

Fakultät  
Maschinenbau

# Masterarbeit Nr. 03/2015

*„CFD-Simulation der Strömungssituation vor einem offenen volumetrischen  
Luftreceiver zur Ermittlung der konvektiven Verlustmechanismen“*

**Autor:** Sebastian Büscher  
Matrikelnummer: 135763

**Prüfer:** Prof. Dr.-Ing. A. Brümmer  
Dipl.-Ing. D. Maldonado Quinto

**Ausgabedatum:** 23.02.2015

**Abgabedatum:** 10.08.2015

## Aufgabenstellung Masterarbeit 2015/03

*„CFD-Simulation der Strömungssituation vor einem offenen volumetrischen Luft-receiver zur Ermittlung der konvektiven Verlustmechanismen“*

**Sebastian Büscher (Matrikel-Nr. 135763)**

In der DLR-Abteilung zu punktfokussierenden Systemen in Köln werden Solarturm-Kraftwerke weiterentwickelt. In solchen Kraftwerken wird das Sonnenlicht von einer Vielzahl von Heliostaten auf einen Strahlungsempfänger konzentriert. Der Strahlungsempfänger, auch Receiver genannt, ist auf einem Turm angebracht und besitzt die Aufgabe, die konzentrierte Solarleistung einem konventionellen Kraftwerksprozess zur Stromerzeugung zur Verfügung zu stellen. Eine am DLR entwickelte Receiver-Technologie ist die des offenen volumetrischen Receivers in der keramische Strukturen die Strahlung absorbieren. Zur Kühlung werden die Absorberstrukturen von Umgebungsluft durchströmt, die heiße Luft wird anschließend zu einem Dampferzeuger geleitet. Diese Technologie wird vom DLR im Forschungskraftwerk Jülich weiterentwickelt und im Kraftwerksmaßstab erprobt.

Im Rahmen der Master-Arbeit soll mittels CFD-Simulationen die Strömung vor einem offenen volumetrischen Receiver untersucht werden. Die heiße Luft besitzt am Austritt des Dampferzeugers eine Restwärme. Zur Wirkungsgradsteigerung wird die Luft zurück in den Receiver geführt und vor die Front geblasen, um einen Teil der warmen Luft zurück in den Receiver zu saugen. Ziel der Simulationen ist die Vorhersage der Rate der zirkulierten warmen Luft und die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen, die zu einer Erhöhung der Rate führen. Die Simulationsergebnisse sollen mit Daten aus bereits durchgeführten Experimenten validiert werden.

Geplante Schritte:

- Einarbeitung in die Thematik und das CFD-Tool OpenFOAM
- Ausarbeitung der charakteristischen Kenngrößen und Optimierungsmaßnahmen
- Erstellung der numerischen Netze und Durchführung der Simulationen
- Parameterstudie mit Hilfe der Kenngrößen
- Schrittweise Validierung anhand von realen Messdaten
- Dokumentation der Ergebnisse in schriftlicher Form entsprechend den Richtlinien des FG Fluidtechnik der TU Dortmund

Betreuer:

TU Dortmund, Prof. Dr.-Ing. A. Brümmer  
DLR Köln, Dipl.-Ing. D. Maldonado Quinto



Prof. Dr.-Ing. A. Brümmer

## **Vorwort**

Die am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. in Köln erstellte Masterarbeit wurde durch das Ministerium für Innovation, Wissenschaft und Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen finanziert.

## Kurzfassung

Um die Energiegestehungskosten für Solar-Turmkraftwerke zu senken, wird am offenen volumetrischen Luftreceiver als Strahlungsempfänger geforscht. Neben den Strahlungsverlusten sind die konvektiven Verluste maßgeblich für den Wirkungsgrad der Umwandlung von Strahlung in Wärme dieser Technologie. Sie entstehen durch die zurück vor den Receiver geführte und nach dem Dampferzeuger noch mit Restwärme behafteter Luft. Die Rate der im halb- offenen Prozess zirkulierenden Luft (Rückführrate) quantifiziert diese.

Diese Arbeit befasst sich speziell mit dem Einfluss von Seitenwind auf die Rückführrate. Dazu wird ein detailliertes CFD-Modell von einem Modul des modularen Receivers erstellt. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den ganzen Empfänger wird mit einem 4-Module-Modell untersucht.

Deutlich wird, dass Seitenwind zu einem rapiden Abfall der Rückführrate führt. Hauptsächlich die horizontal verlaufenden Spalte führen zu Verlusten. Für mehrere hintereinander liegende Module reduziert sich der Abfall der Rückführrate merklich. Zur Reduktion des negativen Windeinflusses kann neben einem massiven Windschutz eine rechteckige Neuordnung des Receivers mit ebenfalls rechteckigen Modulen genannt werden.

## Abstract

In order to decrease the levelized costs of electricity for solar thermal power plants with central receiver system, the open volumetric receiver is investigated. Beside the losses due to radiation, the convective losses exert profound influence on the efficiency of the transformation of radiation to thermal power. The losses result from returning the air, after it has passed the evaporator, to the front of the receiver in order to benefit from its residual heat. The rate of recirculating air quantifies the convective losses (air return ratio).

This study deals with the influence of crosswind on the air return ratio. Considering that, a detailed CFD-model of one module of the modular receiver is made. The transferability of the results to the whole receiver is examined with a new 4-module-modell.

The results show a rapid reduction of the air return ration in case of crosswind. Main parts of the losses occur due to the horizontal gaps. For multiple modules in a row, the reduction due to the crosswind is significantly lower. To decrease the negative influence of the wind, wind barriers may be used. Another possibility is using rectangular modules and receiver.

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>II</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>III</b>	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>2</b>
2.1	Solarthermisches Turmkraftwerk . . . . .	2
2.2	Offener Volumetrischer Receiver . . . . .	3
2.3	Demonstrationskraftwerk in Jülich und High Temperatur Receiver . . . . .	6
2.4	Rückführung der Warmluft . . . . .	8
2.5	Definition der konvektiven Verluste und der Rückführrate . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Motivation und Zielsetzung</b>	<b>13</b>
3.1	Motivation . . . . .	13
3.2	Einflüsse auf die konvektiven Verlustmechanismen . . . . .	14
3.3	Stand der Forschung zu den konvektiven Verlusten . . . . .	15
3.4	Aufgabenstellung und Zielsetzung . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Methodik</b>	<b>20</b>
4.1	Konzept und Annahmen des numerischen Modells . . . . .	21
4.2	Numerisches Modell . . . . .	26
4.2.1	Mathematisches Modell . . . . .	27
4.2.2	Geometrie . . . . .	29
4.2.3	Diskretisierungsmethode . . . . .	30
4.2.4	Numerisches Gitter . . . . .	32
4.2.5	Randbedingungen . . . . .	42
4.2.6	Finite Approximation . . . . .	49
4.2.7	Lösungsmethode . . . . .	50
4.2.8	Simulationseinstellungen . . . . .	52
4.2.9	Konvergenzkriterien . . . . .	53
4.3	Unsicherheitsabschätzung . . . . .	53
4.3.1	Plausibilitätsprüfung . . . . .	54
4.3.2	Fehlerabschätzung . . . . .	54
4.3.3	Netzunabhängigkeitsstudie . . . . .	56
4.4	Validierung . . . . .	62
<b>5</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>64</b>
5.1	Simulationsparameter und dimensionslose Kennzahlen . . . . .	64
5.2	Base Case $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . . . . .	66
5.3	Transienz . . . . .	74
5.4	Wind schwächer als $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . . . . .	78
5.5	Wind stärker als $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . . . . .	82
5.6	Rückführrate . . . . .	86
5.7	Weitere Untersuchungen . . . . .	89

---

<b>6</b>	<b>Übertragbarkeit auf den gesamten Receiver</b>	<b>91</b>
6.1	Methodik . . . . .	91
6.1.1	Ansätze und Konzept des Modells . . . . .	91
6.1.2	Numerische Modell . . . . .	93
6.2	Ergebnisse . . . . .	95
6.2.1	Berechnung der Rückführrate . . . . .	95
6.2.2	Simulationsparameter . . . . .	96
6.2.3	Interaktion mehrerer Waben . . . . .	97
6.2.4	XZ Ebenen am Spalt . . . . .	104
6.2.5	Verhalten der Rückführrate . . . . .	110
6.3	Fazit zur Übertragbarkeit . . . . .	116
<b>7</b>	<b>Verbesserungsmaßnahmen</b>	<b>119</b>
7.1	Potentialbeurteilung . . . . .	119
7.2	Verbesserungsmaßnahmen . . . . .	119
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>123</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	123
8.2	Ausblick . . . . .	125
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>126</b>

## I Abbildungsverzeichnis

1	Turmkraftwerk . . . . .	2
2	Prinzip Turmkraftwerk . . . . .	3
3	Volumetrischer Effekt . . . . .	5
4	Solarturm in Jülich . . . . .	7
5	Receiver des STJ . . . . .	7
6	Aufbau Receiver HiTRec des STJ . . . . .	8
7	Schematische Darstellung des Absorbermoduls . . . . .	10
8	Schematische Darstellung der Receiverkomponenten . . . . .	10
9	Foto Particle Image Velocimetry . . . . .	17
10	Skizze zum verschiedenen Verhalten der Warmluft je nach Spaltseite . . . . .	22
11	Histogramm Windgeschwindigkeiten Mitteldeutschland . . . . .	24
12	Gesamtansicht Domain . . . . .	30
13	Schnitt der Receiverfrontansicht . . . . .	31
14	Receiver Längsschnitt Kontur . . . . .	31
15	Skizze Receiver 2D . . . . .	32
16	Konzept Netzerstellung . . . . .	34
17	Basisnetz Querschnitt gesamt . . . . .	34
18	Basisnetz Querschnitt detail . . . . .	35
19	Vergleich der Nichtorthogonalität des Netzes . . . . .	37
20	Vergleich von Netzen im wandnahe Bereich . . . . .	39
21	Grenzschichthöhen und Zellgrößen . . . . .	41
22	Ergebnis wandnahes Netz . . . . .	42
23	Bezeichnungen der Ränder am Umgebungsvolumen . . . . .	44
24	Bezeichnungen der Ränder im Wabenbereich . . . . .	45
25	Rückführrate über Iterationsschritt . . . . .	55
26	Globale Inbalance der Erhaltungssätze, letzten 200 Iterationen der stationären Simulation . . . . .	55
27	Basis Netz mit markierten Bereichen . . . . .	58
28	Verlauf der Residuen . . . . .	59
29	Verlauf der Rückführrate, Detailansicht . . . . .	59
30	Diskretisierungsfehler . . . . .	61
31	Verlauf der Rückführrate bei transieter Simulation . . . . .	61
32	Temperaturverteilung, XY Ebene, Mitte Wabe, Base Case . . . . .	67
33	Temperaturverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe ca. 0,004 x/L, Base Case . . . . .	67
34	Temperaturverteilung, XZ Ebene, Mitte Wabe, Base Case . . . . .	68
35	Temperaturverteilung, XZ Ebene, Austritt aus Domain, Base Case . . . . .	69
36	Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, YZ Ebene, Distanz zur Wabe 0,004 x/L, Base Case . . . . .	69
37	Geschwindigkeitsfeld, XY Ebene, unter Mitte Wabe (bei 0,25 z/L), Base Case . . . . .	70
38	Geschwindigkeitsverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe 0,004 x/L, Base Case . . . . .	71
39	Geschwindigkeitsfeld, XZ Ebene, Mitte Wabe, Base Case . . . . .	72
40	Topologie der Strömung in der XZ Ebene . . . . .	72
41	Distanz des Knotenpunktes über der Windgeschwindigkeit . . . . .	73
42	Turbulente kinetische Energie $k$ , YZ Ebene, Distanz zur Wabe 0,004 x/L, Base Case . . . . .	73
43	Instationäres Verhalten der Rückführrate . . . . .	75
44	Geschwindigkeitsfeld, XZ Ebene, Mitte Wabe, $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , instationäre Simulation . . . . .	75
45	Mittlere Instationaritäten der Temperatur, XY Ebene, Mitte der Wabe, $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . . . . .	77

46	Mittlere Instationaritäten der Temperatur, YZ Ebene, Distanz zur Wabe $0,008 x/L$ , $7 \frac{m}{s}$ . . . . .	77
47	Temperaturverteilung, XY Ebene, Mitte Wabe, $1 \frac{m}{s}$ . . . . .	79
48	Temperaturverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe ca. $0,004 x/L$ , $1 \frac{m}{s}$ . . . . .	79
49	Temperaturverteilung, XZ Ebene, Austritt aus Domain, $1 \frac{m}{s}$ . . . . .	80
50	Temperaturverteilung, XZ Ebene, Mitte Wabe, $1 \frac{m}{s}$ . . . . .	80
51	Temperaturverteilung, XZ Ebene, vor Mitte Wabe (bei $0,75 y/L$ ), $1 \frac{m}{s}$ . . . . .	81
52	Geschwindigkeitsfeld, XY Ebene, über Mitte Wabe, $1 \frac{m}{s}$ . . . . .	81
53	Geschwindigkeitsfeld, YZ Ebene, Distanz zur Wabe $0,008 x/L$ , $1 \frac{m}{s}$ . . . . .	82
54	Temperaturverteilung, XY Ebene, Mitte Wabe, $25 \frac{m}{s}$ . . . . .	84
55	Temperaturverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe ca. $0,004 x/L$ , $25 \frac{m}{s}$ . . . . .	84
56	Temperaturverteilung, XZ Ebene, Mitte Wabe, $25 \frac{m}{s}$ . . . . .	85
57	Geschwindigkeitsfeld, YZ Ebene, Distanz zur Wabe $0,008 x/L$ , $25 \frac{m}{s}$ . . . . .	85
58	Rückführrate über der Windgeschwindigkeit . . . . .	88
59	Rückführrate über der Distanz des Knotenpunktes . . . . .	88
60	Reynoldsunabhängigkeit der Rückführrate . . . . .	90
61	Temperaturverteilung, XZ Ebene, Austritt aus Domain, 4 Module, $1 \frac{m}{s}$ . . . . .	95
62	Temperaturverteilung, XY Ebene, Base Case, 4 Module, Mitte Modul . . . . .	98
63	Temperaturverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe $0,004 x/L$ , 4 Module, Base Case . . . . .	98
64	Temperaturverteilung, XZ Ebene, Base Case, 4 Module, Mitte Modul 3 . . . . .	99
65	Temperaturverteilung, XY Ebene, Base Case, 4 Module, Oberkante Spalt . . . . .	99
66	Temperaturverteilung, XY Ebene, $25 \frac{m}{s}$ , 4 Module, Mitte Modul . . . . .	100
67	Temperaturverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe $0,004 x/L$ , 4 Module, $25 \frac{m}{s}$ . . . . .	100
68	Temperaturverteilung, XZ Ebene, $1 \frac{m}{s}$ , 4 Module, Mitte Modul 3 . . . . .	102
69	Temperaturverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe $1 x/L$ , 4 Module, $1 \frac{m}{s}$ . . . . .	102
70	Geschwindigkeitsfeld, XY Ebene, 4 Module, Mitte Module, $1 \frac{m}{s}$ . . . . .	103
71	Geschwindigkeitsfeld, YZ Ebene, 4 Module, Distanz zur Wabe $0,004 x/L$ , Base Case . . . . .	103
72	Geschwindigkeitsfeld, YZ Ebene, 4 Module, Distanz zur Wabe $0,004 x/L$ , $1 \frac{m}{s}$ . . . . .	105
73	Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene, Base Case, 4 Module, vor Modul 1 . . . . .	106
74	Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene, Base Case, 4 Module, hinter Modul 1 . . . . .	106
75	Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene, $2 \frac{m}{s}$ , 4 Module, hinter Modul 1 . . . . .	107
76	Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene, $2 \frac{m}{s}$ , 1 Modul, hinter Modul . . . . .	107
77	Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene, Base Case, 4 Module, hinter Modul 3 . . . . .	109
78	Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene, $2 \frac{m}{s}$ , 4 Module, hinter Modul 3 . . . . .	109
79	Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene, $2 \frac{m}{s}$ , 4 Module, hinter Modul 4 . . . . .	110
80	Rückführrate über die Zeit, $7 \frac{m}{s}$ . . . . .	111
81	Rückführrate über die Position des Moduls . . . . .	113
82	Zeitlicher Verlauf der Anteile Zeitlicher Verlauf der Anteile an der Rückführluft des vierten Moduls, BC . . . . .	113
83	Anteile verschiedener Module an der Rückführluft eines Moduls für $2 \frac{m}{s}$ , $7 \frac{m}{s}$ und $25 \frac{m}{s}$ . . . . .	115

---

84	Prozentuale Anteile verschiedener Module an der Rückföhlluft eines Moduls für $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . . . . .	115
85	Anteil moduleigener Rückföhrate an Rückföhrate . . . . .	116
86	Rückföhrate über die Windgeschwindigkeit, 4 Module . . . . .	118
87	Skizze rechteckiger Receiver . . . . .	122

## II Tabellenverzeichnis

1	Grenzschichthöhen ebene Platte . . . . .	39
2	Bezeichnungen der Ränder . . . . .	44
3	Methoden der Finiten Approximation . . . . .	50
4	Relaxationsfaktoren . . . . .	52
5	Simulationsparameter . . . . .	65
6	Simulationsparameter 4 Module . . . . .	96

### III Symbolverzeichnis

#### Formelzeichen

$A$	Fläche
$arr$	air return ration (Rückführtrate)
$c$	Wärmekapazität
$C$	Courant Zahl
$E$	Strahlungsenergie, Energie
$f$	Massenspezifische Körperkraft
$g$	Gravitation
$h$	Höhe
$h$	massenspezifische Enthalpie
$I$	Impuls
$K$	Kinetische Energie
$k$	turbulente kinetische Energie
$l$	Länge
$L$	Seitenlänge der Wabe
$m$	Masse
$N$	Zeitschritt
$p$	Druck
$Q$	Wärmeenergie
$\dot{q}'''$	Quellterm
$R$	spezifische Gaskonstante
$Re$	Reynolds-Zahl
$S$	Reibspannungstensor
$T$	Temperatur
$t$	Zeit
$u$	Geschwindigkeit
$W$	Arbeit
$x$	Distanz in X-Richtung
$y$	Distanz in Y-Richtung
$y+$	Dimensionsloser Wandabstand
$\Delta y_1$	Zellhöhe Randzelle
$z$	Distanz in Z-Richtung
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient
$\delta$	Grenzschichthöhe
$\epsilon$	Emissionsgrad
$\epsilon$	turbulente Dissipation
$\eta$	dynamische Viskosität
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\mu$	kinematische Viskosität
$\rho$	Dichte
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\phi$	fiktive Größe
$\omega$	charakteristische turbulente Frequenz

---

**Indizes**

<i>ABS, abs</i>	Absorber
<i>amb</i>	ambient
<i>c</i>	Konzentration
<i>d</i>	Druck
<i>D</i>	der Diffusionskoeffizient
<i>el</i>	elektrisch
<i>ges</i>	gesamt
<i>in</i>	Eintritt
<i>l</i>	laminar
<i>LH</i>	Heißluft
<i>log</i>	logarithmisch
<i>LW</i>	Warmluft
<i>max</i>	maximal
<i>MOD, mod</i>	Modul
<i>out</i>	Austritt
<i>R</i>	Reaktionsterm
<i>RA</i>	return air
<i>REC</i>	Receiver
<i>rgh</i>	um hydrostatischen Druck bereinigt
<i>S, sol</i>	Solar
<i>t</i>	turbulent
<i>u'</i>	Schwankungsterm von u
$\bar{u}$	Mittelwert von u
<i>vis</i>	viskos
<i>x</i>	in x-Richtung

**Abkürzungen**

<i>arr</i>	air return ratio
<i>HiTeRec</i>	High Temperatur Receiver
<i>STJ</i>	Solarturm in Jülich

## 1 Einleitung

Die Klimaerwärmung führt zu einem Wandel in der Energiepolitik. Nicht nur während der UN-Klimakonferenz, wie zuletzt in Lima, wird weltweit über Klimapolitik debattiert. Allein die Begrenztheit der fossilen Brennstoffe erzwingt eine Suche nach langfristig wirtschaftlicheren Alternativen. Der weltweite Energiebedarf steigt stetig. Um diesen Bedarf zu decken, bietet sich die Nutzung der Sonnenenergie an. Der jährliche Energieeintrag durch die Sonne auf die Erde ist um ein vielfaches höher als der weltweite Energiebedarf.

Solarthermischen Kraftwerke stellen eine Option dar, welche diese Energie emissionsarm, politisch unabhängig und langfristig wirtschaftlich umwandelt.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Wirkungsgradsteigerung von Solar-Turmkraftwerken. Sie gliedert sich in eine Forschungsreihe des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt ein, welche sich mit der Optimierung des offenen volumetrischen Receivers als Strahlungsempfänger beschäftigt. Dessen Effizienz wird maßgeblich durch die konvektiven Verluste und die Strahlungsverluste beeinflusst. Diese Arbeit konzentriert sich auf die konvektiven Verlusten. Sie entstehen, anders als bei anderen Reivertypen, durch den halboffenen Prozess und die damit verbundene Rückführung der aus dem Dampferzeuger austretenden Luft. Die Rückführung beabsichtigt, die Restwärme dieser Luft zu nutzen.

Die konvektiven Verluste werden über die Rückführrate quantifiziert. Sie beschreibt den Anteil der zurück in den Prozess geführten warmen Luft. Es gibt keine verlässlichen Messungen, die die Rückführrate bestimmen. Ein Ziel dieser Arbeit ist es, die Rückführrate zu ermitteln. Dadurch lässt sich der Kraftwerksprozess optimal auslegen. Darüber hinaus ist die Strömung vor einem Modul des modularen Receivers zu analysieren, damit die Rückführrate verbessert werden kann.

Eingegliedert in die aktuellen Forschungen zum Thema konvektive Verluste am offenen volumetrischen Receiver, wird diese Arbeit den Fokus auf den Einfluss von Störgrößen legen. Sie konzentriert sich auf die Frage, welchen Einfluss Seitenwind auf die Rückführrate hat.

Um die genannten Ziele zu erreichen, ist ein CFD-Modell entworfen worden, welches ein Modul abbildet. Es ist in Bezug zu bereits erfolgten Messungen validiert. Die Ergebnisse dieses Modells werden durch weitere Analysen hinsichtlich der Übertragbarkeit auf den ganzen Receiver untersucht.

Die Arbeit ist so aufgebaut, dass zunächst eine Einführung in den Stand der Technik gegeben wird. Anschließend wird die Motivation und die Zielsetzung angeführt. Folgend ist die Methodik und das in ihr enthaltende numerische Modell ausführlich beschrieben. Nachdem die Ergebnisse präsentiert sind, wird deren Übertragbarkeit auf den ganzen Receiver in einem nächsten Kapitel abgeschätzt. Die Ergebnisse werden genutzt um Verbesserungsmaßnahmen zu entwickeln. Abschließend wird die Arbeit resümiert und ein Ausblick für weitere Forschungen gegeben.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

In der vorliegenden Arbeit wird ein Strahlungsempfänger (auch Receiver genannt) untersucht. Dieses Kapitel wird den Kraftwerkseinsatz dieses Bauteils erläutern. Weiterhin soll das Konzept des Receivers und dessen Vorteile erklärt werden. Insbesondere wird auf das Konzept zur Rückführung der Warmluft eingegangen. Die Beschreibung der Technik beginnt mit einer generellen Betrachtung der Solarthermie und führt Schritt für Schritt durch die genutzte Technik bis zum zu untersuchenden Bauteil, dem Receiver.

Mit den hier vermittelten Grundlagen kann im nächsten Kapitel die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit und dessen Aufbau besprochen werden.

### 2.1 Solarthermisches Turmkraftwerk

Die Solarthermie nutzt die Strahlungsenergie der Sonne. Dazu wird diese Strahlung erst konzentriert und absorbiert. Die verschiedenen Konzepte lassen sich über die Art der Fokussierung klassifizieren. So gibt es zunächst Flachkollektoren, welche die Sonne ohne weiteren Fokus nutzen. Zur Stromerzeugung sind jedoch linien- und punktfokussierende Strategien bevorzugt. Das in dieser Arbeit untersuchte Bauteil befindet sich im Bereich der Punktfokussierenden. Die höhere Konzentration der Strahlung erlaubt eine höhere Endtemperatur des Arbeitsmediums, was wiederum einen besseren Wirkungsgrad im nachgeschalteten Kraftwerksprozess impliziert. Unter diese Klasse von thermischen Kraftwerken fallen die Solar-Turmkraftwerke, in welchen der untersuchte Strahlungsempfänger seine Anwendung findet. Ein Solar-Turmkraftwerk ist in Abbildung 1 zu sehen. Die solarthermischen Turmkraftwerke bestehen aus zwei Bereichen. Der erste Bereich ist der Solarteil. Teil davon ist der Konzentrator, welche als Heliostatenfeld ausgeführt ist. Es ist das optische Element des Kraftwerks. Heliostaten sind Spiegel. Die Vielzahl der sich in diesem Feld befindenden Spiegel konzentrieren das Sonnenlicht auf den Receiver. Der Receiver ist ebenfalls Teil des Solarteils. Er befindet sich im oberen Teil des



Abbildung 1: Turmkraftwerk [Deu]

Turms und bildet den Übergang zum zweiten Bereich, dem thermischen Teil. Der Receiver absorbiert die Strahlung und gibt die Wärme an ein Wärmeträgermedium weiter. Der zweite Bereich ist der Thermische. Hier wird die Energie vom erhitzten Prozessfluid in einem Kraftwerksprozess umgesetzt. Die zwei Bereiche sind in Abbildung 2 erkenntlich. Es ist das Prinzip eines Solar-Turmkraftwerk gezeigt.

Somit bildet der Receiver die wichtige und einflussreiche Verbindung zwischen dem optischen

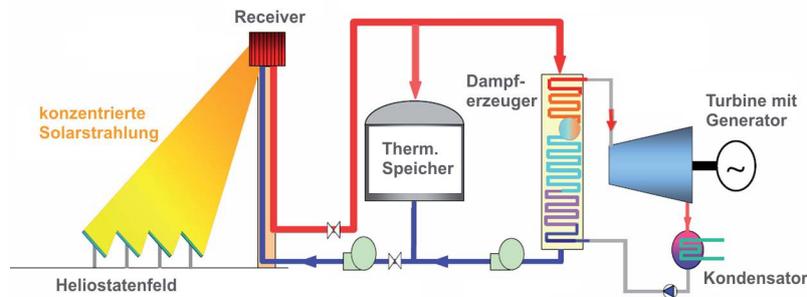


Abbildung 2: Prinzip Turmkraftwerk [Deu]

und dem thermisches System. Um einen hohen Wirkungsgrad des Gesamtsystems zu erreichen, ist ein guter Receiverwirkungsgrad unerlässlich.

Das im Receiver durch die konzentrierte Sonnenstrahlung erhitzte Fluid soll die Energie an einen Kraftwerksprozess übertragen. Üblicherweise besteht der Kraftwerksprozess aus einem Dampfturbinenkreislauf. Ist das Fluid im Receiver kein Wasser, wird ein zusätzliches Wärmeüberträgermedium nötig. Dieser überträgt die Energie vom Prozessfluid des Receivers zum Wasser bzw. Dampf für den Dampfturbinenkreislauf. Er ist gleichzeitig der Verdampfer für den Dampf-Kraftwerksprozess. Das Prozessfluid beschreibt den Primärkreislauf und der Dampf den Sekundärkreislauf.

Der Speicher kann bei veränderter Sonneneinstrahlung genutzt werden um die Leistung des Kraftwerksprozesses konstant zu halten. Diese Entkopplung der Strahlungsleistung von der Kraftwerksleistung ist ein wesentlicher Vorteil solarthermischer Anlagen gegenüber anderen regenerativen Konzepten ohne Speicher.

## 2.2 Offener Volumetrischer Receiver

Je nach Receivertyp ändern sich die Details des oben beschriebenen Grundkonzeptes. Der Primärkreislauf kann sowohl offen als auch geschlossen sein. Für geschlossene Kreisläufe kommen beispielsweise geschmolzene Salze oder Wasser oder Luft als Wärmeträgermedium infrage. Sofern der Primärprozess offen ist, bleibt Luft die einzige Alternative. Hierbei wird der Receiver von der Umgebungsluft durchströmt, wobei sich diese aufheizt. Nach der Wärmeübertragung auf den Sekundärkreislauf besitzt die Luft eine Restwärme. Da der Prozess offen ist, bleibt diese Restwärme ungenutzt. Der Abwärmeverlust entsteht in geschlossenen Systemen nicht.

Trotz dieser Ineffizienz bieten die offenen Receiver ein Potential zur Wirkungsgradsteigerung, weil sie konstruktiv einfach als „volumetrische“ Receiver eingesetzt werden können. „Volumetrisch“ bezieht sich an dieser Stelle auf den sogenannten „Volumetrischen Effekt“, welcher die Effizienz steigert.

Der Receiver ist ein Volumenkörper und kann beispielsweise aus einem schwammartigen oder porösen Material bestehen oder auch aus einer Anordnung von vielen kleinen Kanälen mit der Öffnung zur Strahlungsseite. So kann die Strahlung einerseits von der möglichst kleinen Vorderfläche des Receivers und andererseits vom Inneren des Receivers absorbiert und reflektiert werden. Je mehr Strahlung in den Receiver eindringt, desto weniger Reflexionsverluste entstehen, weil die Reflexionen vom Receiverinneren auf den Receiver zurückfallen. Nur die Reflexionen der Vorderseite entsprechen direkten Verlusten.

Die Strahlung erhitzt den Receiver im Ganzen, nicht nur die Strahlungsseite. Die Absorberstruktur kann je nach Material auf zulässige Temperaturen von 800-1500 °C ausgelegt sein. Die kühle Luft der Atmosphäre erwärmt sich durch erzwungene Konvektion beim Durchströmen des Receivers. Daraus ergibt sich ein Temperaturprofil des Materials des Receivers sowie der Luft jeweils in Strömungsrichtung. In Abbildung 3 werden diese Temperaturprofile von einem Rohrreceiver mit einem Volumetrischen Receiver verglichen. Der Rohrreceiver ist kein volumetrischer Receiver. Er besteht aus vielen Rohren, die einseitig durch die Strahlung erwärmt werden.

Dieses Temperaturprofil verdeutlicht einen Hauptvorteil der volumetrischen Receiver. Die Verlustenergie durch Wärmestrahlung  $\dot{Q}$  ist deutlich geringer. Sie kann über den Emissionsgrad  $\epsilon$ , die Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$ , die Fläche  $A$  und die Temperatur  $T$  ermittelt werden.

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A T^4 \quad (1)$$

Entscheidend ist die quartisch auftretende Temperatur der Strahlungsseite (Fronttemperatur). Bei den volumetrischen Receivern ist die Fronttemperatur geringer als die Endtemperatur des Wärmeträgermediums, ganz im Gegensatz zum Rohrreceiver. Dort liegt die Endtemperatur des Wärmeträgermediums unterhalb der Außentemperatur des Rohres. Dadurch sind beim offenen volumetrischen Receiver, bei gleichen Materialgrenzen, zusätzlich zu der niedrigeren Fronttemperatur auch höhere und damit günstigere Prozesstemperaturen möglich. Die Temperaturen werden maßgeblich durch die Strahlungsintensität und den Massenstrom des Receivers bestimmt. Offensichtlich steigen die Temperaturen mit der Strahlungsintensität. Sie sinken durch die Kühlwirkung der Umgebungsluft bei steigendem Massenstrom.

Luft als Prozessmedium hat schlechtere Wärmeübertragungseigenschaften als andere verwendete Medien wie geschmolzene Salze oder Wasser. Der volumetrische Receiver kann mit Luft trotzdem äquivalente Leistungen erzielen ohne übermäßige Massenströme oder Verweilzeiten zu erfordern. Das liegt daran, dass der niedrigeren Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit von Luft eine deutlich größere Fläche zur Wärmeübertragung gegenüber steht. Sie kompensiert

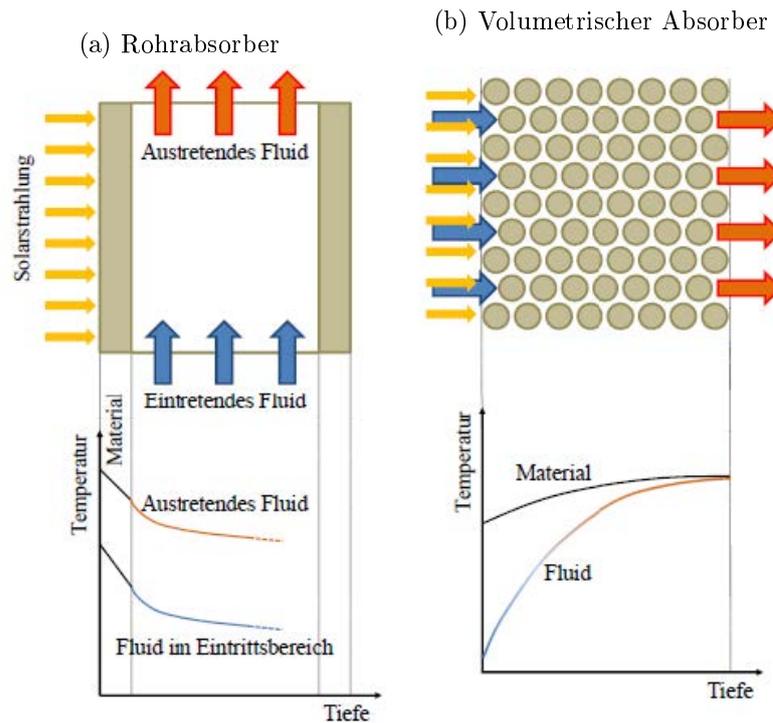


Abbildung 3: Volumetrischer Effekt: Temperaturprofil im Receiver von Material und Prozessfluid [Deu]

sichert die thermischen Nachteile des Mediums Luft.

Weitere Vorteile der Nutzung von Luft neben der unbegrenzten Verfügbarkeit sind zum einen die einfache Handhabung. Der Receiver ist durch seinen einfachen Aufbau sehr robust. Zum anderen entstehen durch den Einsatz von Luft keine Temperaturbeschränkungen. Weiterhin ist Luft kostenlos und schlussendlich ist die Nutzung umweltfreundlich. Hinzukommend haben Luft-Receiver eine schnelle sun-following dispatchability. Das bedeutet, dass das Kraftwerk bei Sonnenaufgang schnell hoch- und abends heruntergefahren werden kann, denn das Wärmeträgermedium hat keine Mindesttemperatur auf die es vorgewärmt werden muss, wie z.B. bei flüssigem Salz.

Zusammenfassend sind vier Hauptaspekte wichtig. Erstens ist die zur Wärmeübertragung zur Verfügung stehende Fläche sehr hoch ist und deswegen werden Gase als Prozessmedien möglich. Zweitens trifft ein Großteil der Strahlung auf Flächen im Absorber, sodass Reflektionsverluste minimiert werden. Drittens ist bei gegebener Grenztemperatur für das Material des Absorbers eine höhere Fluidtemperatur möglich aufgrund des Volumetrischen Effekts. Viertens bewirkt der Volumetrische Effekt eine geringe Abstrahlungsleistung durch eine niedrigere Temperatur der Strahlungsseite des Receivers.

Diese Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit Untersuchungen zu dem offenen volumetrischen Receiver. Dessen Stand der Technik wird folgend erläutert. Er zeichnet sich durch eine sehr robuste Ausführung aus.

### 2.3 Demonstrationskraftwerk in Jülich und High Temperatur Receiver

Das Demonstrationskraftwerk in Jülich und der dort verbaute High Temperatur Receiver bilden den Stand der Technik. Diese Definition legt den Rahmen für die Arbeit fest. Die Simulationen beziehen sich ausschließlich auf diesen einen Typ des offenen volumetrischen Receivers.

