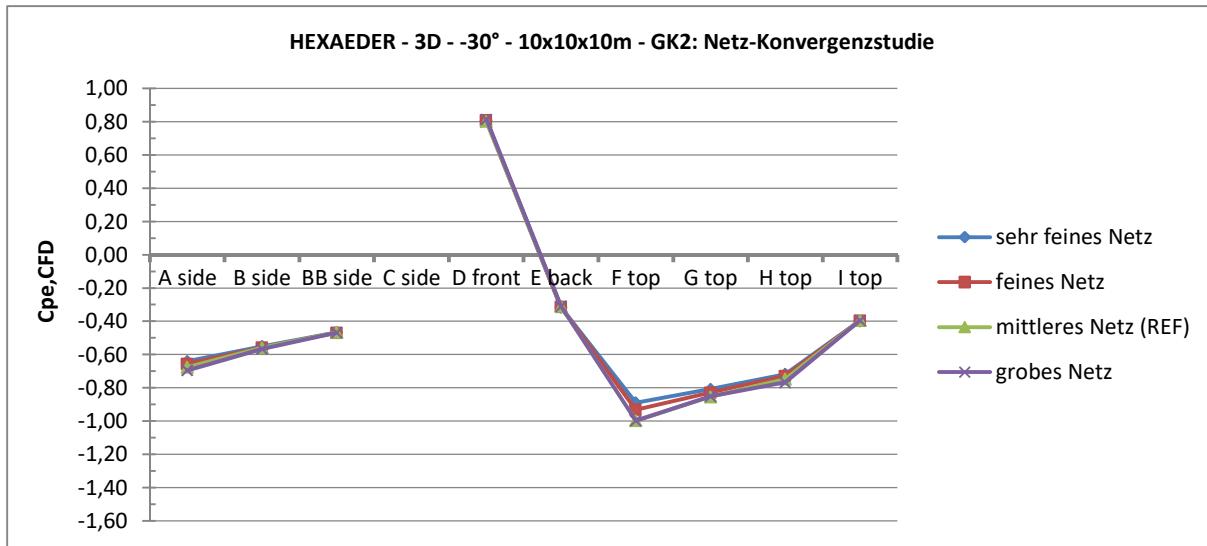


Abbildung 74: Netz-Konvergenzstudie am 3D-Referenzmodell mit entgegen der Strömungsrichtung geneigten Wänden (-30°)

Bei den Modellen mit den entgegen der Strömungsrichtung geneigten Wänden sind die Unterschiede zwischen mittlerem (REF) und sehr feinem Netz mit 11,0% (F) und 4,7% (G) am geringsten (bezogen auf das mittlere Netz).

6.3.3. Generalisierte Richardson-Extrapolation und GCI

Für die Netz-Konvergenzstudie der Modelle mit vertikalen Wänden (0°) wurde eine generalisierte Richardson-Extrapolation mit den resultierenden c_p -Beiwerten der einzelnen Oberflächen (A bis I) durchgeführt, siehe dazu auch Abschnitt 2.9.6. Hier konnten aufgrund monotoner Konvergenzen extrapolierte Werte auf ein theoretisch unendlich feines Netz ermittelt werden, wobei das grösste Netz weggelassen wurde. In Abbildung 75 ist das entsprechende Diagramm mit absoluten c_p -Beiwerten und in Abbildung 76 in normalisierter Version dargestellt.

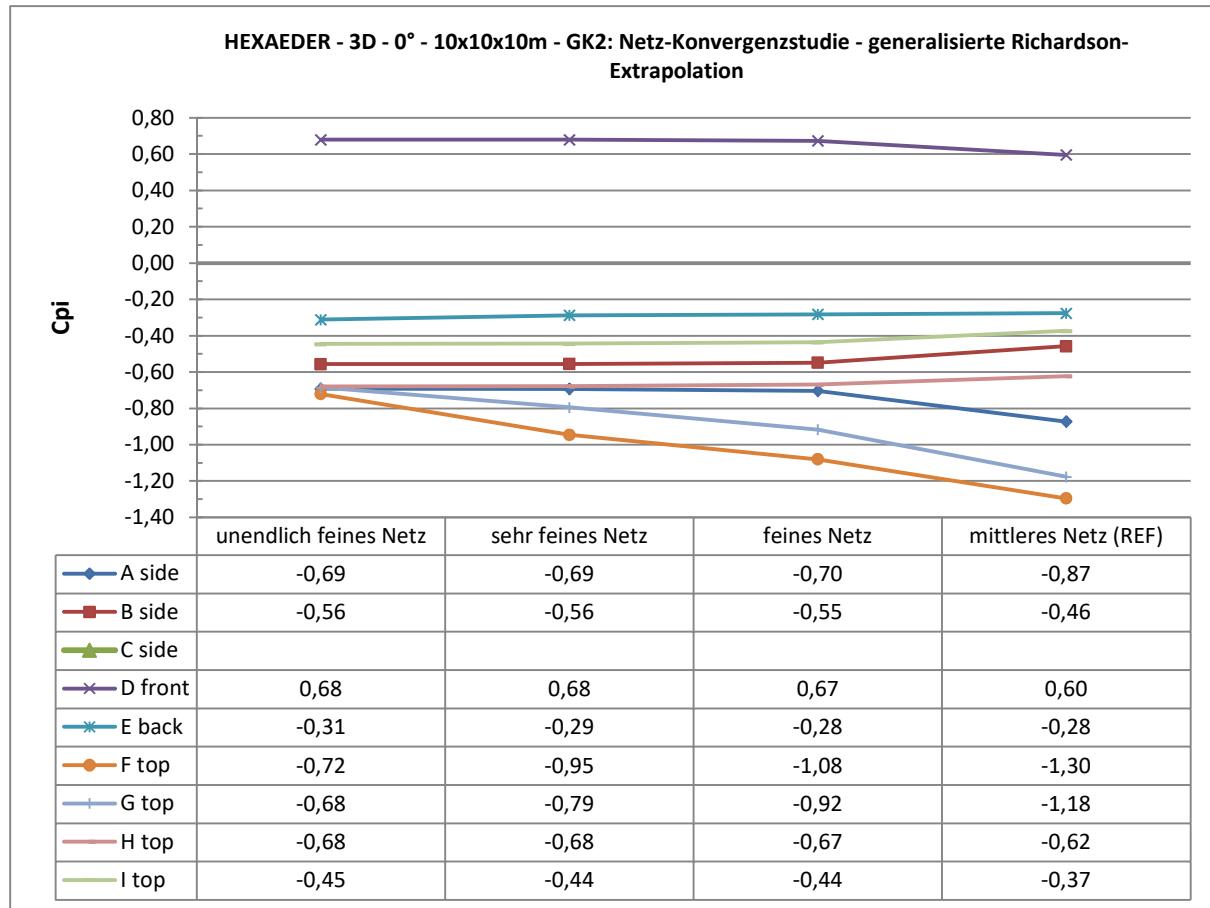


Abbildung 75: Generalisierte Richardson-Extrapolation am 3D-Referenzmodell mit vertikalen Wänden (0°)

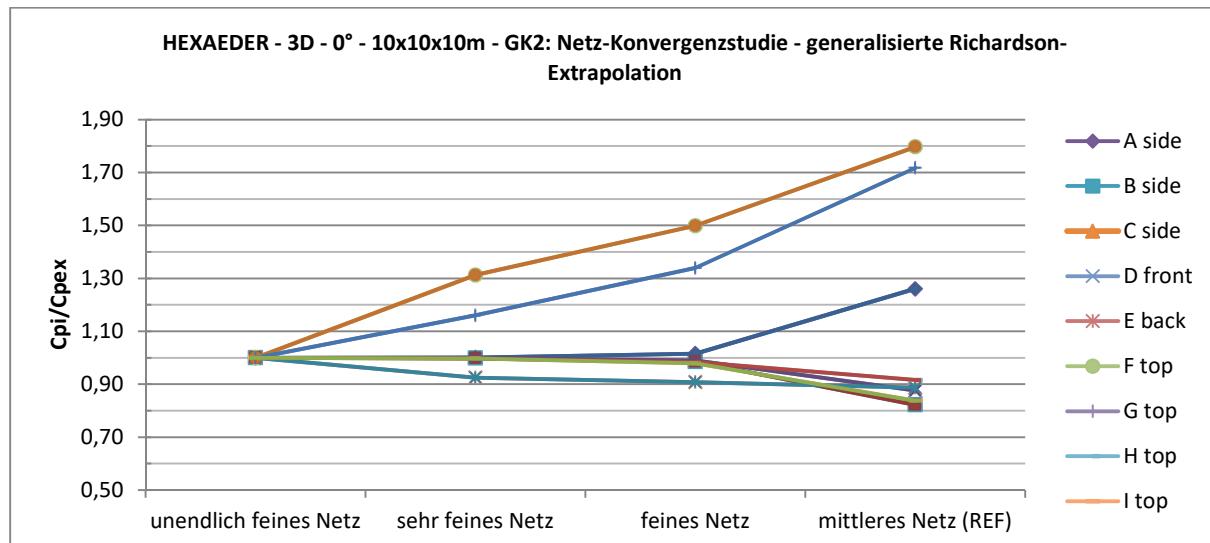


Abbildung 76: Normalisierte generalisierte Richardson-Extrapolation am 3D-Referenzmodell mit vertikalen Wänden (0°)

Bei den Netz-Konvergenzstudien der Modelle mit geneigten Wänden tritt großteils oszillierende Konvergenz oder Divergenz auf, weshalb die generalisierte Richardson-Extrapolation hier nicht anwendbar ist. Im Prinzip ist eine Extrapolation daher nicht nötig, da die Werte der unterschiedlichen

Netze bereits sehr gut zusammen passen. Man kann annehmen, dass das gewählte mittlere (REF) Netz für die Parameterstudie ausreichend ist.

Desweitern wurde nicht für jedes Modell der Parameterstudie eine Netz-Konvergenzstudie durchgeführt. Die Untersuchung an den Referenzmodellen soll lediglich einen Anhaltspunkt liefern. Jedoch könnte man z.B. waghalsig annehmen, dass die erhaltenen GCIs des Referenzmodells (0°) näherungsweise mit jenen aller Modelle mit vertikalen Wänden entsprechen – siehe dazu Tabelle 4.

HEXAEDER - 3D - 0° - 10x10x10m - GK2: Netz-Konvergenzstudie							
$C_{pe,CDF}$	sehr feines Netz	feines Netz	mittleres Netz (REF)	Konvergenz-Verhalten		Konvergenz-Ordnung	extrapolierte Lösung
f	f ₁	f ₂	f ₃	R	Konvergenz	p	fex
A side	-0,69	-0,70	-0,87	0,06	monotone K.	6,90	-0,69
B side	-0,56	-0,55	-0,46	0,08	monotone K.	6,16	-0,56
C side							
D front	0,68	0,67	0,60	0,08	monotone K.	6,27	0,68
E back	-0,29	-0,28	-0,28	0,81	monotone K.	0,50	-0,31
F top	-0,95	-1,08	-1,30	0,63	monotone K.	1,16	-0,72
G top	-0,79	-0,92	-1,18	0,47	monotone K.	1,85	-0,68
H top	-0,68	-0,67	-0,62	0,19	monotone K.	4,10	-0,68
I top	-0,44	-0,44	-0,37	0,13	monotone K.	5,05	-0,45
$C_{pe,CDF}$	discretisation error			GCI nach ROACHE			
f	DE ₁	DE ₂	DE ₃ (REF)	GCI ₂₁	GCI ₃₂ (REF)		
A side	0,00	-0,01	-0,18	0,00	0,02		
B side	0,00	0,01	0,10	0,00	0,02		
C side							
D front	0,00	-0,01	-0,08	0,00	0,01		
E back	0,02	0,03	0,04	0,10	0,13		
F top	-0,23	-0,36	-0,57	0,26	0,42		
G top	-0,11	-0,23	-0,49	0,15	0,32		
H top	0,00	0,01	0,06	0,00	0,02		
I top	0,00	0,01	0,07	0,00	0,03		

Tabelle 4: Auswertung der Netz-Konvergenzstudie des 3D-Referenzmodells (0°)

Außerdem ist anzumerken, dass die jeweiligen GCIs sich schrittweise auf das nächst-kleinere Netz beziehen und nicht auf die extrapolierte Lösung. Eine beispielhafte Aussage ist hier, dass sich die Lösung für die Fläche F zufolge Netz 3 (mittel REF) sich in einem Band von $\pm 42\%$ um die Lösung zufolge dem Netz 2 (feiner) befindet.

6.4 Parameterstudie

Im Zuge der Parameterstudie werden folgende Parameter variiert:

- die Gebäudeabmessungen (Länge x Breite x Höhe bzw. $dxbxh$) und die damit verbundenen Domain-Abmessungen
- die Geländekategorie (GK₂, GK₃, GK₄) und die damit verbundenen Einstellungen, wie
 - die Sandkorn-Rauheit k_s am Boden
 - das Geschwindigkeitsprofil $v(z)$ am Inlet
 - das Turbulenzintensitätsprofil $I(z)$ inkl. der ELS am Inlet
- die Neigung der Wände in Strömungsrichtung (-30°, -15°, 0°, +15°, +30°) → α lt. Abbildung 77

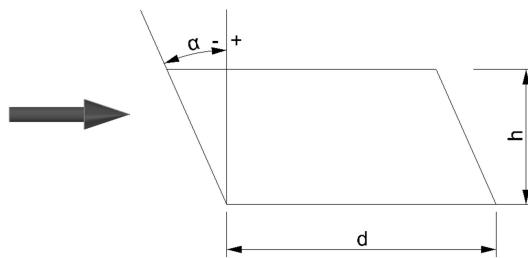


Abbildung 77: Ansicht des Neigungswinkels α in Strömungsrichtung

6.4.1. Hexaeder mit vertikalen Wänden

Die Parameterstudie am Hexaeder mit vertikalen Wänden umfasst 9 Geometrien, für die jeweils alle 3 GK untersucht werden, siehe Tabelle 5. Insgesamt werden also $9 \times 3 = 27$ Hexaeder mit vertikalen Wänden untersucht.

VERTIKALE WÄNDE (0°)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Länge	d [m]	10	20	30	10	10	10	10	20	30	
Breite	b [m]	10	10	10	20	30	10	10	20	30	
Höhe	h [m]	10	10	10	10	10	20	30	20	30	
Geländekategorien		jeweils GK ₂ , GK ₃ und GK ₄									

Tabelle 5: Modelle mit vertikalen Wänden (0°)

6.4.1.1 Untersuchung anhand der c_{pe} -Druckbeiwerte

In Abbildung 78 ist beispielhaft die Auswertung der c_{pe} -Beiwerte für den Hexaeder mit 10x10x10m angeführt. Im Anhang A.1 sind die Diagramme inkl. Wertetabellen für alle Geometrien enthalten.

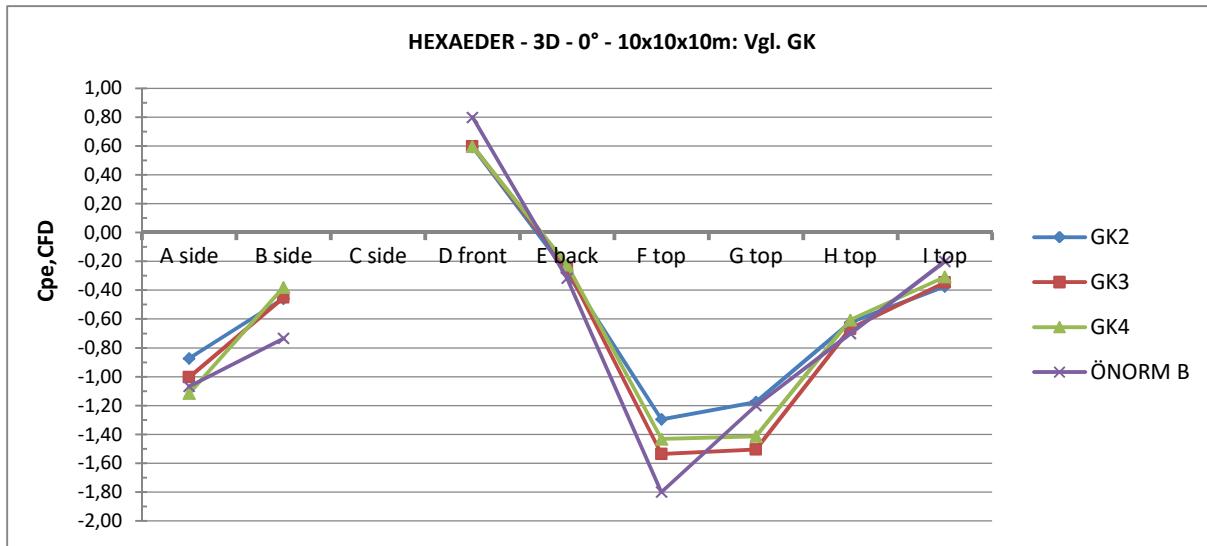


Abbildung 78: Hexaeder - 0° - 10x10x10m: Vergleich zwischen GK u. Norm

Theoretisch sollten die c_{pe} -Werte für alle drei GK den gleichen Wert ergeben. Es stellt sich aber in der Auswertung heraus, dass das nicht der Fall ist. Es können keine Ursachen ausfindig gemacht werden. Eine Vermutung, dass die unterschiedlichen z_{min} bzw. die unterschiedlichen Höhen für das Ansetzen der Mindestgeschwindigkeiten der jeweiligen GK damit in Zusammenhang stehen, kann nicht bestätigt werden. Die Untersuchung dazu wird wiederum am 2D-Referenzmodell durchgeführt, wobei die Geschwindigkeitsprofile für die GK2 und GK4 ohne z_{min} verwendet werden. Auch hier variieren die c_{pe} -Werte.

Bei den meisten Geometrien, jedoch nicht bei allen, liegen die Werte der GK3 zwischen den Werten der GK2 und GK4, weshalb später bei den Modellen mit geneigten Wänden nur mehr die GK2 und GK4 untersucht werden.

An den Dachflächen an der Gebäudevorderseite F und G unterscheiden sich die Werte am stärksten. Bei diesen Flächen war es wie in Abschnitt 6.2.2 bereits beschrieben auch nicht möglich, Netz-Konvergenz zu erzielen. Hier bestünde theoretisch die Möglichkeit eine generalisierte Richardson-Extrapolation durchzuführen und auf das extrapolierte Ergebnis zu schließen.

Im Vergleich zu den Norm-Werten können folgende qualitative Aussagen zu den Druckbeiwerten zufolge CFD gemacht werden:

- $c_{pe,CFD}$ liegen bei den hinteren Seitenflächen B und C immer unter der Norm
- $c_{pe,CFD}$ liegen bei der vorderen Seitenfläche A für GK2 und GK3 unter der Norm, für GK4 über der Norm
- $c_{pe,CFD}$ liegen bei der frontalen Eckfläche am Dach F immer deutlich unter der Norm

- $c_{pe,CFD}$ liegen bei der Frontfläche D immer unter der Norm
 - wenn sich das Objekt in die Höhe streckt, liegen $c_{pe,CFD}$ der Rückseite E immer unter der Norm
 - wenn sich das Objekt in die Breite streckt, liegen $c_{pe,CFD}$ der Rückseite E immer über der Norm
 - bei den Dachflächen G (v. a. bei GK4), H und I liegen $c_{pe,CFD}$ meistens über der Norm
 - laut Norm sind die c_{pe} -Beiwerte für die Dachfläche sowohl positiv als auch negativ angegeben; mittels CFD resultieren jedoch ausschließlich negative Werte (Sog)

6.4.2. Hexaeder mit geneigten Wänden

Bei den Modellen mit schrägen Wänden werden die Oberflächen analog zur Norm bzw. zu den Modellen mit vertikalen Wänden eingeteilt, wie in Abbildung 79 ersichtlich ist. Zu beachten ist jedoch die zusätzlich eingeführte Unterteilung der mittleren Seitenfläche B. Die Fläche B wird an der Stelle, wo sich die Dachflächen H und I berühren, in zwei Teile geteilt, wobei der vordere Teil als B und der hintere Teil als BB bezeichnet wird. Grund für diese Aufteilung ist die stärkere Änderung der Druckverteilung bei geneigten frontalen und rückseitigen Wänden. Dazu ist in Abbildung 80 beispielhaft die Druckverteilung des Hexaeders mit $10 \times 10 \times 10$ m und mit 30° in Strömungsrichtung geneigten Wänden (bei GK2) dargestellt.

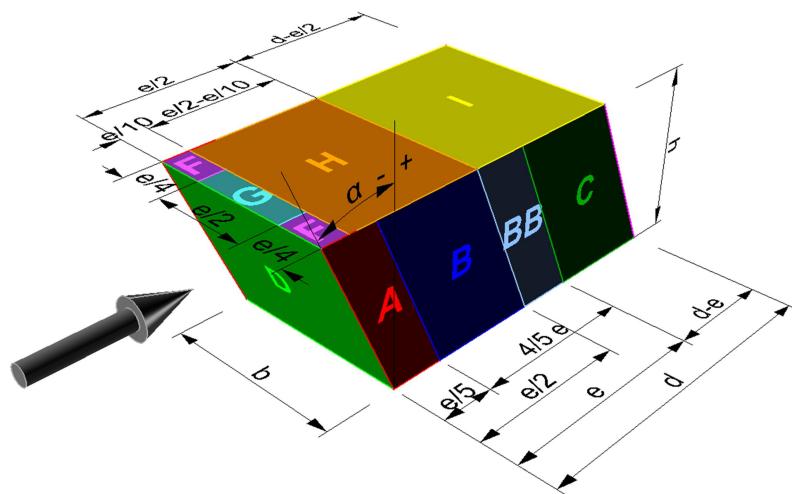


Abbildung 79: 3D-Ansicht der Unterteilung der Gebäude-Oberflächen lt. Norm inkl. zusätzlich gewählter Unterteilung der Seitenflächen (Fläche BB)

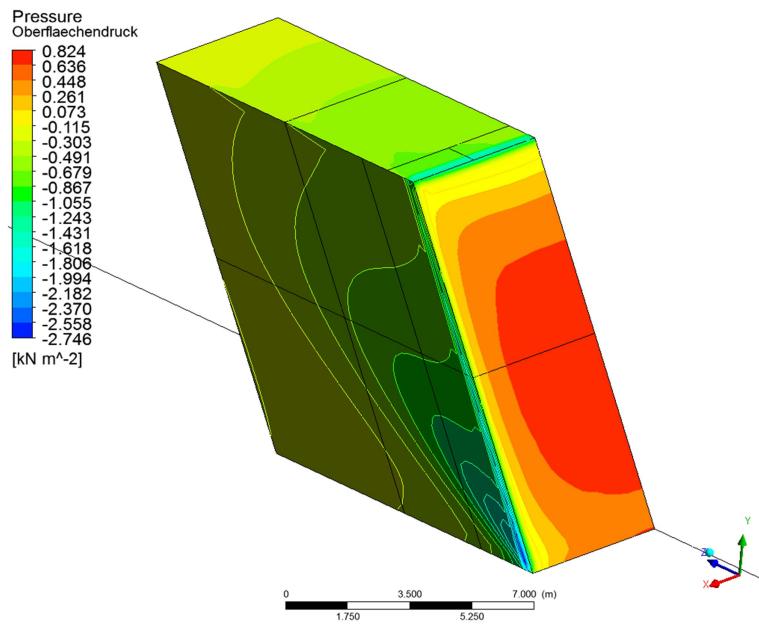


Abbildung 8o: Druckverteilung am Hexaeder mit $10 \times 10 \times 10\text{m}$ und $+30^\circ$ geneigten Wänden bei GK2

Bei den geneigten Wänden werden die Abmessungen $dx \times bx \times h$ auf 10m und 30m beschränkt, 20m werden mit Ausnahme des Würfelförmigen-Modells 20x20x20m ausgelassen. Auch werden nur die GK2 und GK4 untersucht, da davon ausgegangen werden kann, dass die Ergebnisse der GK3 Großteils dazwischen liegen. So wird die Anzahl der zu berechnenden Modelle etwas eingegrenzt und trotzdem sind die Extremwerte abgedeckt. Insgesamt werden $12 \times 2 \times 2 = 48$ Modelle mit schrägen Wänden simuliert. In Tabelle 6 sind die Modelle mit in Strömungsrichtung geneigten Wänden (PLUS°) und in Tabelle 7 diejenigen mit entgegen der Strömungsrichtung geneigten Wänden (MINUS°) aufgelistet.