Neben den vielen Forschungen zu Solar-Turmkraftwerken gibt es allein eine Vielzahl von Studien und Untersuchungen zum offenen volumetrischen Receiver. So sind Studien zu verschiedenen Materialien sowie Geometrien oder Konzepten zur Umsetzung des Volumetrischen Effekts mit Schwämmen, porösen Materialien oder Kanälen durchgeführt worden. Das Konzept Volumetrischer Receiver wird auch als geschlossene Variante untersucht. Ein geschlossenes System verliert den Nachteil des Verlustes über die Abwärme. Dabei stellt sich die Herstellung des Abschlusses zur Atmosphäre als entscheidendes Problem heraus. Ein Konzept ist die Nutzung von Quarz-Glasscheiben. Eine Lösung für die Herstellung von sehr großen und den sowohl thermischen und mechanischen Belastungen (Wind und Druckniveau) standhaltende Scheibe ist noch zu finden. Das Ergebnis all dieser und weiterer Forschungen ist der im Demonstrationskraftwerk in Jülich verbaute Receiver.

Der STJ wurde gewählt, da die verwendete Technik zum einen Ergebnis jahrzehntelanger Forschung ist und somit zu den modernsten seiner Art gehört. Zum anderen ist die Kooperation für diese Arbeit erleichtert, da der STJ Teil des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) ist. Somit sind viele Daten zugänglich. Auch die Kooperation mit gleichzeitig laufenden Projekten zu Simulationen um und am ganzen Turm wird so erleichtert.

Eine Luftaufnahme vom Kraftwerk ist bereits in Abbildung 1 zusehen. Der 55 m hohe Turm selber ist besser in Abbildung 4 zu erkennen. Das Demonstrationskraftwerk erzeugt mit seinen ca. 1200 Heliostaten eine Leistung von 1,5 MW. Bis auf die Trockenkühlung des Dampfprozesses sind alle Komponenten im Turm integriert.

Der Receiver ist ein sogenannter High Temperatur Receiver (HiTRec). Er wurde im Rahmen von den Projekten HiTRec I, HiTRec II, Solair 200 und Solair 3000 entwickelt. Er besteht aus über 1000 Modulen und hat eine Fläche von ca. 23 m<sup>2</sup>. Seine quadratische Form ist in Abbildung 5 zu sehen. Diese Abbildung zeigt die Strahlungsseite des Receivers.

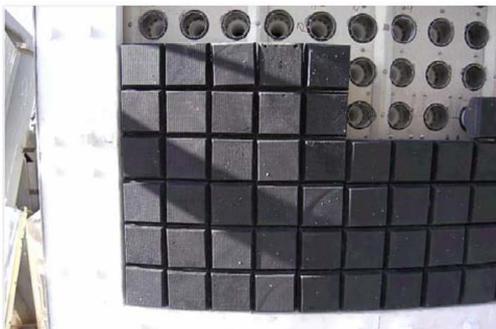
Die Schritte von der Wabe bis zum Receiver sind in Abbildung 6 zu sehen. Die kleinen Strömungskanäle, die insgesamt eine Wabenstruktur bilden, welche das Material durchlässig macht, sind im ersten Bild zu erkennen. Sie verlaufen senkrecht zur Strahlungsseite, im zweiten Bild von rechts entspricht dies einem vertikalen Verlauf. Die Wabenstruktur ist aus Keramik und wird von einer Art Becher gehalten. Waben und Becher werden weiter zu Absorbermodulen zusammengebaut, welche auf dem gelb dargestellten Element angebracht werden. Zusammen bilden sie den Teilreceiver (auch Sub-Receiver genannt), welcher letztendlich in einer Matrix zusammen mit weiteren Teilreceivern den Receiver bildet.

Die Fertigung der Waben ist aufwändig. Lufteinschlüsse können bei den erreichten Temperaturen schnell zu Brüchen führen. Deswegen sind die Waben auf kleine Größen beschränkt, was



Abbildung 4: Solarturm in Jülich [Deu]

(a) Front



(b) Seitenansicht



Abbildung 5: Receiver Demonstrations-Solar-Turmkraftwerk Jülich [Deu]

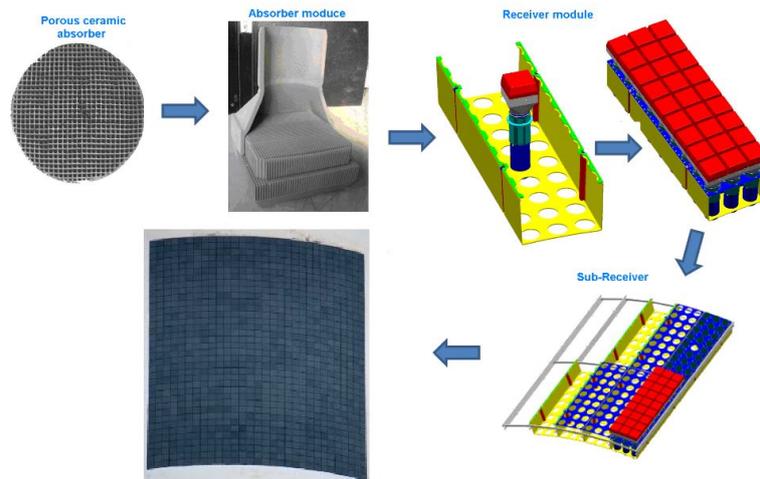


Abbildung 6: Aufbau Receiver HiTRec des STJ [Deu]

den vorteilhaften, modularen Aufbau des Receivers impliziert. Beispielsweise ist eine beliebige Skalierung möglich. Da das Demonstrationskraftwerk mit  $1,5 \text{ MW}_{\text{el}}$  noch keinen kommerziellen Kraftwerksmaßstab erreicht hat, steht diese Skalierung noch aus. Außerdem ist ein Ersetzen von defekten Modulen leicht und schnell möglich. Hinzukommt, dass die Spalte zwischen den Modulen nicht nur für die Rückführung der Warmluft nutzen, sondern auch den Wärmedehnungen Platz bieten. Zuletzt lassen sich die auftretenden Massenströme so besser einstellen. Dadurch kann auf die Einstrahlungsverteilung reagiert werden und durch eine konzeptionierte Anpassung der Wirkungsgrad gesteigert werden. Zurzeit ist es möglich, die Massenströme einzelner Module für einen Design-Zeitpunkt festzulegen, aber nicht diese zu regeln. Dieser Zusammenhang wird zusammen mit dem Rückführkonzept der Warmluft im folgenden Paragraph erläutern.

Abschließend bleibt zu sagen, dass diese Technologie sehr robust ist. Für den Betrieb ist eine zusätzliche Kühlung der Receiverstruktur nötig. Dennoch hält der Receiver einige Minuten unter volle Bestrahlung auch ohne Betrieb, das heißt ohne die Kühlwirkung der Umgebungsluft und ohne zusätzliche Kühlung, stand.

## 2.4 Rückführung der Warmluft

Das Kraftwerkssystem mit einem offenen Receiver wird in der Regel so betrieben, dass die Luft, welche nach dem Dampferzeuger noch Restwärme besitzt, zurück vor den Receiver geführt wird. Die noch warme Luft bezeichnet wird als Warmluft oder Rückfuhrluft bezeichnet. Dieses Konzept nennt sich Rückführung. Zum einen soll so die Abwärme genutzt werden, indem sie wieder in den Kreislauf eintreten kann. Zum anderen kann diese Luft gleichzeitig zur Kühlung der Receiverstruktur dienen. Zur Kühlung wird die Warmluft an der Receiverstruktur vorbei geführt bevor sie vor die Receiverfront geblasen wird. Somit enthält die Rückfuhrluft

Restwärme und die Energie der internen Konvektionsverluste (Kühlungswirkung der Rückführluft).

Die warme Luft wird nicht von der Seite sondern über die Spalte zwischen den einzelnen Modulen vor den Receiver geblasen. Diese Ringspalte um die einzelnen Module werden durch das Leitrohr mit Warmluft gespeist. Dies ist in Abbildung 7 zu sehen.

Der Wirkungsgrad eines Moduls ist abhängig von der Rückführluft. Er entspricht dem Quotienten aus der Differenz zwischen den Enthalpieströmen der Warm- und Heißluft und der Strahlungsleistung, die auf das Modul trifft. Anzumerken ist, dass der Massenstrom der Warm- und Heißluft unterschiedlich sein kann. Der Teilrückführungsgrad beschreibt dieses Verhältnis.

$$\eta_{mod} = \frac{\dot{m}_{mod,out} h_{mod,out} - \dot{m}_{mod,RA} h_{mod,RA}}{A_{mod} \cdot E_{abs}} \quad (2)$$

Eine weitere Schnittansicht ist in Abbildung 8 aufgezeigt. Dargestellt ist die Sammelleitung der Warmluft. Diese Warmluft wird über auf die Teilreceiver aufgeteilt und später in den Verteilungsschachts auf die einzelnen Ringspalte. Zusätzlich ist der Weg der Heißluft über die Bereiche, die als Sammler gekennzeichnet sind, entlang von Drossелеlementen bis zur gemischten Austritts-Heißluft mit gleichmäßiger Temperatur gezeigt.

Letztendlich ist noch das Drosselsystem zu sehen, welches ein wichtiger Bestandteil zur Beeinflussung des Betriebes des Receivers ist. Die Drosselungen bestimmen hauptsächlich den Druckverlust über den Receiver und damit den Massenstrom bei einer konstanten Drehzahl des Gebläses.

Es gibt zwei Arten von Drosselungen. Zuerst befinden sich hinter jedem Modul Blenden. Sie sind individuell eingestellt aber besitzen einen festen Durchmesser. Als zweites sind hinter jedem Teilreceiver Drosselklappen angebracht. Sie sind regelbar und dienen zur Massenstrom-einstellung der Teilreceiver. Die Massenstrom-einstellung der Teilreceiver wird erst bei großen Strahlungsempfänger nützlich.

Die beschriebene erste Stufe des Drosselsystems ermöglicht einerseits einen optimalen Betrieb und verhindert andererseits die Beschädigung des Receivers durch inhomogene Einstrahlung. Strahlung, die den Receiver nicht trifft, entspricht nicht genutzter Energie. Um dies zu vermeiden wird die Strategie verfolgt, dass die Randbereiche, durch eine Zielpunktführung der Heliostate, weniger Einstrahlungsleistung empfangen. Resultat ist eine inhomogene Strahlungsverteilung mit einer höheren Leistung in der Mitte. Der inhomogene Energieeintrag führt zunächst zu einer lokalen Aufheizung des Moduls. Mit der Temperatur sinkt die Dichte der Luft und damit steigt die Strömungsgeschwindigkeit in den Kanälen. Ebenso steigt die Viskosität der Luft, anders als bei den meisten Flüssigkeiten aber ähnlich zu anderen Gasen mit der Temperatur. Die erhöhte Strömungsgeschwindigkeit und Viskosität führen zu einem höheren Druckverlust in der Wabe. Dadurch sinkt der Massenstrom in den Waben lokaler Überhitzung. Durch den gesunkenen Massenstrom wird die Wabe weniger durch die Atmosphärenluft gekühlt, sodass sie sich weiter aufheizt. Dieser Vorgang kann zur Zerstörung des Receivers führen. Da die inhomogene Einstrahlung, wegen des daraus resultierenden gesteigerten Re-



ceiverwirkungsgrades, gewünscht ist, sind als Maßnahme zur Verhinderung der Zerstörung der Module die fixen Drosseln hinter den einzelnen Modulen vorgesehen. Sie bestimmen den Druckverlust maßgeblich, sodass der Temperatureinfluss kaum Auswirkungen hat. Über die Drosseln wird der Massenstrom in den einzelnen Modulen so eingestellt, dass er an die inhomogene Einstrahlung angepasst ist. So kommt es zu keiner Überhitzung trotz inhomogener Leistungsdichte. Die fixen Drosseln ermöglichen ein homogenes Temperaturprofil über den Receiver mit inhomogener Einstrahlung und schützen damit vor Überhitzung.

Ziel des Primärkreislaufes ist es, eine möglichst hohe Wärmeleistung an den Sekundärkreislauf bzw. den Kraftwerksprozess zu liefern. Je nach Prozessparameter des Kraftwerksprozesses sind die Temperaturen vor und nach dem Wärmeübertrager gewählt. Das heißt für den Primärkreislauf, dass die Heißluft bei einer nahezu konstanten Temperatur in den Wärmeübertrager eintreten soll, damit für den Kraftwerksprozess immer die gewünschte Temperatur erreicht werden kann. Weiterhin tritt deswegen die Warmluft mit einer fast konstanten Temperatur aus dem Wärmeübertrager aus. Die Leistung, die so an den Sekundärprozess abgegeben wird, hängt abgesehen vom Bauteilwirkungsgrad nur noch von dem Massenstrom der Heißluft ab. Der Wirkungsgrad des Receivers ergibt sich zu

$$\eta_{abs} = \frac{\dot{m}_{abs,out}(h_{abs,out} - h_{abs,in})}{A_{abs} \cdot E_{abs}} \quad (3)$$

wobei  $E_{abs}$  die Flussdichte der Einstrahlung ist.

Die eingetragene Energie ist die solare Strahlung. Für den Fall, dass der Massenstrom der Heißluft dem der Warmluft entspricht, hängt der Wirkungsgrad nur von dem Massenstrom und der Einstrahlleistung ab, weil wie oben beschrieben, die Temperaturen konstant sein sollen. Als Ziel für den Receiver kann beispielsweise formuliert werden, dass ein möglichst großer Massenstrom an Heißluft bei einer gewählten Heißgastemperatur geliefert werden soll.

## 2.5 Definition der konvektiven Verluste und der Rückführrate

Bei geschlossenen Receivern, wie z.B. einem Rohrreceiver, entstehen Verluste durch Konvektion an der Receiverfront. Die Konvektion kann frei oder auch durch Wind erzwungen entstehen. Für den offenen volumetrischen Receiver entstehen diese Verluste nicht, da die Luft vor der Strahlungsseite in den Receiver eintritt. Die in dieser Arbeit betrachteten konvektiven Verluste haben ihren Ursprung im Betrieb des Systems.

Wie viel von der Rückföhlluft erneut in den Receiver eintritt, beeinflusst den Wirkungsgrad enorm. Dieser Anteil beschreibt die konvektiven Verluste und wird über die Luft-Rückföhrate quantifiziert. Das Verhältnis wird folgend mit *arr* (air return ratio) abgekürzt.

Zur Berechnung des *arr* werden die Enthalpieströme am Receiver betrachtet. Wird die Energie ohne Sonneneinstrahlung ( $\dot{Q}_{sol} = 0 J$ ) bilanziert gilt  $H_{out} = H_{abs,In}$ . Der Enthalpiestrom am Austritt des Moduls entspricht der Mischenthalpie am Einlass. Diese Mischenthalpie stellt

sich durch die Vermischung der Rückföhlluft mit der Umgebungsluft ein. Die Anteile sind entsprechend des  $arr$  verteilt.

$$\dot{H}_{out} = \dot{m}_{out}h_{out} = \dot{m}_{amb}h_{amb} + arr \cdot \dot{m}_{RA}h_{RA} \quad (4)$$

Die Heißluft wird mit  $out$  indiziert, die Umgebungsluft mit  $amb$ , die in den Receiver eintretenden Luft mit  $abs, In$  und die Warmluft mit  $RA$  (return air).

$$\dot{m}_{amb} = \dot{m}_{out} - arr \cdot \dot{m}_{RA} \quad (5)$$

$$\dot{H}_{out} = \dot{m}_{out}h_{out} = \dot{m}_{out}h_{amb} + arr \cdot \dot{m}_{RA}(h_{RA} - h_{amb}) \quad (6)$$

Das  $arr$  entspricht dem Verhältnis der Enthalpiestromdifferenzen von Eintrittsluft und Atmosphäre zu denen der Rückföhlluft und Atmosphäre. Dieses Verhältnis wird mit dem Massenstromverhältnis von Heißluft (Luft nach Austritt aus dem Receiver) zur Rückföhlluft multipliziert um auch in Fällen der Teilrückföhrung bei  $\dot{m}_{out} < \dot{m}_{RA}$  Gültigkeit zu haben. Dieser Zusammenhang ist aus den Gleichungen (4) und (5) abzuleiten.

$$arr = \frac{\dot{m}_{out}}{\dot{m}_{RA}} \frac{h_{abs,In} - h_{amb}}{h_{RA} - h_{amb}} \quad (7)$$

Für  $\dot{m}_{out} = \dot{m}_{RA}$  und  $c_p \neq f(T)$  mit  $h = c_p T$  ergibt sich ausgehend von den Gleichungen (4) und (7):

$$T_{out} = T_{amb} + arr \cdot (T_{RA} - T_{amb}) = arr T_{RA} + (1 - arr) T_{amb} \quad (8)$$

Umgestellt nach dem  $arr$  ergibt sich:

$$arr = \frac{T_{abs,In} - T_{amb}}{T_{RA} - T_{amb}} \quad (9)$$

Entspricht die Temperatur der Eintrittsluft der der Rückföhlluft, wird die gesamte Warmluft wieder eingesaugt wird und es wird  $arr = 1$ .

### 3 Motivation und Zielsetzung

Zu Beginn des Kapitels wird die Motivation der aktuellen Forschung in diesem Bereich dargestellt. Anschließend werden die Einflüsse auf die konvektiven Verluste klassifiziert. Zusammen mit der folgenden Beschreibung der aktuellen Forschung zu diesem Thema, bilden diese drei Unterkapitel die Hinführung zur Aufgabenstellung. Zum Abschluss wird letztere wiedergegeben sowie die Zielsetzung definiert-

#### 3.1 Motivation

Die Relevanz der konvektiven Verluste ist enorm. Als Zahlenwert für die letzteren steht die Luft-Rückführrate. Ein hohes  $arr$  bedeutet wenig Verluste. Heutzutage haben moderne Receiver ein  $arr$  von 45-70 % was einem Energieverlust von 5-15 % entspricht. Für übliche Temperaturen werden Receiverwirkungsgrade von ca. 75 % erreicht. Ziel für eine kommerzielle Nutzung ist ein Wert von 90 % [MRP04]. Übliche Temperaturen liegen bei 80-150 °C für die Warmluft, wobei die Heißluft bei bis ca. 700 °C liegt [Ahl12].

Der Wirkungsgrad des Receivers (Gleichung 3) steigt einerseits mit dem  $arr$ , andererseits fällt er mit der Warmlufttemperatur  $T_{RA}$ . Bei nicht vollständiger Rückführung sinkt der Wirkungsgrad mit der Warmlufttemperatur, weil der Abwärmeverlust so gravierender wird. Selbst für eine hundertprozentige Rückführung sinkt der Wirkungsgrad mit der Warmlufttemperatur, weil die Abstrahlungsverluste durch eine erhöhte Temperatur der Strahlungsseite steigen.

Für die Stromerzeugung ist jedoch der Wirkungsgrad des Systems aus Kraftwerks und Receiver entscheidend. Der Dampfprozesswirkungsgrad steigt mit steigender Warmlufttemperatur  $T_{RA}$ , weil dadurch die mittlere Temperatur der zugeführten Wärme im Dampferzeuger steigt. Die Kombination aus dem Kraftwerks- und dem Receiverwirkungsgrad ergibt den Systemwirkungsgrad.

$$\eta_{system} = \eta_{abs} \cdot \eta_{Kraftwerksprozess} \quad (10)$$

Für die Kombination, der für steigenden Warmlufttemperatur einerseits fallenden und andererseits steigenden Wirkungsgrade, ergibt sich für das System ein Optimum. Dieses entspricht der optimalen Warmlufttemperatur. Wichtig ist, dass dieses Optimum von der Rückführrate abhängt.

Aus diesem Zusammenhang wird die Motivation klar, dass zum einen das  $arr$  für einen besseren Receiverwirkungsgrad erhöht werden muss. Zum anderen ist es gleichermaßen wichtig das  $arr$  verlässlich zu bestimmen. Dadurch ist die optimale Auslegung des Systems möglich, was zu einem verbesserten Systemwirkungsgrad führt. In Kombination lässt sich der Systemwirkungsgrad zum Stand der Technik in Jülich um über 15 % steigern. Für den STJ führt eine Erhöhung des  $arr$  von 60 % auf 100 % ohne die Anpassung der Warmlufttemperatur, zu einer Steigerung des Systemwirkungsgrad von weniger als 10 %. Dies verdeutlicht nochmal wie

wichtig es ist das *arr* zu kennen [Ahl12].

Die Messung des *arr* ist schwierig. Es gibt Messmethoden. Die Summe der Unsicherheiten durch die einzelnen Messelemente ist jedoch so groß, dass die Rückführrate nicht genau bestimmt werden kann.

### 3.2 Einflüsse auf die konvektiven Verlustmechanismen

In diesem Unterkapitel werden die Einflüsse auf ebendiese Verlustmechanismen kategorisiert. Diese Einflussfaktoren lassen sich in sechs Bereiche aufteilen, welche folgend aufgelistet sind.

- Geometrie
- Störgrößen
- Transiente Einflüsse
- Prozessparameter
- Konzeptanpassungen
- Interaktion

Der erste Bereich umfasst die Geometrie des Standes der Technik. So geht es um die Fragestellung, was die beste Anordnung von quadratischen Receivern ist. Konkrete Einflüsse sind zunächst die Wabenfläche und die Spalthöhe. Eine Kennzahl an dieser Stelle ist das Flächenverhältnis der Spaltfläche zur Absorber Vorderseite  $\frac{A_{RA}}{A_{abs}}$ . Weiterhin lässt sich der Winkel zwischen Receiver Vorderseite und der Wirkungsrichtung der Gravitation als geometrischer Einfluss festmachen.

Zweitens bestimmen Prozessparameter die Strömung. Die entscheidenden drei sind die Massenströme im Spalt und im Receiver sowie die Temperatur der Rückführluft. Kennzahlen sind die Verhältnisse der Massenströme  $\frac{\dot{m}_{RA}}{\dot{m}_{abs}}$  bzw. das Verhältnis der Rückführluft-Temperatur und der Umgebungstemperatur  $\frac{T_{RA}}{T_{amb}}$ .

Weiterhin lässt sich ein Teilbereich aus den Störgrößen erstellen. Wie in der zuletzt aufgeführten Kennzahl ist erkenntlich, dass die Umgebungstemperatur das *arr* beeinflusst. Sie bestimmt, wie stark die Rückführluft auftreibt. Als bedeutender erwartet ist an dieser Stelle vor allem der Wind zu nennen. Entscheidend sind die Windgeschwindigkeit und die Richtung. Dimensionslose Kennzahlen sind das Verhältnis der Geschwindigkeiten in Spalt und Wind  $\frac{u_{amb}}{u_{RA}}$  bzw. das Verhältnis der Impulsströme  $\frac{\dot{I}_{amb}}{\dot{I}_{RA}}$ .

An vierter Stelle sind Konzeptanpassungen zu nennen. Die anderen Kategorien der Einflüsse beziehen sich auf ein bestimmtes Konzept, welches nur in Details oder bezüglich Prozessparameter abgewandelt wird. Jedoch beeinflusst diese Festlegung auf ein bestimmtes Konzept das *arr* stark. Andere Konzepte haben andere *arr*. Eine Idee für eine Konzeptanpassung, die eine Umlenkung der Rückführluft vorsieht, ist bereits öfters untersucht worden. Meist ist die Umsetzung einer strahlungsdurchlässigen und temperaturbeständigen Umlenkvorrichtung, die ebenfalls in Receiverdimensionen mechanisch beständig bleibt, das größte Problem. Da immer neue Ideen aufkommen, bleibt dieser Bereich interessant.

Alle transienten Einflüsse sind im fünften Bereich einzuordnen. Die vorherigen vier Bereiche

befassen sich alle mit stationären Einflüssen. Die zeitliche Komponente der obigen Einflüsse wird hier eingeführt. So lassen sich beispielsweise Prozessparameter wie die Rückführlufttemperatur mit der Zeit variieren. Dies tritt z.B. beim Anfahren oder Abschalten der Anlage sowie bei transienten Verhalten des Dampf-Kreislaufes auf. Auch eine veränderte Einstrahlung, wie bei einem Wolkendurchzug, beeinflusst das Verhalten. Die verminderte Einstrahlung führt kurzfristig zu einem Temperaturabfall der Heißluft und längerfristig zu einem Massenstromabfall der Heißluft, da das Gebläse letzteren so regelt damit die Heißlufttemperatur konstant bleibt. Diese Abläufe lassen sich alle unter den Bereich Einflüsse des instationären Verhalten zusammenfassen.

Der sechste Bereich beschreibt die Interaktion mehrerer Waben. Die vorher genannten Aspekte beeinflussen eine einzelne Wabe genauso wie auch den ganzen Receiver. Rückschlüsse von einzelnen Waben auf ein System aus mehreren Modulen sind nicht immer eindeutig. Die Interaktion der einzelnen Waben hat einen deutlichen Einfluss auf die konvektiven Verluste.

Zuletzt ist eine Gruppe aufgeführt, die nicht als Bereich aufgefasst wird. Diese Gruppierung beinhaltet alle Einflüsse, die aufgrund der Struktur der Waben entstehen. Beispiele sind Stegbreiten oder Produktionsfehler. Weiterhin taucht hier die Geometrie der Wabe, sprich die Form (Sechseck, Kreis, Achteck, Dreieck, Kombination Verschiedener) auf.

### 3.3 Stand der Forschung zu den konvektiven Verlusten

Am DLR laufen Forschungsarbeiten zu den konvektiven Verlusten. Es werden unter anderem die Umströmung des Turms als auch unterschiedliche Absorberstrukturen untersucht. Relevant für diese Arbeit sind die Forschungen zur Strömung vor dem Receiver. Langfristig soll in vier Schritten ein numerisches Modell zur Vorhersage dieser entstehen.

1. CFD Modell von einem Modul erstellen
2. CFD Modell experimentell validieren
3. vereinfachtes Modell erstellen
4. Berechnungen des Receivers

Zuerst wird ein CFD Modell von nur einem Modul erstellt, welches als Zweites experimentell validiert wird. Drittens soll auf Basis der neuen Erkenntnisse ein vereinfachtes Modell entstehen. Viertens soll es mit diesem Modell möglich sein, den ganzen Receiver zu berechnen. In diesen Prozess ist die Arbeit einzuordnen.

Mit diesem Modell sollen Verbesserungsvorschläge für den Betrieb des Receivers entwickelt werden. Weiterhin soll eine Vorhersage für die Rückführrate über einen Zeitraum möglich sein. Das ist wichtig für Auslegung und Steuerung des Kraftwerks. Das bedeutet, dass Störgrößen wie Wind Teil des Modells sein sollen.

Die ersten beiden Schritte wurden realisiert. Das entstandene CFD-Modell für ein einzelnes

Modul wurde unter realen Einstrahlungsbedingungen mit einer optischen Methode zur Messung von Geschwindigkeitsfeldern validiert wurde. Es lagen ausschließlich Laborbedingungen vor. Ein Foto eines laufenden Tests ist in Abbildung 9 gezeigt.

Die erste Erkenntnis dieser Messungen war, dass die Strömung vor dem Modul sehr komplex und hoch turbulente ist. Zum Teil wird die warme Luft direkt umgelenkt und tritt in die Wabe ein. Die nicht direkt umgelenkte Warmluft sammelt sich in einem Bereich vor dem Absorber. Sie treibt zunächst vom Receiver weg bis sie in eine reine Thermik-Strömung übergeht. Sie bildet insgesamt einen Verluststrahl, der ungenutzt abströmt. Weiterhin ist die Umlenkung der Warmluft hin zur Wabe davon abhängig, ob die Warmluft aus dem oberhalb, unterhalb, oder seitlich der Wabe liegenden Spalte austritt. Es ist erkannt worden, dass die Warmluft von zwei Seiten deutlich stärker umgelenkt wird. Von diesen zwei gegenüberliegenden Seiten tritt ein Großteil der Warmluft wieder in den Receiver ein. Dadurch „blockieren“ diese beiden stark umgelenkten Seiten die anderen beiden sozusagen. Deshalb entstehen dort deutlich höhere Verluste an Warmluft.

Dieser Versuchsaufbau wurde in dem erstellten CFD-Modell nachgerechnet. Damit ist gemeint, dass die Randbedingungen der Simulation die Situation im Labor abbildeten und nicht die an einem Solarturm. Beispiele dafür sind zunächst die Umgebungstemperatur oder auch die Solarfloatglas-Scheibe. Die Scheibe befand sich zwischen Hochleistungsstrahler und Modul. Sie hat die durch den Strahler entstehenden Druckschwankungen abgeschirmt. Somit tritt sie auch in den Simulationen als undurchlässige Ebene auf. Ein weiteres Beispiel ist die im Labor konstant gehaltene Umgebungstemperatur. Das CFD-Modell ist validiert, da die Simulation mit den Versuchsergebnissen gut übereinstimmt.

Mit dem Modell wurden bereits diverse Betriebspunkte und weitere Parameterstudien durchgeführt. Die folgenden Aspekte sind untersucht:

- Massenstromabhängigkeit
- Anordnung der Wabe (Spaltabstand)
- Temperatur der Rückführluft
- Verlauf der Wabentiefe
- Teilrückführungsverhalten
- Größe des Absorbers

Diese Studien sind noch nicht veröffentlicht und ihre Ergebnisse unterliegen deswegen der Geheimhaltungspflicht. Sie wurden mit dem validierten Modell durchgeführt. Das bedeutet, dass die Randbedingungen, wie zuvor erwähnt, denen im Labor entsprechen und nicht denen am Solarturm.

Genau dieser Aspekt ist der Anknüpfungspunkt dieser Arbeit an die aktuelle Forschung. Diese Arbeit wird sich generell mit den Einflüssen auf die Rückführluft sowie daraus entstehenden Ideen für eine Optimierung beschäftigen. Spezieller Ansatzpunkt ist hierbei, dass die bestehenden Untersuchungen Laborbedingungen abbilden. In der vorliegenden Arbeit wird das Modell dahingehend erweitert, dass die Einschränkung der Laborbedingungen schrittweise aufgehoben wird.



Abbildung 9: Foto Particle Image Velocimetry [Deu]

### 3.4 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das generelle Ziel der Forschung ist es, den Systemwirkungsgrad des Kraftwerks zu verbessern. Dazu soll zum einen der Receiverwirkungsgrad durch eine Reduktion der konvektiven Verluste erhöht werden. Weiterhin soll die Rückführrate quantifiziert werden um die optimale Warmlufttemperatur für den höchsten Systemwirkungsgrad wählen zu können.

In dieser Arbeit sollen die konvektiven Verluste weiter untersucht werden. Einige der Verlustmechanismen die im vorherigen Kapitel kategorisiert wurden, sind bereits untersucht worden. Die Geometrie wurde durch die Variationen des Spaltes, der Wabentiefe und der Größe des Absorbers untersucht. Über die Variationen des Massenstroms, des Teilrückführungsgrades und der Rückführlufttemperatur ist der Einfluss der Prozessparameter erforscht worden.

Als noch unbeachtete Kategorien (in Kapitel 3.2 beschrieben) bleiben die Störgrößen, die transienten Einflüsse, die Konzeptanpassungen und die Interaktion mehrerer Module. Forschungen zur Interaktion mehrerer Module laufen simultan zu dieser Arbeit am DLR.

Ziel all dieser Untersuchungen sind spätere Aussagen über den allgemeinen Betrieb am Solarturm. Die ersten Schritte sind bereits erfolgt, sodass Tendenzen und Abhängigkeiten unter Laborbedingungen an einem Modul berechnet wurden. Der Autor hält es für sinnvoll, zunächst weiter mit den einflussreichen stationären Grundlagen fortzufahren. Erst wenn dieser Bereich abgeschlossen ist, sollten transienten Einflüsse wie böiger Seitenwind, ein Wolkenbruchzug oder die Dynamik des Ventilator-Systems betrachtet werden.

Weiterhin hat es viele Vorteile, das bestehende Konzept vollständig zu untersuchen und erst anschließend Konzeptverbesserungen anzubringen. Konzeptverbesserungen können besser geplant und wirksamer umgesetzt werden, wenn alle Einflüsse und vor allem deren Gewicht bekannt sind, den erster Ansatzpunkt ist typischerweise der Haupteinfluss. Weiterhin ist es vorteilhaft, Abschätzungen treffen zu können, die Aussagen über den gegenseitigen Einfluss zweier Parameter machen. Beispielsweise kann die eine Strömungsführung, welche die zurückgeführte warme Luft umlenkt, gleichzeitig eine Barriere gegen Seitenwind sein. Ist einer dieser beiden Einflüsse unbekannt, kann ein verbessertes Konzept nicht optimal konzipiert werden oder im Nachhinein sein Effekt nicht ganz erklärt werden. Diese Arbeit soll die Ausgangssituation für nachfolgende Konzeptverbesserungen schaffen.

Darüber hinaus ist die Betrachtung der Interaktion mehrerer Module immer sinnvoll, denn die Ergebnisse an einem Modul sollen Aufschluss auf das Verhalten des gesamten Receivers geben. Die Interaktion weniger Module hilft das Verhalten einzelner auf mehrere zu übertragen. Nachteilig ist der deutlich erhöhte Rechenaufwand bei gleicher Akkuratess. Die schnellere Aneignung eines breiteren Basiswissens zu einem Modul erscheint derzeit sinnvoller um möglicherweise auch die Interaktion besser zu abzuschätzen und beurteilen. Zuletzt werden die laufenden Untersuchungen das Vorgehen zur Untersuchung der Interaktion beeinflussen. Daher wird auch diese Kategorie als anschließender Schritt angesehen.

Die letzte sogenannte research void ist der Einfluss der Störgrößen. Der Autor stellt fest, dass als sinnvoller nächster Schritt das bestehende Modell von Labor- auf Realbedingungen erwei-

tert werden muss. Das heißt, es sollen Auswirkungen von ebendiesen Störgrößen betrachtet werden. Diese Einstellung wird durch die Erwartung unterstützt, dass insbesondere Seitenwind einen bedeutenden Einfluss auf den Receiver hat.

Um mit dieser Arbeit den genannten generellen Zielen der Quantifizierung und Verbesserung des  $arr$  näher zu kommen, werden die bisherigen Aussagen über die konvektiven Verluste, die unter Laborbedingungen gelten, auf die real am Turm vorliegenden Bedingungen, wie Temperaturschwankungen oder Wind, erweitert. So kann der Betrieb unter Windeinfluss optimiert werden.

Ein wichtiger Teil der Untersuchungen soll die Ermittlung und das Verständnis der Details der Strömung vor dem Receiver sein. Deshalb wird der Windeinfluss auf Modul- und nicht auf Receiverebene betrachtet.

Die Ergebnisse von einem Modul sind nicht direkt auf den ganzen Receiver übertragbar, deswegen soll anschließend ebendiese Übertragbarkeit der gewonnen Erkenntnisse abgeschätzt werden.

Abschließend sind ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen, Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. Das Potential dieser Maßnahmen kann durch die Abschätzung der Übertragbarkeit der Ergebnisse von einem Modul erörtert werden.

Der Windeinfluss wird als entscheidende Komponenten eingestuft. Die Umgebungstemperatur fällt ebenso unter die Kategorie Störgrößen. Die Untersuchung des Einflusses dieser erfordert jedoch keine Erweiterung des Modells. Eine Betrachtung ist durch Änderung des Parameter Temperatur möglich. Randbedingungen und Netz können bestehen bleiben. Weiterhin wird ihr Einfluss als unbedeutend und zuletzt auch potentielle Einflüsse auf die Auswirkungen dieser Temperatur als gering eingestuft. Diese Einstufung basiert auf den Ergebnissen zu den Untersuchungen mit unterschiedlichen Warmlufttemperaturen. Wie bereits beschrieben dominiert die Trägheit die Rückführrate und nicht die Auftriebskraft. So wird diese Arbeit sich ausschließlich mit der Störgröße Wind befassen.