SCHRÄGE WÄNDE (PLUS°)	2	4	6	8	10	12
Länge	d [m]	10	30	10	10	20
Breite	b [m]	10	10	30	10	20
Höhe	h [m]	10	10	10	30	20
Wandneigung	α [$^\circ$]	+15 +30	+15 +30	+15 +30	+15 +30	+15 +30
Geländekategorien		jeweils GK2 und GK4				

Tabelle 6: Modelle mit schrägen Wänden in Strömungsrichtung geneigt ($+15^\circ, +30^\circ$)

SCHRÄGE WÄNDE (MINUS°)	2	4	6	8	10	12
Länge	d [m]	10	30	10	10	20
Breite	b [m]	10	10	30	10	20
Höhe	h [m]	10	10	10	30	20
Wandneigung	α [$^\circ$]	-15 -30	-15 -30	-15 -30	-15 -30	-15 -30
Geländekategorien		jeweils GK2 und GK4				

Tabelle 7: Modelle mit schrägen Wänden entgegen der Strömungsrichtung geneigt ($-15^\circ, -30^\circ$)

6.4.2.1 Untersuchung anhand der c_{pe} -Druckbeiwerte

In Abbildung 81 und Abbildung 82 ist beispielhaft die Auswertung der c_{pe} -Beiwerte für den Hexaeder mit 10x10x10m mit allen Varianten der Wandneigung angeführt. Der Unterschied zu den vorherigen Diagrammen besteht somit darin, dass nun die Werte für alle Neigungen aufgetragen sind. Im Anhang A.1 sind die Diagramme inkl. Wertetabellen für alle Geometrien enthalten.

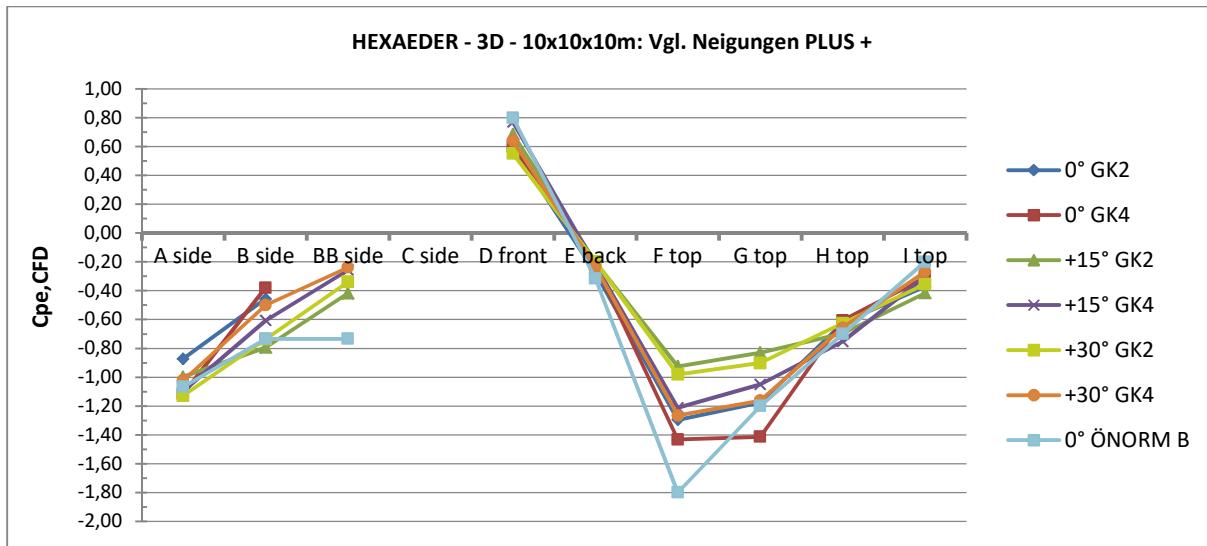


Abbildung 81: Hexaeder - $+15^\circ$ und $+30^\circ$ - 10x10x10m: Vergleich zwischen GK u. Norm

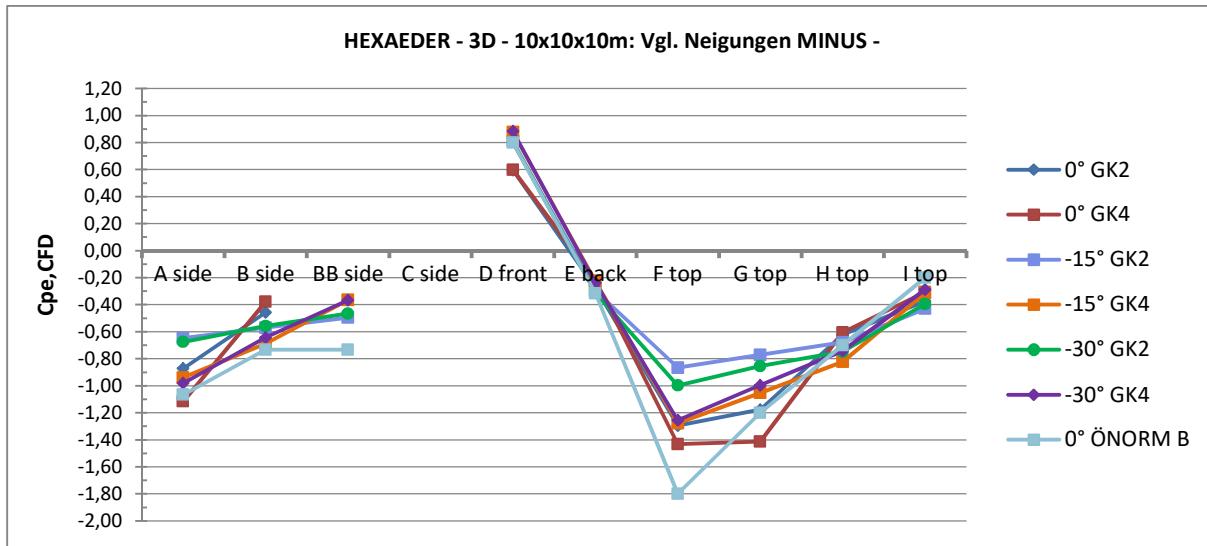


Abbildung 82: Hexaeder - -15° und -30° - 10x10x10m: Vergleich zwischen GK u. Norm

Die Auswertungen ergeben, dass die Neigung der Wände tendenziell nicht sehr großen Einfluss auf die Druckbeiwerte hat. Die Werte aller Neigungen und Objektgeometrien befinden sich in einer gewissen Bandbreite, die bei den rückseitigen Flächen (E) und den hinteren Dachflächen (H, I) am geringsten und bei den Front-und Seitenflächen (D, A, B, BB, C) relativ gering ausfällt. Die größten Unterschiede finden sich an den vorderen Dachflächen (F, G) wieder, wo aber auch die größten Unterschiede zwischen den

GK vorliegen und es generell hinsichtlich Netz-Konvergenz fraglich ist, wie genau die Werte stimmen. Klammt man diese zwei Flächen (F und G) aus, liegen die Werte für alle Wandneigungen relativ nah beieinander. Eine genauere Aussage lässt sich leider nicht treffen.

6.4.3. Auswertung der c_{pe} -Beiwerte in Abhängigkeit des Neigungswinkels

Um den Einfluss des Neigungswinkels auf die Druckbeiwerte c_{pe} genauer zu analysieren, sind in diesem Abschnitt die c_{pe} -Werte in Abhängigkeit des Wandneigungswinkels aufgetragen.

Die Diagramme werden für alle Geometrien $dxbxh$ jeweils in Seitenflächen (A, B, BB, C), Front- und Rückseite (D u. E) und Dachflächen (F, G, H, I) gegliedert.

Für die Referenzabmessung von $10x10x10m$ sind Abbildung 83, Abbildung 84 und Abbildung 85 abgebildet. Die Diagramme inkl. Wertetabellen aller Abmessungen sind im Anhang A.1.3 zu finden.

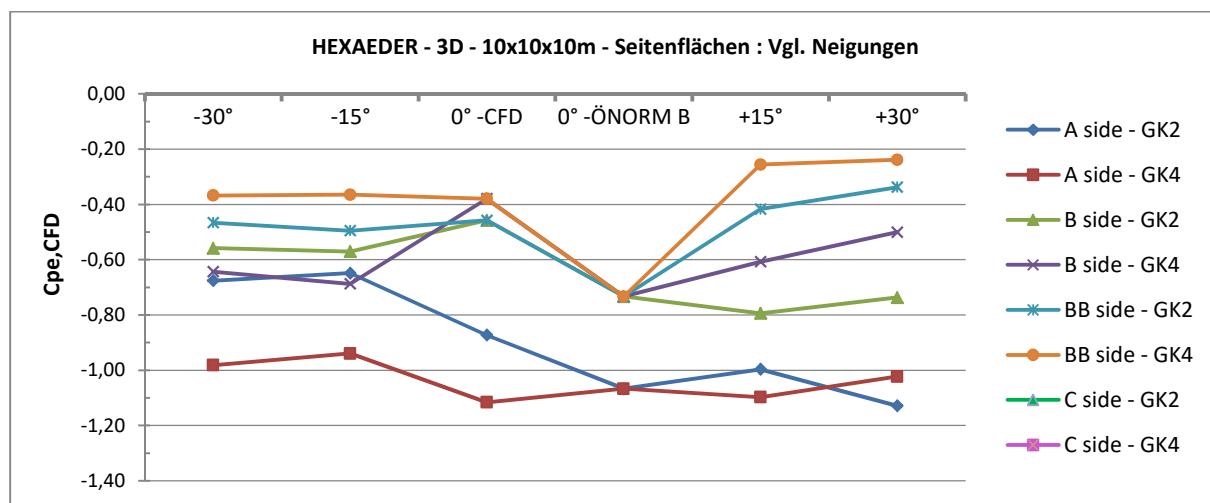


Abbildung 83: Hexaeder -- $10x10x10m$ - Seitenflächen: Vergleich der Wandneigungswinkel

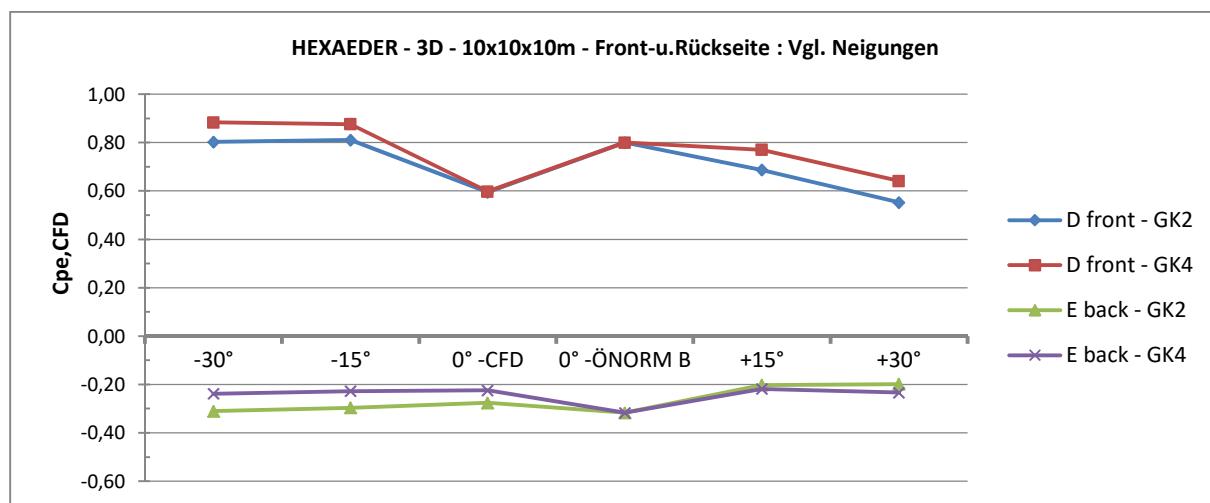


Abbildung 84: Hexaeder -- $10x10x10m$ – Front-u. Rückseite: Vergleich der Wandneigungswinkel

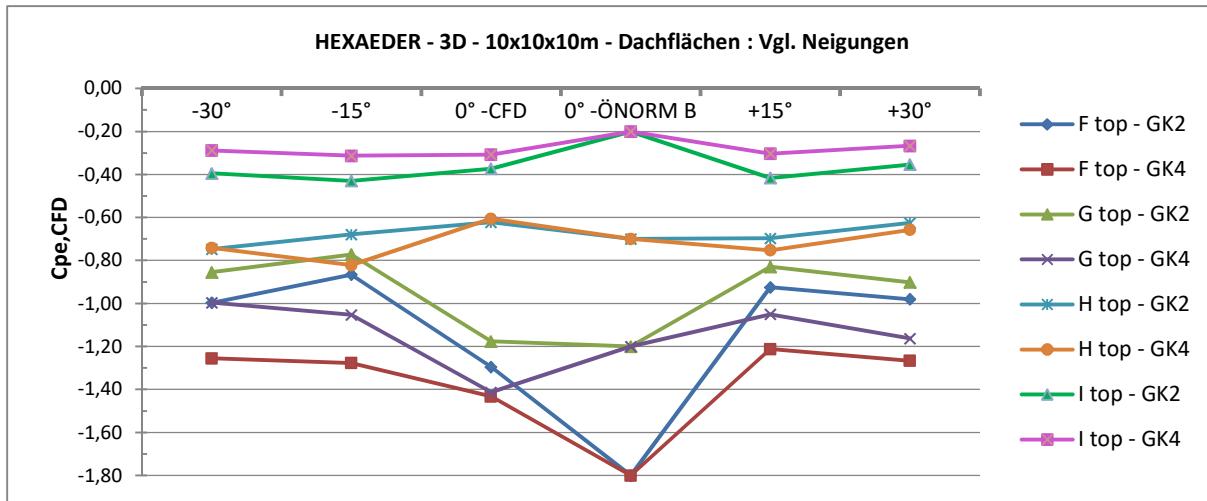


Abbildung 85: Hexaeder -- 10x10x10m - Dachflächen: Vergleich der Wandneigungswinkel

In diesen Diagrammen ist wie bereits erwähnt zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen den Beiwerten der versch. Wandneigungen relativ gering sind. Bei den Front- und Rückseiten (D, E) sind die Unterschiede am geringsten.

Auffallend ist auch, dass die Modelle mit geneigten Wänden trotz unterschiedlicher Neigungsrichtung meist besser miteinander übereinstimmen als die Modelle mit vertikalen Wänden. Das gilt v. a. für die Dachflächen.

6.4.4. Statistische Auswertung der Drücke mit Grenzwertbetrachtung

Da bei der Auswertung über die c_{pe} -Beiwerte aufgrund der Einteilung in Streifen und der folgenden Mittelung der c_{pe} -Beiwerte Unsicherheiten entstehen, wurde entschieden, anstatt der c_{pe} -Beiwerte nochmals die resultierenden Drücke zu untersuchen und statistisch auszuwerten. Dafür wurden nur die Daten der 6 maximalen Geometriekombinationen ($dx \times bx \times h$) verwendet: $10 \times 10 \times 10\text{m}$, $30 \times 10 \times 10\text{m}$, $10 \times 30 \times 10\text{m}$, $10 \times 10 \times 30\text{m}$, $20 \times 20 \times 20\text{m}$, $30 \times 30 \times 30\text{m}$. So wurden getrennt für alle Flächen (A bis I) die Druckwerte [kN/m^2] für jeden Neigungswinkel α (-30° , -15° , $+15^\circ$, $+30^\circ$) auf den Druckwert für 0° normiert (w_α / w_{0°).

Da manche Werte als Ausreißer angesehen wurden, wurden für die normierten Werte mittels der Boxplot-Methode mögliche Ausreißer ([39], Abbildung 86) identifiziert und aus der Datenmenge gelöscht.

Die Ursache dieser Ausreißer ist nicht mit Sicherheit geklärt, wobei in manchen Fällen anhand des MP-Konvergenzverlaufs darauf geschlossen werden kann, dass die Drücke an einigen Stellen stärker oszillieren und nicht exakt der jeweilige Mittelwert ausgewertet werden konnte. Großteils bleibt die Ursache aber ungeklärt.

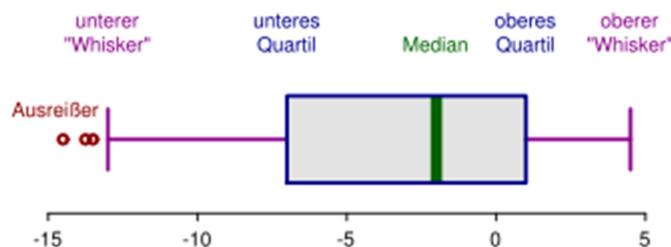


Abbildung 86: Bsp. einer Darstellung einiger Ausreißers im Boxplot, aus [39].

Nachdem die Ausreißer gelöscht wurden, wurden die Maximalwerte und 95%-Quantile der Datenmenge je Neigungswinkel untersucht. Dabei wurde auch eine Grenzwertbetrachtung mithilfe der vorhandenen Netzkonvergenzstudien durchgeführt. Die Netzkonvergenzstudie wurde herangezogen, um die wahrscheinliche Abweichung vom mittleren zum sehr feinen Netz zu ermitteln. Diese prozentuellen Abweichungen wurden für jede Fläche auf die resultierenden Druckwerte im Sinne einer Grenzwertbetrachtung angewendet.

Mittels dieser resultierenden Grenzwerte wurden ingenieurmäßig – meist aufgerundete bzw. auf der sicheren Seite liegende – Faktoren F je Neigungswinkel zugeordnet.

Dabei wurden für die Flächen H und I aufgrund enormer Ausreißer die Ergebnisse von den Modellen mit den Abmessungen $dx \times bx \times h = 20 \times 20 \times 20\text{m}$ (H) bzw. $dx \times bx \times h = 30 \times 10 \times 10\text{m}$ (I) komplett gelöscht, wodurch

realistischere Werte erhalten werden konnten. Auch die Maximalwerte der Faktoren F stimmen dann mit den entsprechenden 95%-Quantilwerten sehr gut überein.

Für die Fläche A sind in Abbildung 87 beispielhaft alle normierten Druckwerte inklusive der Ausreißer und die ingenieurmäßig definierten Faktoren F (rote Punkte) dargestellt. Die Diagramme aller weiteren Flächen sind im Anhang A.1.4 enthalten.

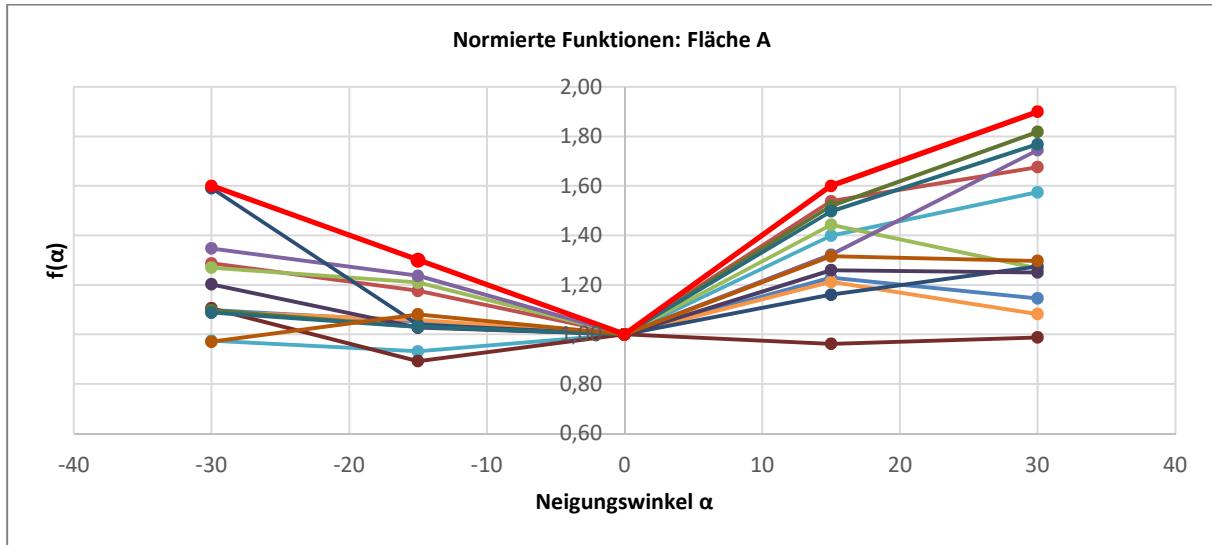


Abbildung 87: Normierte Funktionen für die Fläche A

Somit können die Faktoren F für bestimmte Neigungswinkel oder als linear-interpolierte Werte für Winkel dazwischen verwendet werden:

$$c_{p,\alpha} = c_{p,0^\circ} \cdot F_{interp}(\alpha) \quad (82)$$

Zusammengefasst können die Ergebnisse in Form einer Tabelle als absolute Faktoren F für ausgewählte bzw. berechnete Winkel α (Tabelle 8) dargestellt werden.

F					
Fläche	-30°	-15°	0°	15°	30°
A	1,6	1,3	1,0	1,6	1,9
B	1,3	1,3	1,0	1,3	1,3
C	1,6	1,3	1,0	0,8	0,8
D	1,6	1,6	1,0	1,4	1,4
E	1,6	1,2	1,0	1,3	1,3
F	2,0	1,5	1,0	1,7	1,9
G	1,8	1,6	1,0	2,0	2,0
H	1,7	1,4	1,0	1,3	1,3
I	1,6	1,3	1,0	1,2	1,2

Tabelle 8: Faktoren F für geneigte Wände

Alternativ zu absoluten Werten könnte man auch Trendlinien ermitteln, wobei für jede Fläche zwei Trendlinien – einmal für entgegen der Strömungsrichtung (MINUS α) und einmal für in Strömungsrichtung geneigten Wänden (PLUS α) – zugeordnet werden könnten.

Diese ingenieurmäßigen Trendlinien würden sich in Abhängigkeit vom Neigungswinkel α ermitteln lassen und hätten die Form

$$f(\alpha) = a \cdot \alpha^2 + b \cdot \alpha + 1,0 . \quad (83)$$

Folglich könnten für jede Fläche die Druckbeiwerte in Abhängigkeit des Neigungswinkels α auf Grundlage des Normwertes für vertikale Wände (0°) ermittelt werden:

$$c_{p,\alpha} = c_{p,0^\circ} \cdot f(\alpha) \quad (84)$$

6.4.5. Resümee der Parameterstudie

Leider wurde im Zuge der Bearbeitung dieser MA am Beginn zu wenig Wert auf die Netzqualität gelegt bzw. wurde verfrüht beschlossen, dass die mittlere Netzfeinheit ausreichend für die Parameterstudie sei. Eine Begründung war, dass noch feinere Netze für eine MA zu unverhältnismäßigen Rechenzeiten und zu großem Aufwand führen würden.

Für einen Teil der Modelle war die Feinheit durchaus ausreichend, was die Netzkonvergenzstudien der Modelle mit geneigten Wänden belegt. Jedoch lässt sich daraus nicht auf die Netzqualität aller restlichen Modelle schließen.

Im Nachhinein stellte sich daher leider heraus – u. a. aufgrund unerklärbarer extremer Ausreißer oder unlogischer Oberflächendrücke -, dass die Netze bei einigen Modellen definitiv zu grob gewählt wurden. Somit kann man den Ergebnissen leider nicht trauen.

Trotzdem wird mit den erhaltenen Ergebnissen mittels einer statistischen Auswertung der Drücke mit einer Grenzwertbetrachtung auf Basis der vorhandenen Netz-Konvergenzstudien ein Vorschlag gemacht, wie man mittels eines Multiplikationsfaktors den c_{pe} -Normwert für vertikale Wände auf geneigte Wände in Abhängigkeit des Wandneigungswinkels anpassen und somit die entsprechenden Windlasten ermitteln könnte (siehe Abschnitt 6.4.4).

7. Fazit und Ausblick

Diese Arbeit ist im ersten Teil eine Sammlung an Grundlagenwissen zu Strömungsmechanik, CFD und deren Anwendung auf einfache Gebäudegeometrien bzw. stumpfe Körper. Sie kann dazu als Nachschlagewerk dienen.

Auf Grundlage der vorliegenden CFD-Ergebnisse der Parameterstudie wird ein Vorschlag für die Ermittlung von c_{pe} -Beiwerten für geneigte Wände, wo in der Norm keine Angaben gemacht werden, gemacht. Mittels eines Multiplikationsfaktors kann der c_{pe} -Normwert für vertikale Wände auf geneigte Wände in Abhängigkeit des Wandneigungswinkels angepasst und somit der entsprechende Druck berechnet werden.

Da aber leider erst im Nachhinein festgestellt wurde, dass die Rechennetze teilweise zu grob gewählt wurden, kann man den Ergebnissen mancher Modelle nicht wirklich trauen und es wird empfohlen, die Parameterstudie mit ausreichend feinen Netzen neu und umfangreicher aufzubereiten. Danach wäre der Vergleich der Ergebnisse einer akkurateen neuen Parameterstudie mit den in dieser MA erhaltenen Ergebnissen interessant.

Bei komplexeren Geometrien wäre es außerdem ratsam, sich mit ICEM, dem Netzerstellungs-Programm von ANSYS, auseinanderzusetzen, da damit exaktere Einstellungen z. B. zu Elementlängen oder Bias-Funktionen möglich sind.

Generell sollte man sich im Hinblick auf den Rechenaufwand intensiver mit der Netz-Erstellung auseinandersetzen, um die Elementanzahl so gering wie möglich halten zu können – wie etwa in wichtigen Bereichen feiner aufzulösen und in unwichtigeren Bereichen deutlich größere Elemente verwenden.

Bzgl. des direkten Vergleichs mit der Wind-Norm könnte man auch Überlegungen zur Flächeneinteilung andenken.

8. Verzeichnisse

8.1 Literatur

- [1] ÖNORM EN 1991-1-4 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Allgemeine Einwirkungen - Windlasten, 2011-05-15.
- [2] ÖNORM B 1991-1-4 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Allgemeine Einwirkungen - Windlasten - Nationale Festlegungen, 2013-05-01.
- [3] W. - H. HUCHO, *Aerodynamik der stumpfen Körper - Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Praxis*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2002.
- [4] B. BLOCKEN, W.D. JANSSEN, and T. VAN HOOFF, "CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus," *Environmental Modelling & Software*, no. 30, pp. 15-34, 2011.
- [5] www.cfd-online.com. (2012, June) www.cfd-online.com. [Online]. https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulent_length_scale
- [6] ANSYS Inc., *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*, 17th ed. Canonsburg, 2016.
- [7] J. FRANKE, A.i HELLSTEN, H. SCHLÜNZEN, and B. CARISSIMO, *Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the urban Environment - COST Action 732*. Hamburg: COST Office, 2007.
- [8] CADFEM esocaet Seminar, Strömungsmechanik: Begriffe und Anwendungen, 2017, Vortragender: Georg Scheuerer.
- [9] H. OERTEL, M. BÖHLE, and U. DORHMANN, *Strömungsmechanik: Grundlagen - Grundgleichungen - Lösungsmethoden - Softwarebeispiele*, 5th ed. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009.
- [10] ANSYS Inc., Introduction to CFX: Chapter 9 Turbulence, April 28, 2009.
- [11] ANSYS Inc., Turbulence Modeling Using ANSYS CFX: Lecture 4: Near Wall Modeling, September 13, 2013.
- [12] Rüdiger SCHWARZE, *CFD-Modellierung - Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Vieweg, 2013.
- [13] H. SCHLICHTING and K. GERSTEN, *Grenzschicht-Theorie*, 9th ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.
- [14] ANSYS Inc., *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide*, 170th ed., ANSYS Inc., Ed. Canonsburg, 2016.
- [15] S. LECHELER, *Numerische Strömungsberechnung - Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele*, 2nd

- ed. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2009.
- [16] ANSYS Inc., Introduction to ANSYS CFX: Lecture 10: Turbulence, December 17, 2012.
- [17] F. MENTER, B. HEMSTROM, and M. HENRIKSSON, "CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor-Safety Applications," 2002.
- [18] J. H. FERZIGER and M. PERIC, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 3rd ed. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 2002.
- [19] Y. TOMINAGA et al., "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96, pp. 1749-1761, April 2008.
- [20] Salim M. SALIM and S.C. CHEAH, "Wall $y+$ Strategy for Dealing with Wall-bounded Turbulent Flows," *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, no. Vol II., März 2009.
- [21] (2015, Juni) CFDyna.com. [Online]. <http://www.cfdyna.com/CFDHT/CFDHT.html>
- [22] www.cfd-online.com. (2012) www.cfd-online.com. [Online]. <https://www.cfd-online.com/Forums/cfx/110640-difference-between-ansys-cfx-fluent.html>
- [23] H. SCHLICHTING, *Boundary Layer Theory*, 7th ed., McGraw-Hill Science/Engineering/Mat, Ed., 1979.
- [24] Frank M. WHITE, *Fluid Mechanics*, 7th ed., McGraw-Hill, Ed. New York: McGraw-Hill Education Ltd., 1999.
- [25] ANSYS Inc., Introduction to ANSYS CFD Professional: Lecture 09: domains, Boundary Conditions and Sources, 2012.
- [26] ANSYS Inc., Introduction to CFX: Chapter 4: Solver Settings, 2009.
- [27] B. BLOCKEN, "Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations," *Building and Environment*, pp. 219-245, Februar 2015.
- [28] VDI 3783, *Environmental meteorology – Prognostic microscale wind field models - Evaluation for flow around buildings and obstacles*, Verein Deutscher Ingenieure, Ed. Berlin: Beuth-Verlag, 2005.
- [29] E. LAURIEN and H. OERTEL, *Numerische Strömungsmechanik: Grundgleichungen und Modelle - Lösungsmethoden - Qualität und Genauigkeit*, 3rd ed., Vieweg + Teubner Verlag, Ed. Wiesbaden, 2009.
- [30] P. J. ROACHE, "Verification of Codes and Calculations," *AIAA Journal*, vol. 36, no. 5, pp. 696-702, May 1998.

- [31] P.J. ROACHE, "Perspective: A method for uniform reporting of grid refinement studies," *Journal of Fluids Engineering ASME*, no. 3, pp. 405-413, Sept. 1994.
- [32] Christopher J. ROY, "Review of code and solution verification procedures for computational simulation," *Journal of Computational Physics*, vol. 205, pp. 131-156, May 2005.
- [33] R. YOSHIE and A., TOMINGA, Y. MOCHIDA, "CFD prediction of wind environment around a high-rise building located in an urban area," in *The Fourth International Symposium on Computational Wind Engineering*, Yokohama, Japan, 2006.
- [34] T. TAMURA, K. NOZAWA, and K.i KONDO, "AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96, pp. 1974-1984, April 2008.
- [35] B. BLOCKEN and C. GUALTIERI, "Ten iterative steps for model development and evaluation applied to Computational Fluid Dynamics for Environmental Fluid Mechanics," *Environmental Modelling & Software*, no. 33, pp. 1-22, Februar 2012.
- [36] P.J. ROACHE, "Quantifications of uncertainty in computational fluid dynamics," *Annu Rev Fluid Mech*, pp. 29:123-60, 1997.
- [37] Amit SAXENA. www.esi-cfd.com. [Online]. http://www.esi-cfd.com/esi-users/turb_parameters/
- [38] P.J. ROACHE, "A method for uniform reporting of grid refinement studies," *Journal of Fluids Engineering*, vol. Vol. 116, no. 3, pp. 405-413, September 1994.
- [39] (2017, July) Wikipedia. [Online]. <https://de.wikipedia.org/wiki/Boxplot>
- [40] H. MONTAZERI and B. BLOCKEN, "CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: validation and sensitivity analysis," *Building and Environment*, no. Volume 60, pp. 137-149, Februar 2013.

8.2 Abbildungen

Abbildung 1: Speicherung der Daten- links: in den Eckpunkten, rechts: in Zellmitte, aus [5]	18
Abbildung 2: Supersonische Strömung um ein Projektil , aus [8].	20
Abbildung 3: Hyperbolische, elliptische und parabolische Strömung	21
Abbildung 4: Definition der Schubspannung τ (mittels der sog. Couette-Strömung), aus OERTEL [9], S.47.	21
Abbildung 5: Schubspannung τ für Newton'sche und Nicht-Newton'sche Fluide, aus OERTEL [9], S.49.....	22
Abbildung 6: Eingangswerte für die Ermittlung der Re-Zahl, aus [8].....	23
Abbildung 7: Reynolds' Experiment: laminare und turbulente Strömung mit Übergangsbereich, vgl. [10]....	24
Abbildung 8: Energiekaskade (Energiegehalt E in Abhängigkeit von der Wirbelgröße a),.....	25
Abbildung 9: Turbulente Grenzschicht, aus [11].....	26
Abbildung 10: Universelles Wandgesetz: Geschwindigkeitsverteilung u^+ in Abhängigkeit von y^+ ,.....	27
Abbildung 11: Grenzschicht a) an der ebenen Platte und b) an der gekrümmten Wand, aus HUCHO [3], Bild 2.10.	28
Abbildung 12: Grenzschicht am Boden, aus HUCHO [3] Bild 3.59.	28
Abbildung 13: Vergleich Integral- und Differentialform, aus LECHELER [15], S.8.....	35
Abbildung 14: Vorwärts-, Rückwärts- und zentrale räumliche Differenz, aus LECHELER [15], S.42.....	36
Abbildung 15: Berechnungsverfahren für die räumliche Diskretisierung im Vergleich, aus LECHELER [15], S. 57.	37
Abbildung 16: Reynolds-Ansatz für die u -Komponente der Geschwindigkeit, aus OERTEL [9], S. 128.....	38
Abbildung 17: Vergleich zwischen DNS, LES und RANS, aus [16].....	39
Abbildung 18: Topologie bei körperangepassten strukturierten Gittern, aus SCHWARZE [12], s. 26.	41
Abbildung 19: Unstrukturierte Gitter, aus SCHWARZE [12], s. 26.	41
Abbildung 20: Blockstrukturierte und hybride Gitter, aus SCHWARZE [12], s. 26.	41
Abbildung 21: Auflösung der Grenzschicht mit Wandfunktionen oder mit direkter Auflösung, aus [10].....	43
Abbildung 22: Ablösezonen bei einem Tragflügelprofil, aus [10].	44
Abbildung 23: Prismatisches Element zufolge Inflation-Layer, aus TOMINAGA [19].	44
Abbildung 24: y^+ , aus [10].	45
Abbildung 25: Einteilung der wandnahen Grenzschicht, aus [21].	46
Abbildung 26: Flussdiagramm für die Einstellungen der Inflations.....	49
Abbildung 27: Mögliche Ränder in ANSYS CFX, aus [14], S.66.....	50
Abbildung 28: Coanda-Effekt wenn Strahl in Rohrmitte eintritt, aus [25].	51
Abbildung 29: Zur Verfügung stehende Turbulenzmodelle in ANSYS CFX, aus [10].	53
Abbildung 30: Vgl. der Ergebnisse versch. numerischer Berechnungsverfahren, aus [26].	56
Abbildung 31: Eigenschaften der drei Klassen von Lösungsalgorithmen, aus LECHELER [15].	56
Abbildung 32: Beispiel einer grid convergence study inklusive GCI, aus BLOCKEN [27].	65
Abbildung 33: Abstände der Gebietsgrenzen vom umströmten Objekt in Abhängigkeit der Objekthöhe H . 69	69
Abbildung 34: Erklärung des blockage ratios, aus BLOCKEN [27].	71
Abbildung 35: Netz-Einstellung mittels Bias an den Objektkanten (am 10x10x10m Referenz-Hexaeder).....	73
Abbildung 36: Schematische Darstellung der aerodynamischen Rauheitslänge z_0	74
Abbildung 37: Geländekategorien und Geländeparameter, aus ÖNORM EN 1991-1-4:2013 4.3.2 Tab. 4.1 [2].	75
Abbildung 38: Updated DAVENPORT-WIERINGA-Rauheitsklassifikation, aus BLOCKEN [27].....	76
Abbildung 39: Profile der atmosphärischen Grenzschicht über versch. Landschaftsformen mit den zugehörigen Exponenten α nach DAVENPORT (1960), aus HUCHO [3] Bild 5.6.....	77

Abbildung 40: Geländekategorien und Geländeparameter, aus ÖNORM B 1991-1-4: 2013-05-01, Tab. 1 [2].78	
Abbildung 41: Halbsystem des 3D-Referenzmodells mit allen Randbedingungen.....	82
Abbildung 42: MPs der Oberflächendrücke am Objekt des 3D-Referenzmodells	84
Abbildung 43: Konvergenzverlauf der Residuen der Erhaltungsgleichungen des 3D-Referenzmodells	85
Abbildung 44: Konvergenzverlauf der Oberflächendrücke an den MPs des 3D-Referenzmodells	85
Abbildung 45: Konvergenzverlauf der MPs des Modells: +30° geneigte Wände - 20x20x20m – GK4.....	86
Abbildung 46: Außendruckbeiwerte c_{pe} in Abhängigkeit von der Lasteinflussfläche A,.....	88
Abbildung 47: Druckverteilung am 3D-Referenzmodell in Strömungsrichtung gesehen	89
Abbildung 48: Druckverteilung am 3D-Referenzmodell entgegen der Strömungsrichtung gesehen.....	89
Abbildung 49: Einteilung der Seitenflächen lt. ÖNORM B 1991-1-4:2013 7.2.2 [2], Bild 7.5.	91
Abbildung 50: Einteilung der Dachflächen lt. ÖNORM B 1991-1-4:2013 7.2.3 [2], Bild 7.6.	91
Abbildung 51: Einteilung des Geschwindigkeitsdruckes in horizontale Streifen,.....	93
Abbildung 52: 3D-Ansicht der Unterteilung der Gebäudeoberflächen lt. Norm.....	95
Abbildung 53: Anordnung der MPs (gelbe Kreuze) innerhalb der leeren Domain	96
Abbildung 54: Geschwindigkeitsverteilung in der leeren Domain mit z_{min} und ohne Inflations (REF).....	97
Abbildung 55: Geschwindigkeitsverteilung in der leeren Domain ohne z_{min} und ohne Inflations	98
Abbildung 56: Geschwindigkeitsverteilung in der leeren Domain mit z_{min} und mit Inflations	98
Abbildung 57: Das Vollsystem mit Randbedingungen und MPs	99
Abbildung 58: Stromlinien um den 10x10x10m Hexaeder des Vollsystems	99
Abbildung 59: Druckverteilung des 10x10x10m Hexaeders des Vollsystems	100
Abbildung 60: Vergleich der c_{pe} -Beiwerte am Halbsystem zum Vollsystem	100
Abbildung 61: Untersuchung zum Geschwindigkeitsprofil am 3D-Referenzmodell.....	101
Abbildung 62: Flächeneinteilung des 2D-Modells	102
Abbildung 63: Untersuchung zur ELS am 2D-Referenzmodell	103
Abbildung 64: Isometrie der Stromlinien des 3D-Referenzmodell	104
Abbildung 65: Seitenansicht der Stromlinien des 3D-Referenzmodell	104
Abbildung 66: Untersuchung zu den Inflations am Boden am 2D-Referenzmodell	105
Abbildung 67: Untersuchungen zum Geschwindigkeitsprofil am 2D-Referenzmodell.....	106
Abbildung 68: Untersuchung zur Kombination von z_{min} und k_s	107
Abbildung 69: Isometrie des Netzes des 3D-Referenzmodells der MA.....	108
Abbildung 70: Seitenansicht des Netzes des 3D-Referenzmodells der MA.....	109
Abbildung 71: Netz-Konvergenzstudie am 3D-Referenzmodell bei vertikalen Wänden (0°).....	109
Abbildung 72: Innerer Netz-Bereich des Modells 10x10x10m mit in Strömungsrichtung	111
Abbildung 73: Netz-Konvergenzstudie am 3D-Referenzmodell mit in Strömungsrichtung	112
Abbildung 74: Netz-Konvergenzstudie am 3D-Referenzmodell mit entgegen der	113
Abbildung 75: Generalisierte Richardson-Extrapolation am 3D- Referenzmodell mit vertikalen Wänden (0°)	114
Abbildung 76: Normalisierte generalisierte Richardson-Extrapolation am 3D- Referenzmodell	114
Abbildung 77: Ansicht des Neigungswinkels α in Strömungsrichtung	116
Abbildung 78: Hexaeder - 0° - 10x10x10m: Vergleich zwischen GK u. Norm.....	117
Abbildung 79: 3D-Ansicht der Unterteilung der Gebäude-Oberflächen lt. Norm inkl. zusätzlich	118
Abbildung 80: Druckverteilung am Hexaeder mit 10x10x10m und +30° geneigten Wänden bei GK2	119
Abbildung 81: Hexaeder - $+15^\circ$ und $+30^\circ$ - 10x10x10m: Vergleich zwischen GK u. Norm	120
Abbildung 82: Hexaeder - -15° und -30° - 10x10x10m: Vergleich zwischen GK u. Norm	120
Abbildung 83: Hexaeder -- 10x10x10m - Seitenflächen: Vergleich der Wandneigungswinkel	121

Abbildung 84: Hexaeder -- 10x10x10m – Front- u. Rückseite: Vergleich der Wandneigungswinkel	121
Abbildung 85: Hexaeder -- 10x10x10m - Dachflächen: Vergleich der Wandneigungswinkel.....	122
Abbildung 86: Bsp. einer Darstellung einiger Ausreißers im Boxplot, aus [39].	123
Abbildung 87: Normierte Funktionen für die Fläche A	124

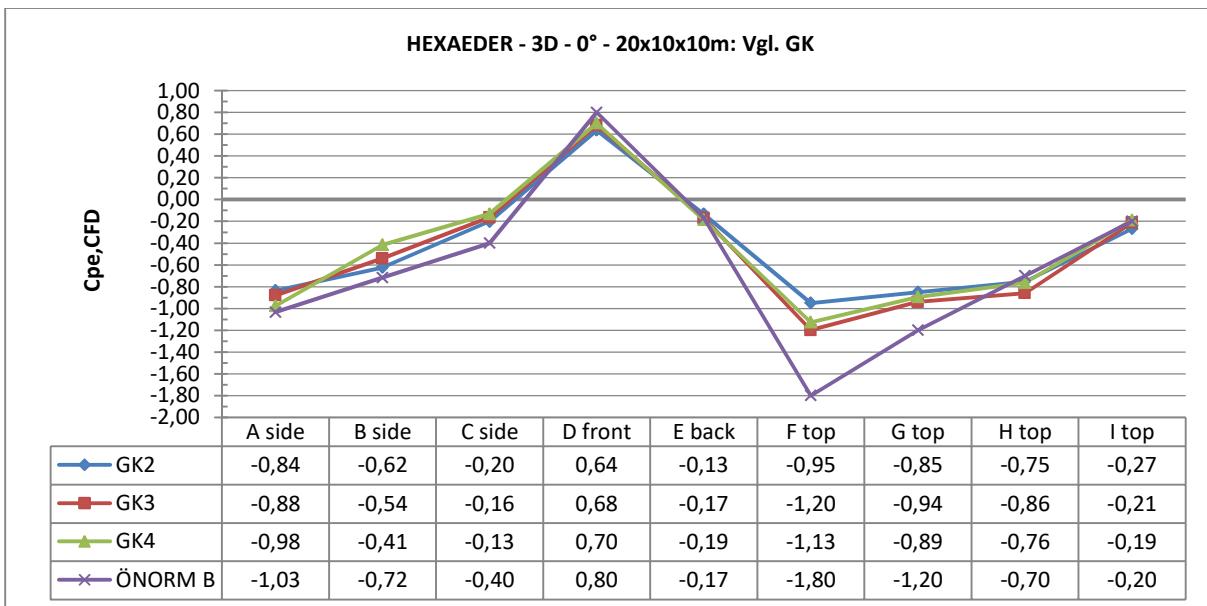
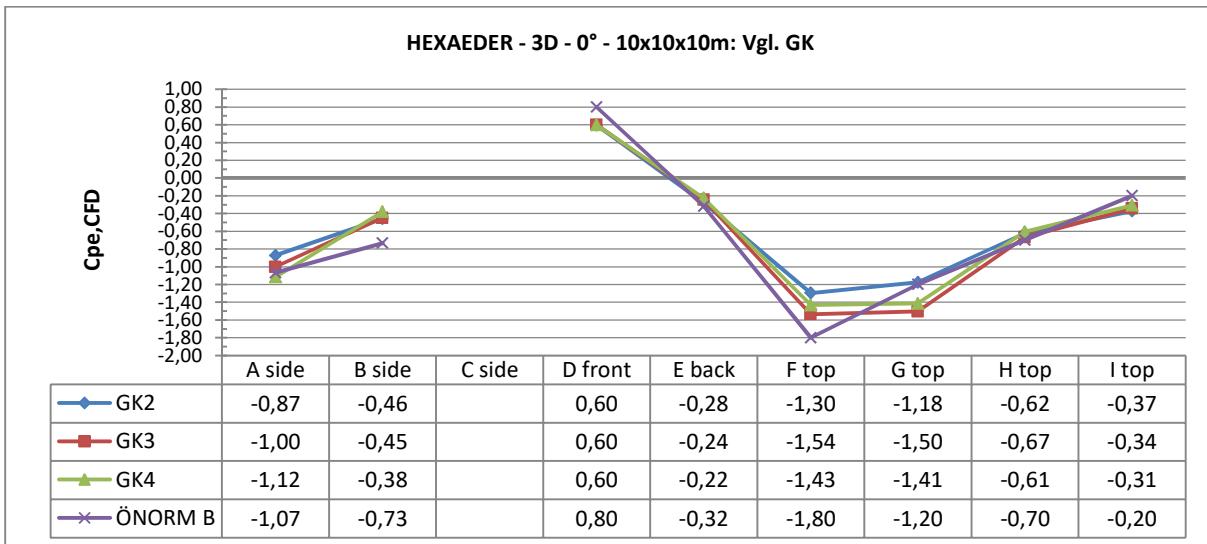
8.3 Tabellen