## 4 Methodik

Im folgenden Kapitel wird verwendete numerische Modell beschrieben. Die Zielsetzung dieses Modells wurde in der Aufgabenstellung (Kapitel 3.4) am Ende des letzten Kapitels beschrieben. Dieses Ziel wird folgend in Kapitel 4.1 im Detail definiert, sodass ein klares Konzept entsteht. Mit dem gesetzten Fokus kann das numerische Modell erzeugt werden, welches in Kapitel 4.2 detailliert beschrieben ist. Die Methodik wird abgeschlossen durch eine Bewertung des Modells. Dazu wird zuerst eine Unsicherheitsabschätzung inklusive einer Netzunabhängigkeitsstudie erfolgen. Anschließend ist eine Anmerkung zur Validierung des Modells angeführt. Als Tool für die Simulation wird die freie Software OpenFOAM 2.3.0 genutzt.

Die in diesem Kapitel vermittelten Kenntnisse sind Basis für eine korrekte Analyse der im nächsten Kapitel folgenden Ergebnisse.

Methodisch wurden neben der Simulation weitere Ansätze betrachtet.

Eine analytische Lösung des Problems war nicht möglich, deswegen war ein erster Ansatz, die Thermodynamik des Recievers über eine Dimensionsanalyse auf wenige Parameter zu beschränken. Wie bereits erwartet, sind die Einflüsse vielzählig, sodass insgesamt über 25 dimensionslose Kennzahlen definiert wurden, um alle Einflüsse der Rückführrate abzubilden. Dieser Ansatz ist nicht zielführend gewesen und eine Versuchsreihe, anstelle einer Simulation, wäre zu aufwändig. Da die Zielsetzung nicht auf dem allgemeinen Einfluss aller Parameter und deren gegenseitiger Beeinflussung liegt, sondern auf dem Windeinfluss im Speziellen, wird im Späteren eine Betrachtung mit einer dimensionslosen Kennzahl nur für diesen Einfluss getätigt. Es wird die Reynolds-Zahl des Windes genutzt. Dies ist in Kapitel 5.7 ausgewertet.

Nicht zuletzt sind Forschungsergebnisse zu ähnlichen Strömungssituationen gesucht worden. Erste Ideen waren Forschungen zu Themen wie der Absaugung von laminarer Grenzschichtströmung oder der Schaufelkühlung bei Gasturbinen. Eine Kombination aus Ausblasen und erneuten Einsaugen ließ sich nicht in High-Tech Bauteilen wiederfinden. Ein weiteres Problem war, dass die hohen Temperaturen, die starke Turbulenz sowie die Einstrahlung die hier vorliegende Anwendung von vielen anderen unterscheiden.

Zusätzlich gab es Überlegungen die Topologie der Strömung a priori zu klassifizieren. Dazu sollte die Anzahl der freien Staupunkte (Sattelpunkte) über einen potentialtheoretischen Ansatz gefunden werden. Die 3D-Strömung stellte sich schnell als zu komplex heraus um Ergebnisse zu erzielen. Die Absicht eine Topologie der Strömung zu finden bleibt und wird in den späteren Ergebnissen a posteriori untersucht.

## 4.1 Konzept und Annahmen des numerischen Modells

Dieses Kapitel dient als Einführung in das numerische Modell. Um das Modell optimal an die Aufgabe anzupassen, ist es zuerst nötig, ein genaues Konzept festzulegen. Dieses beinhaltet globale Annahmen. Es werden Anforderungen an das Modell festgelegt, und somit definiert was genau simuliert werden soll. Beispielsweise beeinflusst die Windgeschwindigkeit die Wandauflösung. Somit müssen die abzubildenden Winde vor der Erstellung des numerisches Modells festgelegt sein.

### Dreidimensionalität und Symmetrie

Die Simulation wird in 3D durchgeführt. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass ein 2D Modell das Verhalten akkurat abbildet.

Ein zweidimensionaler Ansatz würde Turbulenzen unterdrücken. Die (dreidimensionale) Turbulenz beeinflusst die Durchmischung der warmen und kalten Luft vor dem Receiver maßgeblich, deswegen ist sie in keinsten Weise vernachlässigbar. Weiterhin bildet die Strömungsrichtung in der Wabe und im Spalt mit dem Seitenwind eine Ebene. Die Auftriebskraft wirkt senkrecht zu dieser gedachten Ebene, sodass letztere im 2D Modell ebenfalls unterdrückt würde. Der Einfluss des Auftriebs auf die Rückföhrerate ist gering aber nicht vernachlässigbar. In den Ergebnissen wird erkennbar sein, unter welchen Randbedingungen der Auftrieb kaum noch Einfluss auf das Strömungsfeld hat. So kann abgeschätzt werden, ab welcher Windgeschwindigkeit der Einfluss des Auftriebes nicht nur auf die Rückföhrerate, sondern auch auf die Details der Strömung gering ist. Dieses Wissen kann später genutzt werden, falls eine Symmetrierandbedingung für das vereinfachte Modell infrage kommt.

Außerdem, wie die bisherigen Versuche zeigen, strömt die kalte Umgebungsluft, die in die Wabe eintritt, aus allen Richtungen zur Wabe. Diese dreidimensionalen Zufüsse sind weder spiegel- noch rotationssymmetrisch.

Hinzukommend beeinflusst die quadratische Warmluftspaltöffnung die Rückföhrerate stark. Abbildung 10 zeigt, wie im Experiment erkannt, die Warmluft aus einen Paar gegenüberliegender Spalte stark umgelenkt und zum Großteil wieder eingesaugt wird, während die anderen beiden durch die Ersten sozusagen blockiert werden. Die Strahlungsseite der Wabe ist hier schraffiert dargestellt. Sie ist umgeben vom Spalt. So entsteht ein Großteil der Verluste. Ein weiterer großer Teil nicht wieder eingesaugter Warmluft strömt aus den Ecken des Spalts. Ein 2D Modell bildet all dies nicht ab, sodass keine repräsentative 2D Ebene gewählt werden kann.

Zuletzt ist ein wichtiges Ziel, die Strömung näher zu verstehen, optimaler Weise in ihrer 3D Struktur. Außerdem sind ebenfalls die Strömungsfelder in Schnitten senkrecht zum Wind interessant. Sie erleichtern das globale Verständnis der sich einstellenden Strömung.

Um den Rechenaufwand zu reduzieren, sind Symmetrieebenen eine gute Möglichkeit. Potentielle Ebenen lägen in diesem Fall am oberen und unteren Ende der Spalte, parallel zum Wind.

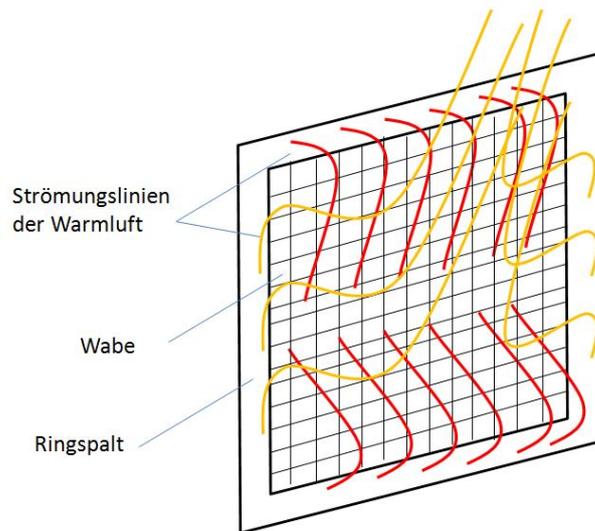


Abbildung 10: Skizze zum verschiedenen Verhalten der Warmluft je nach Spaltseite

Es werden dennoch keine Symmetrieebenen genutzt, da diese Ebenen die Turbulenz beeinträchtigen und wie bereits bei der Wahl für ein 3D und gegen ein 2D Modell beschrieben so auch die Auftriebskraft unterdrückt würde.

### Einzelnes Modul

Die dreidimensionale Simulation ist rechenintensiv. Ebenfalls rechenintensiv ist die Auflösung der Wabe. Das Modul wird Teil des späteren numerischen Modells sein. Die kleinen Kanäle der Wabe erhöhen den Rechenaufwand. Da keine Randbedingung das komplexe Verhalten der Wabe wiedergeben kann, ist diese Auflösung nötig um im Detail korrekte Ergebnisse zu erhalten. Vertretbare Simulationszeiten sind somit nur mit der Simulation weniger und bei größeren Parameterstudien eines Moduls zu erreichen.

Der Vorteil an der Simulation vor nur einem Modul ist, dass sich daraus eher ein vereinfachtes Modell ableiten lässt. Alle Interaktionen mit anderen Modulen beeinflussen die Strömung. Da es kaum möglich ist, mehr als drei bis vier Module in einem angemessenen Zeitrahmen zu berechnen, ist der Einfluss stets einseitig. Das heißt, ein Modul kann nie von allen Seiten von anderen Modulen umgeben sein ohne einen enormen Rechenaufwand zu erzeugen.

Durch die Simulation von nur einem Modul, bleibt das neue Modell nahe an der validierten Simulation. Alle Änderungen in der Rückführrate sollen eindeutig dem Windeinfluss zuzuordnen sein und nicht noch weiterhin durch eine mögliche Interaktion verfälscht werden. So entschließt sich der Autor auch weiterhin im ersten Schritt ein Modul zu betrachten.

Zum Schluss ist die Position des Moduls im Receiver interessant. Das Modell bildet keines der tatsächlich verbauten Module ab. Mit der Annahme, dass weder stromabwärts gelegene noch neben dem Modul liegende weitere Module das *arr* des Betrachteten beeinflussen, kann das untersuchte Modul als Randmodul angesehen werden. Als Randmodul sind alle Module die sich am Rand des Receivers befinden zu verstehen. Der Fehler durch nicht vorhandene

stromabwärts liegende Module wird als sehr gering eingeschätzt. Es bleibt zu untersuchen, inwiefern die fehlende seitliche Abschirmung des Moduls durch neben liegende Module das *arr* beeinflusst.

### **Betrachtungen zum Wind**

Beginnend wird der Einfluss des globalen Verhalten des Windes um einen Solarturm auf das numerische Modell besprochen. Es soll erläutert werden, wie mit verschiedenen Windrichtungen umgegangen wird. Darauf folgend wird der Bereich der simulierten Windstärken besprochen.

Zur Beurteilung des auf den Turm treffenden Windes kann der Einfluss dessen der Windrichtung nach kategorisieren werden. Der Wind kann aus allen Richtungen kommen und dazu noch eine horizontale Neigung haben. Je nach Windrichtung und Turmgeometrie bilden sich bei der Umströmung des Turms Staupunkte und es kommt zu Ablösungen. Diese beeinflussen den Wind, der auf die Module trifft.

Problematisch ist in diesem Zusammenhang der nicht vorhandene industrielle Standard der Receiver-Technologie. Denn nicht nur die Windrichtung, sondern auch die Position des Moduls im Receiver kann die relative Windrichtung beeinflussen. Die zukünftige Ausrichtung der einzelnen Module am Turm ist nicht absehbar. Es ist eine vertikale Neigung sowie eine Anordnung auf konvexen oder konkaven Flächen möglich. Dadurch ist frontaler Wind für die einen Module möglicherweise gleichzeitig seitlicher Wind für andere Module.

Aus diesem Grund wird keine Referenz des im numerischen Modell aufgeprägten Wind auf die globale Situation am Turm gegeben. Das Modell soll möglichst allgemein bleiben und nicht von der Turmgeometrie oder der Receiveraufhängung abhängen.

Diese Problematik ist nicht relevant, da lediglich ein Seitenwind betrachtet werden wird. Ein erster Grund dafür ist, dass dieser Fall ein Verständnis für den Windeinfluss ermöglichen soll. Das Ziel dieser Arbeit bleibt, neben einer quantitativen Abschätzung der Rückführrate unter Windeinfluss auch das Verständnis dieses Vorgangs zu ermöglichen. Dazu wird ein möglichst einfacher Fall, einem mit der Windrichtung als zusätzlichem Parameter, vorgezogen.

Weitere Gründe liegen in der Modellbildung. Es ist besser ein für Seitenwind ausgelegtes numerisches Modell zu entwerfen, welches dieses Verhalten komplett abbildet, als ein Modell für viele Windrichtungen. Letzteres müsste durch die verlangte Flexibilität, Unsicherheiten oder einen deutlich erhöhten Rechenaufwand in Kauf nehmen. Ein auf Seitenwind beschränktes Modell bietet beispielsweise die Chance, den Windein- und -austritt senkrecht zur Windrichtung zu positionieren. Dies vereinfacht die Geometrie insgesamt und ist einfach numerisch umzusetzen.

Schlussendlich kann eine Abschätzung zu schrägem Seitenwind möglicherweise aus einer Überlagerung aus Ergebnissen von frontalem und seitlichem Wind erzeugt werden. Dieser Schritt

kann auch auf der Ebene eines vereinfachten Modells stattfinden und ist somit nicht Teil dieser Arbeit.

Nun soll der Bereich der zu simulierenden Windgeschwindigkeit festgelegt werden. Die erwarteten Stärken sind sowohl vom Standort als auch von der Höhe des Turmes abhängig. Für Mitteldeutschland sind bei einer Turmhöhe von 50 m die im folgenden Histogramm, Abbildung 11, aufgezeigten Werte typisch. Für Windgeschwindigkeitsbereiche ist aufgetragen, wie viele Stunden sie im Jahr 2005 auftraten. Der STJ ist 55 m hoch.

Die Kraftwerke können in Gebieten mit höherem Windaufkommen stehen. Weiterhin zeigte die Vergangenheit, dass die Türme in Zukunft tendenziell höher gebaut werden, sodass die obere Grenze höher zu wählen ist als beispielsweise  $15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , wie es das Histogramm andeutet. Gerade instationäre Rechnungen sind für hohe Geschwindigkeiten aufwändig. Gegen die Wahl einer hohen oberen Grenze der Windgeschwindigkeit spricht, dass die Heliostate ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit in die „Sturmposition“ gefahren werden um vor Schäden durch Wind geschützt zu sein. In dieser Position können so kein Licht mehr auf den Receiver fokussieren. Somit der Bereich der Windgeschwindigkeiten indirekt begrenzt. Für die Wahl einer nicht zu hohen Geschwindigkeit spricht außerdem, dass die Tendenz, beispielsweise über eine Extrapolation, im Bereich starker Winde eher entscheidend ist als der exakte Wert. So sind Verluste, die durch sich im Wind bewegende Heliostate bei starken Winden deutlich höher erwartet als die Unsicherheit einer Extrapolation. Bei den Längen der Strahlungswege kann schon eine sehr kleine Winkelabweichung dazu führen, dass die Strahlung den Receiver verfehlt. Die Heliostate können nicht immer steifer konstruiert werden ohne deutlich höhere Kosten zu verursachen. Das Heliostatenfeld nimmt heutzutage ca. 40 % der Gesamtkosten ein. Insgesamt wählt der Autor einen Bereich bis  $25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , denn die Anfälligkeit für Wind kann sehr unterschiedlich sein, denn die Flächen der Spiegel variieren von  $1 \text{ m}^2$  bis  $165 \text{ m}^2$  [BGS14]. Weiterhin kann Grenzwert für die Sturmposition oder die Steifigkeit der Heliostate mit der

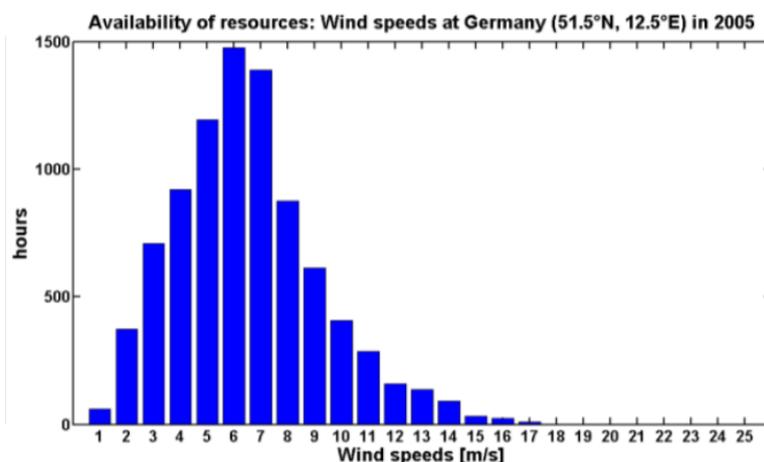


Abbildung 11: Histogramm Windgeschwindigkeiten Mitteldeutschland [GB12]

Zeit steigen. Letztlich kann nicht immer direkt von der Windgeschwindigkeit am Turm auf die Windgeschwindigkeit auf der Heliostatenebene geschlossen werden. Die Heliostate könnten so z. B. durch ihre Umgebung geschützt sein.

### **Strahlungsmodell und Festkörper**

In der Simulation wird die Wabe fein aufgelöst, denn die Wabe bildet einen Druckwiderstand, der außerdem die turbulente Strömung wieder in eine laminare Strömung überführt. Die Massenstromverteilung in der Wabe ist unbekannt. Es wird angenommen, dass sie maßgeblich durch die Druckverteilung bestimmt wird. Der Druckverlust über die Wabe ist eine Funktion der Viskosität und der Strömungsgeschwindigkeit. Mit der Temperatur sinkt die Dichte und wegen des konstanten Massenstroms, steigt die Strömungsgeschwindigkeit. Ebenso wird die Viskosität der Luft mit der Temperatur erhöht. Dadurch steigt insgesamt der Druckverlust über die Wabe. Schlussendlich beeinflusst somit die Temperaturverteilung den Massenstrom. Die Temperaturverteilung wird durch die Einstrahlung, durch die Temperaturverteilung der Luft vor dem Receiver und durch die Wärmeleitung beeinflusst. Wärmeleitung tritt innerhalb der Wabe sowie von der Wabe in den Spalt auf.

Die Strahlungsdichte der Labor-Versuche war inhomogen, deswegen wurde für die bisherigen Simulationen ein Strahlungsmodell benutzt. Auf Kraftwerksebene besteht eine beabsichtigt inhomogene Einstrahlung, welche über die Steuerung der Heliostate erzeugt wird. Die Strahlung, die auf ein kleines Modul trifft, kann dennoch als homogen angesehen werden. Somit ist der Einfluss der Strahlung nur absoluter Natur. Sie hat keinen lokalen Einfluss und ist damit für den relativen Unterschied der Druckdifferenzen der einzelnen Kanäle irrelevant. Der mit der Strahlung insgesamt steigende Druckverlust über die gesamte Wabe hat ebenfalls keinen Einfluss, da der Massenstrom durch die Wabe über eine Randbedingung fixiert ist.

Der Einfluss der Strahlung auf die Temperaturverteilung und den damit verbundenen Druckverlust über die Wabe ist deutlich höher als der Einfluss der Lufttemperatur vor der Wabe, denn die Temperaturdifferenz über die Wabe ist deutlich größer als die vor der Wabe. Letztere resultiert aus der Vermischung der Warm- und Umgebungsluft. Je nach Einstrahlungswinkel wird 80 % der Energie in den ersten 5 mm der Wabe absorbiert. Relativ schnell erwärmt sich die Luft in der Wabe durch konvektive Wärmeübertragung und -Leitung. Durch die Wärmeleitung innerhalb der Wabenstruktur entsteht ein fast homogenes Temperaturfeld am Austritt. Dennoch wird kein Festkörpermodell verwendet, damit Rechenkapazitäten gespart werden. Dadurch ist keine Wärmeübertragung innerhalb der Wabe oder in den Spalt abgebildet. Es wird davon ausgegangen, dass die Vergleichmäßigung des Temperaturprofils über die Wabe keinen Einfluss auf das  $arr$  hat. Weiterhin ist gezeigt, dass die Warmlufttemperatur kaum einen Einfluss auf die Rückführrate besitzt.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass durch den Verzicht auf ein Festkörper- sowie Strahlungsmodell viel Rechenzeit gespart wird. Lediglich die Annahme, dass die interne Wärmeübertra-

gung keinen großen Einfluss auf die Rückführrate bleibt.

### **Luft**

Die Luft wird in den Simulationen als kompressibel angesehen. Trotz Machzahlen von kleiner als 0,3 ist sie nicht dichtebeständig aufgrund der hohen Temperaturdifferenzen. Vereinfachend ist sie als ideales Gas und als trocken angenommen. Weiterhin wurde eine Funktion für eine temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität implementiert. Sie beruht auf Daten aus [Lem00].

## **4.2 Numerisches Modell**

Das Konzept des und die Annahmen zum numerischen Modell sind in Kapitel 4.1 beschrieben. Dieses Kapitel befasst sich mit den Details zum Modell. Dabei werden zu jedem Unterpunkt zunächst Grundlagen definiert und erklärt. Mit diesem Fundamentalwissen wird zum Ende der Unterkapitel, jeweils das verwendete Konzept erläutert und auf die spezifischen Details eingegangen.

Begonnen wird in Kapitel 4.2.1 mit der Basis, dem mathematischen Modell. Dieses soll auf dem Lösungsvolumen gelöst werden um so das Verhalten der Strömung zu beschreiben. Das Lösungsvolumen wird im Kapitel 4.2.2 Geometrie definiert.

Zur Lösung des Modells sind zunächst eine Diskretisierungsmethode (Kapitel 4.2.3) und ein numerisches Gitter (Kapitel 4.2.4) nötig. Dabei werden Bezeichnungen für Bereiche und Flächen eingeführt die einen eindeutigen Bezug für Erläuterungen im späteren Teil der Arbeit ermöglichen.

Nachdem die Grundlage des Rechenmodells, das Netz, beschrieben ist, widmet sich dieses Kapitel den gesetzten Randbedingungen. Sie werden in Kapitel 4.2.5 definiert. Es ist ein bedeutender Abschnitt, der nicht nur grundlegend für die Simulation, sondern dessen Verständnis auch notwendig für die Interpretation der Ergebnisse ist.

Weil nicht nur Parameter in den Rechenknoten verwendet werden, wird zusätzlich eine finite Approximation (Kapitel 4.2.6) benötigt.

Sind alle nötigen Grundlagen für ein vollständig beschriebenes System aufgezeigt, wird dieses Kapitel mit der Lösungsmethode (Kapitel 4.2.7) fortgeführt. Sie beschreibt das Vorgehen zur Lösung des Gleichungssystems, welches näherungsweise gelöst wird. Um die Beschreibung des numerischen Modells abzuschließen wird in Kapitel 4.2.9 Konvergenzkriterien beschreiben, ab wann diese Näherung ausreichend genau ist.

### 4.2.1 Mathematisches Modell

Das mathematische Modell der CFD Simulation besteht aus einem Differentialgleichungssystem, das mit Hilfe von Randbedingungen geschlossen wird.

Die Strömungsmechanik gründet auf der Annahme des Fluides als Kontinuum. Sie steht im Gegensatz zur molekulardynamischen Beschreibung von Strömungen und beschreibt mit Erhaltungssätzen das Verhalten der Strömung. Nachkommend sind die Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie gelistet. Diese Gleichungen werden im Laufe der Berechnung näherungsweise gelöst. Sie werden im allgemeinen als Navier-Stokes-Gleichungen benannt.

#### Massenerhaltung

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (11)$$

Hierbei ist  $u$  der Geschwindigkeitsvektor.

#### Impulserhaltung

Basierend auf der allgemeinen Erkenntnis nach Newton

$$\frac{dI}{dt} = m \frac{du}{dt} \quad (12)$$

ergibt sich für die Strömungsmechanik

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \cdot u^T) = -\nabla p + \nabla \cdot S + \rho f \quad (13)$$

wobei  $S$  der Tensor der Reibungsspannungen ist. Er wird unter der Annahme Newtonscher Fluide angegeben.  $f$  ist der Vektor der massenspezifischen Körperkräfte. Im Anwendungsfall entspricht dieser der Erdbeschleunigung  $g$ . Die Zähigkeit des Fluids  $\mu$  ist eine Stoffgröße, genau wie der Koeffizient der Druckzähigkeit  $\mu_d$ . Sie ist Proportionalitätskonstante für die durch Volumendilatation hervorgerufenen Normalspannungen und vernachlässigbar ( $\mu_d = 0$ ). Die Einheitsmatrix ist mit  $I$  abgekürzt.

$$S = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) + (\mu_d - \frac{2}{3}\mu)\nabla \cdot u I \quad (14)$$

#### Energieerhaltung

Die Änderung der Gesamtenergie entspricht nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik der

Summe aus zugeführter oder entzogener Leistung und Wärmestrom.

$$\frac{dE_{ges}}{dt} = \dot{W} + \dot{Q} \quad (15)$$

Sie setzt sich aus der inneren Energie, der kinetischen Energie und der potentiellen Energie zusammen.

Die drei Teile der Leistung basieren auf Körper oder Volumenkräften, hervorgerufen durch Gravitation, Druck oder Normal- und Schubspannungen. Der Wärmestrom teilt sich ebenfalls dreimal, in die Wärmeleitung, die Wärmestrahlung und die Konvektion.

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u h) + \frac{\partial p K}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u K) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \dot{q}''' \quad (16)$$

Es ist  $h$  die massenspezifische Enthalpie  $h$ ,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit,  $T$  die Temperatur und  $K = \frac{u^2}{2}$  die kinetische Energie. Der Quellterm  $\dot{q}'''$  tritt in der vorliegenden Anwendung auf. Die Energiegleichung ist in einer Form dargestellt, die die kinetische Energie  $K$  enthält, weil letztere im Algorithmus des Lösungsverfahrens auftaucht (siehe Kapitel 4.2.7).

### Zustandsgleichung

Die Zustandsgleichungen komplettieren das Gleichungssystem und balancieren die zu lösenden Variablen mit der Anzahl der Gleichungen. In der vorliegenden Simulation wird die Annahme getroffen, dass sich die Luft als ideales Gas verhält.

$$p = \rho R T \quad (17)$$

Dazu kommt die Definition der Enthalpie.

$$dh = c_p dT \quad (18)$$

Es ist anzumerken, dass die Genauigkeit der Simulation erhöht wurde, indem eine Stofffunktion, die die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärmekapazität der Luft abbildet, im Modell hinterlegt wurde.

### Turbulenzmodell

Da Turbulenzen auf sehr kleinen Skalen stattfinden und deren Auflösung sehr rechenintensiv ist, werden die Strömungsgrößen in den Navier-Stokes-Gleichungen durch die Summe aus zeitlichen Mittelwerten  $\bar{\phi}$  und ihrer Varianz  $\phi'$  ersetzt, wie beispielsweise für die Geschwindigkeit gezeigt.

$$u = \bar{u} + u' \quad (19)$$

Die Navier-Stokes-Gleichungen werden in Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen überführt. Im neuen Gleichungssystem tauchen zwei weitere Unbekannte auf. Dies wird in der Literatur als Schließungsproblem bezeichnet. Über zusätzlich eingeführte Turbulenzmodelle wird das System geschlossen.

Es gibt eine Bandbreite von verschiedenen komplexen Modellen. Als guter Kompromiss aus Genauigkeit und Rechenaufwand sind die 2-Gleichungsmodelle üblich. Gängig ist einmal das  $k - \epsilon - Modell$ , welches zwei zusätzliche Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie und die turbulente Dissipation verwendet. Stärken sind stabiles Verhalten sowie gute Abbildung der inneren Strömung.

Weiterhin oft eingesetzt ist das  $k - \omega - Modell$ , welches anstelle der turbulenten Dissipation die turbulente Frequenz aufführt. Stärken hat es in der Abbildung der wandnahen Strukturen. Das in dieser Arbeit verwendete Modell ist das *Menter -  $k - w - SST - Modell$* . Es kombiniert die Vorteile des  $k - \omega - Modells$  in den wandnahen Regionen mit denen des  $k - \epsilon - Modells$  im üblichen Lösungsraum. Es liefert für Ablösungen und Wärmeübergänge gute Ergebnisse und ist dabei robust und rechenzeiteffizient [FP08].

Die zwei Gleichungen sind folgend aufgeführt. Sie sind gekoppelt. Die erste gilt der turbulenten kinetischen Energie  $k$ . Für die Definition der Konstanten wird an dieser Stelle an [Men94] verwiesen. Anzumerken bleibt, dass für die Verwendung dieser Turbulenzgleichungen zusätzliche Randbedingungen gesetzt werden. Die Randbedingungen für  $k$  und  $\omega$ .

$$\frac{\delta(\rho k)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho u_j k)}{\delta x_j} = P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\delta}{\delta x_j} [(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\delta k}{\delta x_j}] \quad (20)$$

$$\frac{\delta(\rho \omega)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho u_j \omega)}{\delta x_j} = \frac{\gamma}{\nu_t} P - \beta^* \rho \omega^2 + \frac{\delta}{\delta x_j} [(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\delta \omega}{\delta x_j}] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\delta k}{\delta x_j} \frac{\delta \omega}{\delta x_j} \quad (21)$$

#### 4.2.2 Geometrie

Der Simulationsraum besteht aus zwei Bereichen. Zuerst ist das Modul zu nennen. Der in den Rechnungen abgebildete Absorber entspricht dem HiTeRec Receiver, welcher im Solarturm in Jülich verwendet wird. Weiterhin existiert um diesen Receiver herum ein Umgebungsvolumen. Dieses Umgebungsvolumen ist ein Quader. Zusammen sind diese beiden Elemente der Domain in Abbildung 12 zu sehen. In jeder folgenden Abbildung kann das Koordinatensystem genutzt werden um die Windrichtung zu ermitteln. Der Wind wird immer in Richtung -y wehen, in dieser Ansicht von links nach rechts. Die Gravitation wirkt in die negative z-Richtung, hier nach unten.

Schon hier ist zu sehen, dass der Receiver nicht mittig im Umgebungsvolumen platziert ist. Das Umgebungsvolumen soll so groß gewählt werden, dass die Randbedingungen an den Grenzen, die die Realität nicht absolut richtig wiedergeben, die Strömung nahe dem Receiver nicht beeinflussen. Weil die nicht wieder eingesaugte warme Luft nach dem Austreten aus dem Spalt nach oben steigt, ist das Umgebungsvolumen nach oben größer als nach unten. Analog

braucht die Strömung stromabwärts länger, bis sie sich vergleichmäßig hat, sodass eine die Wirklichkeit nicht korrekt wiedergebende Randbedingung am stromabwärts gelegenen Ende kaum noch Einfluss auf die Strömung am Receiver hat. Die Position des Receivers wurde im Laufe der Arbeit mehrmals optimiert.

Die Fläche des Umgebungsvolumen an der Receiverseite wird als Wand behandelt. Dort, wie später erläutert, wird die Haftbedingung erfüllt. Diese Wand gibt im Bezug auf den Stand der Technik den Strahlungsschutz wieder. Die anderen Ränder (oben, unten, links, rechts, vorne) des Umgebungsvolumen begrenzen die Domain zur freien Atmosphäre.

Das Modul in der Detailansicht von vorne ist in Abbildung 13 dargestellt. Zu erkennen sind jeweils die kleinen Strömungskanäle der Wabe sowie der Spalt, welcher außen um die Wabe die warme Luft einspeist.

In Abbildung 14 ist die Absorbermodulkontur als Schnittansicht dargestellt. Es ist ein fast fünf mal längerer Bereich zum Auslass hin als die Wabenlänge zu sehen. In diesem vermischt sich die im Receiver noch stark lokal unterschiedliche Luft. Für spätere Skizzen wird dieser lange Austrittsbereich nicht immer gezeichnet, damit das Wesentliche leicht erkennbar bleibt. Ein Beispiel dafür ist die Abbildung 15. Sie zeigt die gesamte Domain. Die Längenverhältnisse sind angepasst um Details der Wabe zusammen mit dem Umgebungsvolumen zu zeigen. Erkennlich sind die mit Pfeilen markierten Strömungsrichtungen, einmal die des Windes (oben), sowie die der warmen Rückföhlruft (nach rechts zeigend) und die des Receiverstroms.

### 4.2.3 Diskretisierungsmethode

Zur Lösung des mathematischen Modells über das Lösungsgebiet wird dieses diskretisiert. Dazu gibt es verschiedene Methoden. Es wird die Finite-Volumen-Methode gewählt, da sie einen guten Kompromiss aus Flexibilität für komplexe Geometrien und Genauigkeit bietet und sich deshalb gut für CFD-Anwendungen eignet. Sie ermöglicht jede Form von Gitterstruktur, ist per Definition konservativ und leicht zu verstehen, denn alle Terme haben eine physikalische

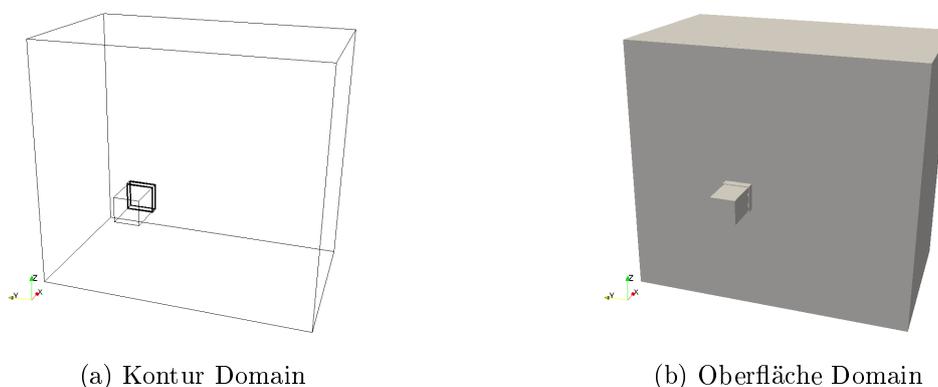


Abbildung 12: Gesamtansicht Domain

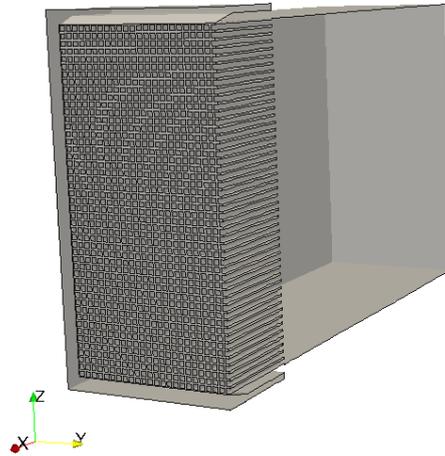


Abbildung 13: Schnitt der Receiverfrontansicht



Abbildung 14: Receiver Längsschnitt Kontur

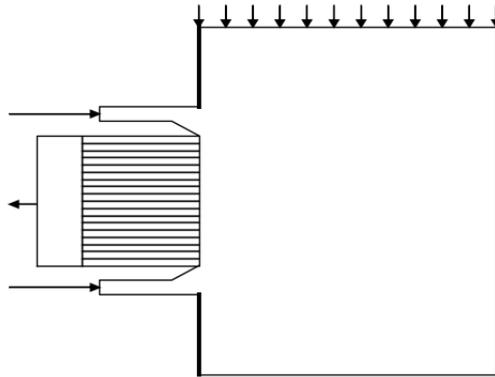


Abbildung 15: Skizze Receiver 2D

Bedeutung. Beispielsweise stellen Oberflächenintegrale die konvektiven und diffusen Flüsse dar.

Bei der Finite-Volumen-Methode wird das Lösungsgebiet in kleine Kontrollvolumina unterteilt, welche sich nicht überlappen und das Lösungsgebiet vollkommen erschließen. Die jeweiligen Rechenknoten befinden sich im Schwerpunkt der Kontrollvolumina. In diesen werden die Variablenwerte bestimmt. Zur Bestimmung der Größen an den Oberflächen wird interpoliert [Sch13].

#### 4.2.4 Numerisches Gitter

Das numerische Gitter legt die Position der Rechenknoten bzw. die Form und Lage der Kontrollvolumina fest. Eine hinreichende Qualität des Netzes ist erforderlich um verlässliche Ergebnisse zu erhalten. Das verwendete Netz ist im folgenden Kapitel beschrieben und dessen Qualität in Kapitel 4.3 untersucht.