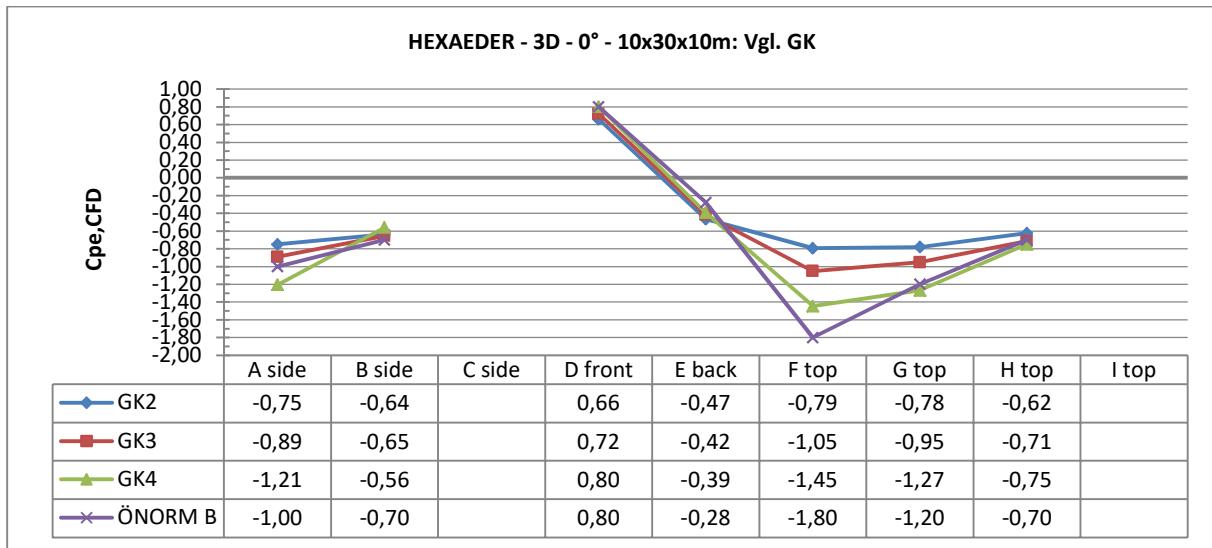
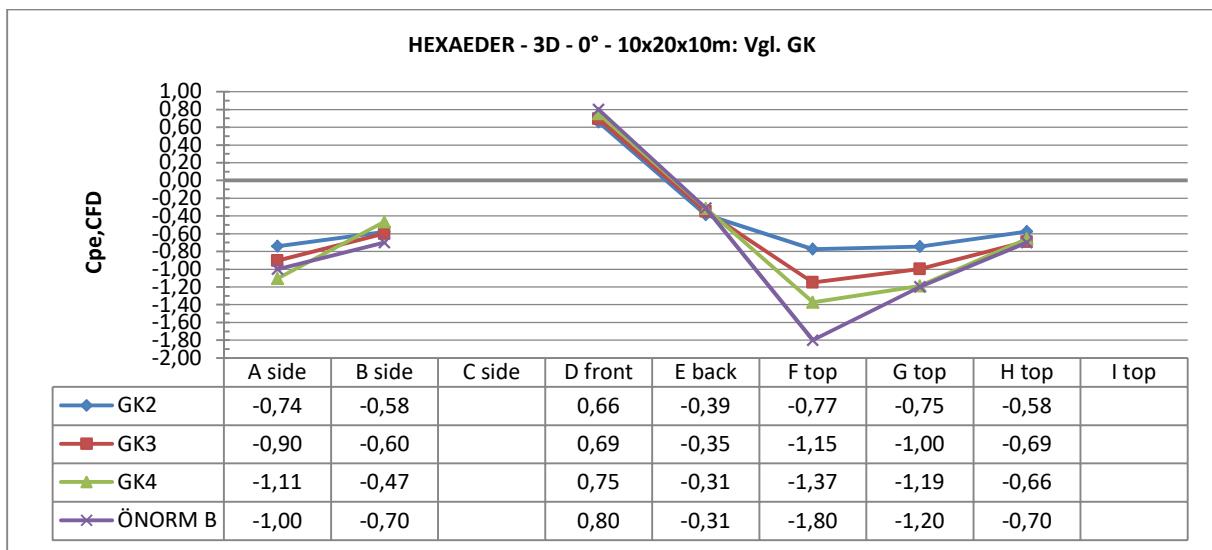
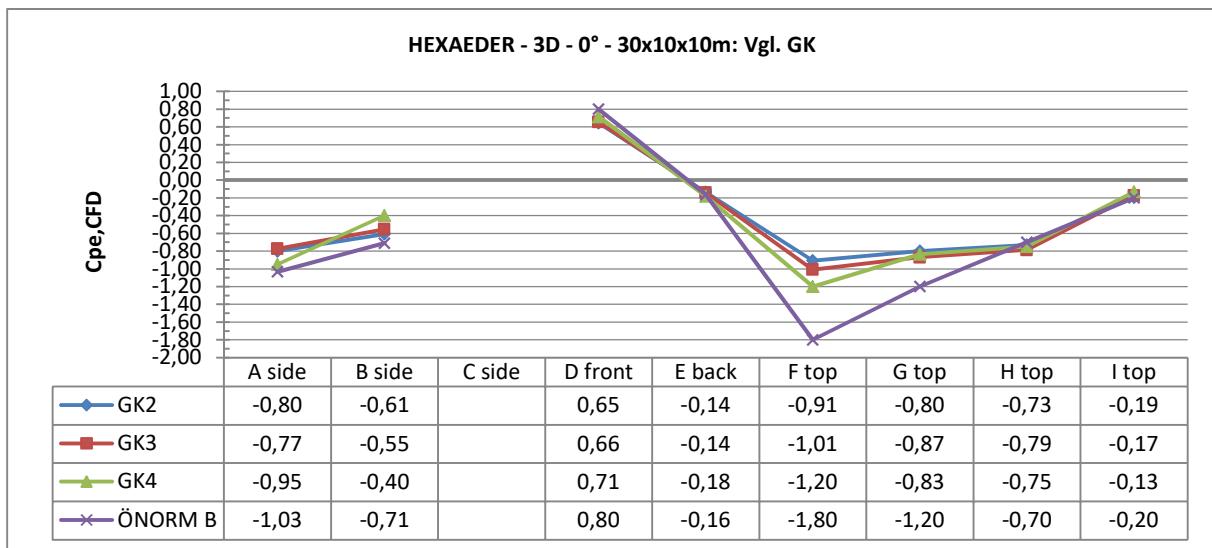
Tabelle 1: Daten zu den einzelnen Netzen (0°).....	109
Tabelle 2: Daten zu den einzelnen Netzen ($+30^\circ$).....	111
Tabelle 3: Daten zu den einzelnen Netzen (-30°).....	112
Tabelle 4: Auswertung der Netz-Konvergenzstudie des 3D-Referenzmodells (0°)	115
Tabelle 5: Modelle mit vertikalen Wänden (0°)	116
Tabelle 6: Modelle mit schrägen Wänden in Strömungsrichtung geneigt ($+15^\circ, +30^\circ$)	119
Tabelle 7: Modelle mit schrägen Wänden entgegen der Strömungsrichtung geneigt ($-15^\circ, -30^\circ$).....	119
Tabelle 8: Faktoren F für geneigte Wände	125

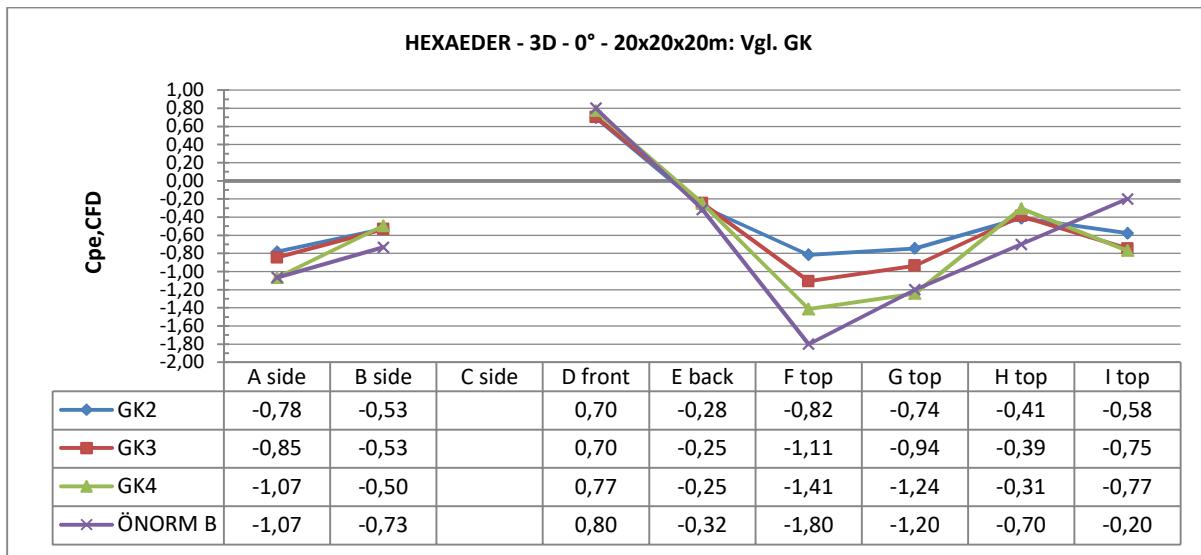
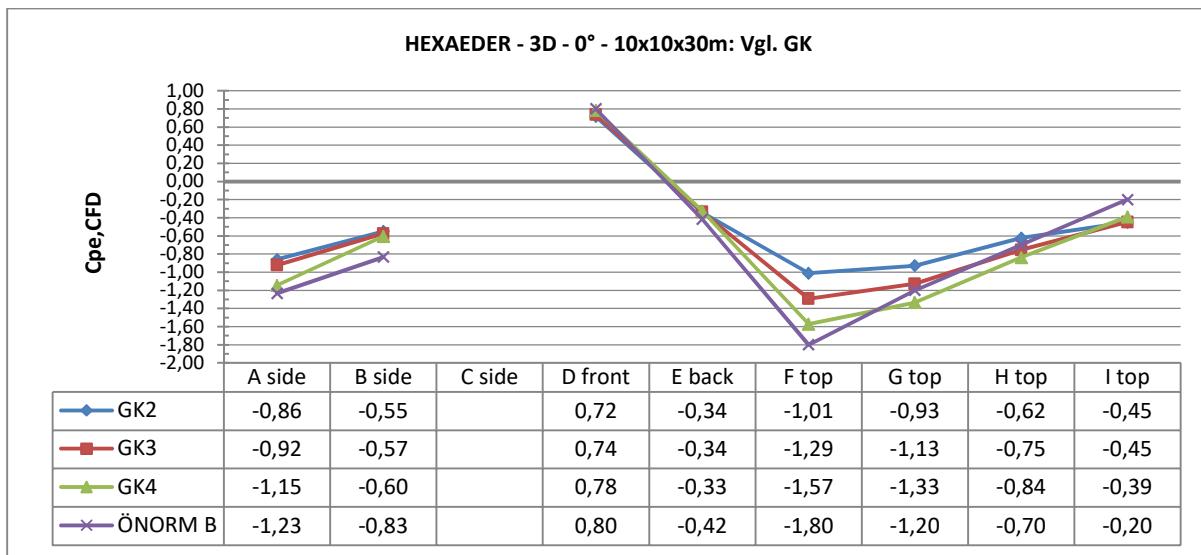
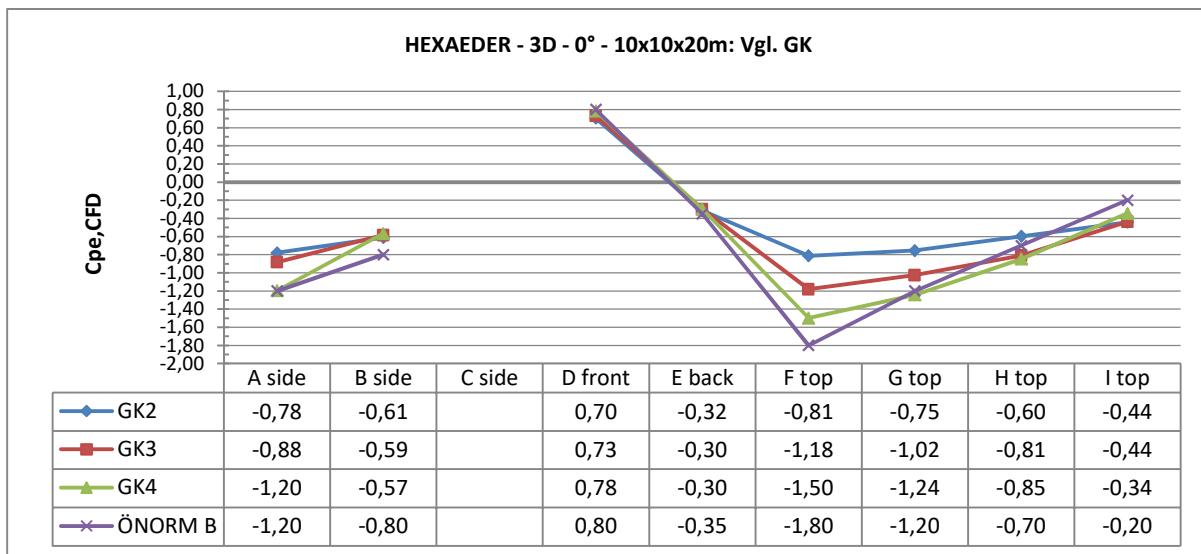
A. Anhang

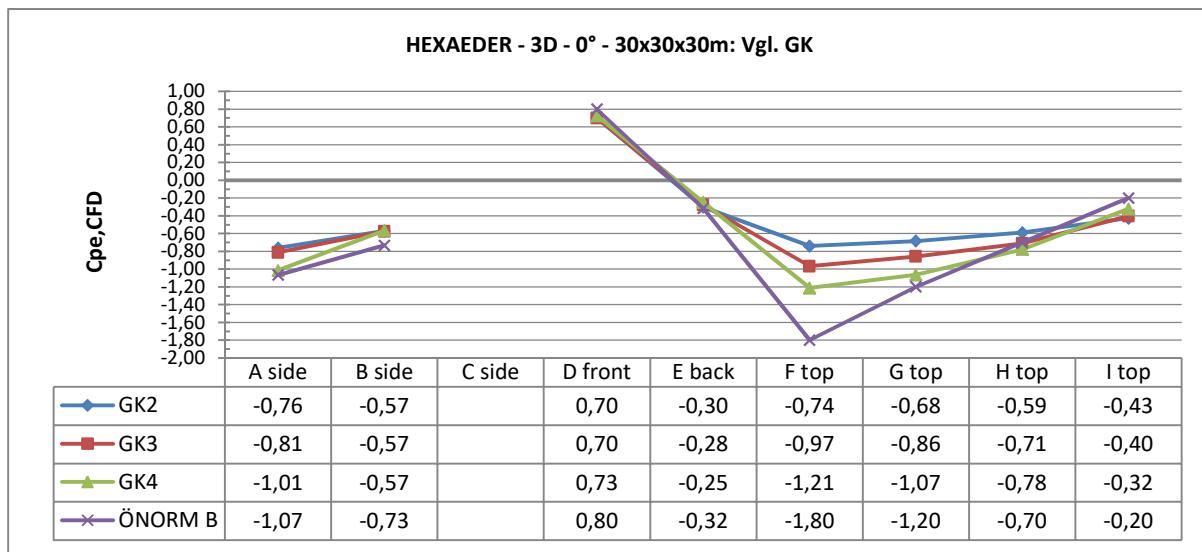
A.1 Parameterstudie c_{pe} -Druckbeiwerte

A.1.1 Vertikale Wände



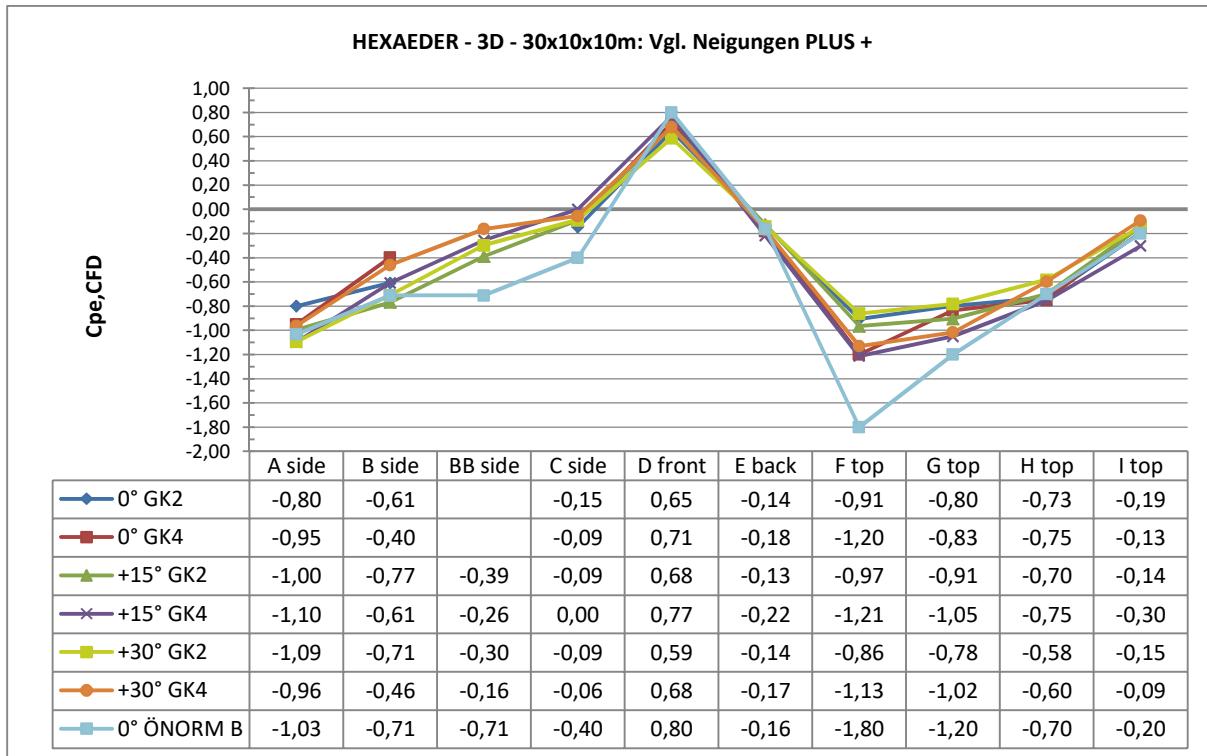
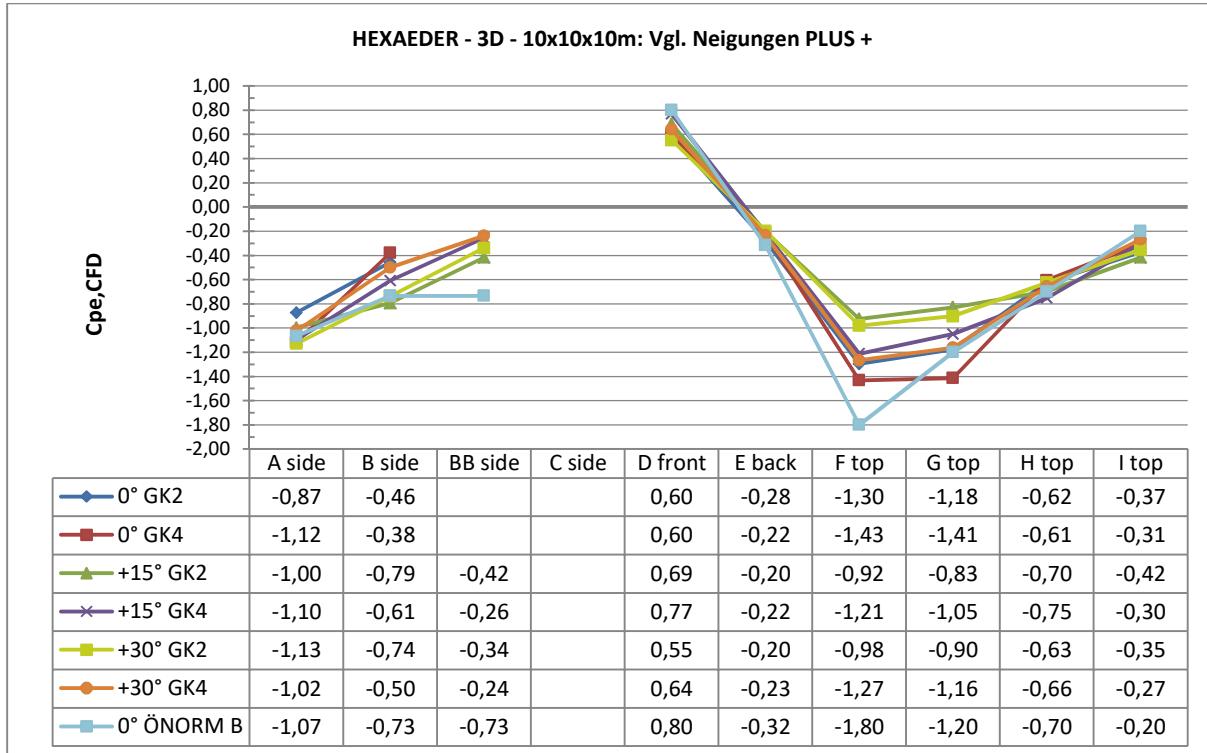


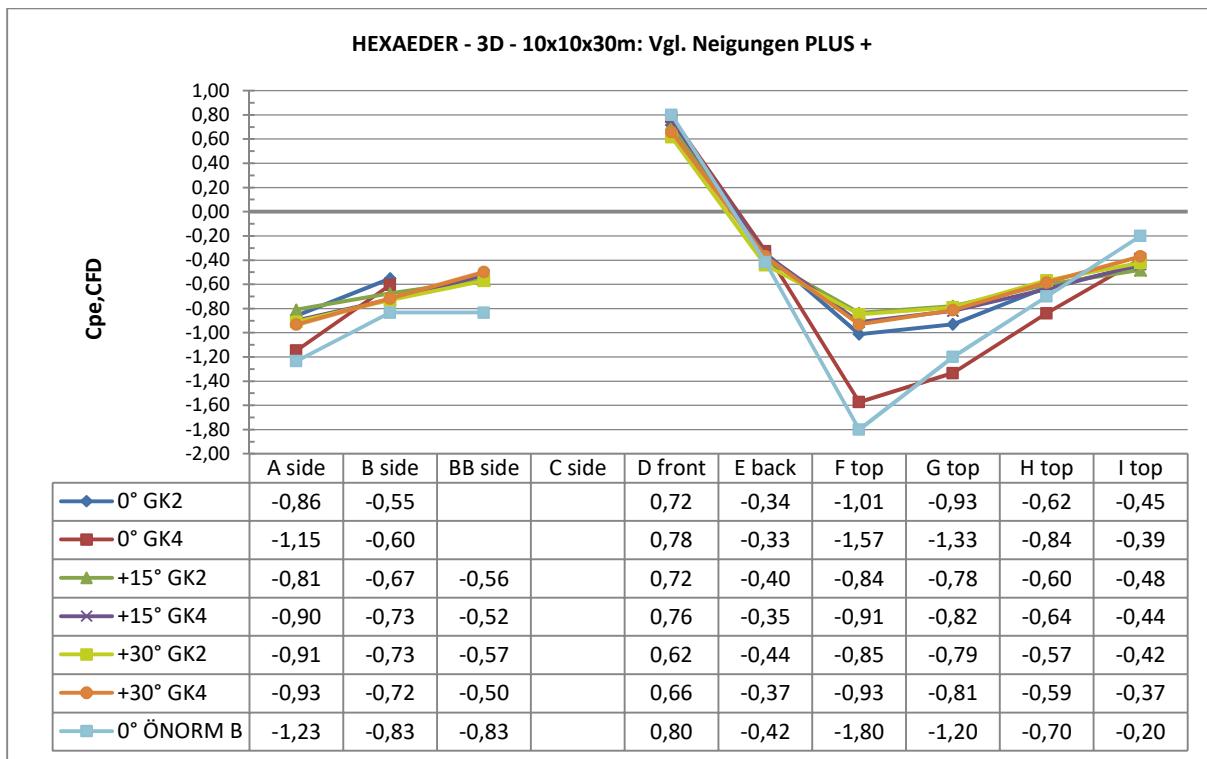
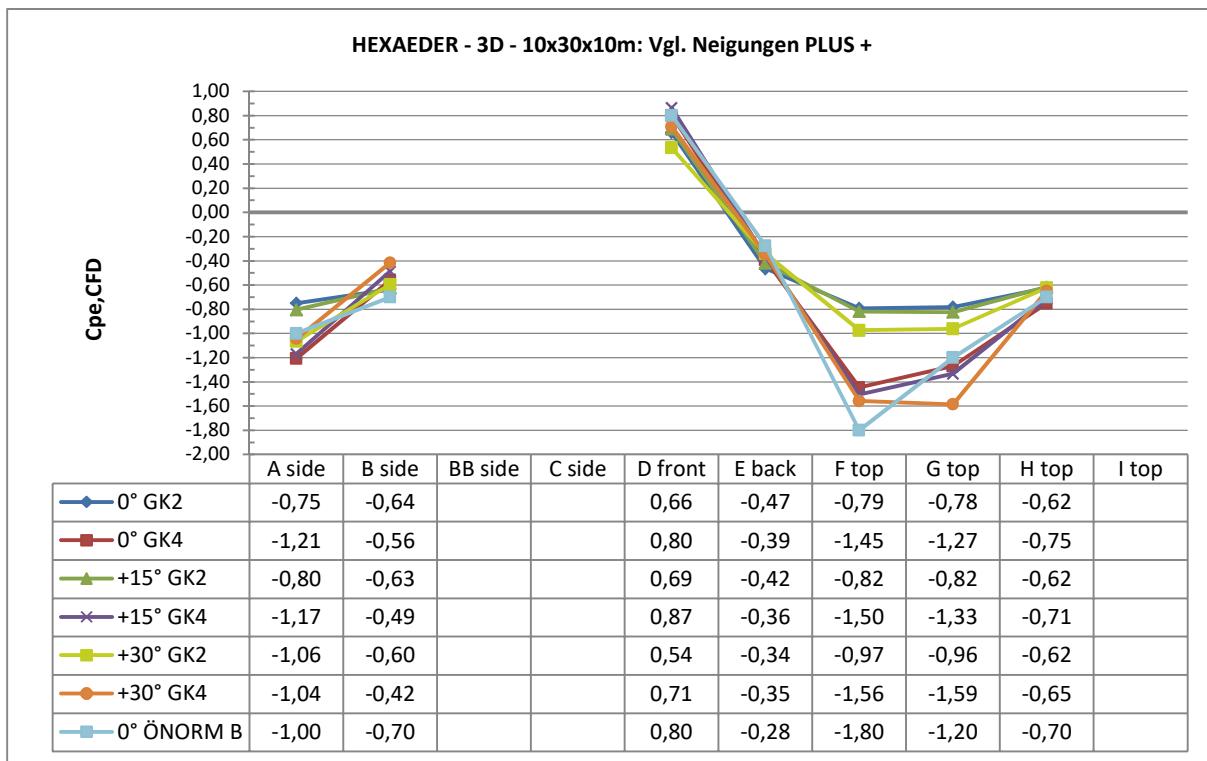