Das verwendete Gitter ist ein Nicht-versetztes. Das heißt, alle Variablen besitzen das selbe Gitter von Kontrollvolumina bzw. Rechenknoten.

#### Konzept

Als Konzept der Netzkonstruktion wird eine Anpassung des bestehenden Netzes gewählt. Grundlage ist das bereits validierte Netz. Die sehr fein gestaltete und aufwändig erzeugte Wabe und ein kleiner Bereich an Umgebungsvolumen vor der Wabe, wird für das neue Modell genutzt. Das bestehende Netz ist in Kapitel 4.2.4 beschrieben. Da die Randbedingungen

für diesen Bereich für das neue Modell von den Alten nicht abweichen, ist dies bedenkenlos möglich. Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass das genutzte Netz weitgehend untersucht und mittels Experimenten validiert wurde.

Um diesen Netzausschnitt soll ein Umgebungsvolumen gebaut werden. Diese Idee verdeutlicht Abbildung 16. Optimalerweise ist dieses Umgebungsvolumen universal für alle Windfälle nutzbar. Entscheidend ist der Wandbereich. Bei höherer Strömungsgeschwindigkeit des Windes ist allgemein eine feinere Wandauflösung nötig.

### **Bestehendes Netz der Wabe**

Die nachstehende Reihe von Bildern zeigt das bestehende, bereits untersuchte und validierte Basisnetz. Es umfasst den Receiver sowie einen sehr kleinen Umgebungsbereich.

Als erstes ist in Abbildung 17 ein Längsschnitt des gesamten Netzes gezeigt. Interessant für die spätere Entwicklung eines Umgebungsvolumen um dieses Netz sind die Verfeinerungsstufen in dem kleinen Umgebungsvolumen. Im Bereich der Wabe ist das Modell detailliert aufgelöst. Ein vergrößerter Ausschnitt folgt in Abbildung 18. Hier werden die einzelnen Kanäle der Wabe deutlich. Außerdem ist der Spalt, der die warme Luft führt, zu sehen. Es ist ein freies Volumen zwischen dem Spalt und der Wabenstruktur zu erkennen. Dort liegen in der Realität verschlossene Wabenkanäle. Sie werden, wie schon in Kapitel 2 gezeigt, nicht durchströmt da sie von der Halterung verschlossen werden.

### **Netzadaption**

Dieses Kapitel befasst sich mit dem Netz, welches als Umgebung um das Basisnetz gelegt wird. Zunächst soll das generelle Konzept gezeigt werden, mit dem das endgültige Netz erstellt werden soll. Danach wird die erste Abschätzung der Dimensionen aufgeführt. Schließlich wird die Wahl der Stufen der Verfeinerung beleuchtet. Anschließend wird der Umgang mit der Reibungsbedingung an der Wand um den Receiver erklärt und zuletzt das resultierende Wandprofil auf zwei verschiedenen Netzen mit unterschiedlichen Umgängen mit dem Wandbereich untersucht.

### **Grobe Abschätzung**

Damit das Fernfeld an den Domaingrenzen die Strömung vor der Wabe nicht beeinflusst müssen diese weit entfernt sein. Die erste Abschätzung der Distanzen zu den Rändern der Domain wurde auf Basis der bisherigen Untersuchungen ohne Wind getätigt. Die im Stand der Forschung (siehe Kapitel 3.3) beschriebenen Ergebnisse zeigen die hoch turbulenten Bereiche. Der für die Rückführrate einflussreiche Bereich ist dadurch abschätzbar. Um die Beeinflussung durch zu nahe Grenzen auszuschließen, wurde zunächst mit einem deutlich zu großem

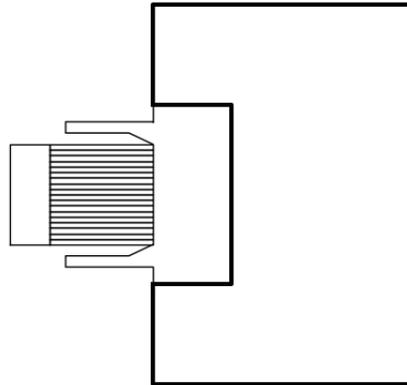


Abbildung 16: Konzept Netzerstellung

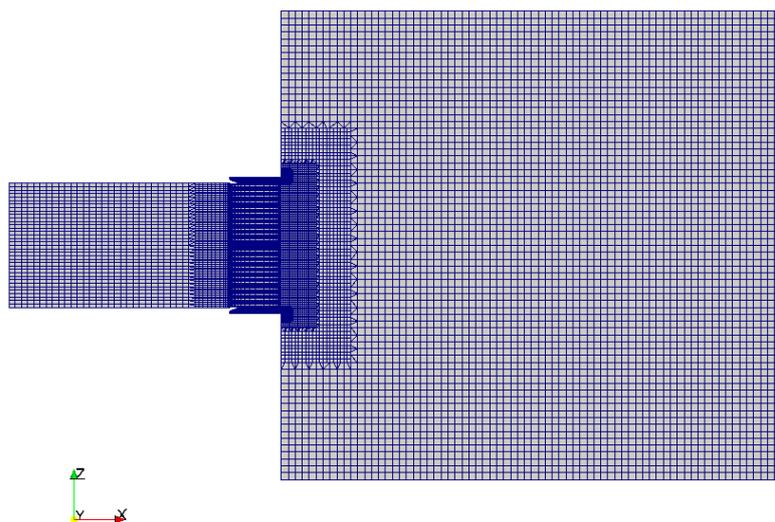


Abbildung 17: Basisnetz Querschnitt gesamt

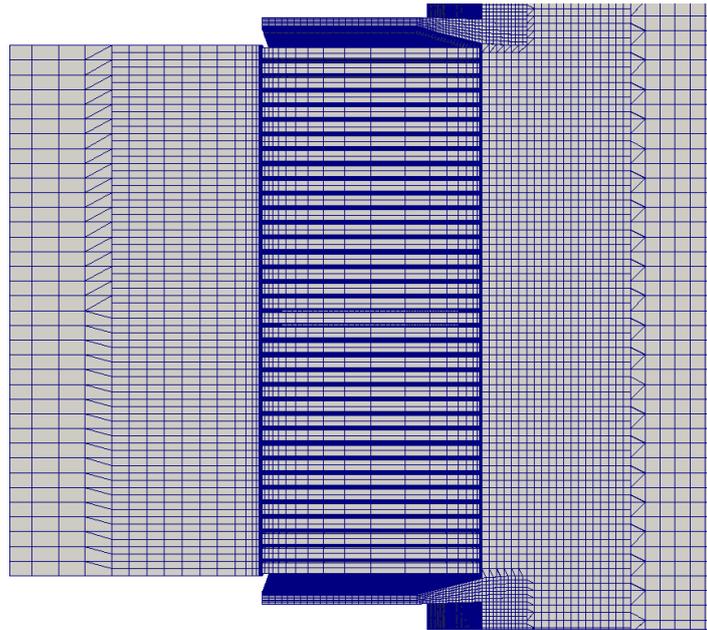


Abbildung 18: Basisnetz Querschnitt detail

Netz eine Untersuchung durchgeführt. Der für das *arr* einflussreiche Bereich wurde untersucht, beispielsweise über die maximale Entfernung der Warmluft von der Wabe. Basierend auf den Ergebnissen, kann beurteilt werden inwiefern die Grenzen der Domain näher an den Receiver gesetzt werden können ohne sein Verhalten zu beeinflussen.

Die zur Abschätzung der Domaingröße dienende Simulation wurde mit schwachem Wind von  $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  durchgeführt, weil dieser die warme Luft aus dem Spalt sicher langsamer und weniger beeinflusst als ein sehr starker Wind. Die warme Luft wird langsamer in Windrichtung umgelenkt, sodass ein größerer Bereich der Domain mit warmer Luft in Berührung kommt. So stellt der schwache Wind einen guten Grenzfall für die Domainabmaße dar. Der entscheidende Bereich stärkerer Winde ist kleiner und damit weiter von den Domaingrenzen entfernt. Diese Simulation muss nicht weit konvergiert sein, da sie nur zur groben Abschätzung dient.

Der iterative Prozess führte auf die endgültigen Maße des Umgebungsvolumen von  $7/L \times 11,6/L \times 10,7/L$  ( $X \times Y \times Z$ ), wobei  $L$  die Wabenkantenlänge ist.

Ein erstes Ziel war es, die Zellenanzahl so klein wie möglich zu halten. Erneut basierend auf dem bestehenden Know-how zu den durchgeführten Receiversimulationen ohne Windeinfluss wurde schon zu diesem Stadium ein Wunschwert von weniger als fünf Millionen Zellen definiert. Ob dies erreicht werden kann, zeigt die später durchgeführte Netzunabhängigkeitsstudie.

### Stufen der Verfeinerung

Um Rechenzeit zu sparen ist die Auflösung des Umgebungsvolumen nahe der Wabe höher als am Rand der Domain, wo die Strömung keinen Einfluss mehr auf die vor der Wabe hat. Es wird eine stufenweise Verfeinerungen gewählt werden. Somit bleibt ein bedeutender Netzqualitätsparameter, das Verhältnis von kleinster Fläche zur größten (aspect ratio), für das neue

Netz bei eins. Eins ist der optimale Wert.

Die Zellgrößen werden schrittweise hin zum entscheidenden Bereich nahe der Wabe verkleinert werden. Diese Stufenweise Verfeinerung wurde schon im Basisnetz verwendet, wie in Abbildung 17 zusehen. Dazu wird von einer Stufe zur nächsten jede Zelle in alle Raumrichtungen halbiert. Wichtig ist, dass durch die Aufteilung in kleinere Zellen an dem Übergang zwischen zwei Größen eine Nichtorthogonalität entsteht. Diese Nichtorthogonalität ist in Abbildung 19 dargestellt. Sie beschreibt die Abweichung der Richtung vom Normalenvektor auf der Zelloberfläche zur Richtung der kürzesten Verbindung der Rechenknoten. Die Abbildung verdeutlicht dies in 2D. Das gleiche Netz hätte in 3D leicht veränderte Werte. Je geringer die Nichtorthogonalität desto höher die Netzqualität. Ab Werten um ca.  $70^\circ$  wird keine stabile Simulation erwartet. Erkenntlich ist auch, dass im Sinne der Nichtorthogonalität, die Zellgrößen besser halbiert als geviertelt werden. Dies wurde im neuen Netz konsequent umgesetzt. Das erzeugte Umgebungsvolumen hat einen Maximalwert von  $25,3^\circ$  sowie einen Durchschnittswert von  $5,1^\circ$ , was hinreichend klein ist.

Die nächste Beschränkung für das Umgebungsvolumen ist, dass die maximale Zellgröße nicht größer als 50 mm sein soll. Da die Zellgrößen am Ansatzpunkt des Umgebungsvolumen an das Basisnetz gegeben sind, und die maximale Zellgröße ein Vielfaches dieser sein muss, ist die maximale Zellgröße zu 44,8 mm gegeben. Damit steht auch die Anzahl der Verfeinerungsstufen von 44,8 mm auf den Ansatzpunkt mit 5,6 mm mit drei fest.

Als letztes ist die Position der Grenzen der Stufen bzw. die Größe der feinen Bereiche zu wählen. Zunächst sollte die Zellenanzahl möglichst klein bleiben. Dies hat einzig und allein den Hintergrund kürzerer Rechenzeiten. Für das angewandte Vernetzungskonzept, welches auf ebendieser stufenweisen Verfeinerung basiert, ist dies differenziert zu betrachten.

Jeder Sprung zwischen den verschiedenen Kantenlängen bzw. Auflösungen stellt numerische Probleme dar. An der Grenze von kleineren zu größeren Volumen tritt numerische Diffusion auf. Folgen mehrere Sprünge kurz aufeinander, kann sich so ein Fehler fortpflanzen. Um diesen Aspekt zu verhindern, sieht der Autor zunächst immer mindestens fünf Zellen einer Größe in Strömungsrichtung vor. Um Vergleichswerte zu erlangen, wurden Simulationen mit verschiedenen schnellen Übergängen durchgeführt. Wird die Zellenanzahl zwischen den Stufen verschiedener Kantenlängen erhöht, steigt automatisch die gesamte Zellenzahl deutlich. Ergebnis dieser Untersuchung war, dass ein langsamerer Übergang zur nächsten Stufe zwar ein größeres Netz bedeutet, dieses größere Netz jedoch schneller konvergiert.

Schlussendlich wurde der Abstand gewählt, der am schnellsten konvergiert und damit trotz größerer Zellenzahl schneller die Lösung erreicht. In einem späterem Schritt wird, basierend auf diesem Netz, noch eine Netzunabhängigkeitsstudie durchgeführt, in der wiederum der hier erläuterte Abstand zwischen den Stufen beurteilt wird. Dies erfolgt in diesem Kapitel in 4.3.

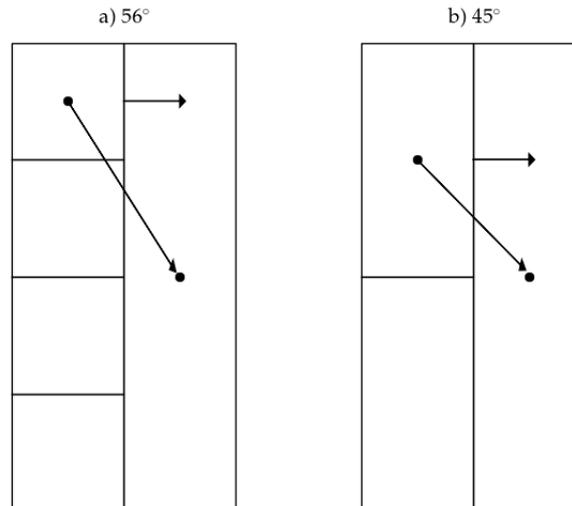


Abbildung 19: Vergleich der Nichtorthogonalität des Netzes

### Auflösung der Wandgrenzschicht

Die einzelne Wabe befindet sich im Receiver zwischen anderen Waben oder neben dem Strahlungsschutz, der den Receiver umschließt. Der Strahlungsschutz schützt den Turm vor Strahlung, die den Receiver verfehlt. Um einen möglichst allgemeinen Fall für eine bestenfalls allgemeine Aussage zu generieren, wird die Ebene um die Modulfront im Modell als Wand deklariert. Dort soll die Haftbedingung gelten. Hier wird der Umgang mit der Grenzschicht an dieser Wand erläutert.

Für eine korrekte Auflösung der Grenzschicht muss das Netz das verwendete Netz auf die Erwartete angepasst sein. Ihre Auflösung an dieser Wand ist nicht nur für die Stabilität der Rechnung, sondern auch für die Qualität des Ergebnisses entscheidend, denn es wird erwartet, dass nicht nur die Windgeschwindigkeit, sondern auch das Geschwindigkeitsprofil des Windes einen Einfluss auf das *arr* hat.

Für ihre akkurate Abbildung sind die zwei Parameter, die Anzahl der Zellen in der Grenzschicht und die Höhe der ersten Zelle, entscheidend. Zuerst wird die Anzahl der Zellen betrachtet. Dazu wird die Grenzschichthöhe abgeschätzt. Mit der Höhe kann die Auflösung nahe der Wand der gewünschten Zellenzahl angepasst werden. Je kleiner die Grenzschichthöhe desto feiner muss das Netz an dieser Stelle sein.

Die Grenzschichthöhe wird über die externe Strömung über eine ebene Platte abgeschätzt. Sie hängt von der Reynolds-Zahl ab, welche wiederum unter anderen von der Plattenlänge und der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Je länger die Wand in Strömungsrichtung ist, desto höher die Grenzschicht. Abhängig von weiteren Parametern, kann die zunächst laminare Strömung nach einer bestimmten Länge in eine turbulente Grenzschicht umschlagen.

Um die Höhe abzuschätzen muss folglich die Strahlungsschutzlänge definiert werden. Die Türme der Solarkraftwerke befinden sich noch in der Weiterentwicklungsphase. Eine allgemeine

Breite des Strahlungsschutzes existiert nicht und kann deswegen auch nicht als Referenz genutzt werden. Es wird eine Strahlungsschutzlänge von 1- 1,5 m angenommen. Die Wahl von maximal 1,5 m beruht auf der Idee, dass sie in jedem Fall kleiner als die zu erwartenden Strahlungsschutzbreiten der Zukunft ist. Die Übertragung der hier erzeugten Ergebnisse auf einen längeren Strahlungsschutz ist einfacher als auf einen kürzeren. Es ist ein Bereich gewählt, da die Strömung über die ganze Domain gut abgebildet werden soll, besonders von Eintritt des Windes bis zur Wabe. Um der Strömung einen ausreichenden Einlaufbereich zu geben und um den Rand von der Wabe zu entfernen, befindet sich der Einlass des Windes 0,5 m vor der Wabe. So entsteht der oben genannte Bereich von 1- 1,5 m. Durch den Einlass sinkt der Fernfeld Einfluss auf die Strömung vor der Wabe und das Windprofil kann sich ausbilden. Von längeren Einläufen ist aufgrund der Rechenkapazität abgesehen. Um mit dem 0,5 m langen Einlass das Profil eines 1,5 m langen abzubilden, wird ein der Wind über ein entsprechendes Strömungsprofil abgebildet.

Die Reynoldszahl für diese Form der Strömung berechnet sich über

$$Re_x = \frac{\rho c l}{\mu} \quad (22)$$

wobei  $l$  die Länge der Platte ist,  $\rho = 1,21 \frac{kg}{m^3}$  und  $\mu = 1,79 \cdot 10^{-5} Pas$  sind. Der Umschlag in eine turbulente Strömung erfolgt im Bereich um  $Re_x = 5,5 \cdot 10^5$  [Sch04].

Die Grenzschichthöhe laminarer Strömungen kann über Gleichung 23 abgeschätzt werden.

$$\delta_l = \frac{5 \cdot l}{\sqrt{Re_x}} \quad (23)$$

Für turbulente Strömungen, bei denen der Umschlag ins Turbulente schon erfolgt ist, kann sie über das 1/5 Potenzgesetz bestimmt werden [Kra03].

$$\delta_t = \frac{0,37 \cdot l}{(Re_x)^{\frac{1}{5}}} \quad (24)$$

Für verschiedene Windgeschwindigkeiten sind die Werte der Reynolds-Zahlen und Grenzschichthöhen für den Einlass (1 m) und Beginn der Wabe (1,5 m) in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Längenangaben beziehen sich auf die fiktive Strahlungsschutzlänge von 1,5 m.

Die Grenzschichthöhen der Windgeschwindigkeiten  $0,5 \frac{m}{s}$  und  $7 \frac{m}{s}$  werden zur Netzabschätzung gewählt. Der Fokus liegt somit auf dem Bereich niedriger Geschwindigkeiten bis zu den häufig auftretenden Geschwindigkeiten. Dies hat drei Gründe. Zum einen wird erwartet, dass der Gradient des *arr* über die Rückföhrtrate bei niedrigeren Geschwindigkeiten höher ist. Damit hat auch das Netz dort einen größeren Einfluss. Außerdem wird erwartet, dass für hohe Windgeschwindigkeiten das *arr* unter einen akzeptablen Wert sinkt. Für diesen inakzeptablen Bereich wird eine höhere Unsicherheit akzeptiert. Drittens ist es sinnvoll das Netz an die häufigen Windgeschwindigkeiten anzupassen und einen Fehler für die sehr selten auftretenden zu tolerieren.

Geschwindigkeit [m/s]	$Re_x(1m)$ [e5]	Grenzschichthöhe [mm]		$Re_x(1,5m)$ [e5]
		laminar	turbulent	
0,5	0,4	27,1	46,0	0,5
1	0,7	19,2	40,0	1
2	1,4	13,6	34,8	2
3	2,0	11,1	32,1	3
5	3,4	8,6	29,0	5
7	4,7	7,3	27,1	7
10	6,8	6,1	25,3	10
15	10,0	5,0	23,3	15
25	16,9	3,9	21,0	25

Tabelle 1: Grenzschichthöhen auf frei umströmter ebener Platte nach Annahme laminarer oder turbulenter Strömung bei einem Meter Länge

Der  $0,5 \frac{m}{s}$  Wind befindet sich im laminaren Bereich und seine Grenzschichthöhe liegt bei 27,2 mm. Die des als turbulent angenommenen  $7 \frac{m}{s}$  Falles ist zu 27,1 mm bestimmt. Die Grenzschichthöhen sind fast identisch. Das hat den Vorteil, dass ein Netz für beide Windgeschwindigkeiten akkurat sein kann. Es wird ein Netz für alle Geschwindigkeiten gewählt. Dies ist für den Zwischenbereich nicht absolut korrekt, da die Grenzschichthöhe für laminare und turbulente Strömungen mit der Geschwindigkeit fällt. Jedoch ist zu sehen, dass der Umschlag ins turbulente eher erfolgt, was eine größere Grenzschicht nach sich führt. Da die Grenzschicht stromabwärts anwächst, wird der Wandbereich auf eine Grenzschichthöhe von mindestens 27 mm ausgelegt. Somit ist die Grenzschichthöhe abgeschätzt und über diese kann mit der gewünschten Zellenanzahl die Auflösung bestimmt werden.

Das zweite Kriterium der guten Wandauflösung ist die erste Zellhöhe. Gut heißt in diesem Fall: möglichst genau bei wenig Rechenleistung. Für diesen Kompromiss sind Wandfunktionen optimal. Dabei wird der wandnahe Bereich über halb-empirisch ermittelte Funktionen berechnet. Die Grenzschicht besteht aus der viskosen Unterschicht, dem Übergangsbereich und dem logarithmischen Bereich. Die Geschwindigkeitsgradienten sind in der viskosen Unterschicht am größten. Um diesen Bereich aufzulösen, müsste das Netz dort sehr fein werden. Genau diesen Bereich soll die Wandfunktion überbrücken. Einen Vergleich zwischen einem Netz mit aufgelöster Grenzschicht und einem mit Wandfunktion zeigt Abbildung 20.

Das bedeutet wiederum, dass die erste Zelle die viskose Unterschicht und möglichst auch den Übergangsbereich einschließt. Um diesen Sachverhalt abzuschätzen, wird in der Simulation

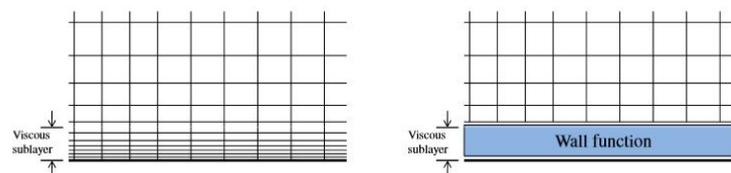


Abbildung 20: Vergleich von Netzen im wandnahe Bereich [Neb10]

oft der dimensionslose Wandabstand  $y^+$  verwendet. Der Wert lässt sich über die folgenden Gleichungen berechnen.

$$y^+ = \frac{\rho U_T \Delta y_1}{\mu} \quad (25)$$

$$U_T = \sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}} \quad (26)$$

$$\tau_\omega = \frac{1}{2} C_f \rho u^2 \quad (27)$$

Für den Anwendungsfall einer externen Strömung ist die Konstante  $C_{f, external} = 0,058 Re^{-0,2}$ . Für die Netzgenerierung ist die Zellhöhe für einen bestimmten  $y^+$  Wert interessant.

$$\Delta y_1 = \frac{y^+ \mu}{\rho U_T} \quad (28)$$

Der dimensionslose Wandabstand ist von der Strömung selber abhängig und deswegen nur nach der Simulation endgültig zu beurteilen, dennoch ist er ein erprobtes Werkzeug um Zellhöhen abzuschätzen.

In der Grenzschicht findet der Übergang zwischen der viskosen Unterschicht und dem Logarithmischen Bereich um  $y^+ = 11$  ab, denn das ist die Position an denen die Scherspannungen der beiden Bereiche identisch sind. Oft werden Wandfunktionen im Bereich von  $y^+ = 30 - 300$  genutzt [Sch13].

Da ein windunabhängiges Netz genutzt wird, muss wie bei der Grenzschichthöhe der Bereich der verschiedenen  $y^+$ -Werte abgeschätzt werden. Das Netz soll für alle untersuchten Windgeschwindigkeiten akkurat sein. In Abbildung 21 sind die Höhen der Grenzschicht und der ersten Zellen aufgetragen. Zu erkennen ist, für eine Zellhöhe von 5,6 mm ist  $11 \leq y^+ < 300$ . Werden die Zellen kleiner und damit ebenso der Wert  $y^+$ , wird die Genauigkeit nicht schlechter jedoch erhöht sich der Rechenaufwand. Werden die Zellen größer, gibt es weniger restliche Höhe in der Grenzschicht. Dies hat den Nachteil, dass trotz Wandfunktion immer noch so viele Zellen wie möglich in der Grenzschicht sein sollen, beispielsweise mindestens 10 - 20. Daraus folgt, dass die erste Zelle zu 5,6 mm Kantenlänge gewählt wird, was einen guten Kompromiss aus Akkuratessse und Rechenzeit ist und gleichzeitig die Windunabhängigkeit gewährleistet.

Das Ergebnis aus den Betrachtungen ist in Abbildung 22 dargestellt. Zu sehen ist das wandnahe Netz neben dem Verlauf der Grenzschichthöhe in Strömungsrichtung bis zum Receiverbeginn. Die Verfeinerungsstufen außerhalb der Grenzschicht erzeugen ein numerisch stabileres Verhalten der Simulation als ein direkter Übergang zu der Zellgröße im wandfernen Bereich. Wie bereits erläutert, soll ein möglichst leichter Übergang entstehen zwischen zwei Bereichen unterschiedlicher Zellvolumen. Weiterhin ist auffällig, dass die ersten wandnahen Zellen lediglich in Richtung der Normalen zur Wand geteilt sind. So entsteht die Verfeinerung an der richtigen Stelle, denn die Geschwindigkeitsgradienten normal zur Wand sind deutlich größer als parallel zur Wand. Dieses Vorgehen ist nur im sehr wandnahen Bereich genutzt, da sonst

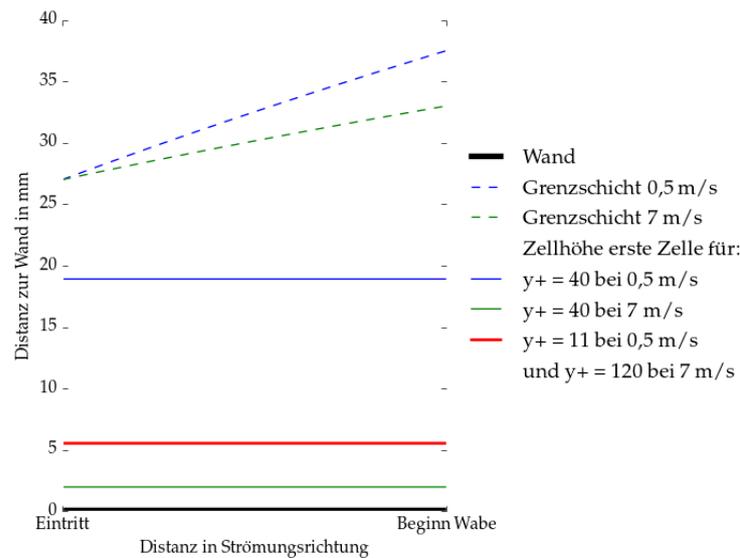


Abbildung 21: Grenzschichthöhen und Zellgrößen der ersten Zelle

die Flächenverhältnisse der einzelnen Zellen zu groß würden (aspect ratio). In dem gezeigten 2D Fall entstehen so im schlechtesten Fall Verhältnisse von  $L/D = 8$ . Im oberen Bereich ist der Anfang der größten auftretenden Zelle zu sehen. Sie besitzt eine Kantenlänge von 44,8 mm.

Einflussreich ist das Netz besonders kurz vor der Wabe. Dort ist das Netz nochmals feiner. Es besteht dort aus Würfeln mit 2,8 mm Kantenlänge, d. h. die Hälfte der ersten Zelle des weiter entfernten Bereichs. Ganz nah an der Wabe, z.B. am Spalt, wird das Netz nochmals deutlich feiner und die Kantenlänge wird auf 0,7 mm reduziert. So wird der entscheidende Bereich nicht durch eine Wandfunktion verfälscht.

Wichtig ist an dieser Stelle anzumerken, dass nur dieser Bereich der Domain mit einer Wandfunktion arbeitet. Fein aufgelöste Bereiche, wie die Kanäle der Wabe, werden ohne Wandfunktion berechnet.

Schlussendlich bleibt zu konstatieren, dass es gelungen ist, ein windunabhängiges Netz zu generieren. Dieses Netz ist besonders akkurat in Bereichen, der Erwartung nach, hoher Gradienten des  $arr$  über der Windgeschwindigkeit und ebenfalls in Bereichen häufiger Windgeschwindigkeiten. Geringe Fehler sind toleriert für den Fall von ohnehin, der Erwartung nach, inakzeptablen Rückföhraten im Bereich starker Winde, welche gleichzeitig seltener auftreten. So bleibt dennoch der  $y+$  Wert für  $15 \frac{m}{s}$  bei 250, was im optimalen Bereich für die Wandfunktion bleibt. Eine kleine Unsicherheit bleibt durch die geringere Anzahl der Zellen in der Grenzschicht. Da jedoch im Bereich um die Wabe ebendiese Zahl deutlich erhöht ist, wird davon ausgegangen, dass auch für die hohen Windgeschwindigkeiten eine ausreichende Genauigkeit erzielt ist.

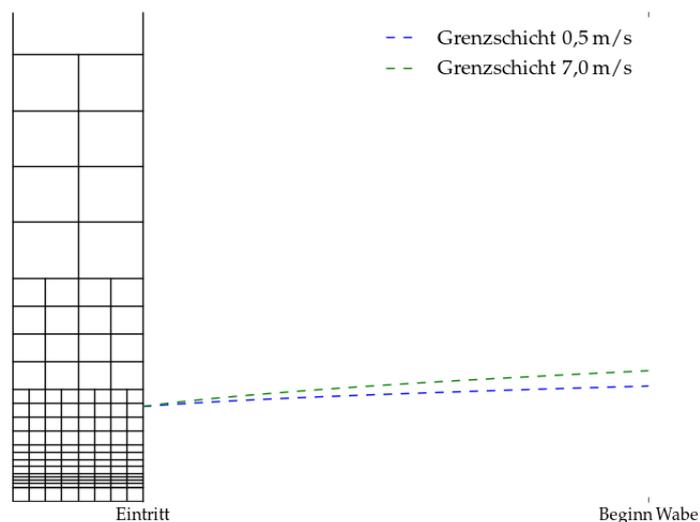


Abbildung 22: Ergebnis wandnahes Netz

#### 4.2.5 Randbedingungen

Durch die Diskretisierung über das Rechenetz entstehen kleine Kontrollvolumina, deren Variablenwerte aus den der benachbarten Zellen bestimmt werden. An den Grenzen der Domain werden Randbedingungen gesetzt um die Strömungsgrößen der angrenzenden Zellen bestimmen zu können. Jede Variable des Differentialgleichungssystem muss an allen Rändern über eine Randbedingung definiert werden, damit das System lösbar ist. Einige Größen werden nicht über Differentialgleichungen bestimmt und benötigen keine Randbedingungen. Beispielsweise die Dichte  $\rho$  wird über das ideale Gasgesetz ermittelt.

Randbedingungen können in Form von Funktionswerten und Ableitungswerten auftreten. Erst genannte sind auch als Dirichlet Randbedingung bekannt, wobei der Variable ein fester Wert zugeordnet wird. Letztere, welche Neumann Bedingung genannt werden, verbinden den Gradienten der Variable an dem Rand mit einem Wert.

Eine Randbedingung auf einer Fläche wird in OpenFOAM durch zwei Elemente klassifiziert. Zunächst ist die Grundlage definiert, die in OpenFOAM als „Basistyp“ bezeichnet werden. Zu ihnen gehört die Definition, ob ein Rand beispielsweise eine Wand, eine Symmetrieebene oder eine allgemeine Fläche ist.

Weiterhin gibt es für den Fall einer allgemeinen Fläche, auf diese Basis aufbauend, Beschränkungen. Dazu gehören die „Primitiven Typen“. Ein Beispiel ist eine feste Zuordnung eines Wertes zu einer Variablen. Außerdem können auch komplexere Randbedingungen definiert werden. Sie werden in Openfoam mit „Abgeleiteten Typen“ benannt. Ein Beispiel dafür wäre eine Bedingung für die Geschwindigkeit, welche die Geschwindigkeit so anpasst, dass ein gewählter Massenstrom auftritt. Diese komplexeren Randbedingungen setzten sich immer aus mehreren primitiven zusammen.

### Bezeichnung und Konzept der Ränder

Folgend werden die Bereiche gezeigt, an denen Randbedingungen definiert werden müssen. Sie sind die Grenzen der Domain. Die Tabelle 2 beschreibt die Lage und die Art dieser und gibt dabei die in OpenFoam verwendete Bezeichnung an. Die Art beschreibt was an den Rändern abgebildet wird. Insgesamt kann zwischen Wänden ohne Reibung, Wänden mit Reibung und feiner Auflösung sowie Wänden mit Reibung und grober Auflösung unterschieden werden. Letzteres tritt nur zweimal auf und ist in der Tabelle durch den Zusatz „(grob)“ gekennzeichnet. Außerdem gibt es Eintritts- und Austrittsflächen der Warm- und Heißluft sowie des Windes.

Weiterhin sind die Positionen der einzelnen Bereiche in Abbildung 23 und Abbildung 24 zu sehen.

Was an den einzelnen Rändern abgebildet wird, ist folgend erklärt. Zunächst wird auf den Bereich der Wabe eingegangen. Das Basisnetz ist sehr fein aufgelöst. Die Strömung in Wandnähe muss nicht durch Wandfunktionen bestimmt werden, denn die Grenzschicht ist fein genug aufgelöst.

Am Spalteinlass „inlet“ tritt ein Massenstrom mit fixer Temperatur ein. Am Receiveraustritt „outlet“ tritt der selbe Massenstrom aus.

Die Grenze „wallRA“ ist sozusagen eine Symmetrieebene. Sie wird als Wand ohne Reibung definiert. Sie liegt geometrisch in der Mitte des Spaltes von zwei nebeneinander liegenden Waben. Die Grenze „wallWedgeComb“ ist als einzige Wand mit Reibung des Wabenbereiches nicht ausreichend aufgelöst um auf Wandfunktionen zu verzichten.

Im Bereich des Umgebungsvolumens gibt es lediglich die Fläche „ambReceiver“, welche als Wand mit Reibung deklariert ist. Am Eintritt „ambLeft“ wird ein Windprofil vorgegeben. Dieser Wind tritt an „ambRight“ aus der Domain aus.

Die restlichen Bereiche, „ambTop“, „ambBottom“, und „ambFront“ bilden einen Kanal für den Wind. An diesen Flächen kann die Luft die Domain nicht verlassen. Diese Grenzen werden als geschlossen gestaltet. Sie sind nicht offen gelassen, weil es sonst zu numerischen Problemen kommt. Diese Einstellung ist zwingen nötig. Die Geschwindigkeitsrandbedingung an „ambLeft“ würde an den Kanten der Domain auf eine in keiner Weise beschränkte Strömung treffen. Die Zellen die sowohl an den Windeinlass „ambLeft“, als auch an eine oder mehrere Grenzen des Umgebungsvolumen angrenzen, können nur schwer berechnet werden. Das führt dazu, dass die Lösung deutlich wahrscheinlicher divergiert. Es wäre so kein stabiles Modell erzeugt worden. Stattdessen wird die Strömungsrichtung über eine reibungsfreie undurchlässige Grenze vorgegeben, sodass der Gradient der Strömungsgeschwindigkeit klein ist. Somit ist die Strömung auch in den kritischen und oben erwähnten Zellen ausreichend definiert.

In den nächsten Abschnitten wird die Wahl der Randbedingungen aufgezeigt.

Bezeichnung	Lage	Art
ambFront	Front des Umgebungsvolumen, gegenüber des Receivers	Wand ohne Reibung
ambReceiver	Fläche um den Receiver	Wand mit Reibung (grob)
ambLeft	Links aus sicht des Receivers	Eintritt des Windes
ambRight	Fläche stromabwärts des Receivers	Austritt des Windes
ambTop	Oberes Ende der Domain	Wand ohne Reibung
ambBottom	Unteres Ende der Domain	Wand ohne Reibung
inlet	Endes des Spaltes um die Wabe	Eintritt der Warmluft
outlet	Ende des Kelches	Austritt der Heißluft
wallRa	Äußere Wand am Spalt	Wand ohne Reibung
wallWedgeComb	Innere Wand am Spalt	Wand mit Reibung (grob)
wallKelch	Rohr welches die Wabe mit dem Outlet verbindet	Wand mit Reibung
channel	Wänder der kleinen Strömungskanäle in der Wabe	Wand mit Reibung
stegFront	Vorderseite der kleinen Strömungskanäle der Wabe	Wand mit Reibung
stegBack	Rückseite der kleinen Strömungskanäle der Wabe	Wand mit Reibung

Tabelle 2: Bezeichnungen der Ränder

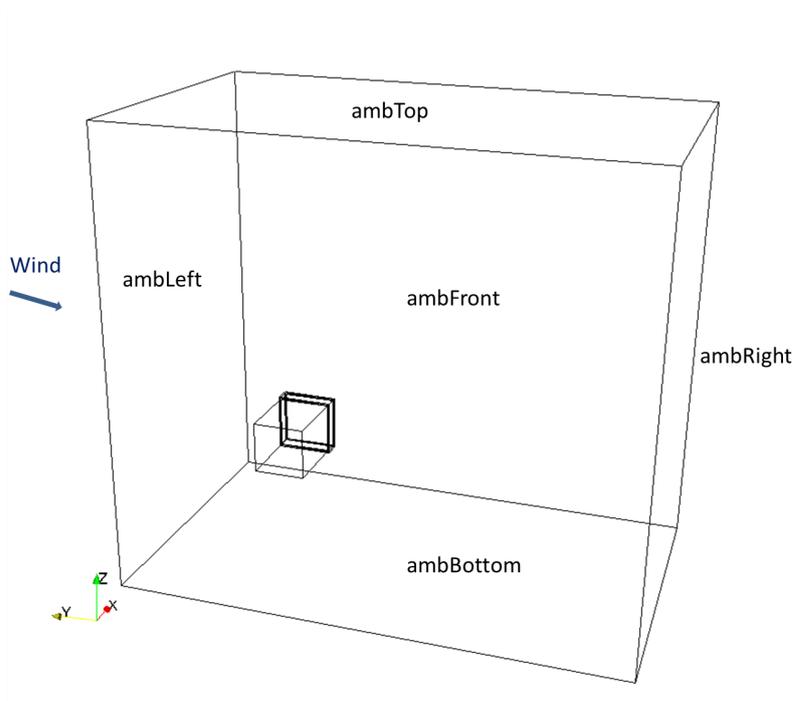


Abbildung 23: Bezeichnungen der Ränder am Umgebungsvolumen

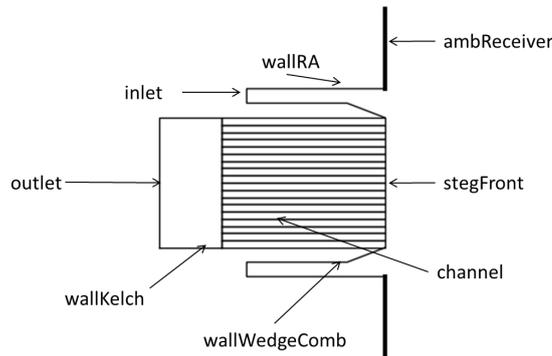


Abbildung 24: Bezeichnungen der Ränder im Wabenbereich

### Temperatur $T$

Das interne Feld ist mit einer Temperatur von  $20\text{ °C}$  initiiert. Die warme Luft strömt mit  $120\text{ °C}$  durch den Spalt um die Wabe in die Domain ein. Der eintretende Wind besitzt eine Temperatur von  $20\text{ °C}$ . Dies wird realisiert, indem an den Eintritten der Temperatur ein fixer Wert zugeordnet wird. An allen anderen Rändern ist der Gradient der Temperatur normal zur Fläche Null. An Austritten sollte die Temperatur sich nicht mehr stark ändern. Die Randbedingung sieht hier einen Gradienten normal zu den Auslässen von Null vor. An den Wänden, unabhängig von der Auflösung und der Reibung, wird ebenfalls ein Nullgradient vorgegeben. Dadurch sind alle Wände der Domain adiabat. Es gibt keine Wärmeübertragung innerhalb der Wabe oder von der Wabe in den Spalt.

### Strömungsgeschwindigkeit $u$

Das Initialfeld ist ein Nullfeld. An den Wänden mit Reibung wird die Geschwindigkeit zu Null, gesetzt. Somit wird die Haftreibungsbedingung erfüllt. An den Wänden ohne Reibung wird die Geschwindigkeit normal zur Fläche Null wobei die tangentialen Geschwindigkeitskomponenten keinen Gradienten in normalen Richtung besitzen.

Der Wind wird über ein Strömungsprofil definiert, welches einen Grenzschichtbereich und einen Bereich konstanter Strömungsgeschwindigkeit aufweist. Die Geschwindigkeit der freien Strömung wird als Windgeschwindigkeit bezeichnet. Es ist ein laminare Profil gewählt, da für den Windgeschwindigkeitsbereich von  $0,5 - 7 \frac{m}{s}$  sich Reynoldszahlen von  $Re_x = 3,38 \cdot 10^4 - 4,72 \cdot 10^5$  ergeben, welche noch in den laminaren Bereich fallen. Das laminare Profil wird über

folgenden Zusammenhang angeben.

$$u = u_{frei} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{h}{\delta}}\right) \quad (29)$$

Die freie Windgeschwindigkeit ist mit  $U_{frei}$  gekennzeichnet. Der Abstand zur Wand ist mit  $h$  gegeben. Die Grenzschichthöhe ist  $\delta$ . Sobald  $h > \delta$  wird  $u = u_{frei}$ . Einflussreich ist die Wahl der Grenzschichthöhe. Sie soll folgend diskutiert werden.

Die Grenzschichthöhe steigt mit der Länge des Strahlungsschutzes und sinkt mit der Strömungsgeschwindigkeit. Sofern eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit zum Umschlag ins Turbulente führt, kann die Grenzschichthöhe dennoch höher sein.

Ziel ist ein Modell, welches von der Länge des Strahlungsschutzes unabhängig ist. Weder der Strahlungsschutz am STJ noch an einem anderen Turm soll abgebildet werden.

Es bestehen zwei Möglichkeiten das Windprofil vorzugeben. Zum einen wird die Grenzschichthöhe für eine definierte Strahlungsschutzlänge in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit abgeschätzt. Dies wurde in Kapitel 4.2.4 gemacht um die Wandauflösung zu optimieren. Zum anderen wird eine feste Grenzschichthöhe definiert.

Der Grenzschichthöhe wird eine nicht zu vernachlässigende Bedeutung zugewiesen. Die Rückföhrtrate wird sicherlich auch von der Ausprägung der Grenzschicht abhängen. Für den Ansatz einer konstanten Strahlungsschutzlänge variiert die Grenzschichthöhe mit der Geschwindigkeit. Da so die Strahlungsschutzlänge die Rückföhrtrate wesentlich beeinflusst, wird dieser Ansatz nicht gewählt.

Stattdessen wird der Grenzschichtbereich für alle Windgeschwindigkeiten auf den konstanten Wert von 27,1 mm festgelegt. Damit ist die Simulation von der Strahlungsschutzlänge unabhängig. Weiterhin vorteilhaft ist, dass alle Änderungen dadurch rein auf die Windgeschwindigkeit zurück zu führen sind und nicht auf die durch die Windgeschwindigkeit erzeugte Grenzschichthöhe. Somit bleiben die Ergebnisse sehr allgemein und aussagekräftig.

Durch diesen Ansatz werden weitere Unsicherheiten ausgeklammert. Es ist beispielsweise unklar, wie das Strömungsprofil durch die Turmbauart beeinflusst wird. So kommt es an den Kanten des Turms zu Ablösungen und vor dem Turm zum Aufstauen der Strömung.

Würde die Grenzschichthöhe vorgegeben, basiert diese Vorgabe immer auf Annahmen ob die Strömung laminar oder turbulent ist. Der Zeitpunkt des Umschlages ist nicht genau bestimmt. Er tritt bei Reynolds-Zahlen um  $5,5 \cdot 10^5$  auf [Sch04].

Außerdem gibt es einen Übergangsbereich. Dieser Übergangsbereich würde nach den Abschätzungen aus Kapitel 4.2.4 in Tabelle 1 oft auftreten, was diesen Aspekt stärker gewichtet. Problematisch ist, dass ebendieser Umschlag von den Turbulenzmodellen generell eher ungenau abgebildet wird. Somit wären ungewisse Annahmen Basis der Abschätzung der Grenzschicht. Diese Ungewissheit soll in keinem Fall die Rückföhrtrate beeinflussen, deswegen ist es vorteilhaft, eine konstante Grenzschichthöhe zu wählen.

Es wurde die Grenzschichthöhe zu 7,1 mm gewählt, weil dieser Wert den der laminare Strömung des  $0,5 \frac{m}{s}$  Falles sowie den der turbulenten Strömung des  $7 \frac{m}{s}$  Falles wiedergibt. Diese beiden Fälle spielen erneut eine Rolle, weil sie zum einen Teil des Bereiches hoher Gradienten des  $arr$  über der Windgeschwindigkeit sind und zum anderen ist der  $7 \frac{m}{s}$  Fall ein häufig auftretender. Die berechneten Werte entsprechen noch immer, wie zuletzt in Tabelle 1 einer Strahlungsschutzlänge von einem Meter. Die theoretische Strahlungsschutzlänge für die anderen Fälle wird durch die feste Vorgabe der Grenzschichthöhe von diesem einen Meter abweichen. Der Einlaufbereich von ca. 0,5 m gewährt der Strömung noch Spielraum um den Einfluss des einzelnen Windstärken abzubilden. Außerdem ist anzumerken, dass der Geschwindigkeitsunterschied der über den Höhenunterschied in der Domain von ca. einem Meter entsteht, vernachlässigt wird. Nach Passieren der Wabe verlässt die Strömung die Domain ohne Gradient in Normalenrichtung.

Ein weiterer Teil der Geschwindigkeitsrandbedingung ist die Realisierung des Massenstromes über den Spalt und durch die Wabe. Der Ein- und Auslass der Warm- bzw. Heißluft wird über den Massenstrom eingestellt. Die Geschwindigkeitsrandbedingung gibt einen fixen Massenstrom vor. Aus dieser Vorgabe in Kombination mit der in der Zelle vorhandenen Dichte, ergibt sich die Geschwindigkeit.

In der Realität wird der Massenstrom des Receivers über ein Gebläse geregelt. Dieser Massenstrom wird über Drosselklappen auf die Teilreceiver verteilt. Die Aufteilung des Teilreceivermassenstromes auf die Module erfolgt passiv. Eine Regelung des Massenstroms einzelner ist derzeit nicht umgesetzt.

Genau diese Regelung am einzelnen Modul wird in der Simulation zwangsweise eingeführt, denn es gibt nur das eine Modul. Es besteht keine Möglichkeit einen verringerten Massenstrom des einen Moduls durch einen Erhöhten des anderen Moduls auszugleichen.

Es könnte sein, dass bei extremen Winden am realen Turm die Strömungsrichtung in der Wabe umgekehrt würde. Der Wind saugt sozusagen Luft aus der Wabe heraus. Das Gebläse würde diesen verminderten Massenstrom versuchen auszugleichen. Da dadurch nur der Massenstrom über die Teilreceiver geändert wird, kann es dennoch sein, dass einzelne Module nicht durch alle Waben einsaugen und dieses Defizit über den Teilreceiver durch andere Module ausgeglichen wird. Solche potentiellen Phänomene werden durch die angewandten Randbedingungen unterdrückt.

Eine weitere Abweichung des Modells zur Realität, die durch die Wahl eines fixen Massenstroms herrührt, liegt in der Dynamik des Gebläses. Die Regelung des Gebläses muss die Trägheit des gesamten Primärkreislaufes der Warm- und Heißluft berücksichtigen. Eine Erhöhung der Einstrahlung sollte, aufgrund der konstant gehaltenen Austrittstemperatur der Wabe, einen gesteigerten Massenstrom nach sich ziehen. In dem Modell ist sozusagen ein ideales Gebläse abgebildet, welches den Massenstrom immer zeitgleich zur Veränderung anpasst.

Auch dieser Unterschied ist unbedenklich, da instationäre Phänomene wie Wolkendurchzüge nicht simuliert werden und da für konstante Bedingungen am Solarturm der Massenstrom am einzelnen Modul konstant bleibt. Zuletzt verteilt sich der Massenstrom der Warmluft homogen über den Spalt. Es wird erwartet, dass dies auch in der Realität so vorzufinden ist.

### **Druck $p_{rgh}$**

Die Domain wird mit einem gleichmäßigen Druck von 1,01325 bar initiiert.

Als Grenze für den Auslass des Windes „ambRight“ wird ein Totaldruck von ebenso 1,01325 bar vorgegeben. Alle anderen Ränder passen den Druck automatisch nach dem Massenstrom an. Das heißt, an den Eintrittten sowie dem Austritt der Heißluft wird der Druckgradient so eingestellt, dass die Geschwindigkeitsrandbedingung erfüllt ist. Mathematisch ist es wie folgt umgesetzt.

$$\nabla(p) = \frac{\phi_{H/A} - \phi}{|Sf|D_p} \quad (30)$$

Hierbei ist  $p$  das Druckfeld,  $\phi = \rho u$  die Stromdichte,  $\phi_{H/A}$  die vorhergesagte Stromdichte,  $|Sf|$  die Fläche des Randes und  $D_p$  die Diffusität des Druckes. An Wänden, sprich den Flächen ohne Massenstrom durch diese, besitzt der Druck somit keinen Gradienten normal zur Fläche.

### **Turbulente kinetische Energie $k$**

Auch diese Größe wird uniform initiiert. An Wänden ohne Reibung, an Auslassen sowie am Einlass der Warmluft ist der Gradient normal zur Fläche Null. Der Eintritt des Windes besitzt ebenso wie das Startfeld einen konstanten Wert.

An Wänden mit Haftbedingung und grober Auflösung wird eine Wandfunktion verwendet. Die Wandfunktion setzt in diesem Fall für  $k$  einen Nullgradienten.

An Wänden mit Reibung und feiner Auflösung wird die turbulente kinetische Energie zu fast Null gesetzt. An diesen Flächen sollte sie exakt Null sein, jedoch verhält sich das Modell numerisch stabiler, sobald dieser Wert nur näherungsweise Null ist, zum Beispiel  $10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$ .

Alle Simulationen werden mit kleinen Werten für das Initialfeld und die Eintrittswerte der Turbulenz durchgeführt. Diese Werte lassen sich über die Turbulenzintensität abschätzen. Diese Abschätzung wird aus folgenden Gründen nicht durchgeführt.

Beispielsweise wird sie über die Turmhöhe beeinflusst. Die Aussage der Ergebnisse soll jedoch unabhängig von einer bestimmten Solarturmhöhe gelten. Zusätzlich sind Wetterphänomene Einflüsse auf die Turbulenz im Wind die nicht berücksichtigt werden sollen. Weiterhin ist sie durch Staupunkte und Ablösungen am Turm selber stark beeinflusst. Die Umströmung des STJ wurde bereits simuliert. Die Ergebnisse werden dennoch nicht für die in dieser Arbeit angestellten Untersuchungen verwendet, da die Simulation vom STJ unabhängig bleiben soll. Zusätzlich ergaben die ersten Tests, dass sich das Simulationssystem deutlich besser verhält sobald eine geringe Turbulenz am Wind-Eintritt vorgegeben wird.

Zuletzt und entscheidenderweise zeigen die bestehenden Ergebnisse, dass die Turbulenz, die

vor dem Receiver auftritt, um ein Vielfaches höher ist als die an den Eintritten der Domain. Deswegen wird die Bedeutung der Eintrittsturbulenz als gering eingeschätzt. Die turbulente kinetische Energie  $k$  steigt nahe der Wabe auf ca.  $6 \text{ m}^2 \text{ s}^2$ . Somit liegt ein Faktor von 1000 zwischen dem Eintrittswert und dem von der Wabe erzeugten.

### Charakteristische turbulente Frequenz $\omega$

Diese Variable wird analog zur turbulenten kinetischen Energie behandelt. Sie besitzt die selben Randbedingungen. Auch hier wird eine Wandfunktion genutzt. Sie berechnet die Frequenz über die charakteristische Frequenz der viskosen Unterschicht  $\omega_{vis}$  und der des logarithmischen Bereichs  $\omega_{log}$ .

$$\omega = \sqrt{(\omega_{vis}^2 + \omega_{log}^2)} \quad (31)$$

Nachdem die Randbedingungen beschrieben sind, wird nun mit der finiten Approximation fortgefahren.

#### 4.2.6 Finite Approximation

Die Finiten-Volumen-Methode verlangt Methoden für die Approximation der Flächen- und Volumenintegrale, der Gradienten und der Interpolation zwischen den einzelnen Rechenknoten. Die verwendeten Methoden sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Methoden bestimmen mit welchen anderen Knoten, ein Wert eines Knotens bestimmt wird. Dazu werden immer Interpolationsschema angegeben. Sie beschreiben wie Werte von Oberflächen bestimmt werden. Damit beeinflusst diese Wahl die Stabilität der Simulation und den Diskretisierungsfehler. Bezogen werden die Schema auf die Operanten auf eine Fiktive Größe  $\phi$ . Aufgeführt sind die Bezeichnungen aus OpenFOAM.

Zunächst soll auf die stationäre Simulation eingegangen werden. Sie benötigt keine zeitliche Diskretisierung. Für die Operanten wird jeweils das Gauß-Schema verwendet, welches auf dem Gaußschen Integralsatz beruht. Dieses Schema benötigt Werte an Zellflächen auf Basis von Zellknoten. Dazu wird jeweils das verwendete Interpolationsschema angegeben. Es ist das Gauß-Schema gewählt, weil es 2. Ordnung ist. Methoden zweiter Ordnung sind ein guter Kompromiss aus Genauigkeit der Approximation und Recheneffizienz. Außerdem sind sie stabil und damit einfach zu implementieren.

Als Interpolationsschema wird fast ausschließlich lineare Interpolation verwendet. Sie ist einfach und zeigt neben einem stabilen Verhalten einen ausreichend kleinen Abbruchfehler. Die Divergenz weicht vom linearen Interpolationsschema ab. Dort wird die Aufwind-Methode genutzt. Sie ist gewählt, da sich der Fluss leichter aus dem Aufwind, sprich den stromaufwärts gelegenen Knoten berechnen lässt. Dabei wird „Gauss linearUpwind“ für die alle Größen verwendet außer die Turbulenzgrößen  $k$  und  $\omega$ . Sie werden über „Gauss upwind“ angenähert.

Operant	stationär	instationär
zeitl. Diskretisierung $\frac{\delta}{\delta t}$	steady state	backward
Gradient $\nabla\phi$	Gauss linear 1	cellLimited Gauss linear 1
Divergenz $\nabla \cdot \phi$	Gauss linearUpwind / upwind	bounded Gauss linearUpwind grad( $\phi$ ) / upwind
Laplace $\nabla^2 \cdot \phi$	Gauss linear corrected	Gauss linear corrected
Interpolation zwischen Rechenknoten	linear	linear
Bestimmung des Normalen - Gradienten an Oberflächen	corrected	corrected

Tabelle 3: Methoden der Finiten Approximation

Der Laplace Operator  $\nabla^2 \cdot \phi$  wird über das „Gauss linear corrected“ Schema bestimmt. Ist „corrected“ beigefügt, weist dies immer auf eine Anpassung an die Nichtorthogonalität hin. So wird in einer angegebenen Anzahl von Iterationen dieser Fehler berichtigt.

Die Interpolation zwischen den Rechenknoten erfolgt linear. Im Lösungsraum wird die Nichtorthogonalität immer berücksichtigt.

Die instationäre Simulation unterscheidet sich teilweise vom oben Beschriebenen. Zunächst ist eine zeitliche Diskretisierung nötig. Es wurde das „backward“ Schema verwendet. Es ist zweiter Ordnung und implizit. Implizit heißt an dieser Stelle, dass zur Berechnung des nächsten Zeitschritts Werte aus dem letzten und dem zu Berechnenden genutzt werden. Es ist ein einfaches stabiles Schema, deswegen ist es gut für die Anwendung geeignet. In dieser Arbeit soll nicht der zeitliche Verlauf der Strömung abgebildet werden. Hauptsächlich die Mittelwerte sowie der zeitliche Verlauf der integralen Größe  $arr$  ist von Interesse.

Der Gradient und die Divergenz unterscheiden sich durch jeweils einen Zusatz. Der Zusatz „cellLimited“ verweist auf eine beschränkte Variable. Dies ist ebenfalls über den Zusatz „bounded“ realisiert. Damit ist auch die Änderung dieser Variable an einen Rahmen gebunden und kann sich nicht beliebig stark ändern. Der Grund liegt im Unterschied zur stationären Simulation. Diese ist laut Definition erhaltend, sowohl über die Domain als auch in den Zellen. Bei der instationären Simulation ist dies nicht der Fall, deswegen werden unrealistische Änderungen und Werte über die genannte Begrenzung verhindert [FP08].

#### 4.2.7 Lösungsmethode

Die Diskretisierung liefert ein Gleichungssystem mit sowohl linearen als auch nichtlinearen Gleichungen. Diese gekoppelten Gleichungen können simultan oder sequentiell gelöst werden. In der Anwendung werden sie sequentiell gelöst. Das ist recheneffizienter, da die Gleichungen komplex und nicht linear sind. Bei der sequentiellen Methode werden alle Gleichungen für alle Variablen gelöst, wobei jeweils die übrigen als bekannt angenommen werden. Das heißt, sie

werden entkoppelt (nach einander) gelöst. Die Iterationen zu einzelnen Gleichungen heißen innere Iterationen, wobei ein Zyklus über alle Variablen als äußere Iteration bezeichnet wird [FP08].

Als Solver wird „buoyantSimpleFoam“ für die stationären Simulationen und „buoyantPimpleFoam“ für die instationären genutzt. Er enthält neben den zur Applikation nötigen Elemente die in Kapitel 4.2.1 aufgeführten Gleichungen sowie die Methode zur Lösung dieses Gleichungssystems.

Der Solver verwendet den SIMPLE-Algorithmus (Semi-implicit Method for Pressure Linked Equations) respektive den PIMPLE-Algorithmus, eine Kombination aus dem SIMPLE- und dem PISO-Algorithmus (Pressure Implicit with Splitting of Operators), um die gekoppelten Gleichungen zu lösen.

Die in der Anwendung auftretenden Machzahlen liegen unter 0,3. Deswegen ist die Dichte hauptsächlich durch die Temperatur bestimmt. Das beeinflusst die Lösungsmethode insofern, als dass damit das Simple Verfahren vorteilhaft wird. Der SIMPLE Algorithmus ist Standard in der Strömungssimulation. Er basiert auf der Lösung einer Druckkorrekturgleichung, die eine Kombination aus Impuls- und Massenerhaltung ist. Sie wird auch Poisson-Gleichung für den Druck genannt und ermöglicht eine einfachere Bestimmung von diesem. Aufgrund dessen wird das verwendete Lösungsverfahren auch druckbasiert genannt. Die Druckkorrekturgleichung ist gegeben in Gleichung 32 [PS72].

$$\nabla \cdot (\nabla p) = -\nabla \cdot [\nabla \cdot (\rho u u - S) - \rho f + \frac{\delta(\rho u)}{\delta t}] \quad (32)$$

Der PISO-Algorithmus eignet sich für transiente Simulationen. Er ist in diesem Fall recheneffizienter. Die Hauptunterschiede sind, dass er keine Unterrelaxation vorsieht und die Korrektur vom Druck- und Geschwindigkeitsfeld mehrfach durchgeführt wird [Iss86].

Für die Lösung der linearisierten Gleichungen wird die algebraische Mehrgittermethode, der sogenannte „GAMG“ Solver (Generalised geometric-algebraic multi-grid) genutzt. Er ist ein allgemeiner Solver und ist besonders für die Druckgleichung gut geeignet. Er basiert auf dem Prinzip, in einem ersten Schritt eine grobe schnelle Lösung für den Parameter auf weniger Zellen zu generieren. Diese grobe Lösung wird auf ein feineres Netz übertragen und dort als Startwert für eine Iteration für einen genaueren Wert genutzt. Dieser Ablauf soll die Berechnung beschleunigen [FP08].

Um eine stabile Simulation zu ermöglichen werden Relaxationsfaktoren eingeführt. Diese Faktoren beschränken die maximale Änderung einer Variablen zum nächsten Iterationsschritt. Bei sowohl zu niedrigen als auch zu hohen Werten können sie zu Divergenz oder Schwingungen führen. Sie beruhen auf Erfahrungswerten, da eine Bestimmung von optimalen Werten schwierig ist. Sie werden auf die äußere Iteration angewendet. Die Tabelle 4 listet die verwendeten Faktoren auf. Bei dem Iterationsverfahren der instationären Strömungen werden die Gleichungen mit einem Fortschreiten in der Zeit gelöst („time marching Prinzip“). Für stationäre Strömungen wird ähnlich zur instationären Methode eine Pseudozeit eingeführt, welche fortschreitet.

Variable	stationäre	instationär
Druck	0,5	0,5
Geschwindigkeit	0,6	0,8
Turbulenzgrößen	0,8	0,7
Enthalpie	0,8	0,8

Tabelle 4: Relaxationsfaktoren

Die sich ergebenden Residuen können bei der stationären Simulation als instationäre Terme interpretiert werden [FP08].

#### 4.2.8 Simulationseinstellungen

Dieses Kapitel beschreibt die Einstellungen, die die Lösung nicht beeinflussen, sondern nur der Vollständigkeit halber aufgeführt sind. Dazu gehören die Wahl der Courant Number, die Art der Initialisierung sowie die Festlegung der maximalen Iterationsschritte.

Als nötige Bedingung für das time marching Prinzip muss die Zeitschrittweite gewählt werden. Zu große Schritte können eine falsche Lösung ergeben. Zu kleine Schritte führen zu einem hohen Rechenaufwand. In der durchgeführten Simulation wird die Zeitschrittweite automatisch angepasst. Dies geschieht über die Bedingung einer maximalen Courant Zahl. Für den  $n$ -dimensionalen Raum ist sie über

$$C = \Delta t \sum_{i=1}^n \frac{u_{x_i}}{\Delta x_i} \leq C_{max} \quad (33)$$

definiert. Angewandt auf den eindimensionalen Fall ergibt sich

$$C = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \leq C_{max} \quad (34)$$

Mit  $\Delta x$  ist die Zellgröße angegeben, mit  $\Delta t$  die Zeitschrittweite und  $u$  die Geschwindigkeit. So kann die Courant Zahl als Maß der durchquerten Zellen eines Strömungspartikels angesehen werden. Ist die Courant Zahl kleiner eins, bleibt ein fiktiv betrachteter Partikel innerhalb eines Kontrollvolumens. Dies sichert die Konvergenz der Simulation. Dennoch ist gezeigt, dass auch konvergierende Simulationen mit einer Courant Zahl größer als 1 die richtige Lösung zeigen. Erfahrungsgemäß ist die Courant Zahl zu  $C = 6$  gewählt [CFL28].

Für die meisten Simulationen ist kein angepasstes Initialfeld nötig. Es wird mit einem Nullfeld für die Geschwindigkeit gestartet. Ebenso haben alle anderen Werte innerhalb der Domain einen konstanten Wert. Ausgenommen sind natürlich Randbedingungen. Dies ist bereits in

Kapitel 4.2.5 beschrieben.

Für Windgeschwindigkeiten ab  $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und höher benötigt das Modell ein angepasstes Initialfeld, damit die Simulation nicht divergiert. Dazu wird die stationäre Lösung des  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  Falls genutzt.

Der Ablauf der Rechnung wird ebenfalls durch die Anzahl der maximalen Iterationen bestimmt. Die Nichtorthogonalität wird instationär sowie stationär durch einen Iterationsschritt ausgeglichen. Für die instationäre Simulation ist die Anzahl der inneren Schleifen des PISO-Algorithmus auf Eins gesetzt. Weiterhin ist die Anzahl der äußeren Iteration für einen Zeitschritt auf 30 begrenzt. So soll die Simulation effizient bleiben, denn es wird verhindert, dass zu viel Rechenkapazität in die Bestimmung der ersten irrelevanten Zeitschritte investiert wird. Zu späteren Zeitpunkten im periodischem Zustand sollte diese Grenze nicht mehr erreicht werden. Es ist erkannt, dass diese Grenze bei guter Initialisierung über eine stationäre Lösung nach wenigen Zeitschritten nicht mehr erreicht wird.

#### 4.2.9 Konvergenzkriterien

Abschließend müssen Konvergenzkriterien für die iterativen Methoden gesetzt werden. Dies geschieht jeweils für die inneren Iterationen, in denen die linearen Gleichungssysteme gelöst werden, sowie für die äußeren, die die nicht lineare Kopplung dieser beschreibt. Der Einfluss auf die Genauigkeit und Effizienz ist hoch. Diese Werte beruhen auf Erfahrungswerten.

Die gewählten Abbruchkriterien für die innere Iteration liegen für die stationären Simulation bei  $10^{-7}$ . Die inneren Iterationen werden ebenfalls abgebrochen sobald die relative Toleranz den Wert  $10^{-2}$  für den Druck bzw.  $10^{-3}$  für die restlichen Parameter erreicht. Sie ist der Unterschied zwischen dem initialem und dem finalen Residuum, welche vor bzw. nach der inneren Iteration auftreten.

Für die instationäre Simulation sind diese Grenzen wie üblich etwas höher. Sie liegen bei  $10^{-6}$  für die Toleranz und bei  $10^{-2}$  für die relative Toleranz jeweils bei allen Parametern.

Für die instationäre Simulation sind außerdem Abbruchkriterien für die Zeitschritte definiert. Dort ist die Grenze für die äußeren Iterationen zu  $10^{-4}$  für den Druck sowie  $10^{-6}$  für die übrigen gewählt. Für die relative Toleranz zwischen den Zeitschritten ist ein Grenzwert von Null gesetzt. Damit wird gesichert, dass die Simulation für jeden Zeitschritt voll konvergiert. Die stationären Simulationen besitzen keine einheitlichen Abbruchkriterien für die äußeren Iterationen. Sie werden manuell gestoppt.

### 4.3 Unsicherheitsabschätzung

Da die Simulation immer eine Annäherung bleibt, ist es notwendig die entstehende Abweichung zur exakten Lösung abzuschätzen. Vor dieser Abschätzung, wird die Simulation auf

ihre Plausibilität geprüft.

### 4.3.1 Plausibilitätsprüfung

Bevor die einzelnen Fehler abgeschätzt werden, muss gewährleistet sein, dass die Simulation plausibel ist. Um dies zu beurteilen, gibt es drei Kriterien, die jeweils erfüllt sein sollten. Zunächst sollten die Residuen unter einer akzeptablen Grenze liegen. Eine typischerweise angeführte Grenze ist 0,0001. Für eine exakte Lösung sind jegliche Residuen Null. Zweitens sollten die Größen von Interesse bis hin zu einer stationären Lösung konvergieren. Zuletzt sollten die Unterschiede in der Domain maximal 1 % betragen [LO13].

Die Residuen sind für den Testfall von  $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ausreichend niedrig, bei unter 0,0001, nach 8000 Iterationsschritten.

Als zweites Kriterium ist die einzige integrale Größe von Interesse, die Rückführrate. Diese pendelt sich schnell und gut auf einen stationären Wert ein. Illustriert ist dies über die Abbildung des  $arr$  über die Iterationsschritte in Abbildung 25. Der Zusammenhang für die drei Windgeschwindigkeiten  $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und  $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  aufgezeigt.

Drittens ist eine Prüfung, ob das System global konservativ ist, immer Hilfreich um Fehler zu erkennen. Die Finite-Volumen-Methode ist laut Definition konservativ, dennoch kann die Summe aller Fehler über jede Zelle zu einer globalen Unausgeglichenheit führen. Die Abweichung liegt deutlich unterhalb der Grenze von 1 %. Für die Energieerhaltung und die Massenerhaltung ist dies für die letzten 200 Iterationen zweier Simulationen in Abbildung 26 aufgeführt. Die Simulation kann als plausibel angesehen werden. Dies ist kein Kriterium für die Gültigkeit der Lösung. Folgend wird die Abweichung zur Realität abgeschätzt.

### 4.3.2 Fehlerabschätzung

Zur Abschätzung des Fehlers lässt sich dieser in drei Kategorien aufteilen.

1. Iterationsfehler: Unterschied zwischen der exakten Lösung und der iterativen Lösung der diskreten Erhaltungsgleichungen
2. Diskretisierungsfehler: Unterschied zwischen der exakten Lösung der Erhaltungsgleichungen und der exakten Lösung der diskreten Gleichungen
3. Modellfehler: Unterschied zwischen der exakten Lösung der Erhaltungsgleichungen, sprich des mathematischen Modells und der tatsächlichen Strömung (Randbedingungen, Wandfunktionen, Turbulenzmodelle, ...)

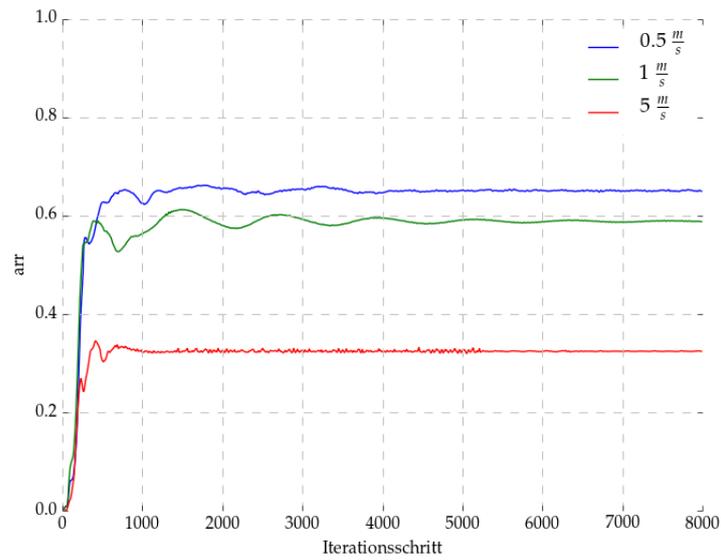


Abbildung 25: Verlauf der Rückführrate über Iterationsschritt

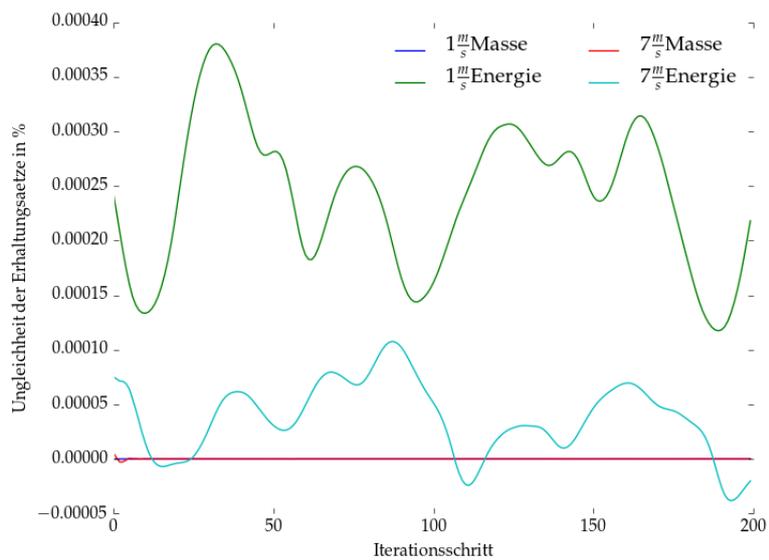


Abbildung 26: Globale Inbalance der Erhaltungssätze, letzten 200 Iterationen der stationären Simulation

Es ist sinnvoll, zunächst den Iterationsfehler zu bestimmen, wobei die Dimension dieses Fehlers mindestens um einen Grad kleiner sein sollte als die des Diskretisierungsfehlers um diesen nicht zu beeinflussen. Analog sollte auch der Diskretisierungsfehler um einen Grad kleiner sein als der Modellfehler [LO13].