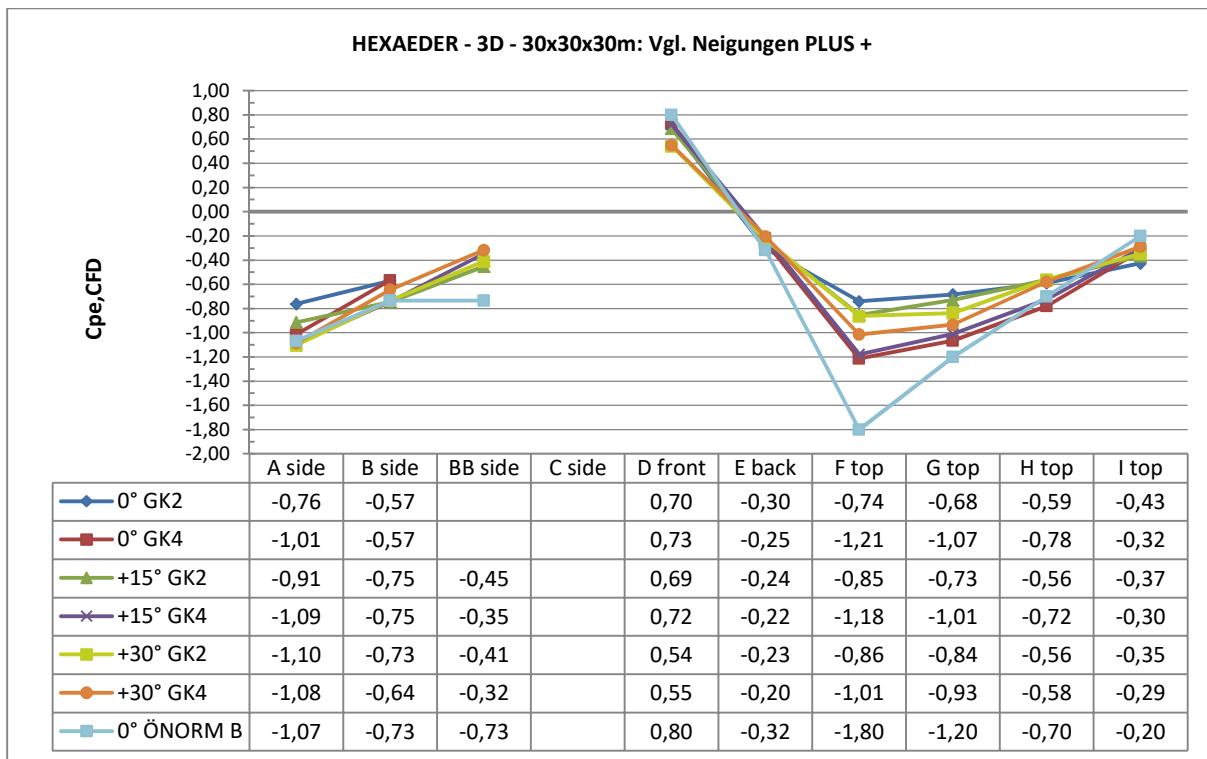
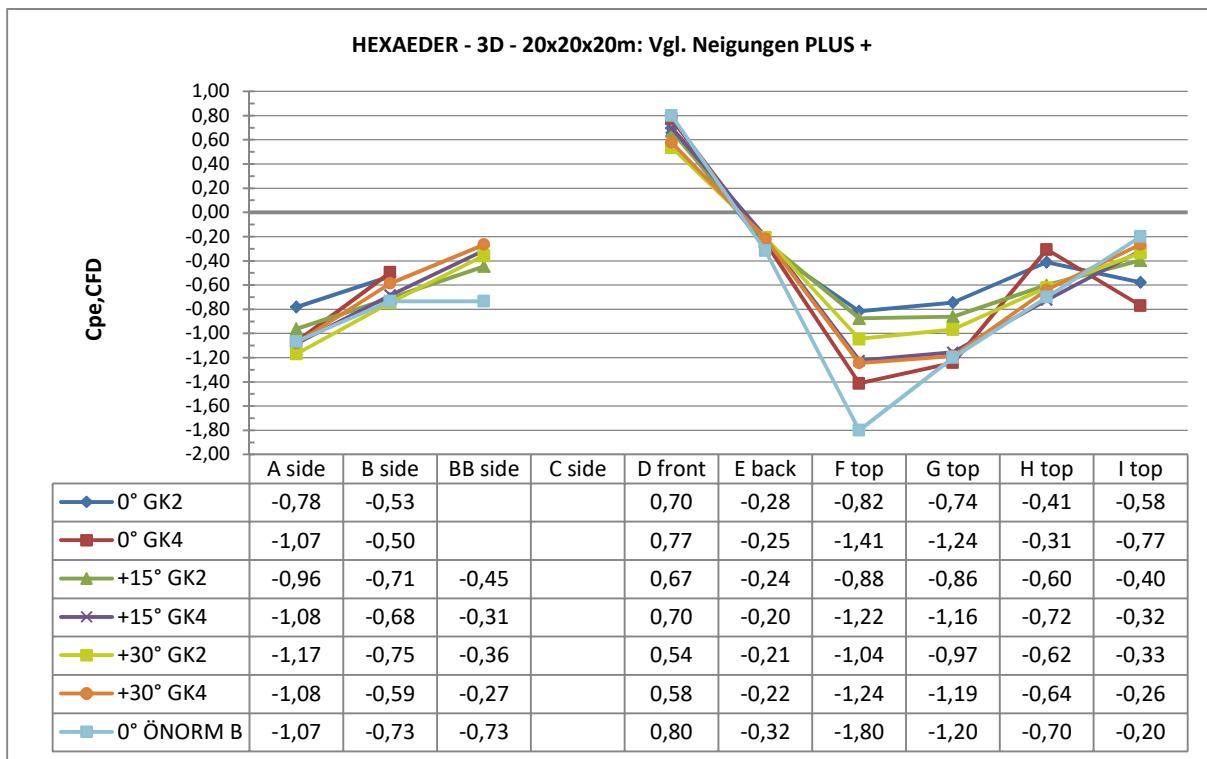


A.1.2 Geneigte Wände

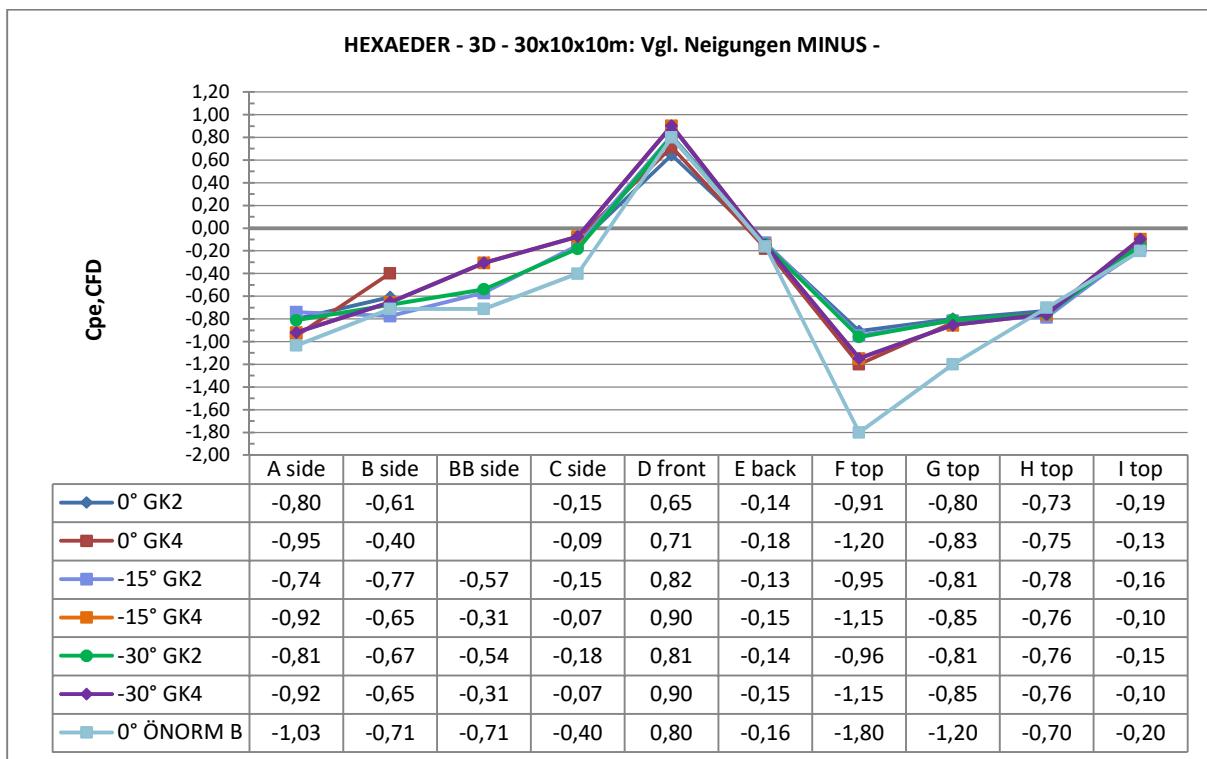
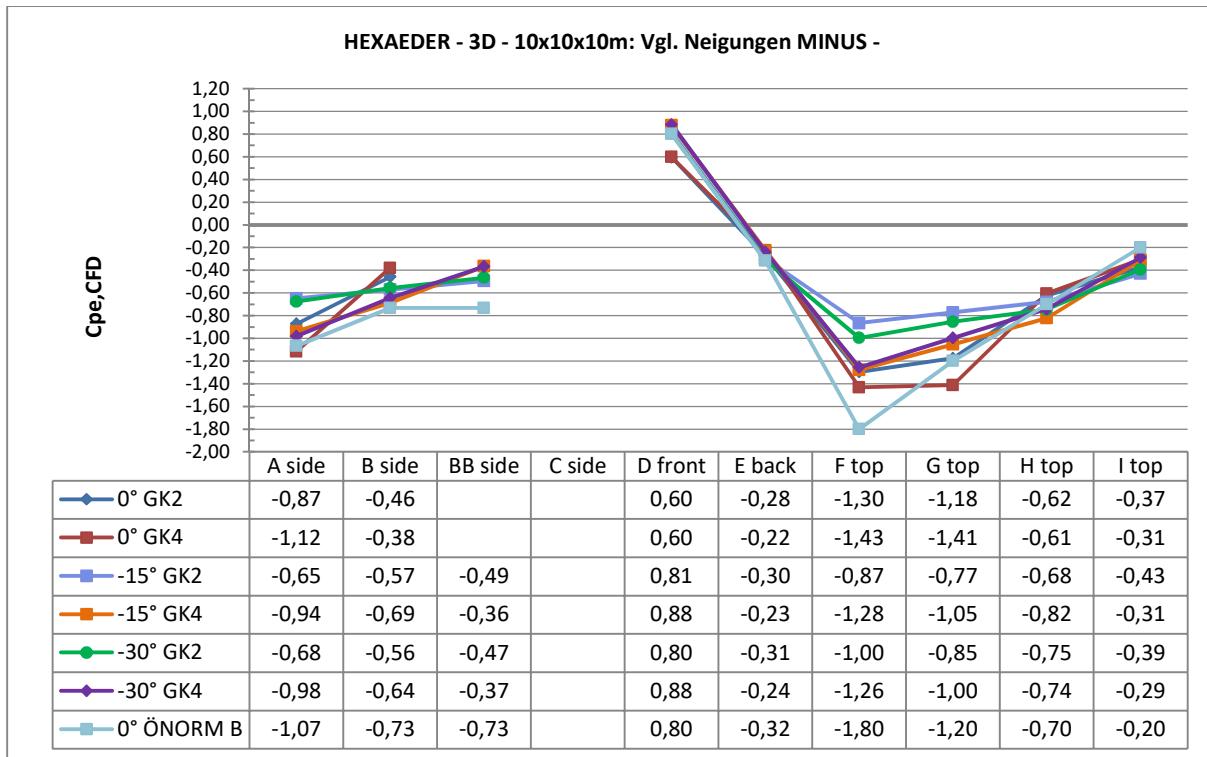
A.1.2.1 c_{pe} -Werte - in Strömungsrichtung geneigt (PLUS +)

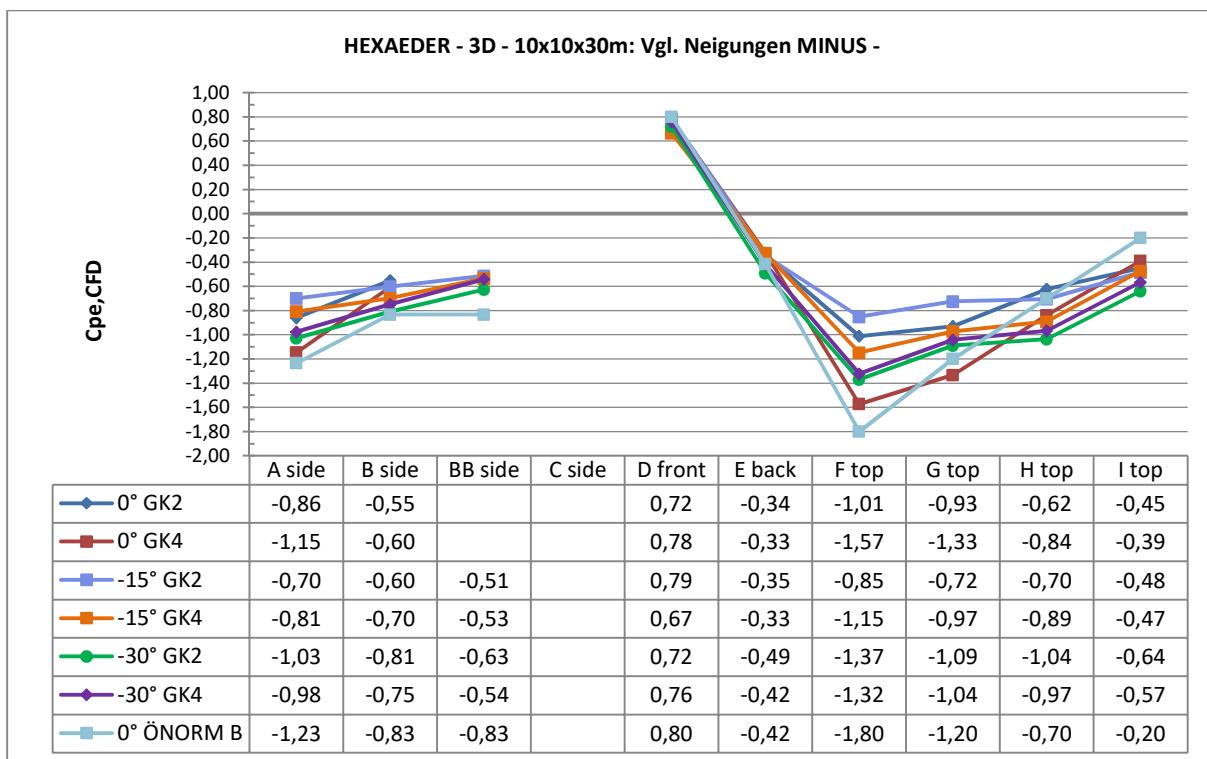
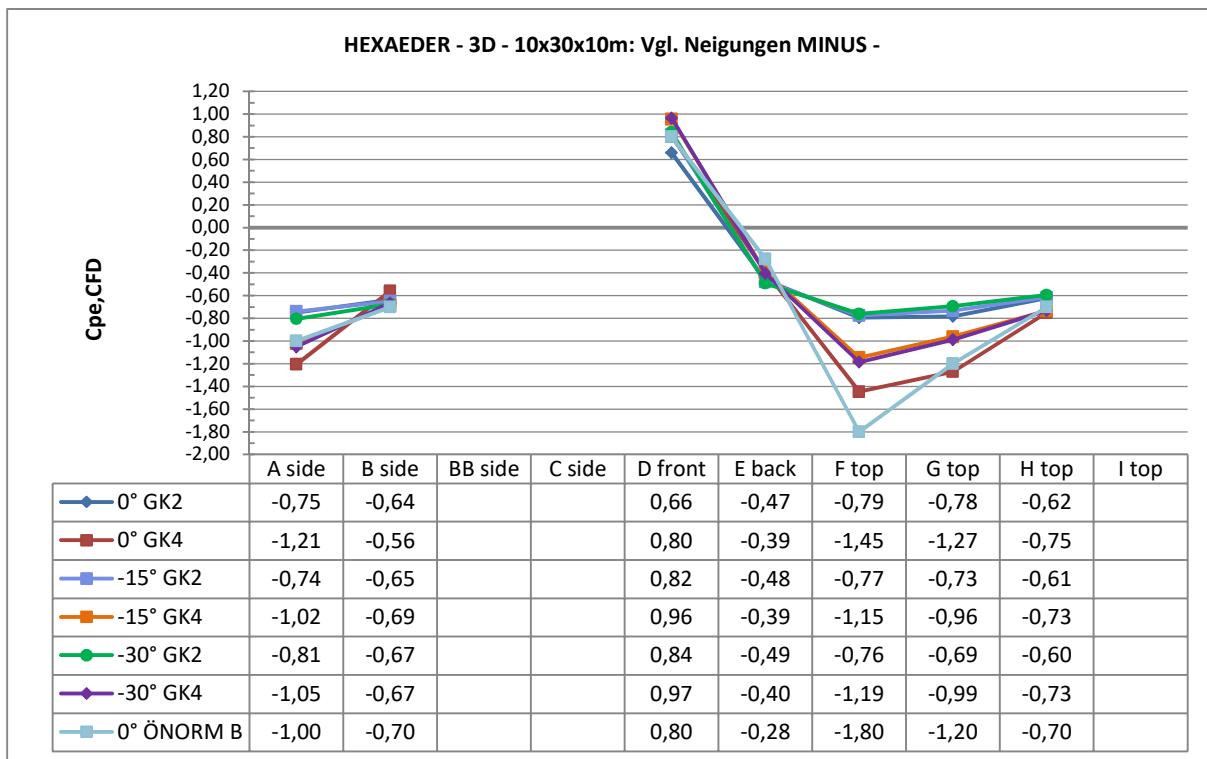


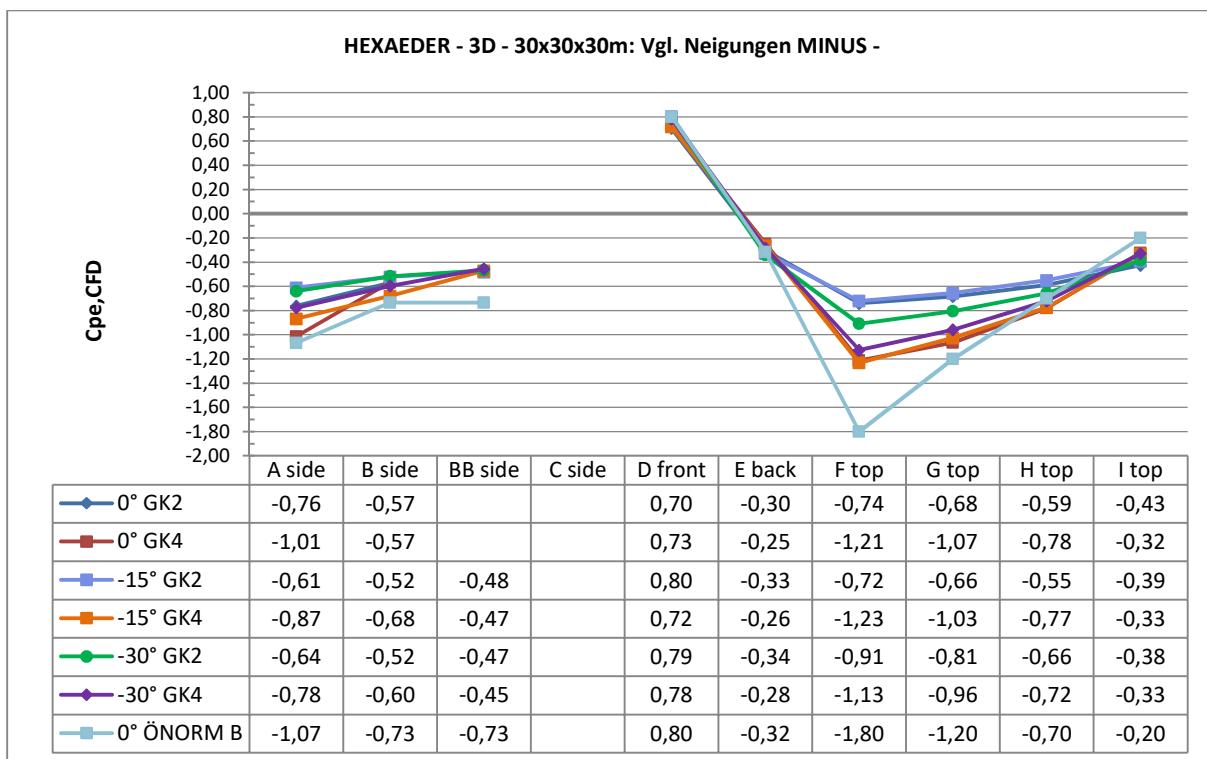
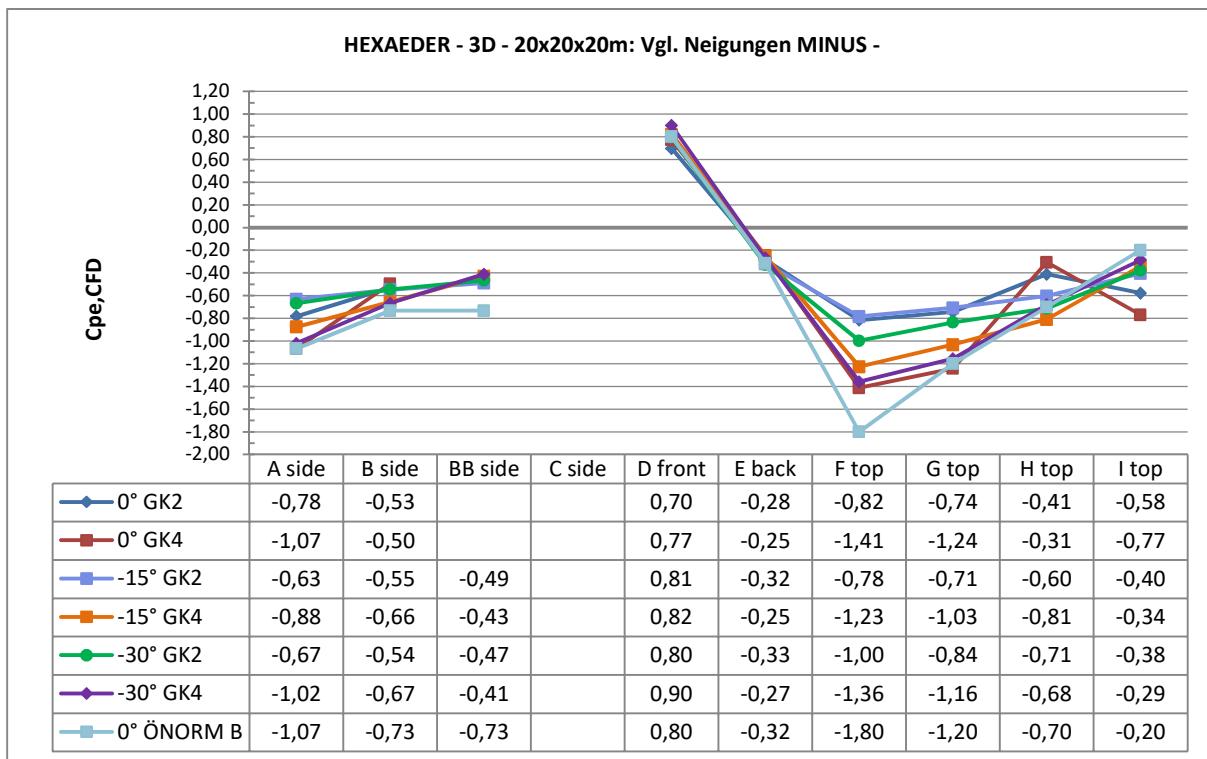




A.1.2.2 c_{pe} -Werte - entgegen der Strömungsrichtung geneigt (MINUS -)

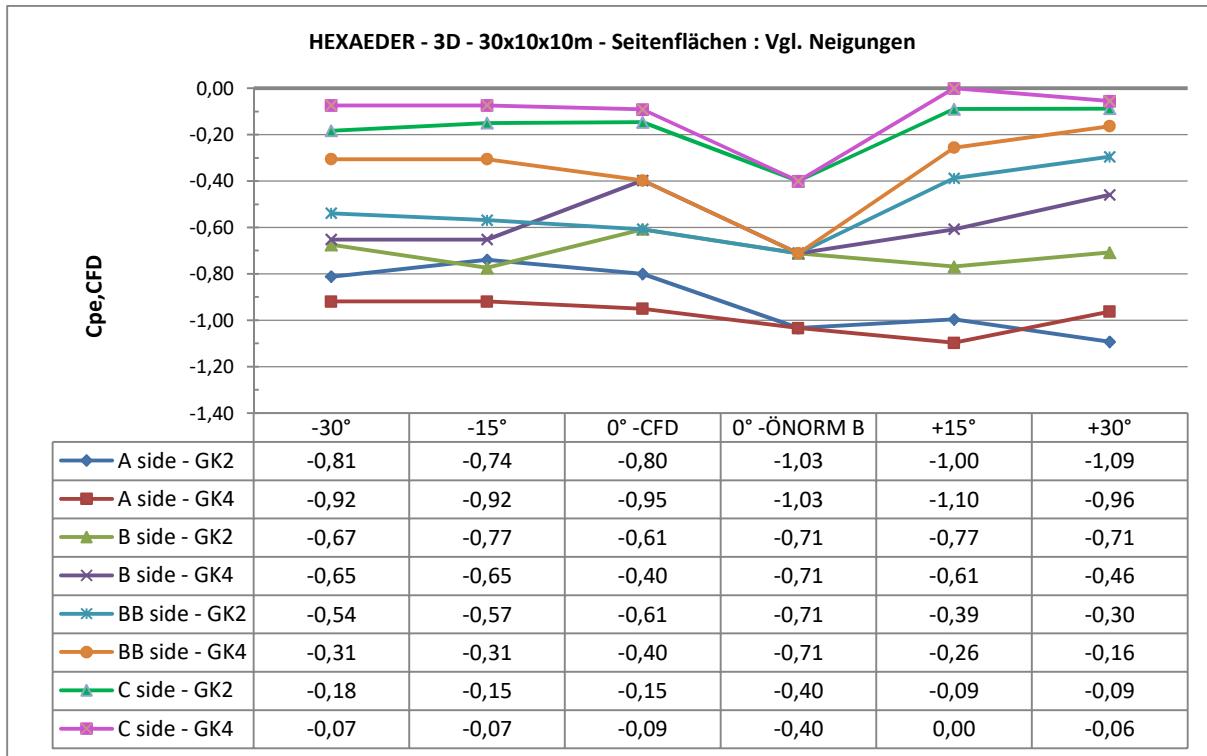
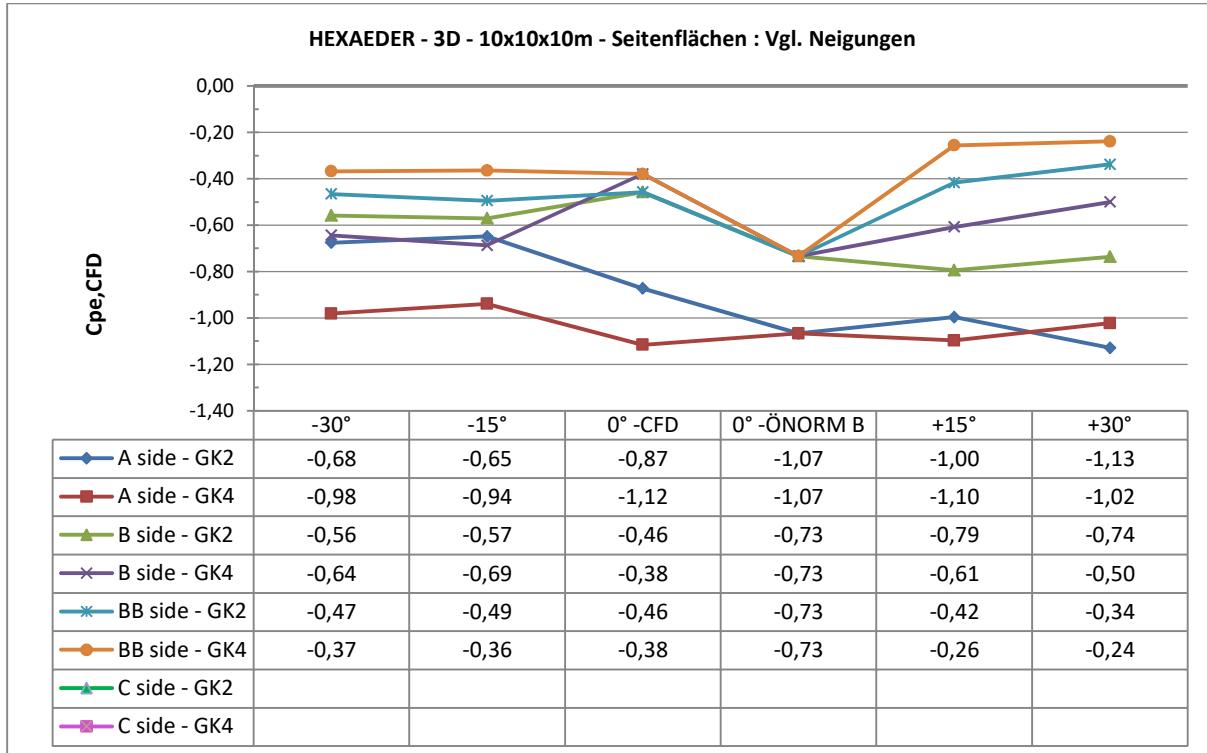


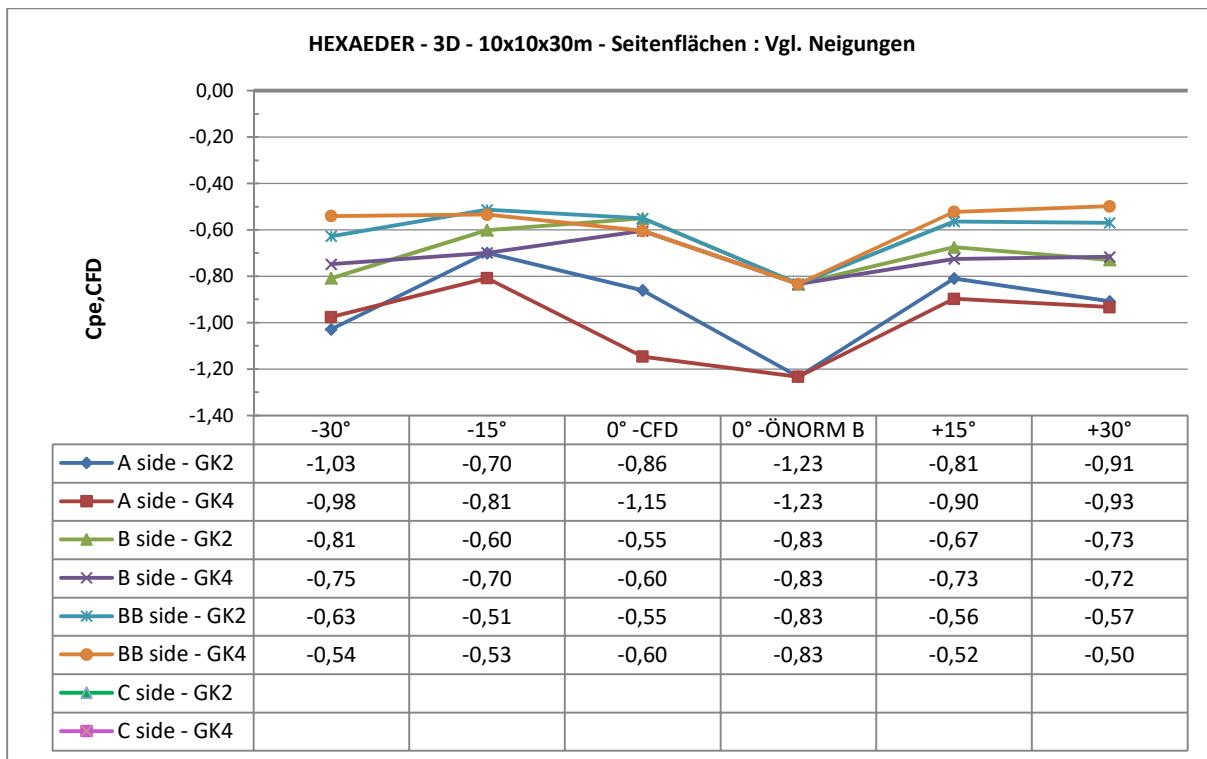
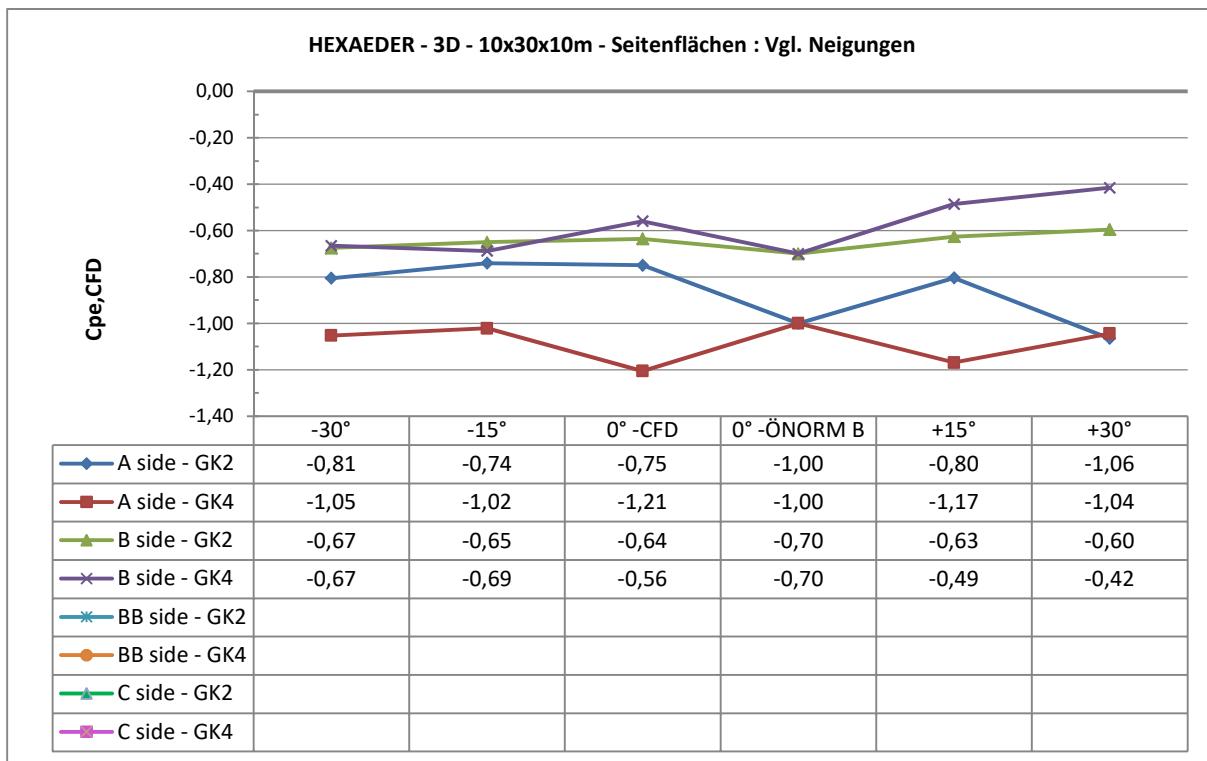


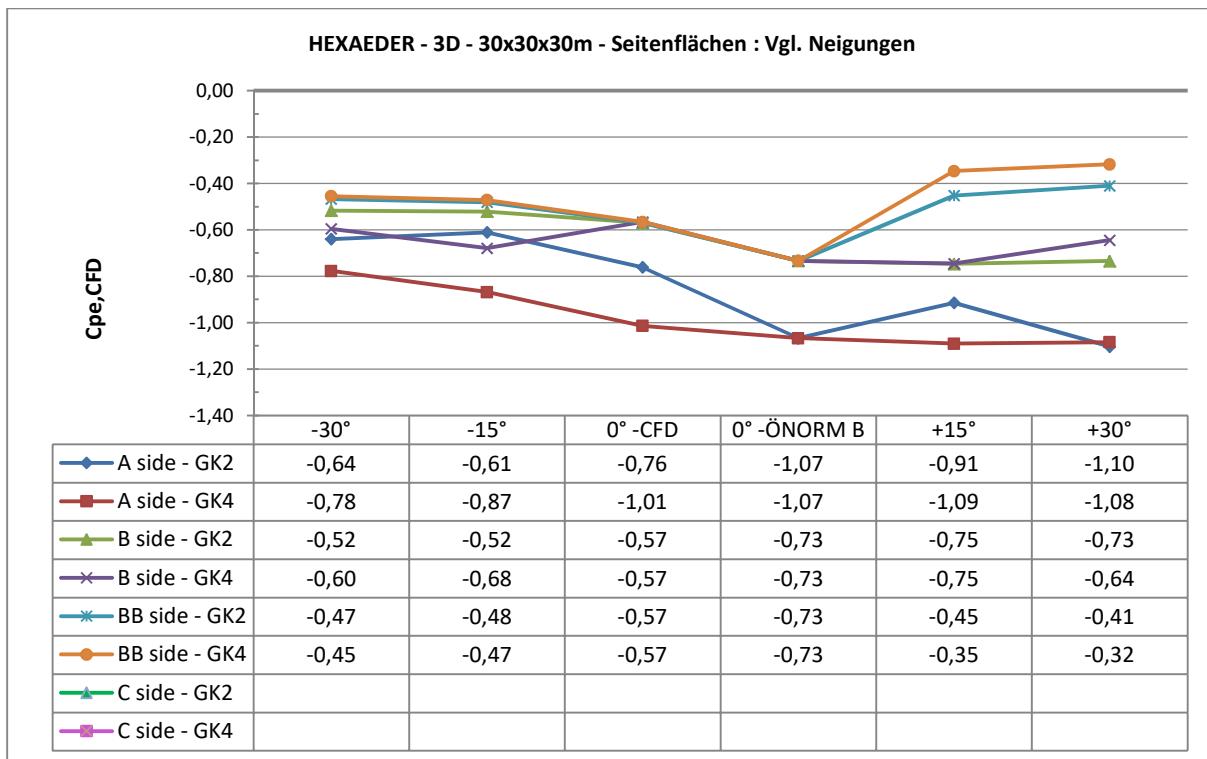
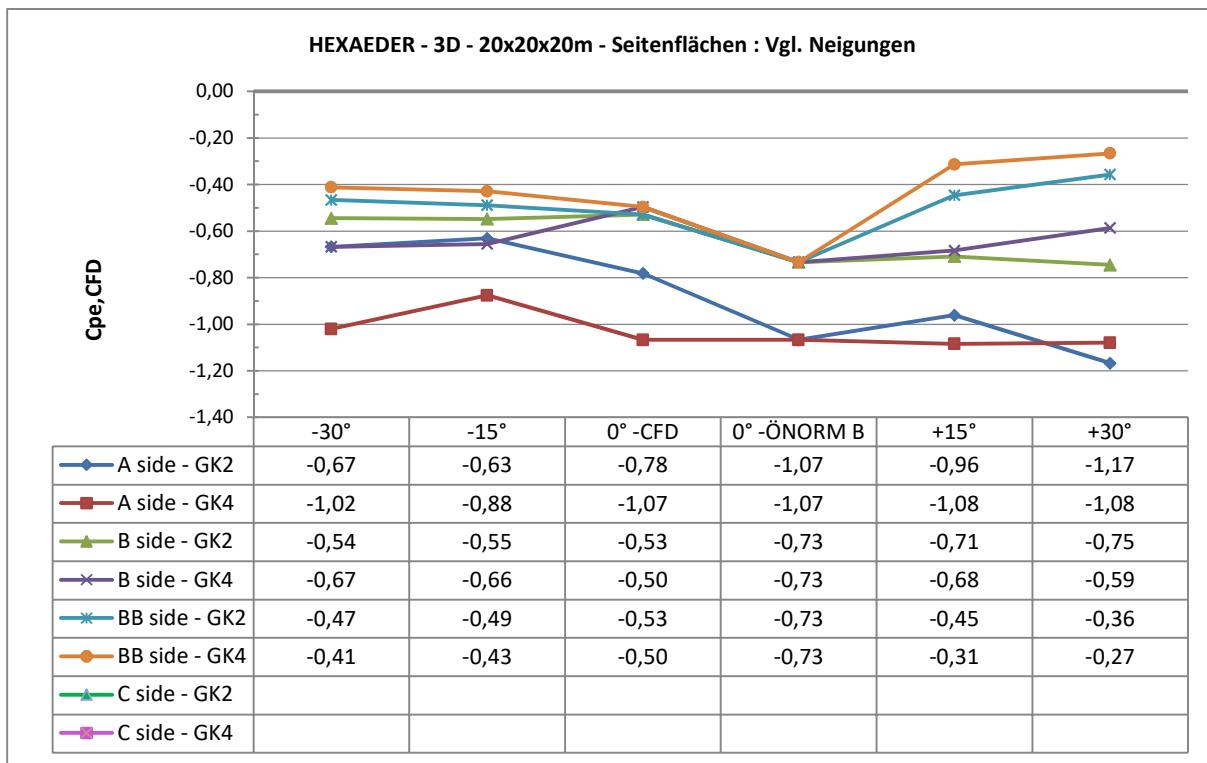


A.1.3 c_{pe} -Beiwerte in Abhängigkeit von der Wandneigung

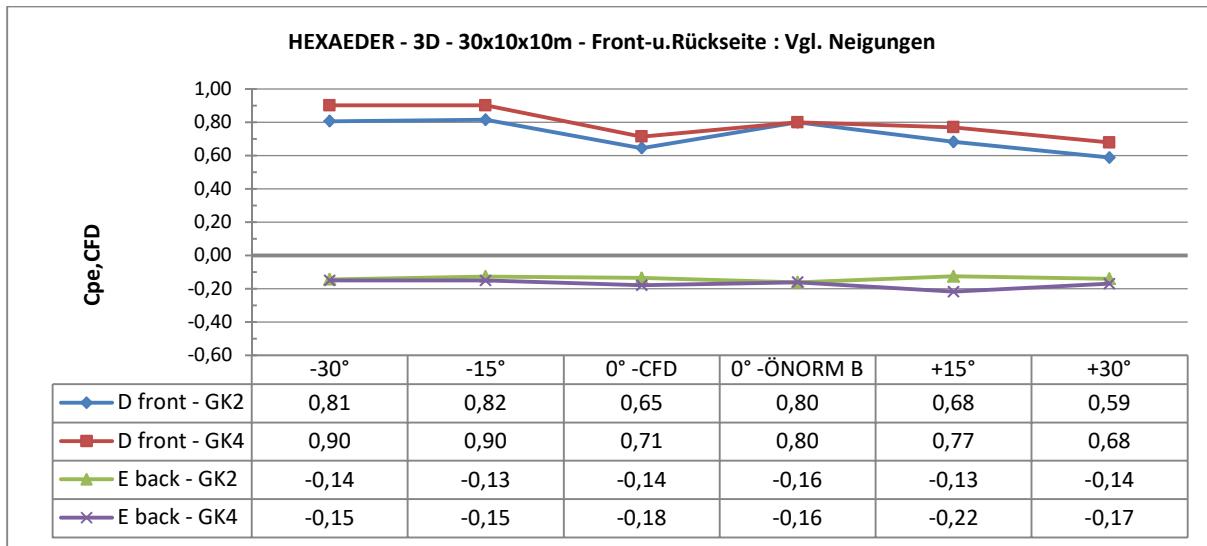
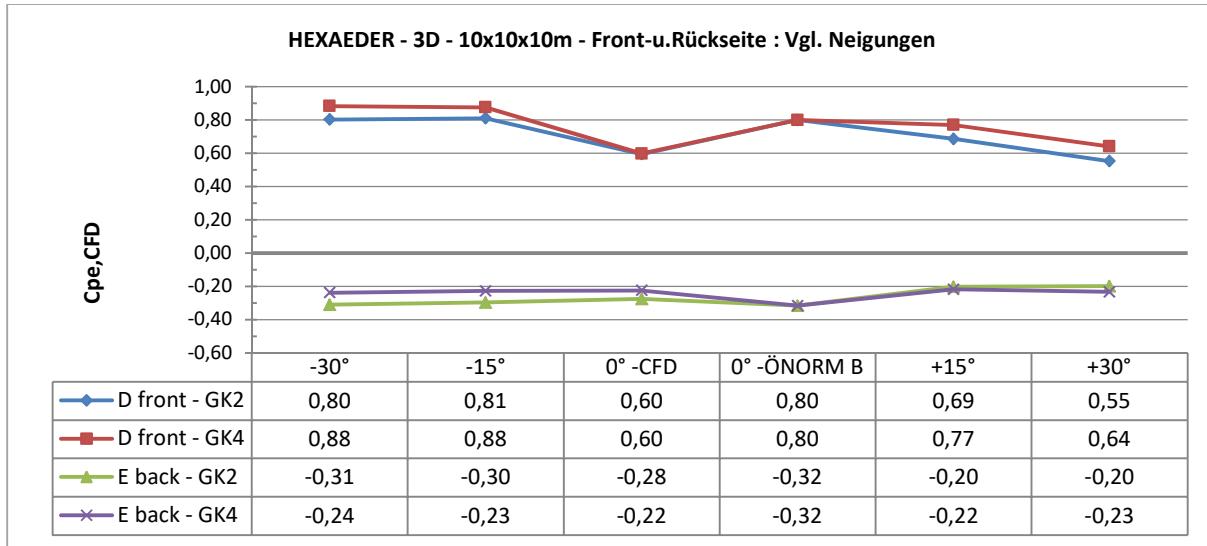
A.1.3.1 Seitenflächen (A, B, BB, C)