Der Iterationsfehler ist in Form von Residuen direkt nach der Simulation zugänglich. Ziel ist es, eine obere Grenze von  $10^{-4}$  zu gewährleisten.

Der Diskretisierungsfehler wird mit einer Netzunabhängigkeitsstudie eingegrenzt. Diese ist folgend besprochen (Kapitel 4.3.3).

Der Modellfehler ist über die Validierung, einem Vergleich der Simulationen mit Messergebnissen, des bestehenden Modells abgeschätzt und liegt bei ca. 5 %. Der Versuch ist im Kapitel 3.3 zum Stand der Forschung beschrieben.

### 4.3.3 Netzunabhängigkeitsstudie

Mit der Netzunabhängigkeitsstudie wird der Diskretisierungsfehler abgeschätzt. Über diesen kann der Einfluss des Netzes auf die Lösung beurteilt werden. Ziel ist ein netzunabhängige Lösung zu generieren. Die Netzunabhängigkeit muss bewiesen werden, damit die Simulationsergebnisse reproduzierbar und verlässlich sind. Netzunabhängigkeit heißt in diesem Fall, dass der durch das numerische Gitter erzeugte Diskretisierungsfehler klein genug ist und er sich auch bei Netzverfeinerungen nicht stark ändert.

Zunächst wird dargelegt, auf welchen Netzen die verschiedenen Simulationen durchgeführt wurden. Danach wird die Wahl einer bestimmten Windgeschwindigkeit begründet. Die Studie wird auf eine Windgeschwindigkeit beschränkt, da die Durchführung der Studie mit allen Varianten der Randbedingungen in dem vorgegebenen zeitlichem Rahmen nicht umsetzbar ist. Zuletzt wird die Studie ausgewertet.

#### Netze

Für die Netzunabhängigkeitsstudie werden zunächst drei Netze verglichen. Ziel dieser Untersuchung ist es, ein Rechennetz zu finden, welches im akzeptablen Rahmen für den Diskretisierungsfehler bleibt und gleichzeitig am wenigsten Rechenaufwand beansprucht.

Um eine gültige Aussage zu treffen, muss genügend Varianz in der Netzgröße bestehen. Natürlich ist eine reine Verfeinerung nicht automatisch eine Verbesserung. Wichtig ist, dass die verfeinerten Bereiche einen Einfluss auf die untersuchte Größe haben. Generell ist eine globale Verfeinerung ratsam, jedoch impliziert sie, gerade bei 3D Betrachtungen, eine enorme Rechenzeitsteigerung. Das ist hier keine Option. Eine globale Verfeinerung kommt für diesen Fall weiterhin nicht in Frage, da der Kern des Netzes, die Wabe, bereits optimiert wurde und dort keine Verfeinerung sinnvoll sind.

Da die globale Verfeinerung keine Option ist, wählt der Autor Bereiche, die einen Einfluss auf die Rückführrate haben könnten. Es kommt zu lokalen Verfeinerungen. Dabei sind diese Bereiche so abgeschätzt, dass die Netze jeweils um ca. 10 % größer sind als das nächst kleinere. Das kleinste Netz hat 3,6 Millionen Zellen, das mittlere 4,0 Millionen und das größte 4,6 Millionen.

Als entscheidende Netzbereiche sind zum einen die Wabe und zum anderen der Einlauf, d. h. der Bereich stromaufwärts der Wabe, zu nennen. Da das Netz der Wabe identisch bleibt, wird der Einlauf verändert. In Abbildung 27 ist ein XY Schnitt durch das mittlere Netz zu sehen. In dieser Ansicht kommt der Wind von oben und die Gravitation wirkt senkrecht zur Bildebene. Eingezeichnet und farblich kenntlich sind die Bereiche, die jeweils unterschiedlich sind. Orange dargestellt sind, die für das kleine Netz größer als für das mittlere Netz aufgelösten, Bereiche. Die Wandauflösung beeinflusst das auf den warmen Luftstrom treffende Geschwindigkeitsprofil des Windes maßgebend und hat deswegen einen bedeutenden Einfluss. Die zuvor in Kapitel 4.2.4 erläuterte Wandauflösung ist für das kleinere Netz größer.

Das große Netz ist im Vergleich zum mittleren stromaufwärts verfeinert. Dies ist grün dargestellt. Das Geschwindigkeitsprofil des Windes ist auch durch die Auflösung außerhalb der Grenzschicht beeinflusst. Deswegen sind für den Fall des größten Netzes die Areale mit feineren Zellen stromaufwärts vergrößert.

### **Verwendete Windgeschwindigkeit**

Für die Netzunabhängigkeitsstudie wird die Windstärke im Gegensatz zur Plausibilitätsprüfung erhöht, denn das Netz soll auch bei hohen Gradienten akkurat sein. Je stärker der Seitenwind, desto stärker wird die warme Luft umgelenkt. Insgesamt werden bei höheren Windgeschwindigkeiten höhere Gradienten erwartet.

Zusammenfassend möchte der Autor für die Konvergenzstudie hohe Gradienten nutzen und gleichzeitig nicht zu weit vom Bereich schwacher Winde entfernt liegen, da diesen Ergebnissen mehr Relevanz zugeschrieben wird. Der Autor wählt  $7 \frac{m}{s}$  als Kompromiss. Dieser Wert entspricht einem häufig auftretenden Wind. Bei starken Winden wird eine größere Unsicherheit aus analogen Gründen, wie bei der Wandauflösung, toleriert.

### **Ergebnisse der Netzunabhängigkeitsstudie**

Schrittweise soll bei der Netzunabhängigkeitsstudie erst die Konvergenz auf dem Initialnetz und den anderen beiden sichergestellt werden. Anschließend wird die Abweichung der auf den verschiedenen Netzen berechneten Rückführrate zum extrapolierten Grenzwert bestimmt. Auf Basis dieser Abweichung und der jeweiligen Simulationszeit wird abschließend ein Netz ausgewählt.

Der erste Schritt dieser Studie stellt sicher, dass die betrachteten Lösungen konvergiert sind.

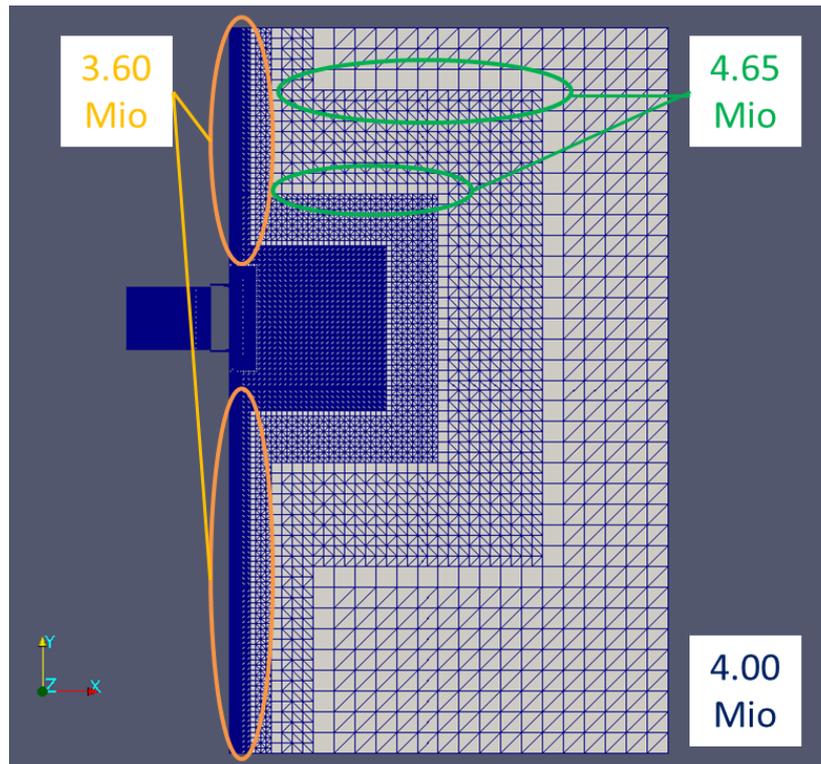


Abbildung 27: Basis Netz, makierte Bereiche zeigen die Stellen an denen Unterschiede bestehen zu den anderen Netzen

Dazu wird zunächst der Verlauf der Residuen heran gezogen (siehe Abbildung 28). Sofort ersichtlich ist, dass mit der im Vergleich zu der  $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  Simulation die instationären Phänomene stärker werden und ein weiteres konvergieren der stationären Simulation unwahrscheinlich ist. Neben den Residuen ist die Konvergenz der Rückführrate zu einem stationären Wert sicherzustellen. Die Rückführrate, als die für die konvektiven Verluste entscheidende integrale Größe, wird als Referenz für die Netzunabhängigkeitsstudie genutzt. Da sowohl die Enthalpie als auch der Massenstrom über die Eintritts- und Austrittsflächen variiert, müssen zur Bestimmung des *arr* die kalorisch gemittelten Größen verwendet werden. Der kalorisch gemittelte Enthalpiestrom wird nach Gleichung (35) bestimmt. Die tatsächliche Berechnung geschieht über das ebenfalls aufgezeigte Produkt der Enthalpie mit dem Massenstrom über die Flächen in jeder Zelle.

$$\bar{h} = \frac{\oint_A \rho u h dA}{\oint_A \rho u dA} = \frac{\sum_{\text{Zellen}} h \dot{m}}{\sum_{\text{Zellen}} \dot{m}} \quad (35)$$

Es ist erkenntlich, dass die Rückführrate, als zu untersuchende Größe, für alle Netze in einem Bereich von weniger als  $\pm 0,5\%$  um einen Durchschnittswert pendelt. Dies ist in Abbildung 29 zu sehen, in welcher die Rückführrate über die letzten 200 Iterationsschritte dargestellt ist. Es ist ein analoges Verhalten für alle drei Netz

Nachdem die Konvergenz auf allen Netzen gezeigt ist, wird im zweiten Schritt die Abweichung des *arr* der Lösungen von der Realität abgeschätzt. Dazu wird eine Funktion aufgestellt, die die Rückführrate in Abhängigkeit der Zellenanzahl wiedergibt. Eine üblicherweise verwendete

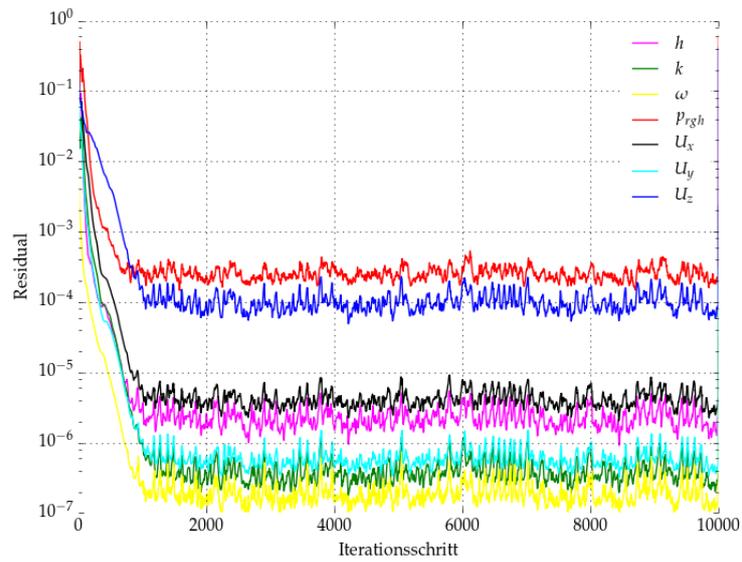


Abbildung 28: Verlauf der Residuen,  $7 \frac{m}{s}$

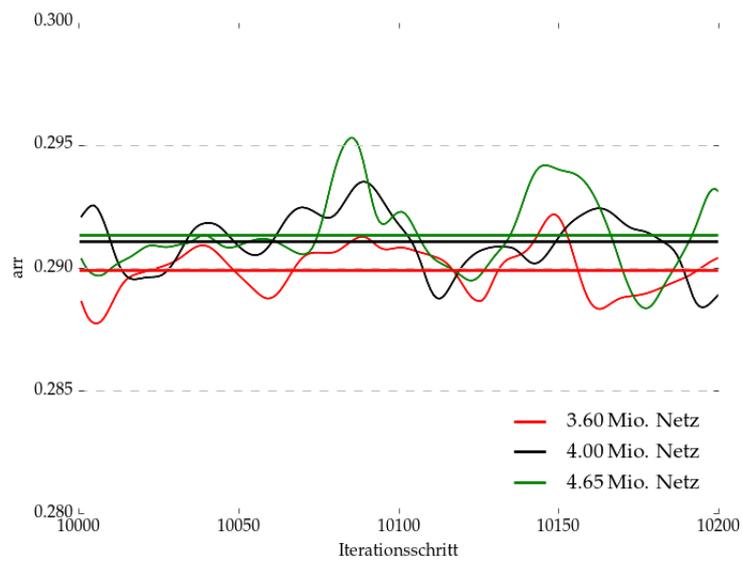


Abbildung 29: Verlauf der Rückführrate, Detailansicht der letzten 200 Iterationsschritte,  $7 \frac{m}{s}$

Funktion ist in Gleichung 36 aufgezeigt. Sie wird verwendet, weil neben der Aussage des Diskretisierungsfehlers, über die Koeffizienten eine Aussage zur Qualität der Studie gemacht werden kann [FP08].

$$arr = a + b \cdot N^{-P} \quad (36)$$

Über einen Fitting-Prozesses werden die Koeffizienten der Funktion bestimmt. Sie sind folgend aufgeführt.

$$arr = 0.291413521044 - 88490.6464098 \cdot N^{13.9751843644} \quad (37)$$

Diese Funktion ist in Abbildung 30 zusammen mit den Werten für die Netze aufgezeigt. Ebenso abgebildet ist der extrapolierte Grenzwert für die Rückführrate. Dieser Grenzwert wird als Referenz für die Abschätzung des Diskretisierungsfehlers genutzt.

Die erste Erkenntnis ist, dass die Werte stetig steigen, sodass es möglich ist die Funktion zu bilden. Weiter ist zu sehen, dass die Werte alle im Bereich der Funktion liegen, in dem der Gradient der Rückführrate über die Netzgröße gering ist. Die Netzgröße hat keinen großen Einfluss mehr. Die Abweichung zum extrapoliertem Wert ist gering, sodass wird kein feineres Netz benötigt.

Die Abweichung des berechneten  $arr$  auf den verschiedenen Netzen zum extrapolierten Grenzwert  $arr_{\infty}$  beträgt für das kleinste Netz 0.51 %, für das mittlere Netz 0.12 % und für das größte Netz 0.02 %.

Problematisch sind zwei Aspekte. Zum einen ist als Indiz für eine stabile Studie zu sehen, dass der Exponent der Funktion  $P$  kleiner oder gleich dem Grad des Diskretisierungsschemas sein sollte. Mit stabil ist gemeint, dass sichergestellt ist, dass die Ergebnisse im stetigen Bereich liegen. Das stetig monotone Steigen könnte Zufall sein und der Verlauf erst ab einer deutlichen Erhöhung der Netzknotenzahl erkennbar werden. Die Ordnung des Diskretisierungsschemas liegt bei zwei und ist geringer als  $P$ , welcher zu dreizehn bestimmt ist.

Da dieser Exponent nur als Indiz gilt, ist dieser Zusammenhang nicht umzukehren. Der Exponent ist größer, dennoch bedeutet dies erst einmal nichts. Der Autor geht nicht von dem unwahrscheinlichem Fall der zufällig passenden Anordnung der Ergebnisse aus, da der wichtigste Teil des Netzes, die Wabe an sich, unverändert blieb.

Der vermutliche Hauptgrund für den hohen Wert von  $P$ , ist das Vernachlässigen des instationären Verhaltens. Dazu wurde für die beiden größeren Netze eine instationäre Simulation durchgeführt. Der Verlauf der Rückführrate ist in Abbildung 31 gezeigt. Zusehende Überschneidungen der Funktionen sind auf das Starten und Stoppen der Simulation und der damit verbundenen Datenaufzeichnung zurück zu führen.

Transiente Simulationen benötigen ein Vielfaches der Rechenkapazität im Vergleich zu stationären Rechnungen. Zu diesem Stadium der Arbeit ist es nicht möglich auf die Ergebnisse der drei Netze von Rechnungen über eine simulierte Zeit von möglicherweise fünf Sekunden zu warten. Nach einer Simulationszeit von einigen Tagen wurden die Ergebnisse zusammengefasst.

Für das große Netz ist in Abbildung 31 zu sehen, dass das  $arr$  zuerst abfällt und dann um

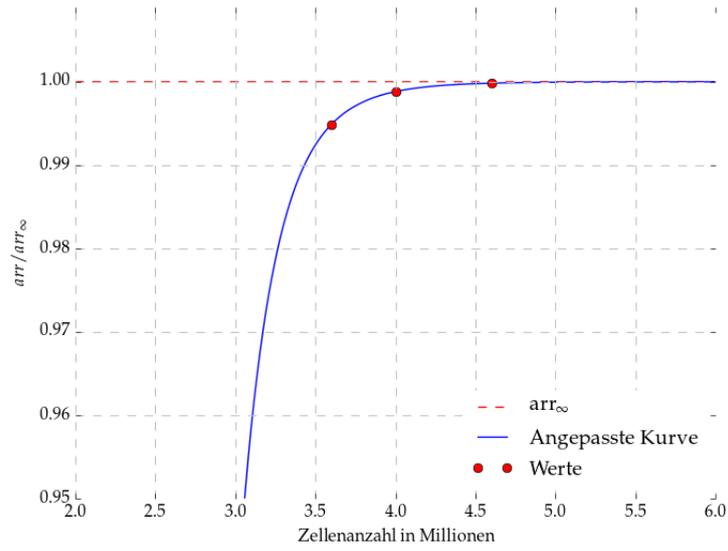


Abbildung 30: Diskretisierungsfehler,  $7 \frac{m}{s}$

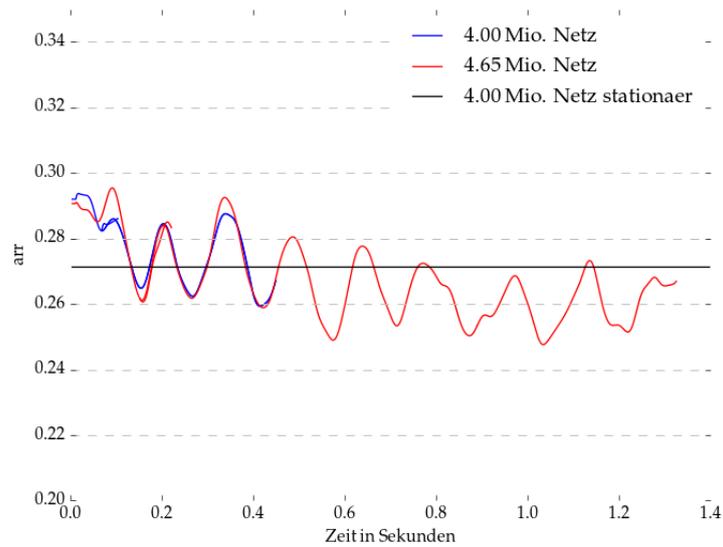


Abbildung 31: Verlauf der Rückföhrtrate bei transieter Simulation, Vergleich der Netze,  $7 \frac{m}{s}$

einen Mittelwert pendelt. Das mittlere Netz folgt diesem Verlauf. Es ist nicht länger simuliert worden, sodass unklar bleibt um welchen Mittelwert dieses Netz später pendelt. Es wird erwartet, dass die Abweichungen der beiden Mittelwerte im Rahmen der bisherigen Abweichungen der stationären Netze bleiben. Somit wird die Netzunabhängigkeitsstudie trotz hohem Wert für  $P$  als abgeschlossen angesehen. Sie wird auf der stationären Werten basieren weitergeführt.

Für die abschließende Beurteilung ist zunächst wichtig, dass mit den berechneten Abweichungen von dem extrapolierten Grenzwert alle Netze unter 1% liegen, sodass alle Netze in Frage kämen. Die Abweichung ist geringer im Vergleich zum Modellfehler, der durch die Validierung des Netzes ohne Wind bestimmt wurde und bei ca. 5% liegt.

Das größte Netz hat zwar den geringsten Fehler, dennoch ist diese kleine Verbesserung den erhöhten Rechenaufwand nicht wert. Dieser Aspekt ist auch im Rahmen mit dem deutlich höheren Modellfehler und dem nicht berücksichtigten instationären Verhalten zu sehen.

Erst einmal liegt es nahe, das kleinste Netz zu wählen. Der Unterschied zwischen dem kleinen und dem mittleren Netz ist die Wandauflösung. Für das Geschwindigkeitsprofil, welches kurz vor der Wabe auftritt, bestehen kaum Unterschiede für die beiden Netze. Dies ist jedoch nur für den Fall  $7 \frac{m}{s}$  betrachtet worden. Es wird erwartet, dass das mittlere Netz für einen breiten Bereich an Windgeschwindigkeiten besser ist. Als Negativargument bezüglich des kleineren Netzes gilt, dass das mittlere zwar größer ist, aber schneller konvergiert, sodass die Simulationszeit fast identisch ist.

Schlussendlich wird aufgrund nahezu identischer Simulationszeiten und der als besser erwarteten Ergebnisse, das mittlere Netz, anstatt des kleineren gewählt. Es erzielt schnell genaue Ergebnisse. Außerdem ist es wahrscheinlich, dass keine weiteren Anpassungen für die verschiedenen Windgeschwindigkeiten nötig sein werden. Das mittlere Netz ist flexibler.

#### 4.4 Validierung

Für die bevorstehenden Simulationen sind keine Messergebnisse vorhanden. Besonders da alle Untersuchungen nur eine einzelne Wabe betreffen, sind Werte, die beispielsweise am Solarturm in Jülich über den ganzen Receiver aufgezeichnet wurden, nur schwer übertragbar. Daher basieren die Aussagen der folgenden Simulationen auf der Validierung des Modells ohne Wind. Insgesamt kann der Fall ohne Wind gut als validierte Basis genutzt werden, da entscheidende Netzbereiche und auch viele Randbedingungen übernommen werden konnten.

Da diese Simulationen erstmals durchgeführt werden und keine Messungen zur Validierung der Windeinflüsse existieren, ist an dieser Stelle anzumerken, dass vor allem die Tendenz und Größenordnung der Ergebnisse für einen breiten Bereich an Windgeschwindigkeiten korrekt sein sollte. Weniger sind einzelne Werte von hoher Genauigkeit von Interesse.

Um einen Bezug vom Modell mit Windeinfluss zum ehemaligen ohne Windeinfluss zu erstel-

len, wird ein Fall mit schwachem Wind auf dem neuen Modell simuliert. Das Modell ist für den Windfall ausgelegt. Wird kein Wind aufgeprägt, sind vor allem die Randbedingungen an den Grenzen des Umgebungsvolumens kritisch. Die im Grenzfall keines Windes auftretenden Bewegungen sind nicht möglich. Die warme Luft kann nicht nach oben aus der Domain entweichen und es strömt ebenfalls keine Luft von unten nach. Es ist lediglich ein Massenstrom über die Seitenflächen möglich, an denen sonst der Wind ein- und austritt. Ist der Windeinfluss durch die sehr geringe Geschwindigkeit klein, so kommt es dazu, dass am eigentlichen Windaustritt Luft in die Domain eintritt. Deshalb wird die Bezugssimulation nicht ohne Wind, sondern mit schwachem Wind ausgeführt. Dies sichert ein stabiles Verhalten der Rechnung. Trotz dieser Einschränkungen liegt die integrale Größe, die Rückführrate, ausreichend nah an dem Ergebnis des validierten Modells. Sie liegt mit 64,5 % etwas über der Referenz von 63 %. Die Simulation wurde im Gegensatz zum Referenzfall stationär durchgeführt. Die Abweichung von 1 % nach oben ist eher auf diesen Umstand zurück zu führen als auf den Windeinfluss. Mit der Windgeschwindigkeit steigt die Amplitude der Periodizitäten im Residuen-Verlauf. Daher wird vermutet, dass der Einfluss der instationären Phänomene mit der Windgeschwindigkeit zu nimmt. Dieser Aspekt wird in Kapitel 5.3 detailreicher betrachtet.

Diese Simulation zeigt, dass das neue Modell nahe am validierten Modell liegt. Dadurch ist es legitim, das Neue als verlässlich anzusehen.

Das Konzept der dreidimensionalen Simulation wurde durch Annahmen und das gezielte Abschätzen der zu erwartenden Strömung in ein flexibles numerisches Modell umgesetzt. Die Ergebnisse des Modelles werden in den nächsten Kapiteln präsentiert und diskutiert.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

In den letzten Kapiteln wurden das verwendete Modell, die dafür getroffenen Ansätze und die dahinterstehende Technik vorgestellt. Hier folgen die Ergebnisse und deren Diskussion aus der Anwendung der geschilderten Methode.

Zunächst werden die berechneten Fälle sowie die dazu gehörenden Parameter im Unterkapitel 5.1 genannt. Dort wird auch auf die Bedeutung einzelner Fälle verwiesen. Danach werden schrittweise Ergebnisse angeführt. Dabei werden ausgewählte Plots dargestellt, welche das generelle Verhalten der Wabe verständlich machen. Ziel ist es, ein Verständnis von der Strömung zu bekommen. Dazu werden die Ergebnisse ausführlich beschrieben, interpretiert und bewertet.

Nachdem die Strömung und die auftretenden Phänomene gezeigt sind, befasst sich die weitere Auswertung mit der Rückführrate.

Vor den Ergebnissen wird die Darstellungsweise in Erinnerung gerufen. In dieser Arbeit weht der Wind in -y Richtung. Die Gravitation wirkt in -z Richtung. Daraus ergibt sich, dass der Wind bei XY Plots von oben kommt. In XZ Plots weht der Wind aus der Ebene heraus. In allen YZ Plots weht der Wind von rechts nach links. Die Längen in den Koordinatenrichtungen werden auf die Wabelänge bezogen. Deswegen liegt die Ausdehnung der Wabe immer zwischen 0 und 1. Kurz darauf folgt der Spalt. Zusätzlich zu diesen Angaben ist die Lage der Wabe in YZ Plots durch eine Kontur dargestellt. Die Spalten um die Wabe werden als vordere bzw. hinterer bezeichnet, sofern sie stromaufwärts bzw. -abwärts liegen. Für instationäre Ergebnisse werden stets die über die Zeit gemittelten Größen gezeigt.

Die in diesem Kapitel aufgeführten Ergebnisse beziehen sich auf ein Modul. Im nächsten Kapitel wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse zum ganzen Receiver beleuchtet. Zusammen stellt dies die Hinführung auf die Verbesserungsmaßnahmen dar.

### 5.1 Simulationsparameter und dimensionslose Kennzahlen

Die Simulationen können der Windgeschwindigkeit nach beurteilt werden. Zunächst werden die simulierten Windgeschwindigkeiten genannt. Später werden den einzelnen Fällen jeweils Reynolds-Zahlen zugeordnet.

Es wurden Simulationen zu zehn verschiedenen Windgeschwindigkeiten im Bereich von 0,1-25  $\frac{m}{s}$  durchgeführt. Welche Geschwindigkeiten gewählt wurden, ist in Tabelle 5 zu sehen.

Es wird erwartet, dass die Änderung des *arr* im Bereich schwacher Winde größer ist als im Bereich starker Winde. Daher sind mehr Simulationsergebnisse für schwache Winde nötig um den Verlauf des *arr* über die Windgeschwindigkeit genau abzubilden.

Windgeschwindigkeit [ $\frac{m}{s}$ ]	0,1	0,5	1	2	3	5	7	10	15	25
Stationär	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Instationär	×	×	✓	×	×	×	✓	×	×	×
Reynolds-Zahl [ $\cdot 1000$ ]	0,9	4,5	9	18	27	45	63	90	135	225

Tabelle 5: Simulationsparameter

Von den vielen Simulationen besitzen einige Fälle einen gesonderten Stellenwert. Der  $0,1 \frac{m}{s}$  Fall dient hauptsächlich der Validierung des Modells. Sie ist in Kapitel 4.4 beschrieben.

Der  $1 \frac{m}{s}$  Fall gibt eine gute Referenz für einen schwachen Wind. Der Wind ist langsam und deswegen gut geeignet um sich einen Vergleich zum Fall ohne Wind zu ziehen.

Der  $7 \frac{m}{s}$  Fall kann als Durchschnittsfall oder Base Case gesehen werden. Er liegt im mittleren Bereich der erwarteten Geschwindigkeiten und ist der am häufigsten auftretende Fall (vgl. Abbildung 11).

Abschließend ist der  $25 \frac{m}{s}$  Fall als Grenzfall eingeführt. Die Wahrscheinlichkeit eines Windes mit dieser Geschwindigkeit ist deutlich kleiner als beim Base Case und sie sinkt weiter mit höheren Geschwindigkeiten. Dennoch erhofft sich der Autor durch diesen Wert eine Abschätzung über das Verhalten bei starkem Wind. Möglicherweise ist ein asymptotisches Verhalten für die Rückführrate bereits erreicht.

Es sind die Fälle  $1 \frac{m}{s}$  und  $7 \frac{m}{s}$  ebenfalls instationär simuliert worden. Von der Simulation höherer Windgeschwindigkeiten wurde zunächst abgesehen, da mit der Windgeschwindigkeit die Simulationszeit steigt. Die Unterschiede der Ergebnisse zu denen der stationären Simulation sind in Kapitel 5.3 besprochen.

Für den Anwendungsfall Seitenwind ist die Reynolds-Zahl aussagekräftig. Diese wird in Kapitel 5.7 untersucht. Bekannterweise ist sie das Verhältnis der Trägheit zur Zähigkeit.

$$Re = \frac{\rho ul}{\eta} \quad (38)$$

Die dynamische Viskosität ist mit  $\eta$  abgekürzt.

Die Reynolds-Zahl soll zur Charakterisierung des Windes dienen. Zur Berechnung werden die Eigenschaften des in die Domain eintretenden Windes genutzt, sprich die freie Windgeschwindigkeit, die Umgebungstemperatur und der -druck. Für die folgenden Untersuchungen ist die charakteristische Länge zu der Wabellänge  $L$  gewählt. Die Wandlänge des Strahlungsschutzes ist nicht geeignet, obwohl sie zunächst der charakteristische Länge einer externen Strömung über eine ebene Platte ähnelt. Zum einen sollen die Ergebnisse nicht durch die Domaingröße beeinflusst werden. Zum anderen entspricht die charakteristische Länge zusammen mit der Windgeschwindigkeit einer Grenzschichthöhe. Da die Grenzschichthöhe vorgegeben wird, ändert sich die theoretische Länge der Wand um den Receiver. Das ist nicht gewünscht.

Für die verschiedenen Windfälle ergeben sich die in Tabelle 5 zusammengefassten Reynolds-

Zahlen.

Nachdem die zu simulierenden Fälle festgelegt sind, wird zuerst der Base Case im Detail besprochen. Dadurch wird ein häufiger auftretender Fall umfassend erklärt. Danach wird zunächst auf den Einfluss der Transienz und anschließend auf die Auswirkungen der Windstärke eingegangen.

## 5.2 Base Case $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Die Darstellung der Ergebnisse wird mit dem Base Case ( $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ) begonnen. Diese Referenz bietet die Basis um Tendenzen in Richtung höherer und niedriger Windgeschwindigkeiten zu erläutern.

Zunächst werden Temperaturplots gezeigt. Sie sollen den Weg der Rückföhlluft verdeutlichen. Dadurch soll eine dreidimensionale Vorstellung von der Strömung vor dem Modul vermittelt werden. Die Konturen der Temperaturplots decken genau den Bereich zwischen Warmluft und Umgebungstemperatur ab (20 - 120 °C).

Die Erläuterungen starten in der XY Ebene. In Abbildung 32 ist diese Ebene mittig der Wabe gewählt. Zu sehen ist, wie die Warmluft aus dem vorderen Spalt stark umgelenkt wird. Ein Großteil dieser Luft wird bereits in der ersten Hälfte der Wabe eingesaugt. Der übrige Teil der Warmluft tritt, durchmischt mit der Umgebungsluft, bei Temperaturen unter 330 K kurz nach der Mitte der Wabe in diese ein. Vom hinteren Spalt wird keine Warmluft zurück in die Wabe gebracht. Es bildet sich in Wandnähe ein warmer, ca. 350 K heißer Bereich aus.

In Abbildung 33 ist die Temperaturverteilung in der YZ Ebene kurz vor der Wabe abgebildet. Deutlich wird wie groß der Bereich ist, in dem ausschließlich kalte Umgebungsluft in die Wabe eintritt. Außerdem ist zu sehen, wie die Warmluft aus beiden vorderen (stromaufwärts (in dieser Darstellung rechts)) Ecken zum Teil nach außen und zum Teil zur Wabe hin, nach innen, umgelenkt wird. Der nach innen umgelenkte Teil vergrößert die Rückföhlrate. Durch den anderen entsteht ein Bereich durchmischter Luft über und unter der Wabe. Ein in dieser Abbildung vertikal liegender Schnitt erzeugt die XZ Ebene. Sie soll das Verhalten der Seiten nochmals darstellen.

In der XZ Ebene (Abbildung 34) sind zwei ovale Bereiche zu sehen. Sie zeigen den durch die parallel zum Wind liegenden Spalte erzeugten, warmen Bereich. Die Ausdehnung dieser beiden Bereiche steigt stromabwärts. Insgesamt verlagert sich die Struktur in Richtung Wabeninneren. Dies ist auch im zuvor gezeigtem Bild der YZ Ebene erkennbar. Die Krümmung des dünnen, heißen Bereichs nimmt ab. Dieser Plot zeigt wie wenig von der oben und unten an der Wabe zurück geföhlten Luft tatsächlich wieder in die Wabe eintritt.