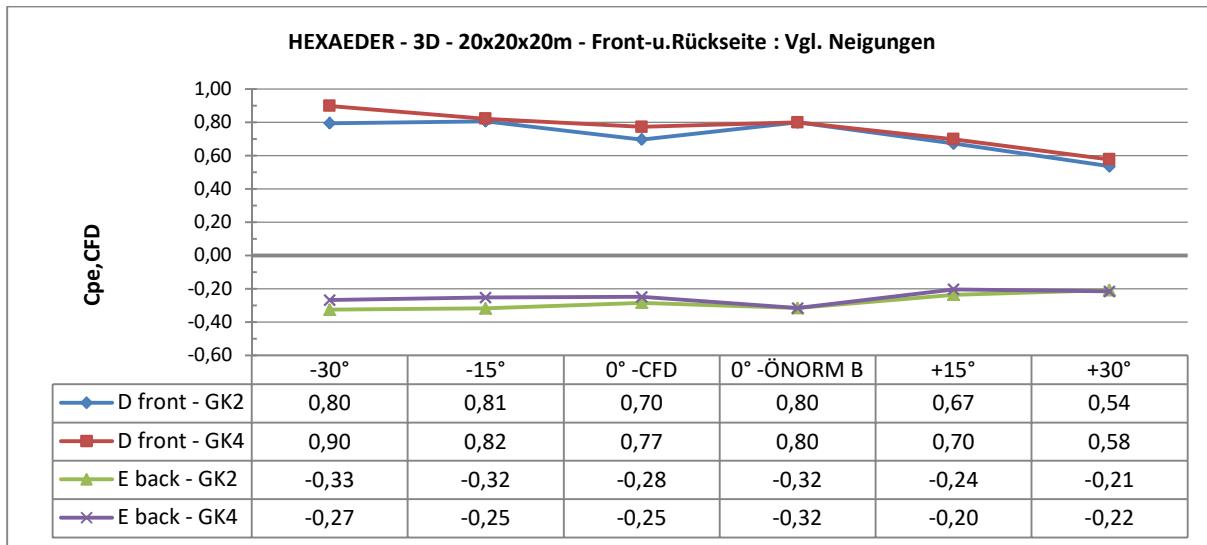
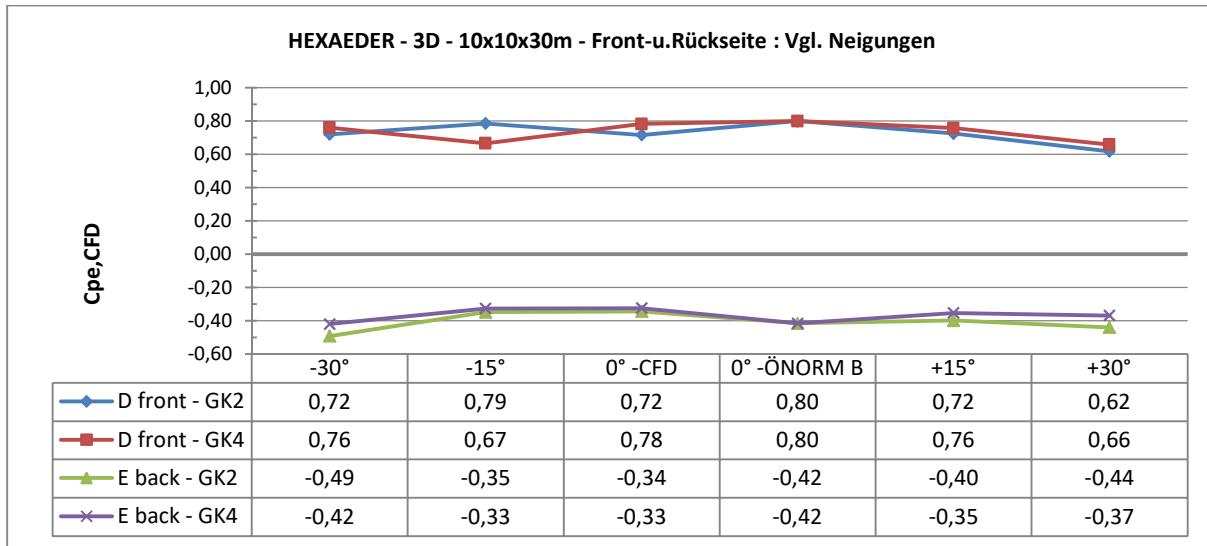
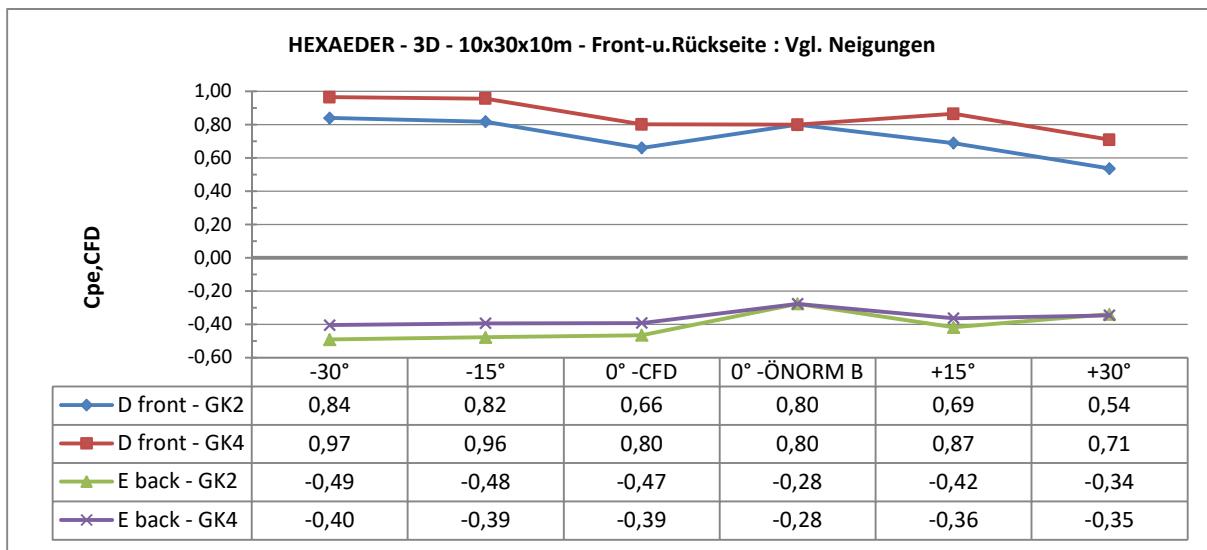


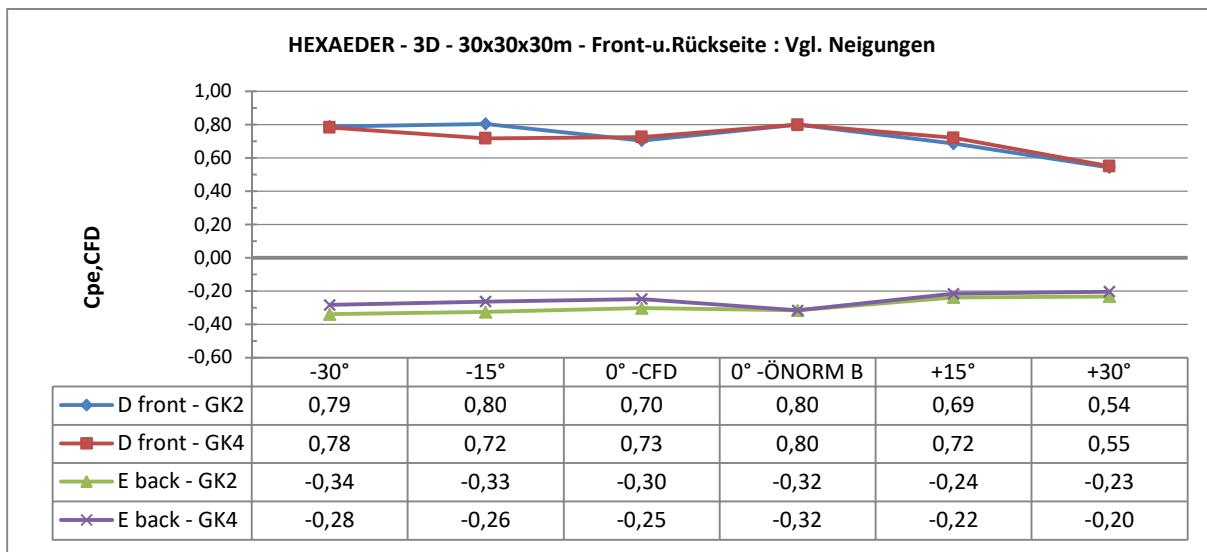




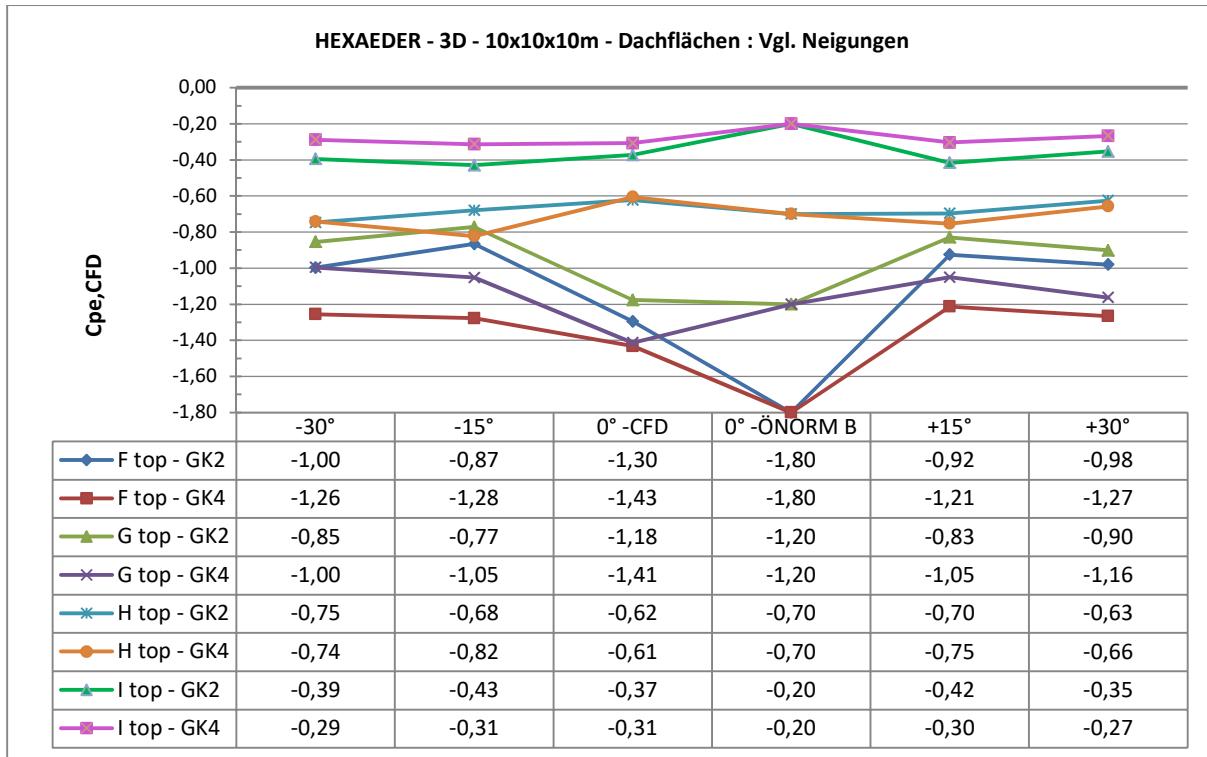
A.1.3.2 Front-und Rückseite (D, E)

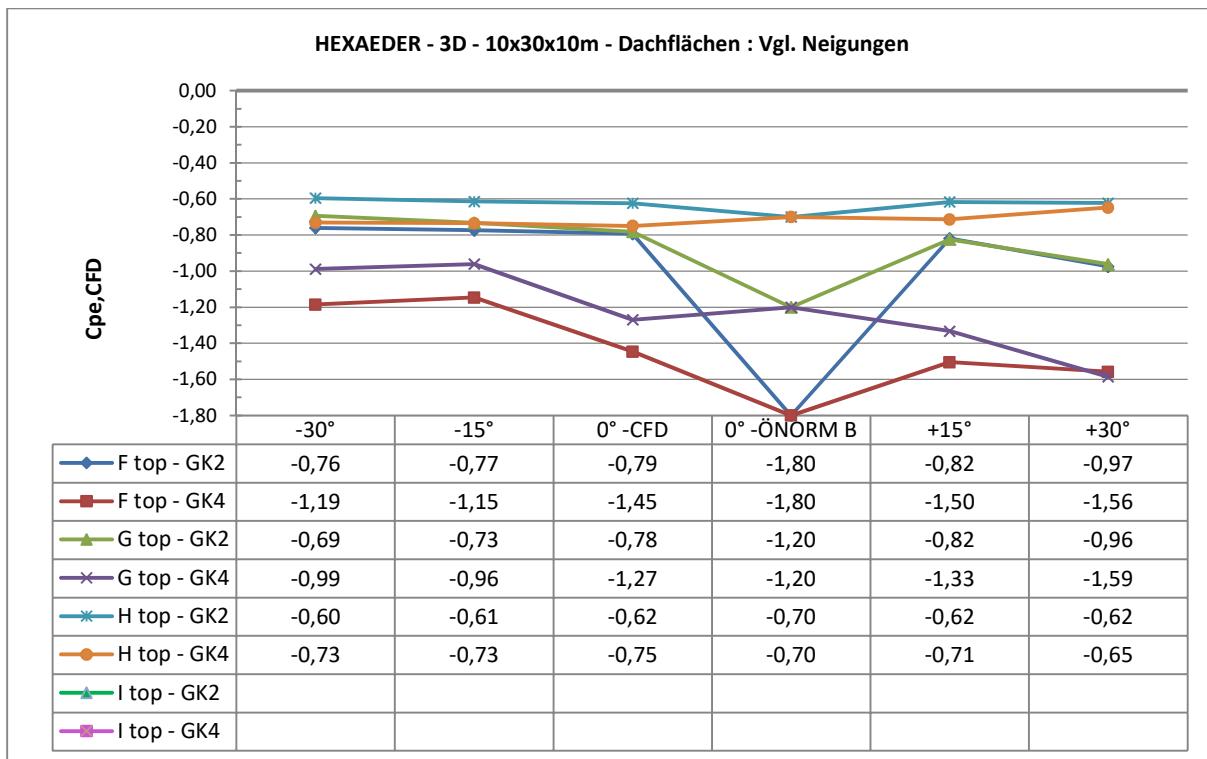
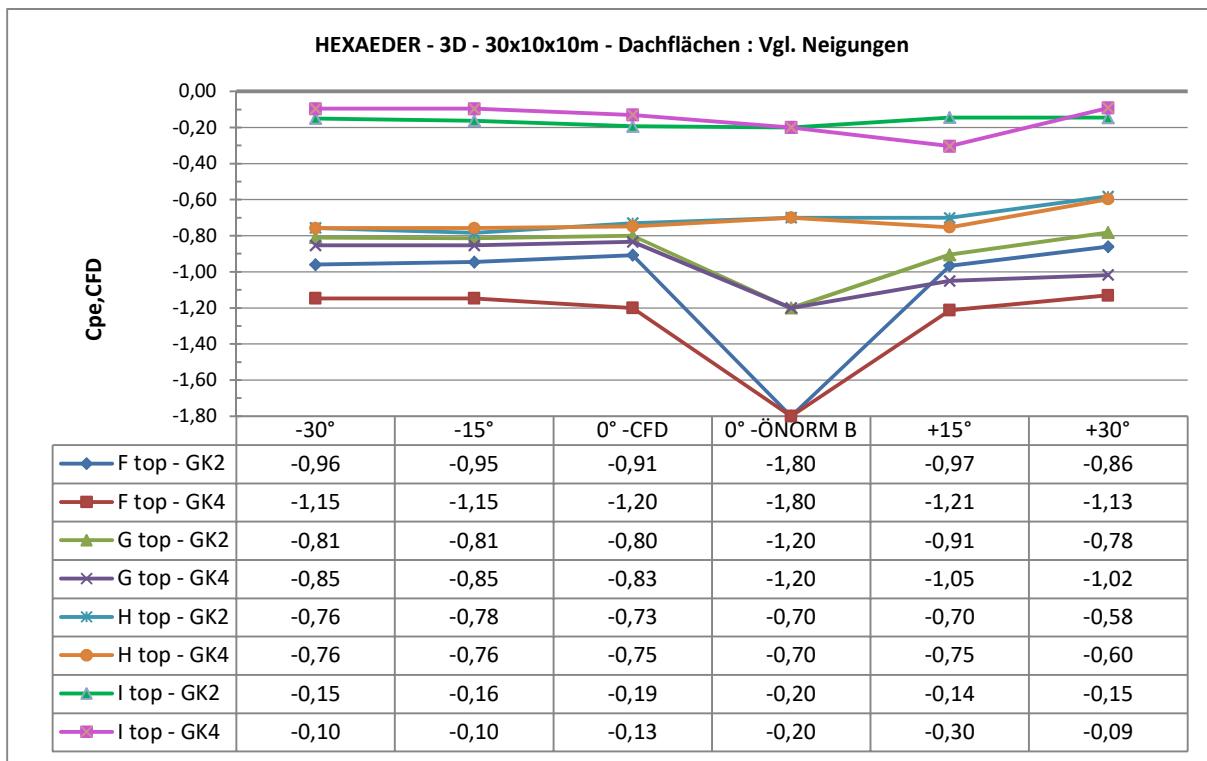


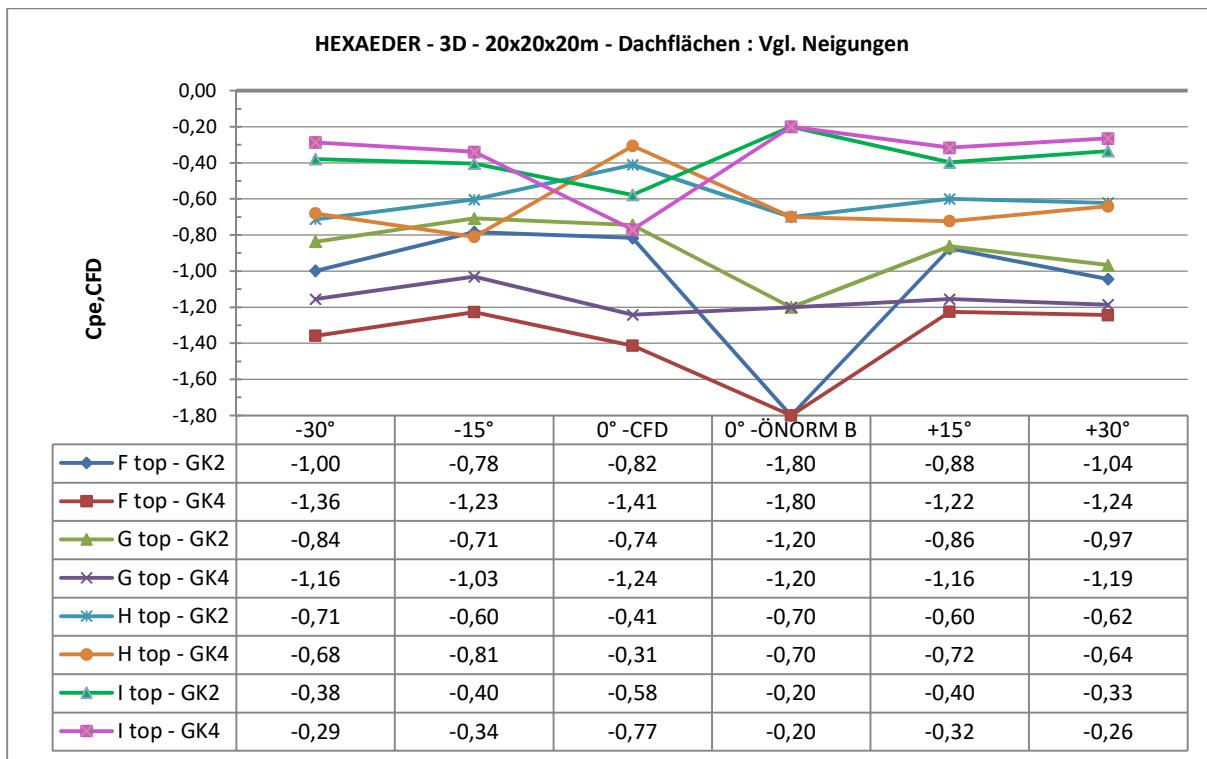
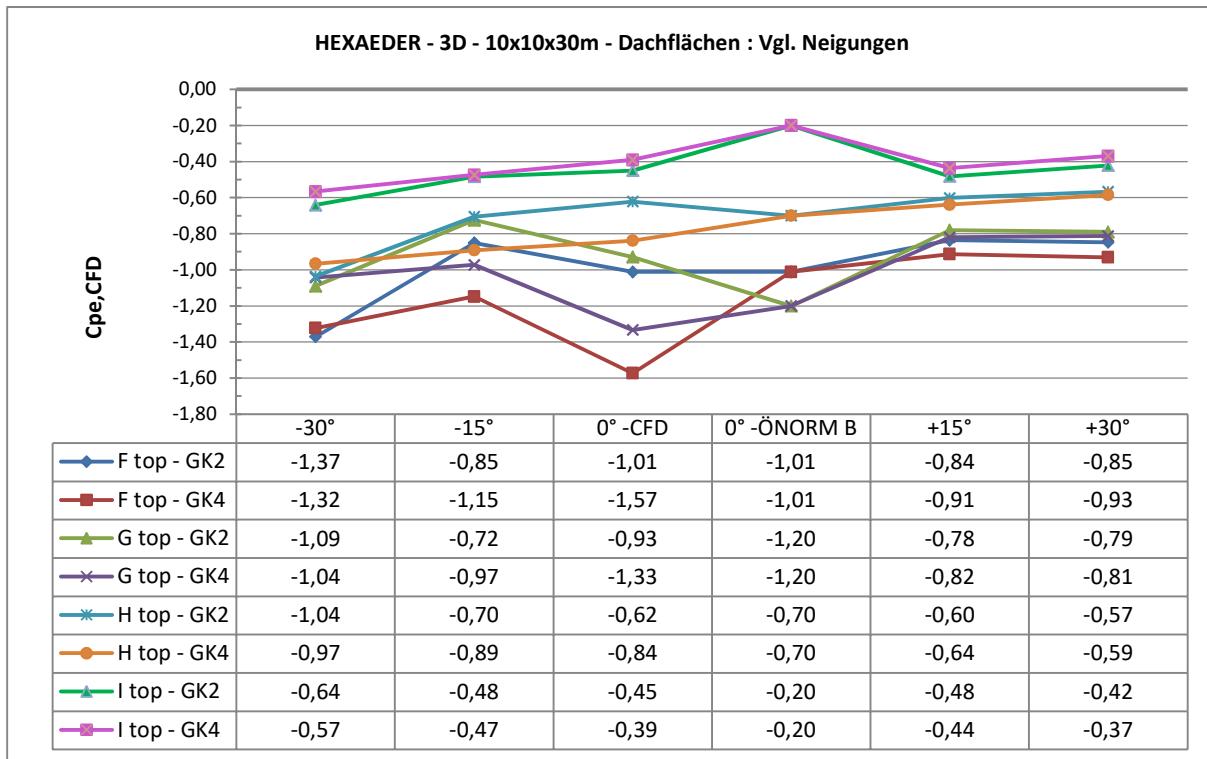