Der letzte Temperaturplot für dieses Kapitel zeigt die Austrittsebene des Windes (Abbildung 35). Zu beachten ist, dass die Temperaturskala und die Dimensionen des Gezeigtem im Gegensatz zu vorherigen Abbildungen angepasst ist. Weit hinter dem Modul ist die Luft durchmischt und deswegen gibt es nur noch eine kleine Temperaturspanne. Formgebend ist

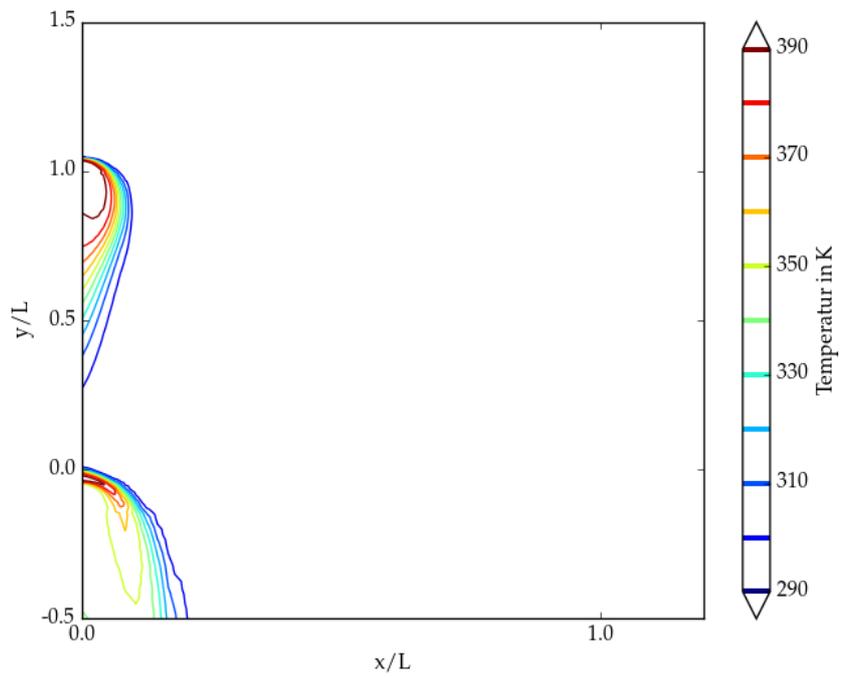


Abbildung 32: Temperaturverteilung, XY Ebene, Mitte Wabe, Base Case

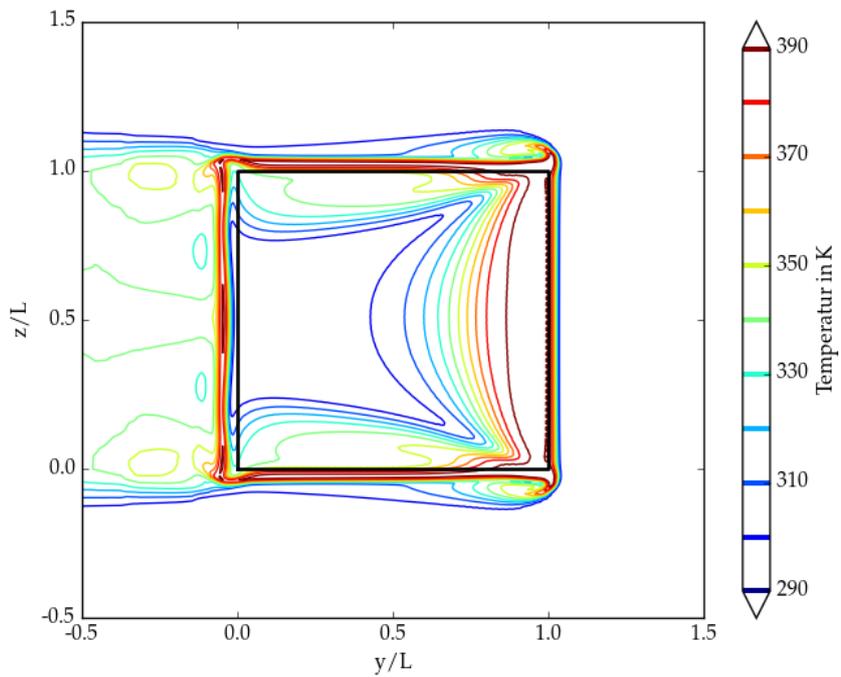


Abbildung 33: Temperaturverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe  $0,004 x/L$ , Base Case

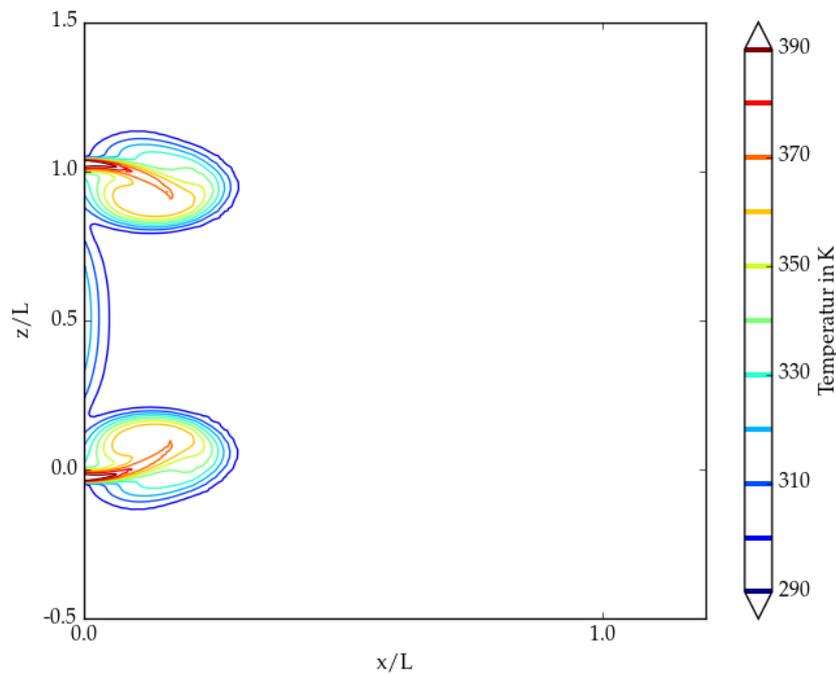


Abbildung 34: Temperaturverteilung, XZ Ebene, Mitte Wabe, Base Case

hauptsächlich der Seitenwind. Der Einfluss des Auftriebes ist durch den Versatz der Kontur nach oben, relativ zur Wabe, erkenntlich.

Als erster Geschwindigkeitsplot ist ebenfalls ein Konturplot zu sehen (Abbildung 36). Es ist die selbe YZ Ebene zu sehen wie zuvor im Temperaturplot (Abbildung 33). Die Geschwindigkeit normal zur Ebene ist dargestellt. Somit kann entnommen werden, in welchen Bereichen die Luft sich der Wabe nähert und in welchen sie sich entfernt. Trivialerweise ist die Geschwindigkeit in den Spalten am größten. Interessant ist der Bereich neben dem oberen und dem unteren Spalt. Dort ist zu sehen, wie warme Bereiche (siehe Abbildung 33) sich vom Modul entfernen. Dies sind Warmluftströme, die gewölbt über die Wabe fließen und nicht wieder in letztere eintreten. Sie sind Verlustströme.

Die folgenden Geschwindigkeitsplots zeigen die Topologie der Strömung. Beginnend ist die XY Ebene zu sehen. Gezeigt sind die normierten Geschwindigkeitsvektoren, dessen Betrag über den nebenstehenden Konturplot gegeben ist. Zu sehen ist eine sehr homogene Strömung. Die Mittelebene ist kaum von den Spalten beeinflusst.

Die Abbildung 38 zeigt die Geschwindigkeitsvektoren in der YZ Ebene. Insgesamt ist die Strömung sehr homogen. An den vorderen Ecken kommt es zu Geschwindigkeiten in zerstreute Richtungen. Innerhalb der Kontur, die das Modul repräsentiert, ist die Strömung fast homogen. Zum Ende der Wabe bewegt sich die Luft im oberen und unteren Bereich nach außen. Hinter der Wabe erinnert das Geschwindigkeitsfeld an die Umströmung eines Festkörpers.

Eine weitere wichtige Erkenntnis dieser Darstellung ist, dass der Wind über und unter der Wabe keine deutliche Kraft auf den Warmluftstrom ausübt. Es liegt keine große Geschwindig-

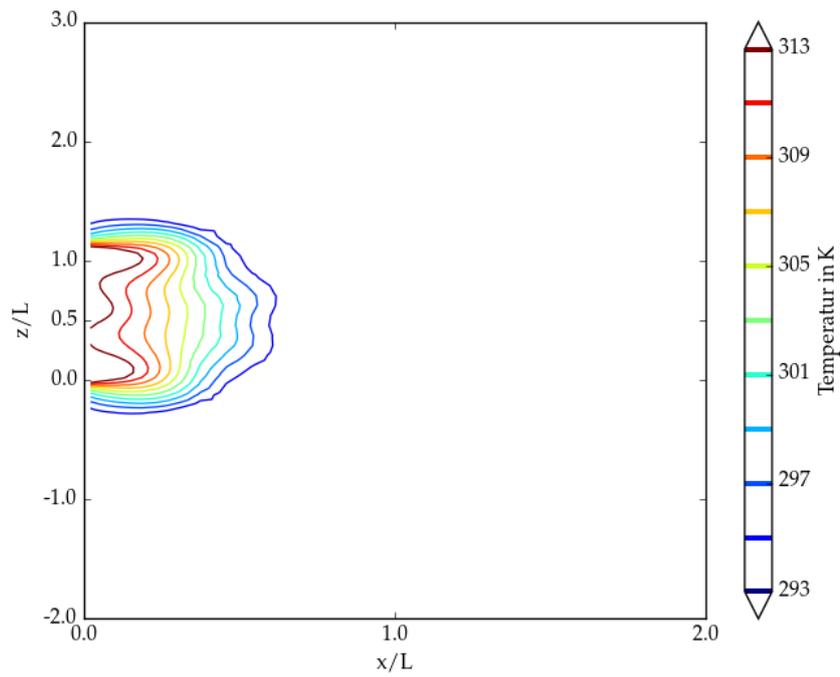


Abbildung 35: Temperaturverteilung, XZ Ebene, Austritt aus Domain, Base Case

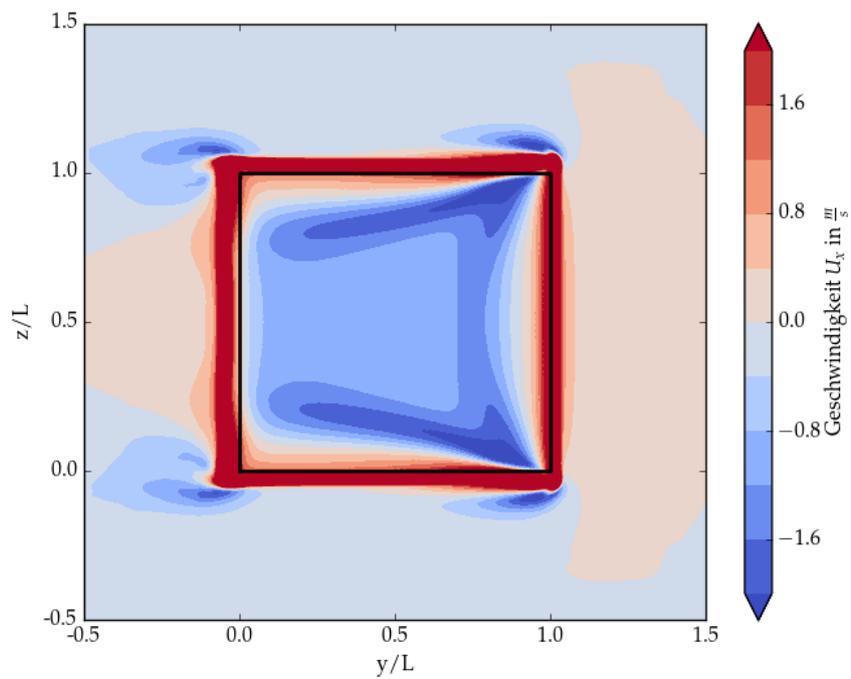


Abbildung 36: Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, YZ Ebene, Distanz zur Wabe  $0,004 x/L$ , Base Case

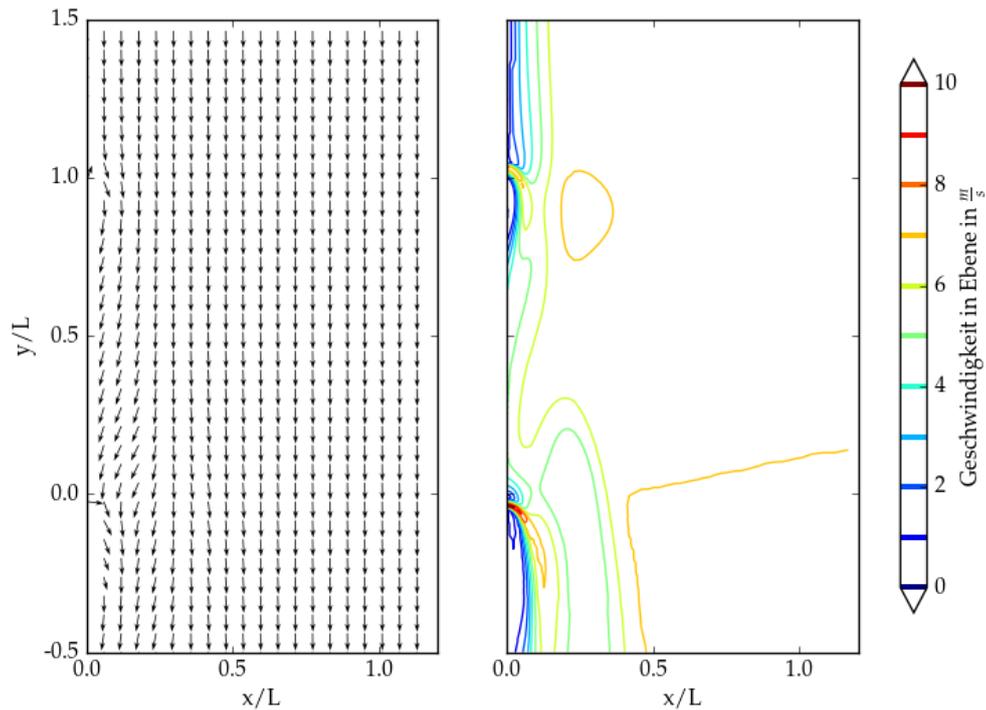


Abbildung 37: Geschwindigkeitsfeld, XY Ebene, unter Mitte Wabe (bei  $0,25 z/L$ ), Base Case

keit von außerhalb des Moduls in dessen Richtung vor. Das Fehlen der benachbarten Module wird deswegen für mittlere Windgeschwindigkeiten als weniger bedeutend eingestuft.

Erneut ist abschließend die XZ Ebene angeführt (Abbildung 39). Diese ist bedeutend, da sie senkrecht zum Wind liegt. Die in Windrichtung zeigende Vektorkomponente ist somit nicht dargestellt. So sind die Einflüsse der Wabe besser erkennbar. Es wird die Mitte der Wabe gezeigt. Deutlich zu sehen ist ein Sattelpunkt mittig vor der Wabe. Ebenso markant sind vier Wirbel, jeweils zwei symmetrisch zur Mittelachse. Die Wirbel liegen innerhalb und außerhalb einer gedachten Kontur vom Spalt zum Sattelpunkt.

Diese Topologie ist in Abbildung 40 skizziert. Sie findet sich in allen Simulationen wieder. Ebenso ist sie stromaufwärts und -abwärts vorzufinden. Der Lage der kritischen Punkte (Wirbel und Sattelpunkt) sind sowohl von der Lage der betrachteten Ebene, als auch von der Windgeschwindigkeit abhängig. Je stärker der Wind, desto weiter entfernt sich der Sattelpunkt von dem Modul. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 41 verbildlicht. Dort ist die Distanz in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit aufgetragen. Es sind lediglich Werte dargestellt für Fälle, bei denen sich der Sattelpunkt gut lokalisieren ließ. Stromabwärts bewegen sich die Wirbel ebenfalls, entlang der Konturlinie vom Spalt zum Sattelpunkt, weg von der Wabe. Bei stärkerem Wind bewegen sie sich zu dieser Konturlinie hin, sodass sie bei starkem Wind fast nebeneinander liegen. Der Zusammenhang für die Bewegungen des Sattelpunktes bezüglich der Lage der Ebene ist nicht eindeutig. Die Mehrzahl der Ergebnisse zeigt die Tendenz, dass stromaufwärts liegende Ebenen einen näheren Sattelpunkt zeigen. Obgleich zu erkennen ist, dass der Einfluss der Lage der Ebene auf den Sattelpunkt mit der Windgeschwindigkeit steigt. So haben die vorderen Ebenen bei starken Winden einen deutlich näheren Sattelpunkt

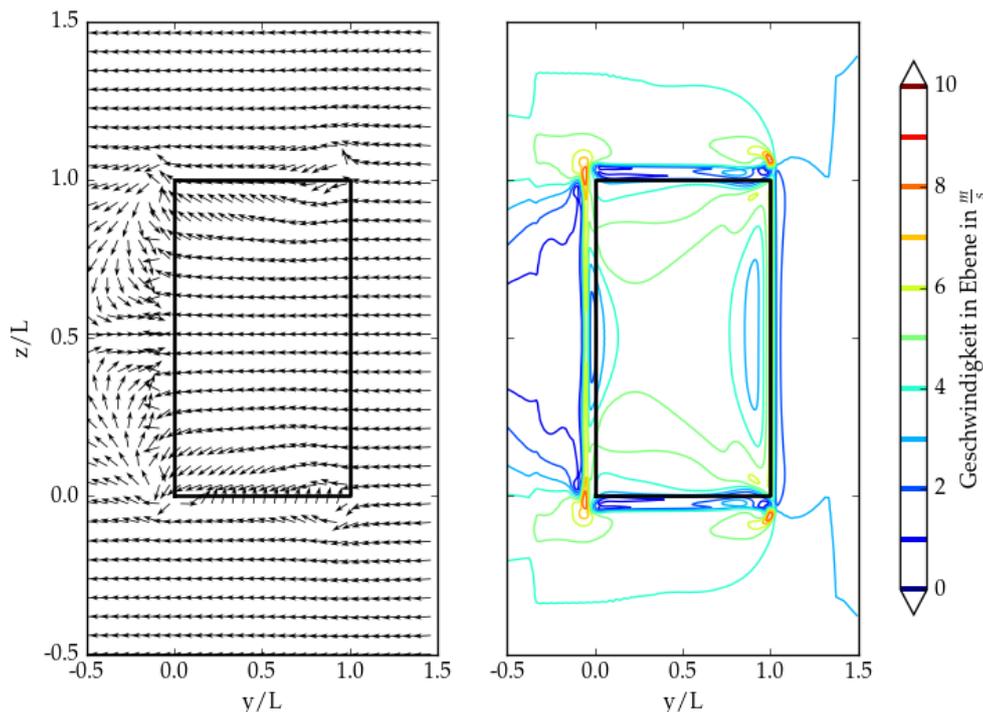


Abbildung 38: Geschwindigkeitsverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe  $0,004 x/L$ , Base Case

als weiter stromabwärts.

Es ist bemerkenswert, dass innerhalb der mit der schwarzen Kontur angedeuteten „Glocke“ die Strömung Richtung Wabe fließt. Dennoch kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Luft, die sich innerhalb der Glocke befindet, in die Wabe eintritt. Das liegt daran, dass durch den deutlich schnelleren Wind die Strömung in der Glocke eher davon getragen wird, als dass sie sich der Wabe ausreichend nähert. Dennoch kann dieses Erkenntnis für die Interaktion mehrerer Waben interessant sein.

Im zur Validierung des Modells ohne Wind bereits durchgeführten Versuch ist erkannt worden wie hochturbulent die Strömung vor der Wabe ist. Der Wind ändert an diesem Umstand nichts. Es treten weiterhin hohe Turbulenzen auf. Die im Base Case auftretenden turbulenten kinetischen Energien  $k$  liegen bei über  $6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$ . Sie sind nahe dem Spalt lokalisiert. In der übrigen Domain reduziert sich die Turbulenz. Die Verteilung in der YZEbene ist in Abbildung 42 zu sehen. Die Bereiche der reinen Umgebungsluft werden durch eine sehr niedrige Turbulenz deutlich.

Der Base Case ist nun beschrieben. Folgend können Abweichungen von diesem aufgezeigt werden, wobei immer wieder die Referenz zum Base Case auftauchen wird. Bevor der Einfluss der Windgeschwindigkeit besprochen wird, werden die Auswirkungen der Transienz beleuchtet.

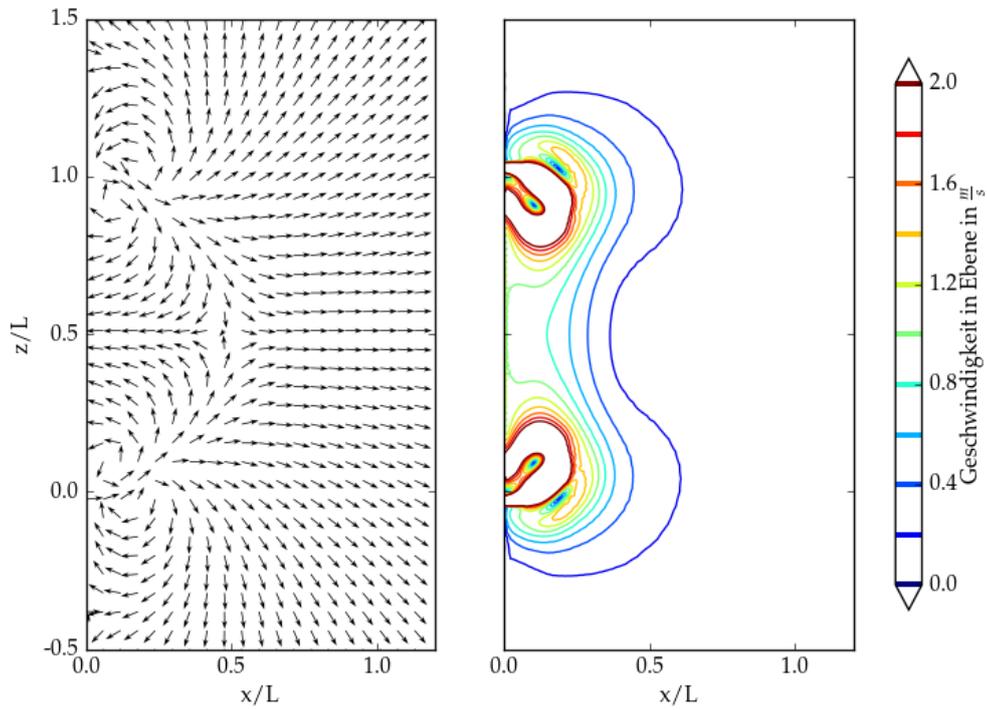


Abbildung 39: Geschwindigkeitsfeld, XZ Ebene, Mitte Wabe, Base Case

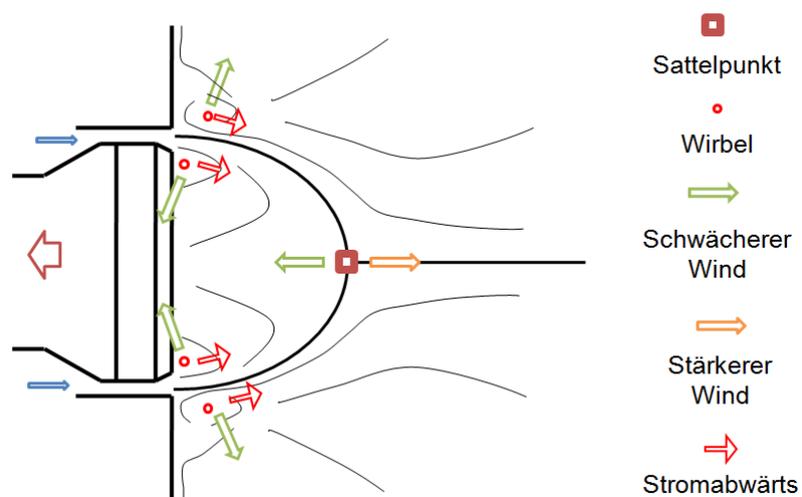


Abbildung 40: Topologie der Strömung in der XZ Ebene

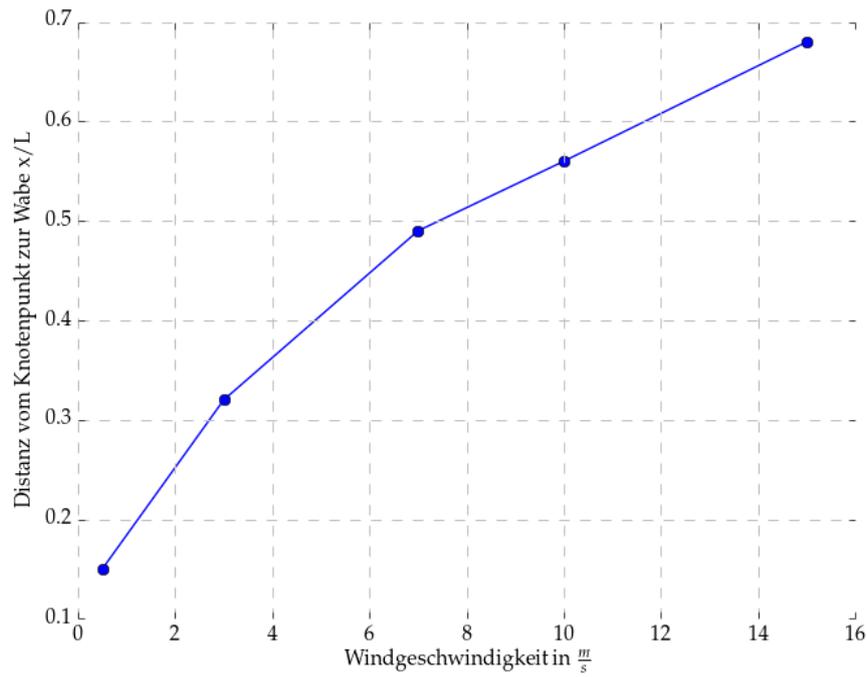


Abbildung 41: Distanz des Knotenpunktes über der Windgeschwindigkeit

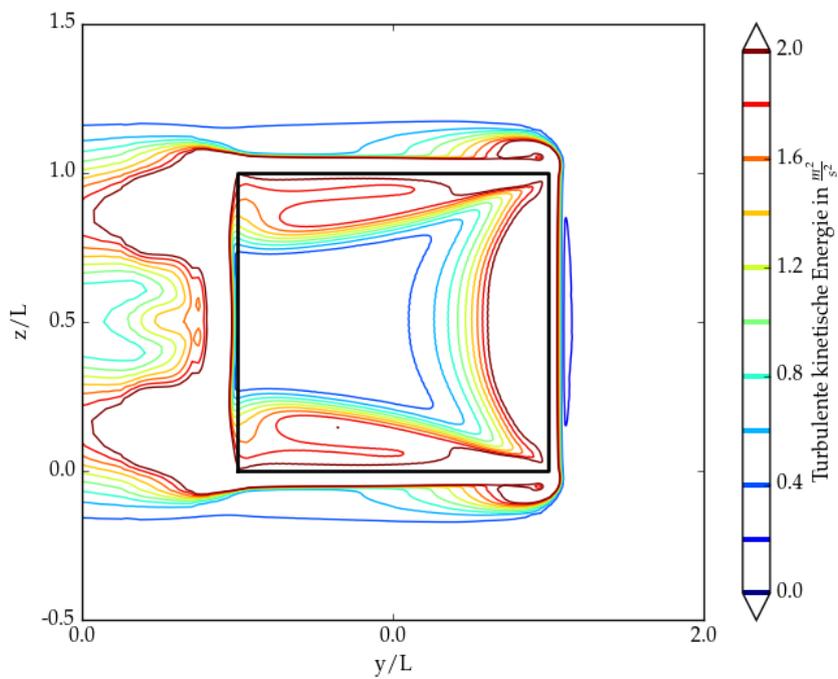


Abbildung 42: Turbulente kinetische Energie  $k$ , YZ Ebene, Distanz zur Wabe  $0,004 x/L$ , Base Case

### 5.3 Transienz

Die Residuenverläufe lassen auf ein instationäres Verhalten der Strömung schließen. Sie nehmen ein periodisches Verhalten ein. Die Ausprägung dieser Periodizität nimmt mit der Windgeschwindigkeit zu. Möglicherweise kommt es immer wieder zu Ablösungen oder Wirbeln. Die Rückführrate ist für alle instationär gerechneten Fälle um ca. 1 % niedriger als das stationäre gerechnete Pendant, unabhängig von der Windgeschwindigkeit. Dieses Kapitel widmet sich diesem Phänomen.

Die hier gezeigten Mittelwerte des fiktiven Strömungsparameters  $\phi$  werden durch das arithmetische Mittel über einen Zeitbereich gebildet (Gleichung 39). Dieser Zeitbereich wird über die Menge der Zeitschritte  $N$  angegeben. Die aperiodische Anfangsphase der instationären Simulation ist nicht Teil dieser Menge.

$$\bar{\phi} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \phi_i \quad (39)$$

Die zeitlich von diesem Mittelwert abweichenden Größen werden Instationaritäten genannt. Sie ergeben sich aus Gleichung 40.

$$\bar{\phi}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (\phi_i - \bar{\phi})^2 \quad (40)$$

Beginnend zeigt Abbildung 43 den Verlauf des  $arr$  über die simulierte Zeit. Aufgetragen sind zum zeitlichen Verlauf ebenso das Ergebnis des stationären Falls und der Mittelwert des instationären. Sowohl die Schwankungen um den instationären Mittelwert als auch die Abweichung vom stationären Mittelwert sind prozentual identisch. Diese Abweichung soll mit den folgenden Abbildungen aufgeklärt werden. Abbildung 44 zeigt beispielhaft das Geschwindigkeitsfeld der instationären Simulation in der XZ-Ebene. Es wird deutlich, dass die Abweichungen zum stationären Ergebnis marginal sind (stationäres Ergebnis: Abbildung 39). Die Auswirkungen auf die Geschwindigkeiten scheinen gering. Dies ist auch in den anderen Ebenen zu erkennen. Neben dem Strömungsprofil wird die Rückführrate durch die vor der Wabe herrschende Temperatur bestimmt. Die Plots der zeitlich gemittelten Temperaturen sind ebenfalls identisch mit den stationären Ergebnissen. Lediglich die Durchmischung des Windes mit dem vorderen Spalt scheint etwas stärker zu sein. Der im Temperaturplot der XY-Ebene zu sehende Bereich mit über 390 K (Abbildung 32) ist etwas kleiner im instationären Fall. Da letztendlich trotzdem die ganze Warmluft aus dem vorderen Spalt in die Wabe eintritt, ist in dieser Abweichung nicht der Grund für die reduzierte Rückführrate gefunden. Daher sollen folgend die Instationaritäten betrachtet werden.

Die Instationaritäten der Temperatur sind folgend über die Konturplots angeführt (Abbildung 45 und 46). Gezeigt ist die XY bzw. die YZ Ebene. Das Maximum der Schwankungen liegt bei 14 K. Außerdem ist deutlich, dass der Großteil der Schwankungen hinter der Wabe liegt und somit keinen Einfluss auf die Rückführrate haben. Entscheidend für die Rückführrate sind die

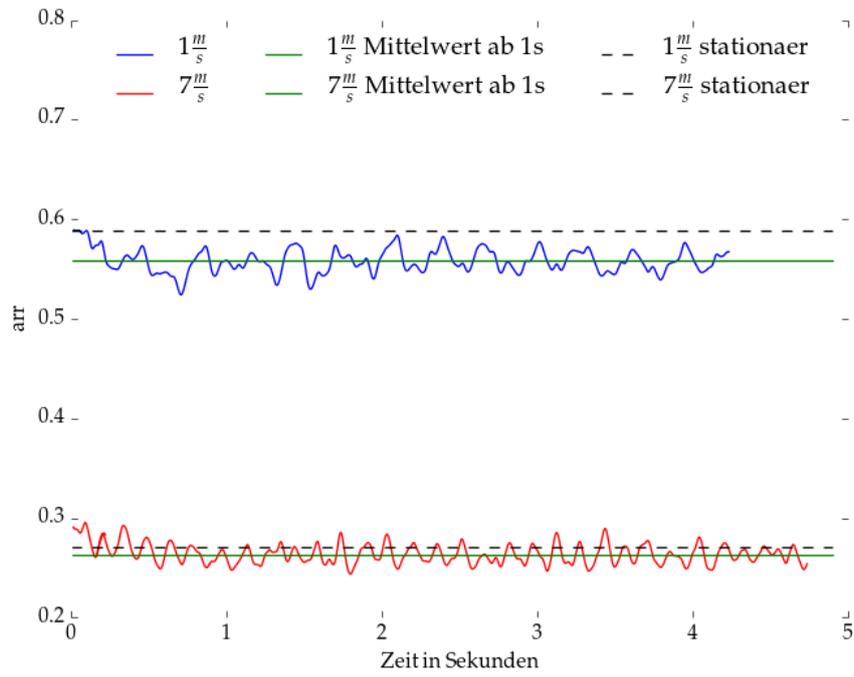


Abbildung 43: Instationäres Verhalten der Rückführrate

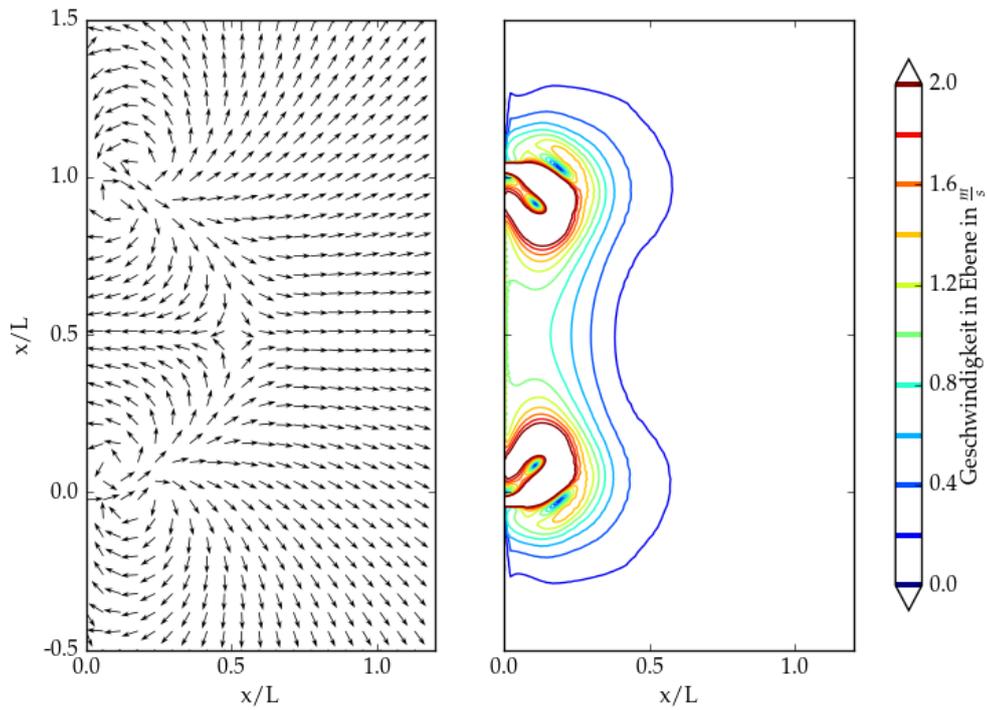


Abbildung 44: Geschwindigkeitsfeld, XZ Ebene, Mitte Wabe,  $7 \frac{m}{s}$ , instationäre Simulation

Areale im äußeren Bereich vom vorderen Teil der Wabe. Die deutlich roten Bereiche zeigen, wo die Abweichung von ca. 1% entstehen könnte.

Es ist abschließend nicht zu erklären, warum die instationär berechnete Rückführrate kleiner ist als die stationäre, jedoch ist gezeigt worden, dass das *arr* durch die Instationaritäten beeinflusst ist. Als Grund für den Einfluss kommt die veränderte Durchmischung der Warm- und Umgebungsluft infrage. Wichtig ist, dass die meisten Instationaritäten hinter der Wabe liegen. Deswegen kann die durch stationäre Simulationen erzeugte Tendenz als verlässlich angesehen werden.