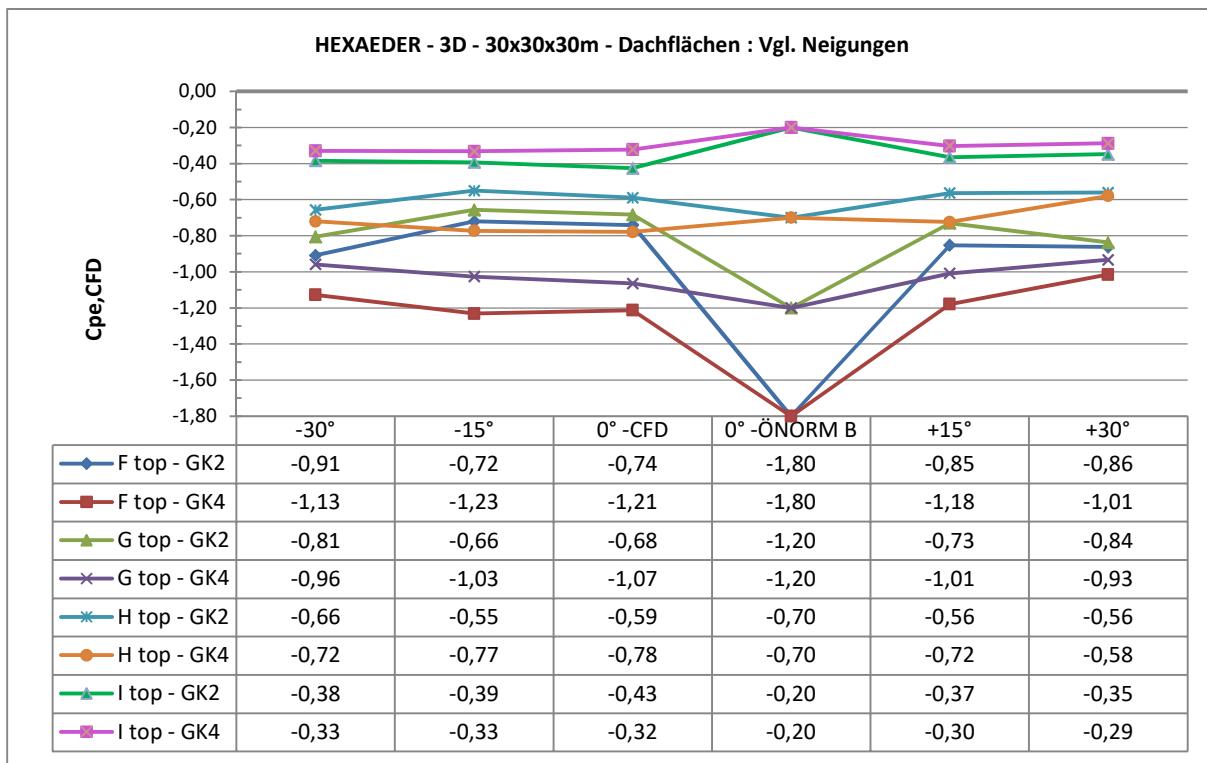


A.1.3.3 Dachflächen (F, G, H, I)

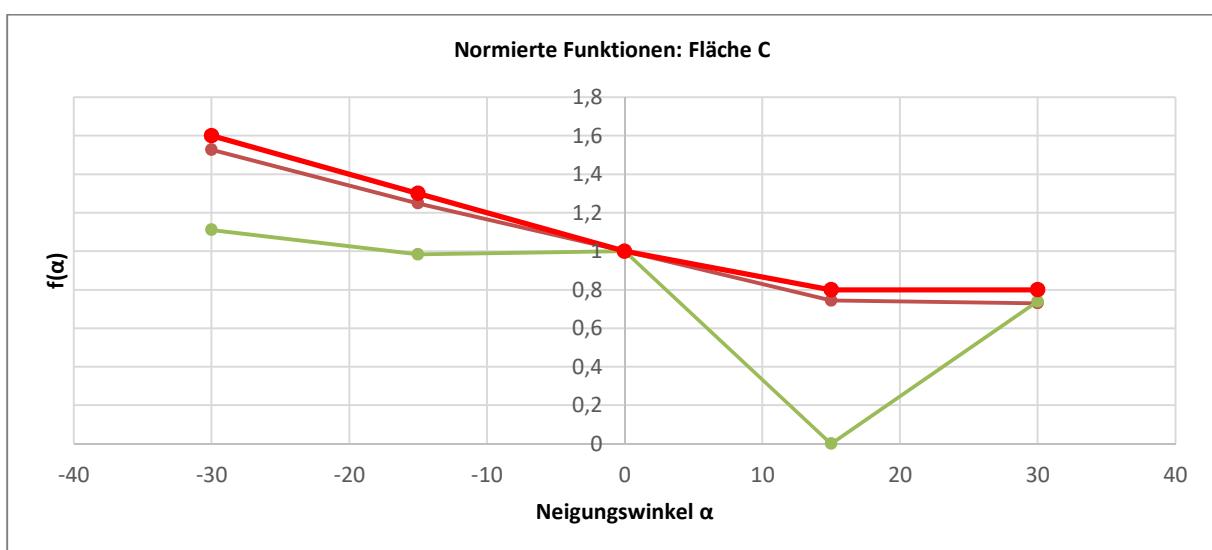
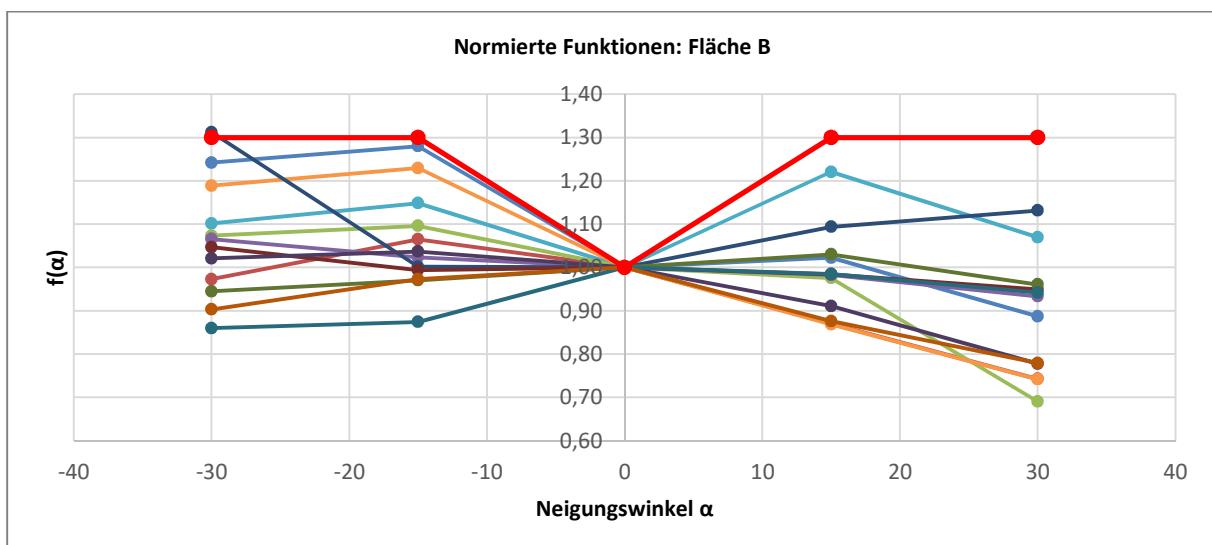
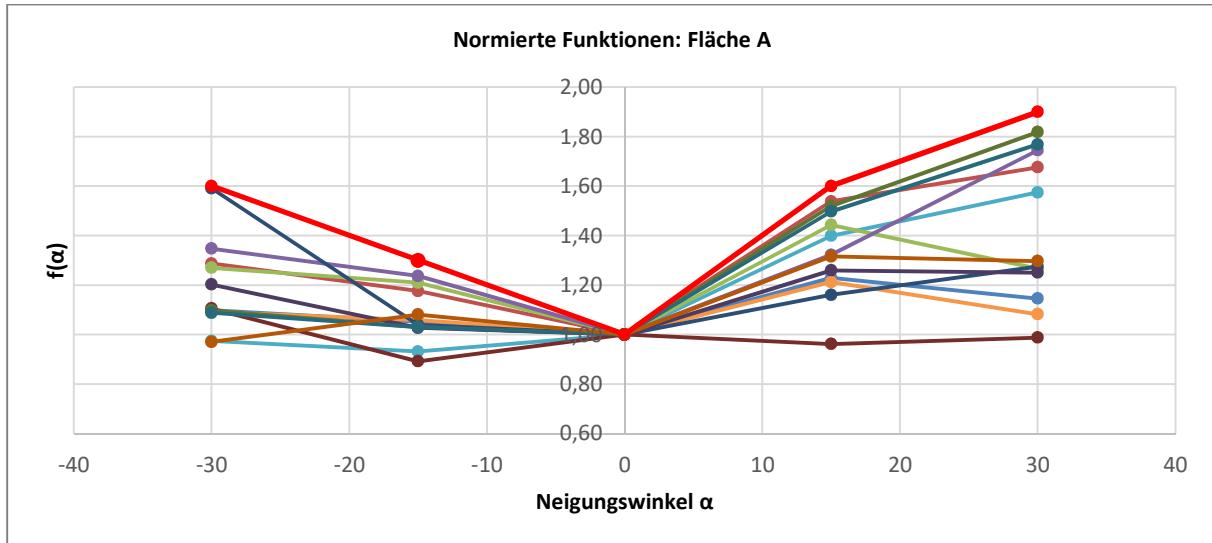


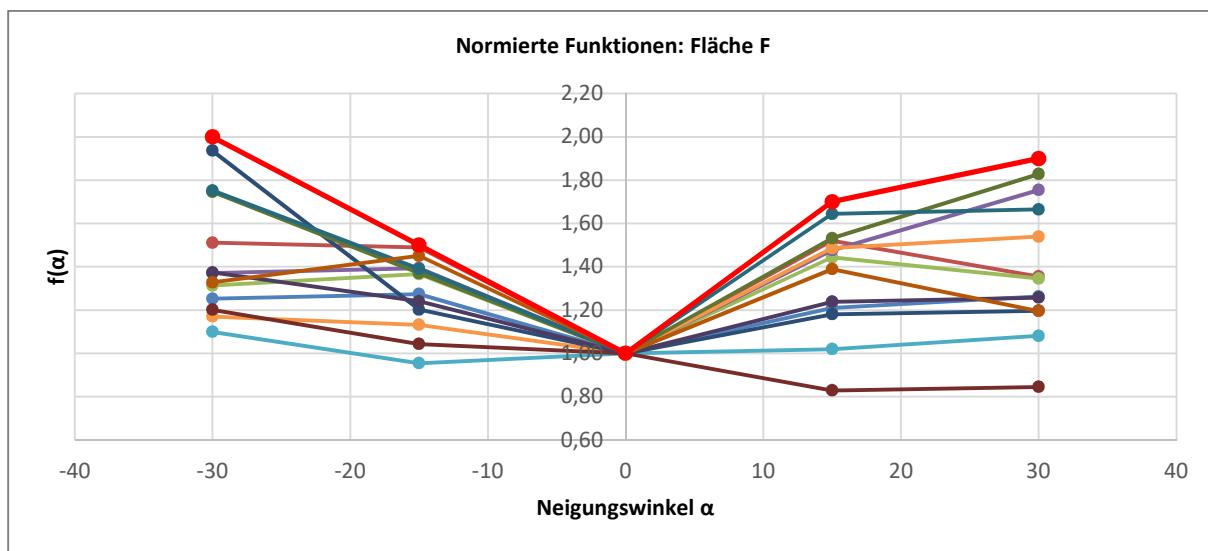
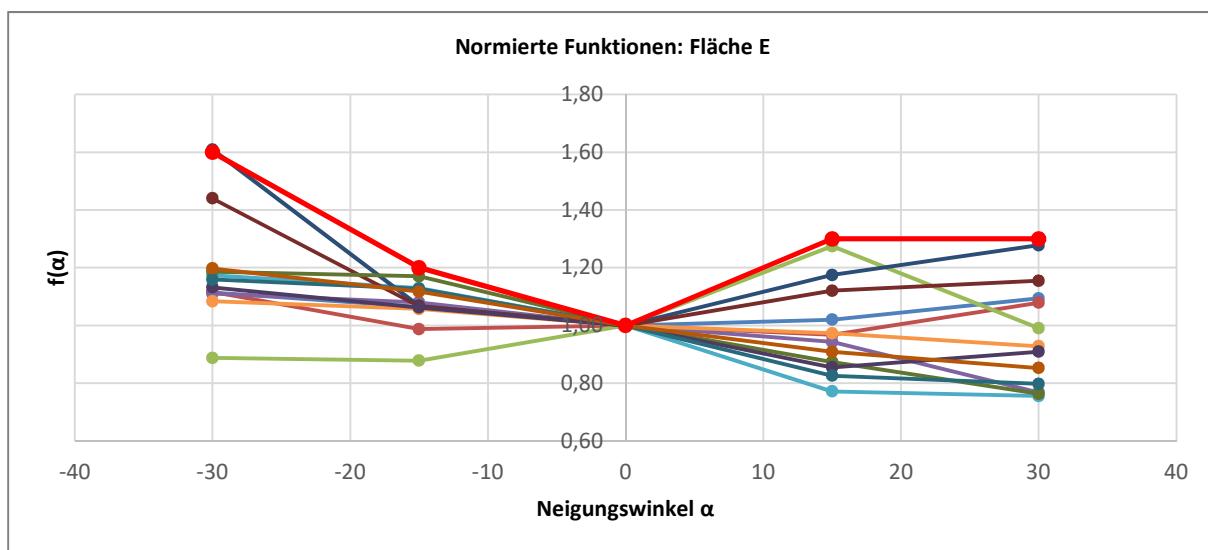
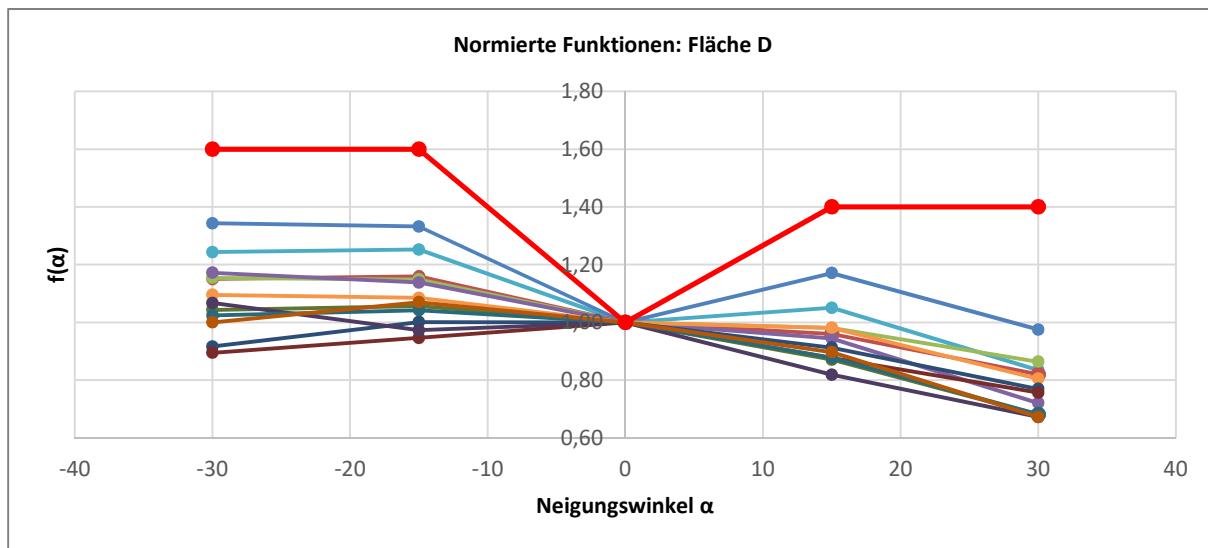


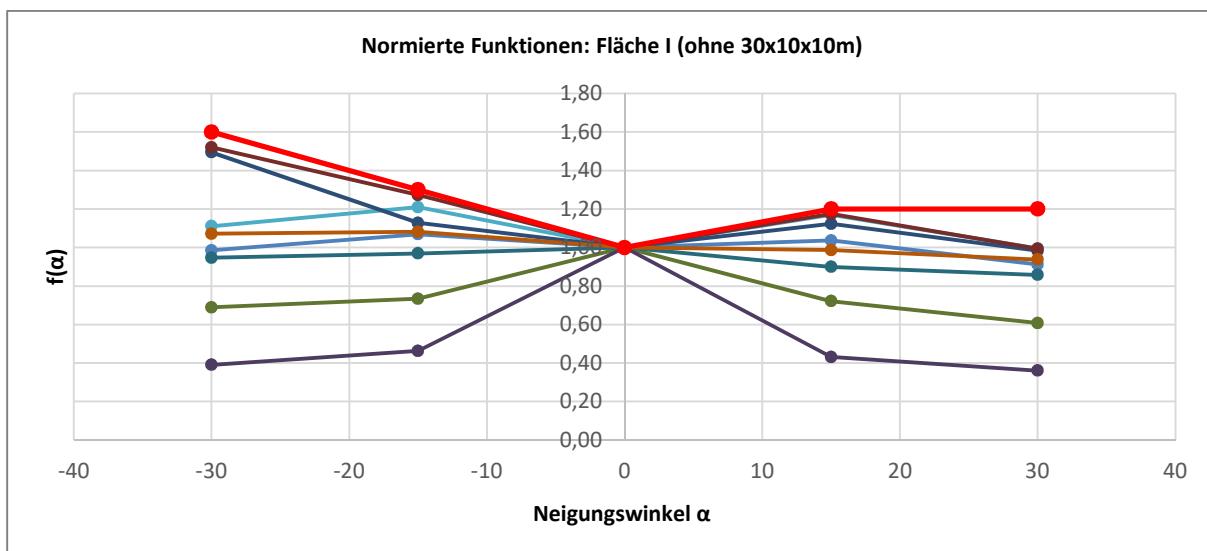
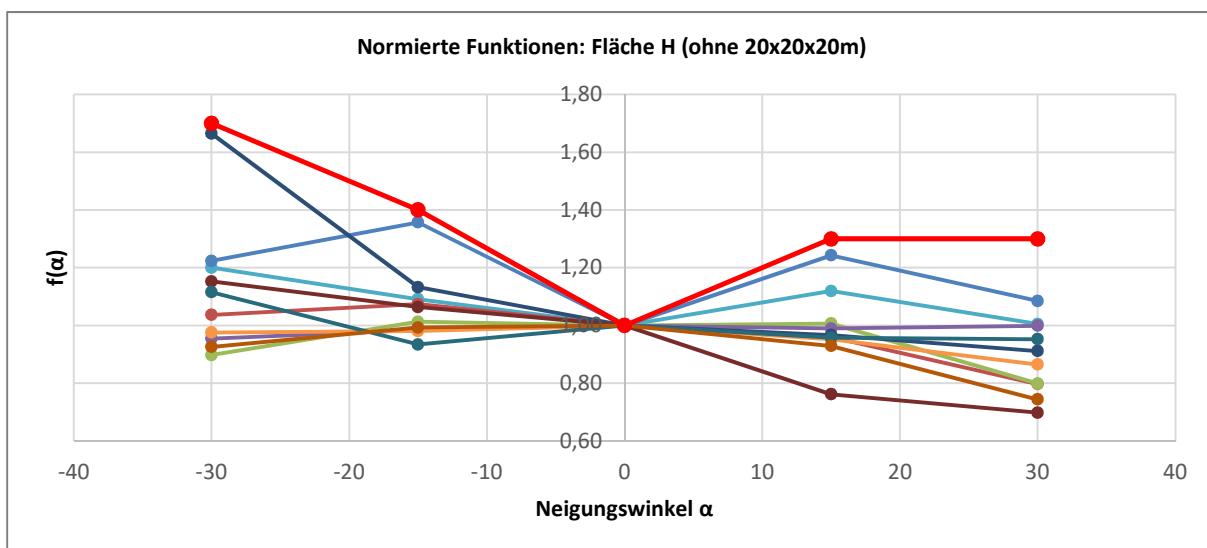
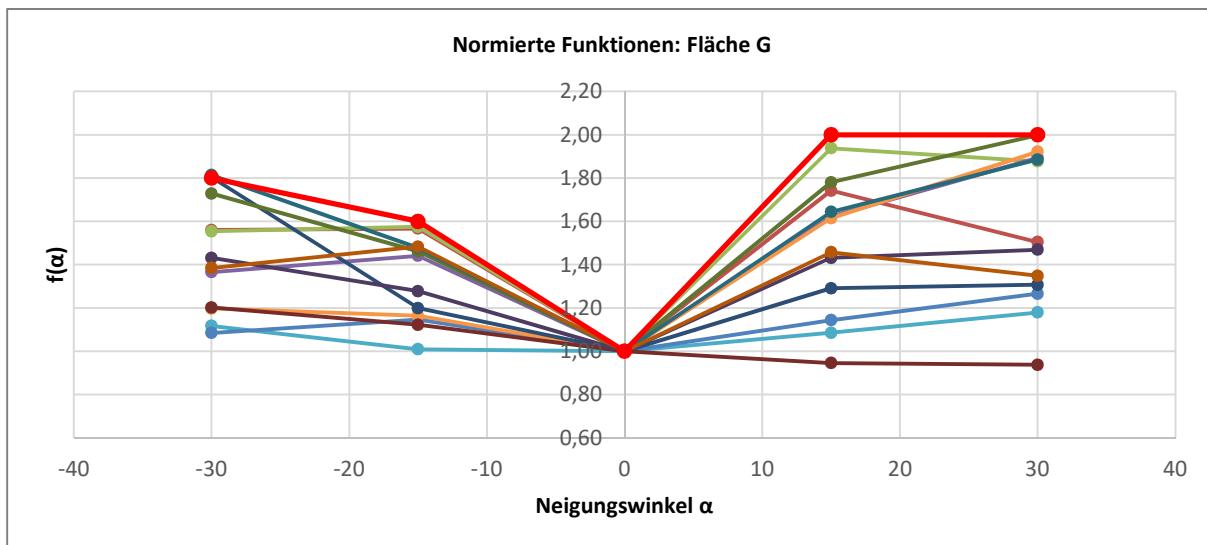




A.1.4 Statistische Auswertung der normierten Druckwerte mit Grenzwertbetrachtung







Verpflichtungs- und Einverständniserklärung

Ich erkläre, dass ich meine Masterarbeit selbstständig verfasst und alle in ihr verwendeten Unterlagen, Hilfsmittel und die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Ich nehme zur Kenntnis, dass auch bei auszugsweiser Veröffentlichung meiner Masterarbeit die Universität, das Institut und der Arbeitsbereich, an dem die Masterarbeit ausgearbeitet wurde, und die Betreuer zu nennen sind.

Ich nehme zur Kenntnis, dass meine Masterarbeit zur internen Dokumentation und Archivierung sowie zur Abgleichung mit der Plagiatssoftware elektronisch im Dateiformat „pdf“ ohne Kennwortschutz bei dem Betreuer einzureichen ist, wobei auf die elektronisch archivierte Masterarbeit nur die Betreuer der Masterarbeit und das studienrechtliche Organ Zugriff haben.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich den angegebenen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Masterarbeit eingereicht.

Innsbruck, am

.....

Anna FEICHTNER