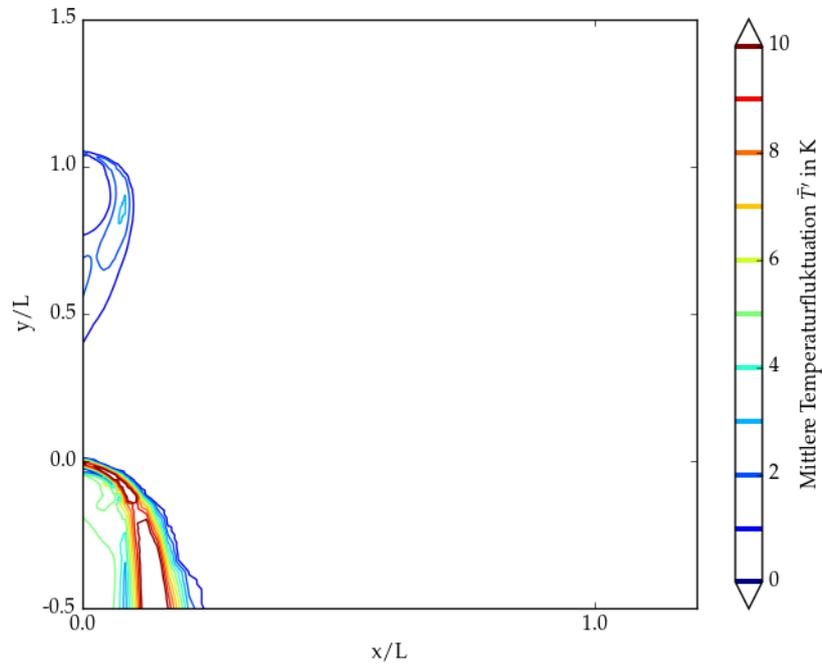


Abbildung 45: Mittlere Instationaritäten der Temperatur  $\bar{T}'$ , XY Ebene, Mitte der Wabe,  $7 \frac{m}{s}$

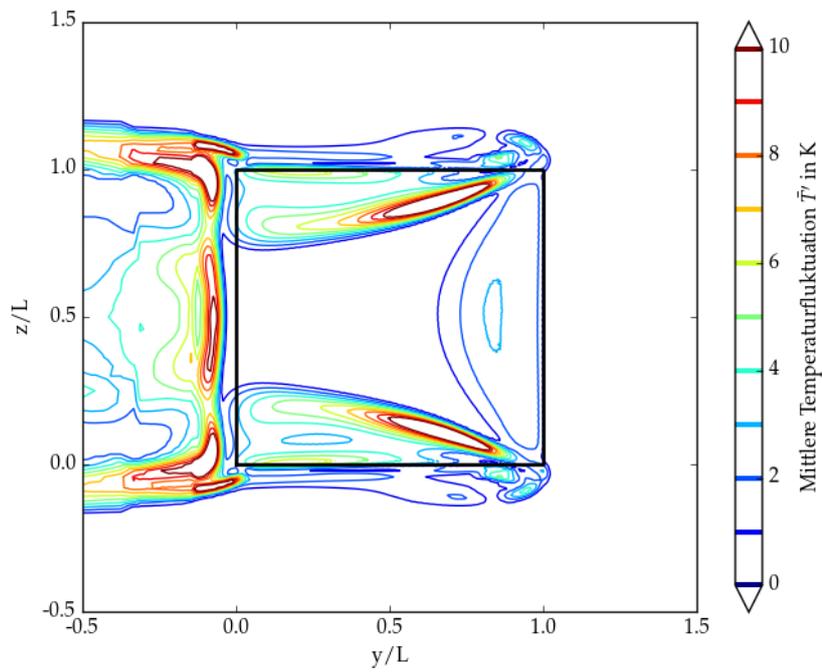


Abbildung 46: Mittlere Instationaritäten der Temperatur  $\bar{T}'$ , YZ Ebene, Distanz zur Wabe  $0,008 x/L$ ,  $7 \frac{m}{s}$

## 5.4 Wind schwächer als $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Wie in den Beschreibungen zum Base Case, beginnen die Erläuterungen hier ebenfalls mit Temperaturplots. Diese zeigen, wie der Weg der warmen Luft sich durch den abgeschwächten Wind verändert. Die Änderung bezieht sich immer auf das Verhalten des Base Cases.

Als erstes ist in Abbildung 47 ein XY Schnitt durch die Mitte der Wabe gezeigt. Der vordere Bereich der Warmluft ist weniger stark umgelenkt, dennoch tritt sie bereits vor der Mitte der Wabe, und damit deutlich eher, komplett in diese ein. Der hintere Spalt ist kaum umgelenkt, was ebenfalls einen deutlichen Gegensatz zum Base Case darstellt. Zuletzt ist ein großer Bereich durchmischter Luft vor der Wabe zu sehen. Dieser kommt aus dem oberen und dem unterem Spalt. Im Base Case trägt der Wind diese warme Luft fort, noch bevor sie sich vor der Wabe mit der aus dem gegenüberliegenden Spalt kommenden Warmluft vermischt. Diese Vermischung in der Mitte findet ab  $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  nicht mehr statt.

Als nächstes ist die YZEbene in Abbildung 48 dargestellt. Sie hat den selben Abstand zur Strahlungsseite der Wabe wie die zuvor Gezeigten. Auffallend ist, dass keine symmetrische Struktur erkennbar ist. Weiterhin hat der kälteste Bereich eine Temperatur von über 300 K. Somit steht fest, dass keine reine Umgebungsluft in das Modul einströmt. Die Flächen der fast reinen Warmluft sind insgesamt deutlich größer. Hinter der Wabe herrscht Umgebungstemperatur. Die nicht in die Wabe eintretende Warmluft strömt nicht an der Wand entlang Richtung Austritt, sondern ist gelöst von dieser. Abbildung 49 zeigt den Austritt aus der Domain. Die von der Wand gelöste und mittlerweile stark durchmischte Warmluft ist deutlich stärker vom Auftrieb beeinflusst. Das Zentrum des wärmsten Bereichs liegt oberhalb des Moduls.

Als nächstes folgen zwei XZ Plots. Es werden zwei gezeigt, da der YZ Plot das Verhalten in den unterschiedlichen Ebenen nicht aufzeigt. Zuerst ist die Mittelebene zu sehen (Abbildung 50). Erneut sind die Warmluftströme kaum umgelenkt und strömen in den Raum vor der Wabe und nicht durch diese. Dennoch vermischt sich diese Luft mit der Umgebungsluft und somit wird ein Teil wieder eingesaugt. Dieses Verhalten bleibt stromabwärts erhalten. Dort ist auch ein deutlich größerer Bereich warmer Luft neben dem Spalt zu sehen. Es wird Warmluft von stromaufwärts, an dieser stromabwärts neben dem Spalt liegenden Stelle, wieder eingesaugt. Stromaufwärts, bei  $0,75 y/L$  sind die beiden Spaltseiten noch nicht in der Mitte und es tritt eine Wirbel-ähnliche Form der warmen Bereiche auf (Abbildung 51).

Folgend werden die Geschwindigkeiten näher betrachtet. Dazu werden wieder die normierten Geschwindigkeitsvektoren in verschiedenen Ebenen gezeigt. Die Geschwindigkeiten sind über die seitlich angeordneten Konturplots abzulesen. Zuerst zeigt die Abbildung 52 (XY Ebene) wie sich die Warmluft von der Wabe entfernt. Die Warmluft des vorderen Spalts wird direkt umgelenkt. Die des Hinteren strömt erst von der Wabe weg. Dann bewegt sie sich langsam Richtung der Mitte der Wabe. Schnell ändert sich die Richtung wieder, sodass die Warmluft des hinteren Spalts in einem Verluststrom aus Warmluft stromabwärts und weg von der Wabe fließt.

In der YZEbene, welche in Abbildung 53 dargestellt ist, ist eine zunehmende Verwirbelung

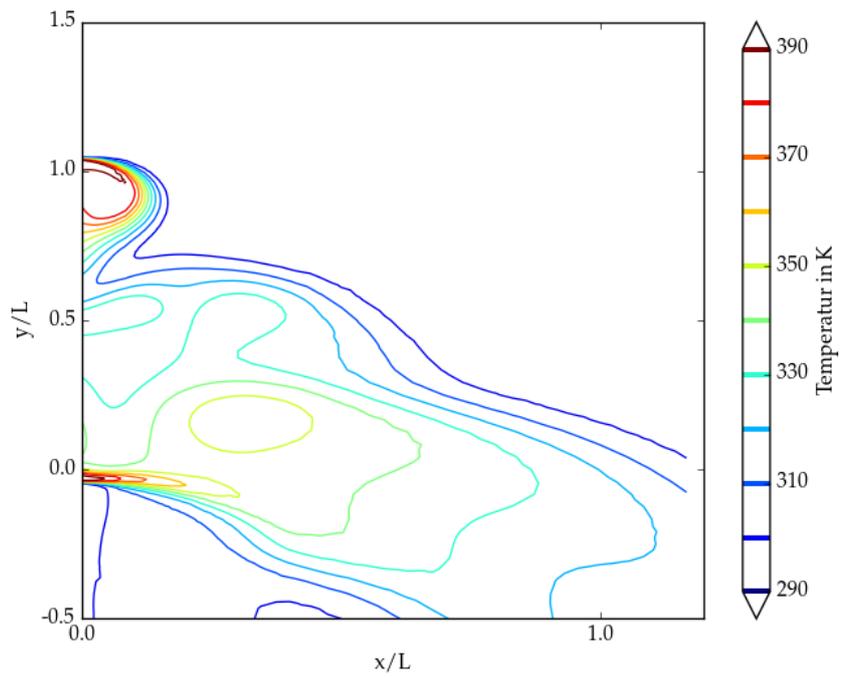


Abbildung 47: Temperaturverteilung, XY Ebene, Mitte Wabe,  $1 \frac{m}{s}$

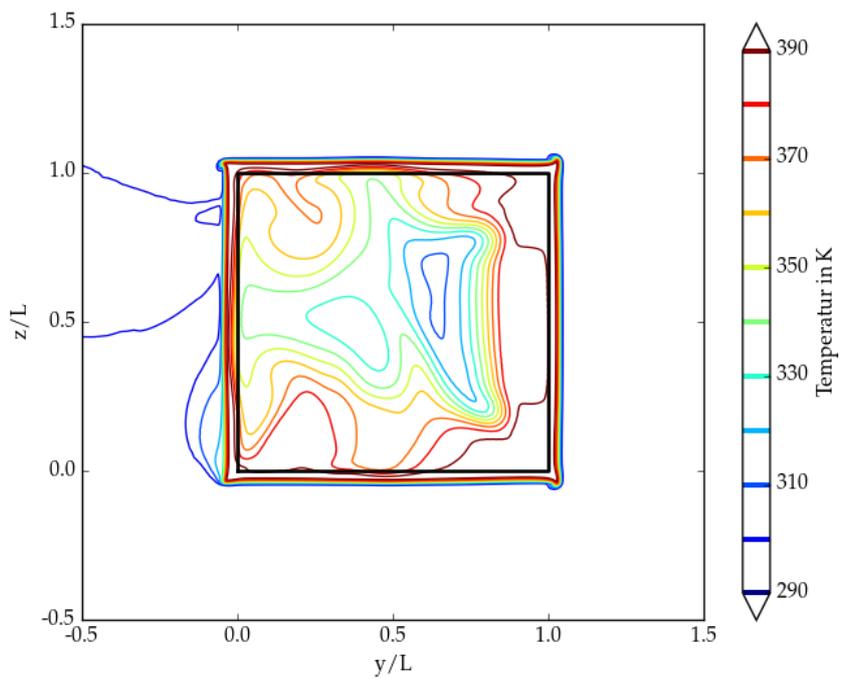


Abbildung 48: Temperaturverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe ca.  $0,004 x/L$ ,  $1 \frac{m}{s}$

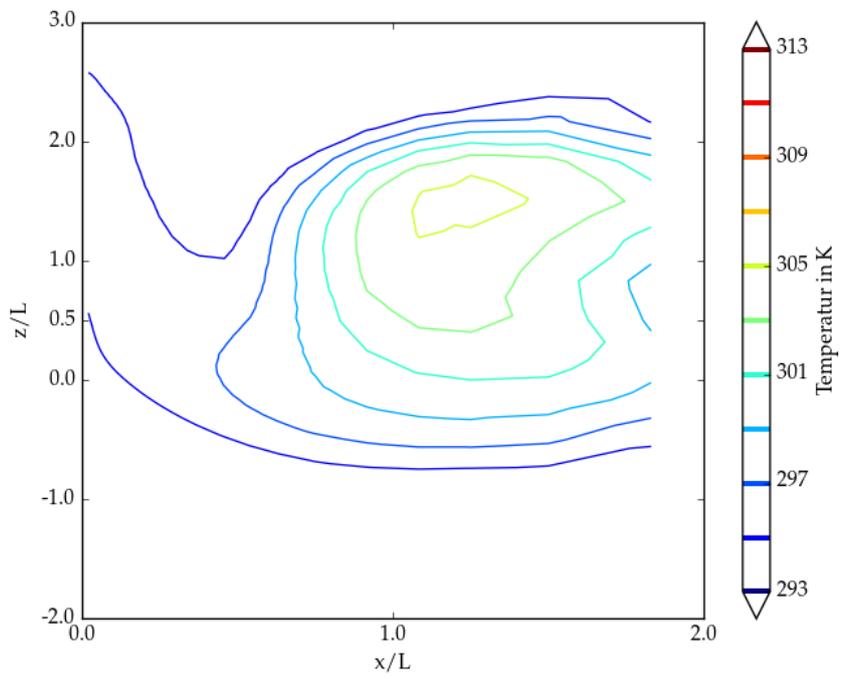


Abbildung 49: Temperaturverteilung, XZ Ebene, Austritt aus Domain,  $1 \frac{m}{s}$

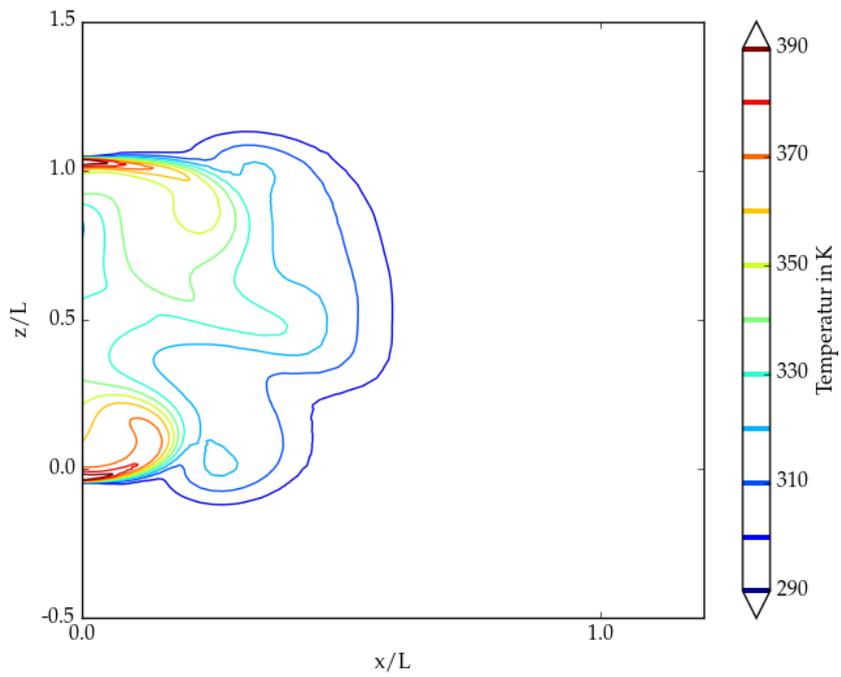


Abbildung 50: Temperaturverteilung, XZ Ebene, Mitte Wabe,  $1 \frac{m}{s}$

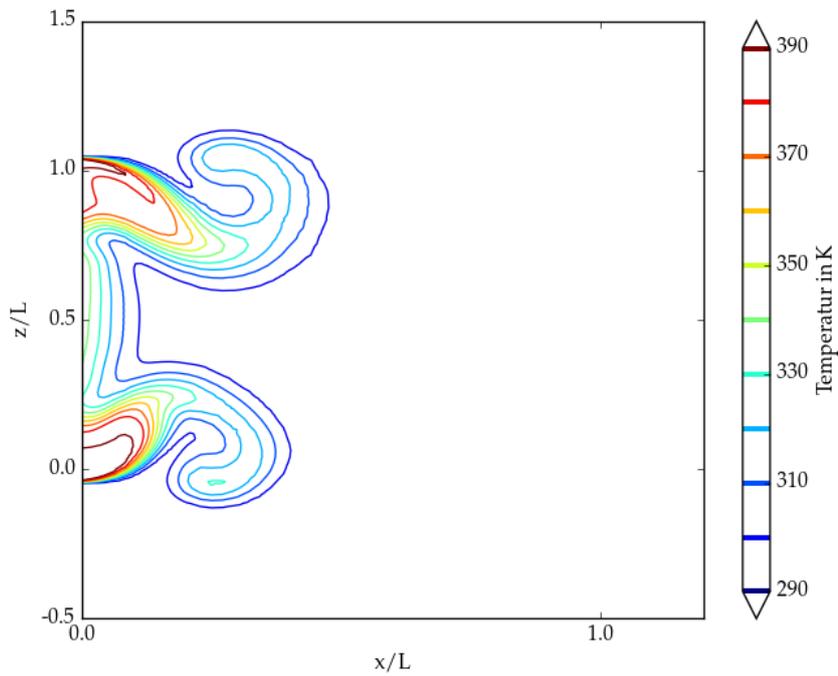


Abbildung 51: Temperaturverteilung, XZ Ebene, vor Mitte Wabe (bei  $0,75 y/L$ ),  $1 \frac{m}{s}$

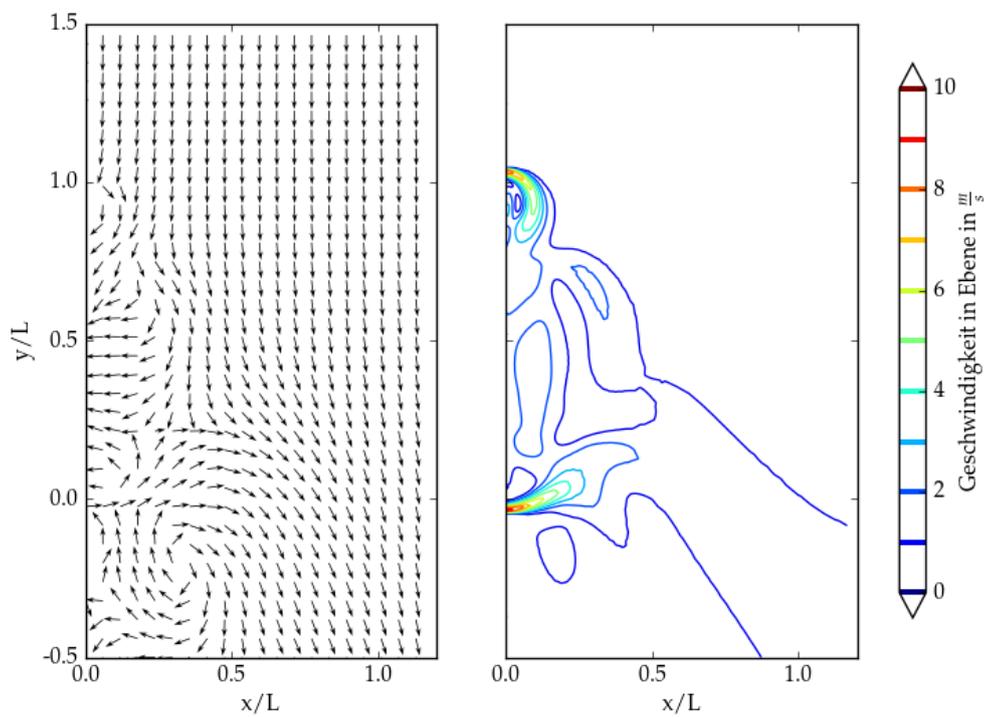


Abbildung 52: Geschwindigkeitsfeld, XY Ebene, über Mitte Wabe,  $1 \frac{m}{s}$

und Durchmischung zu sehen. Ebenfalls erzeugt der Auftrieb eine starke Asymmetrie, welche beim Base Case nahezu nicht zu erkennen war. Zuletzt ist auffällig, dass bei schwachem Wind ein möglicher Einfluss durch die fehlenden Nachbarmodule entsteht. Dieser mögliche Einfluss tritt bereits bei  $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  nicht mehr auf. Zu sehen ist, wie die Vektoren über und unter der Wabe schon mit dem Beginn der Wabe Richtung dieser abgelenkt werden. Die Wabe zieht Luft aus allen Richtungen an. Der Wind ist noch nicht dominierend. Es wird erwartet, dass der Effekt auf das *arr* letztendlich klein ist. Außerdem wird erwartet, dass er sich eher positiv auf das *arr* auswirkt.

Es kann konstatiert werden, dass der Auftrieb bei schwächerem Wind erwartungsgemäß eine

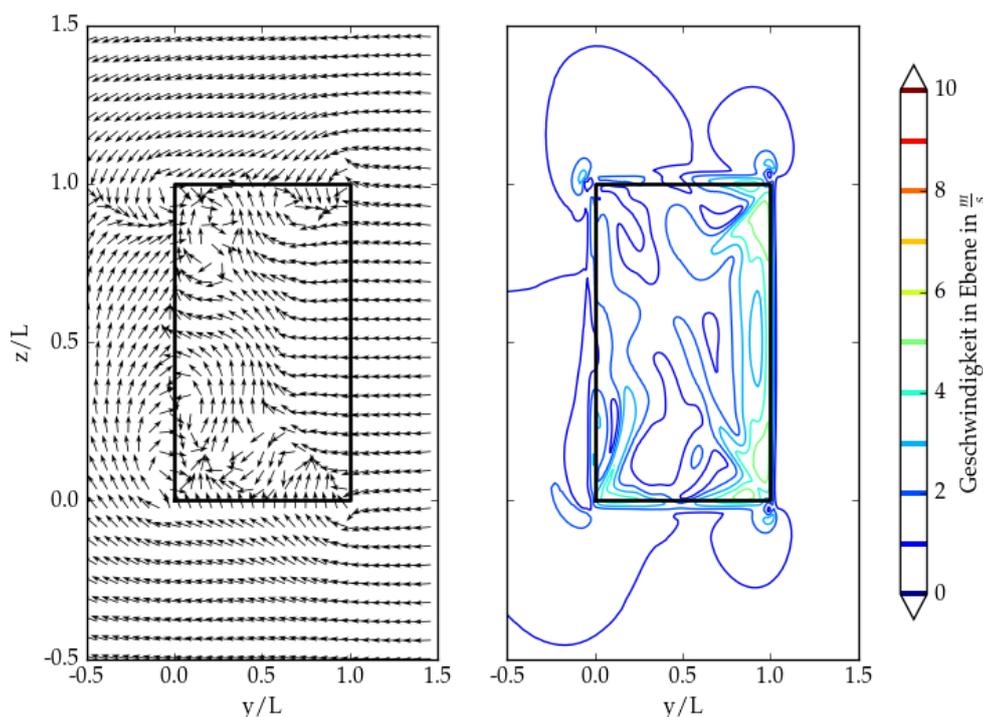


Abbildung 53: Geschwindigkeitsfeld, YZ Ebene, Distanz zur Wabe  $0,008 x/L$ ,  $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

bedeutendere Rolle spielt. Der erhöhte Einfluss der turbulenten Vermischung wird durch das inhomogene, unsymmetrische Temperaturprofil (Abbildung 48) deutlich. Insgesamt strömt viel mehr Warmluft durch die Wabe. Es gibt keine Bereiche wo reine Umgebungsluft in einen Kanal der Wabe eintritt. Es findet eine starke Durchmischung statt. Insbesondere der Anteil an wieder eintretender Warmluft aus dem oberen und dem unteren Spalt nimmt zu, sodass selbst im hinteren Bereich der Wabe heiße Flächen erkenntlich werden (Abbildung 53).

## 5.5 Wind stärker als $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Auch in diesem Kapitel werden beschriebene Änderungen immer auf den Base Case bezogen. Erneut wird mittels Temperaturplots zunächst ein Verständnis vermittelt, sodass danach Details in Geschwindigkeitsplots zu sehen sind.

Abbildung 54 verbildlicht, wie stark der Wind im betrachteten Fall ist. Die Umlenkung der Warmluft ist enorm. Die Wabengänge sind nicht ausreichend um alle Warmluft des vorderen Spalts aufzunehmen. Ein kleiner Teil wird in der Ebene in der Mitte der Wabe über diese hinweg geweht.

Der folgende YZ Schnitt (Abbildung 55) zeigt diesen Zusammenhang nochmals. Es sind im gewählten Abstand von ca.  $0,004 x/L$  kaum noch Bereiche wärmer als 330 K. Lediglich die oberen und unteren Spalte dringen mit ihrer Warmluft durch diese Ebene.

Abbildung 56 zeigt die Mitte der Wabe im XZ Schnitt. Die Konturen sind symmetrisch. Der Auftrieb hat keinen Einfluss mehr. Anders als beim Base Case oder schwächeren Winden, wächst die Größe der äußeren Kontur nicht merklich an. Erst weiter stromabwärts wird der von der Warmluft beeinflusste Bereich größer. Das liegt an der fortlaufenden Durchmischung. Diese Analogie zu allen anderen Fällen ist erwartungsgemäß.

Als ein weiterhin interessanter Geschwindigkeitsplot, ist Abbildung 57 angeführt. Zu sehen ist eine homogene Strömung. Ausschließlich der obere und untere Spalt erzeugen Abweichungen von der Homogenität. Der Wind wird dort sehr stark durch die austretende Warmluft abgebremst. Diese Bereiche weisen eine deutlich verminderte Geschwindigkeit in der Ebene auf. Die Abbremsung des Windes ermöglicht anderen Kräften wie z.B. der Sogwirkung der Wabe, ihren Einfluss zu zeigen. Die Strömung außerhalb der Wabe zeigt sich unbeeinflusst von dem Modul und umgekehrt. Dies deckt sich mit den bisher gezeigten Betrachtungen dazu. Bereits ab  $3 \frac{m}{s}$  treten über- und unterhalb der Wabe keine Geschwindigkeiten mehr in Richtung dieser auf. Daher ist davon auszugehen, dass der Einfluss der fehlenden Nachbarn vernachlässigbar ist.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, dass durch eine Windgeschwindigkeit, die ca. 2,5 mal schneller als der Spaltstrom ist, der Auftrieb irrelevant wird. Die Warmluft bleibt sehr nahe der Wabe bzw. nahe des Strahlungsschutzes. Sie hat weniger Zeit, sich zu durchmischen und wird in einem schmalen und heißeren Bereich davon getragen.

Der Einfluss der Windgeschwindigkeiten auf die Strömung vor dem Receiver ist nun dargelegt. Im nächsten Kapitel soll als zusätzliche Untersuchung der Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Rückführrate gezeigt werden.

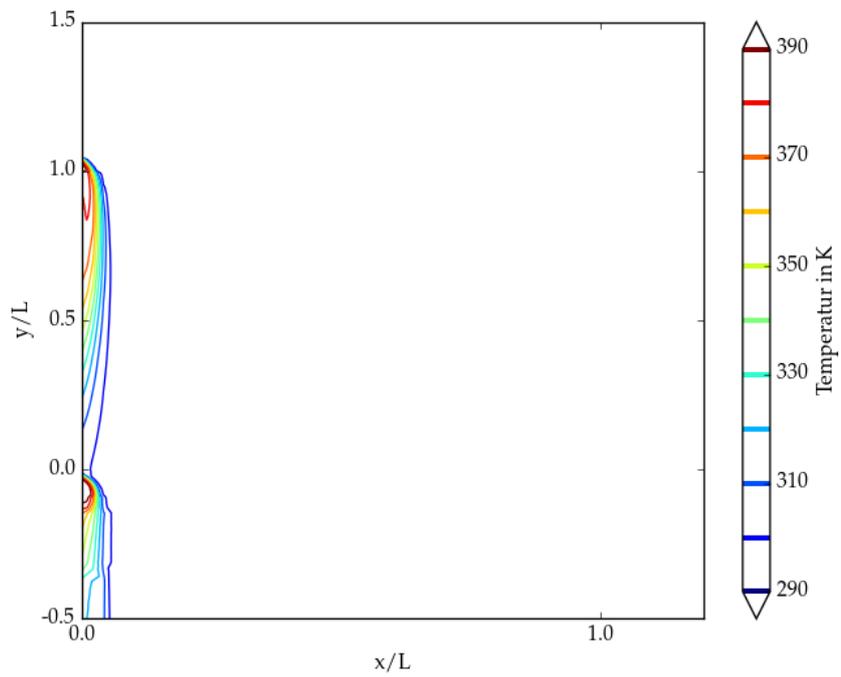


Abbildung 54: Temperaturverteilung, XY Ebene, Mitte Wabe,  $25 \frac{m}{s}$

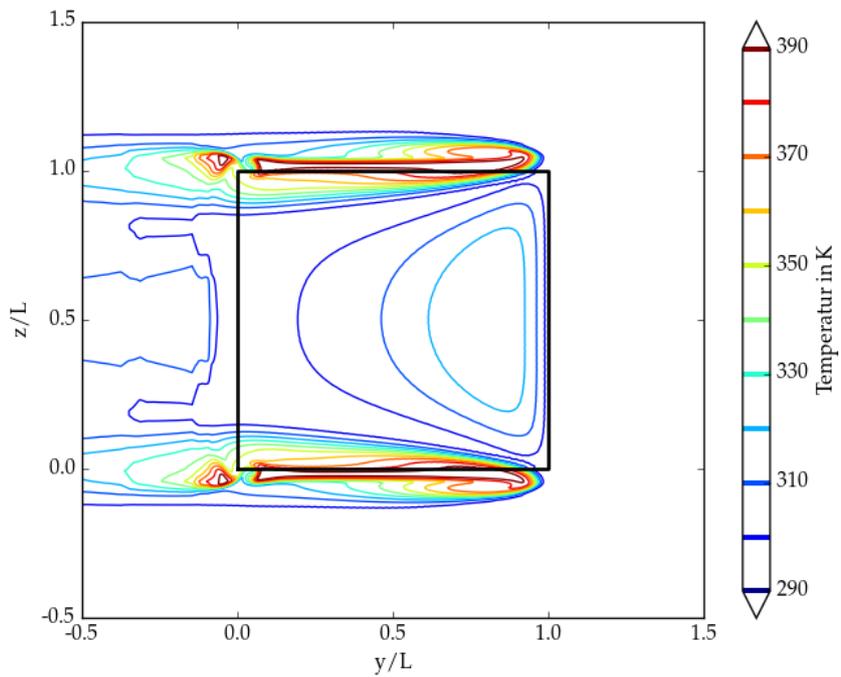


Abbildung 55: Temperaturverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe ca.  $0,004 x/L$ ,  $25 \frac{m}{s}$

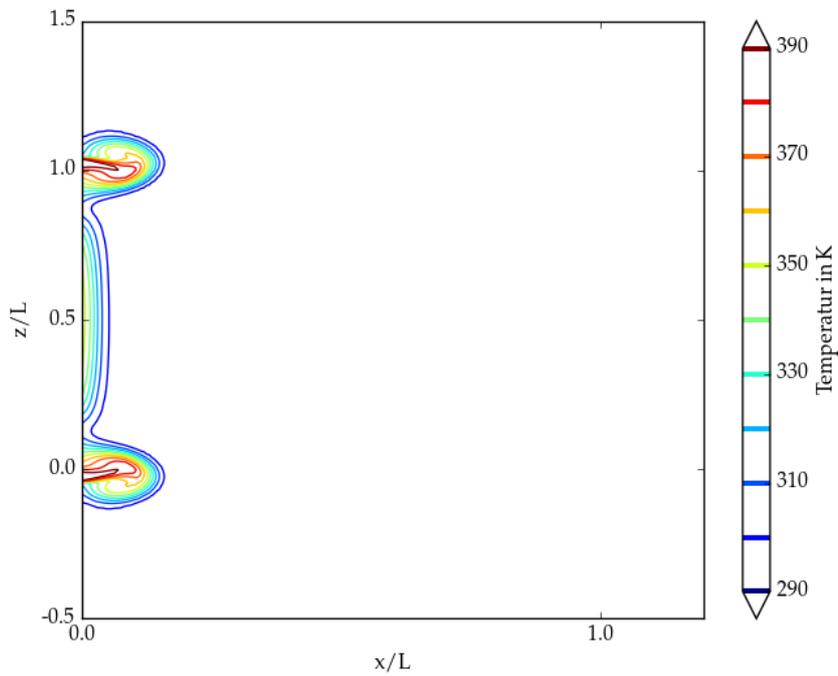


Abbildung 56: Temperaturverteilung, XZ Ebene, Mitte Wabe,  $25 \frac{m}{s}$

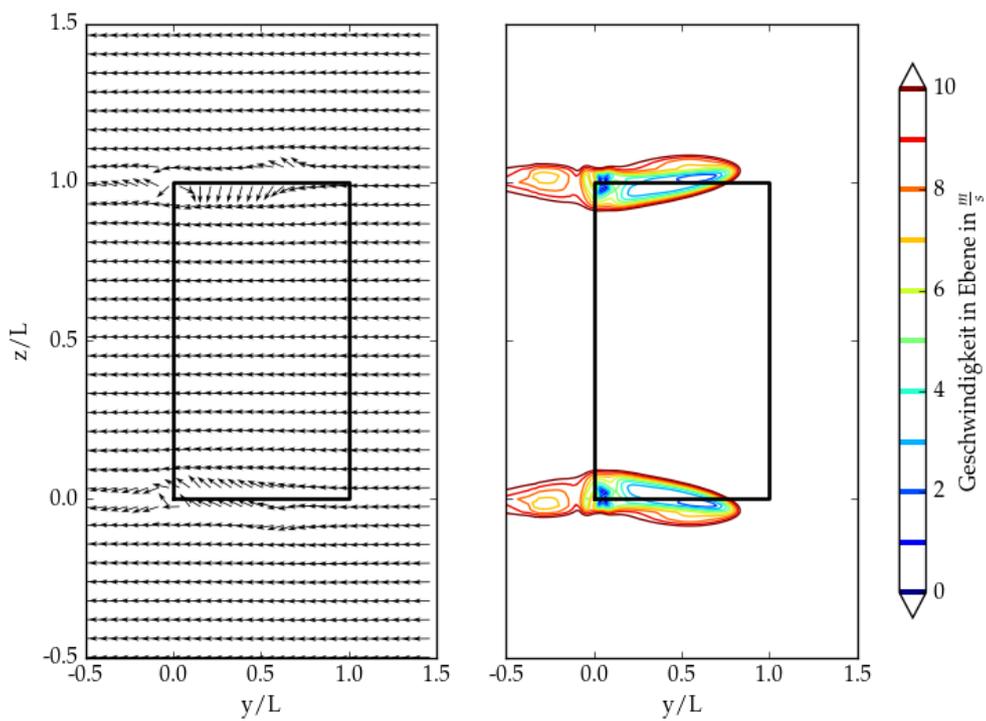


Abbildung 57: Geschwindigkeitsfeld, YZ Ebene, Distanz zur Wabe  $0,008 x/L$ ,  $25 \frac{m}{s}$

## 5.6 Rückführrate

Ein Hauptergebnis dieser Arbeit ist die Quantifizierung der Rückführrate in Abhängigkeit der Windstärke. Das zuvor vermittelte Wissen hilft bei der Erklärung der Abhängigkeit der Rückführrate von der Windgeschwindigkeit.

Die Simulationsergebnisse sind dazu in Abbildung 58 zusammengefasst. Zusehen sind die Werte der stationären Ergebnisse in blau sowie die der instationären in rot. Zu den instationären Werten wurde das Ergebnis der bisherigen Simulationen für den Fall ohne Wind ( $0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ) hinzugefügt. Die Ausgleichskurve bezieht sich auf die instationären Werte.

Bis zu Windgeschwindigkeiten von ca.  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  nimmt die Rückführrate rapide ab, sodass sie bei ca.  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bereits unter 30 % liegt. Die Warmluft, die nicht direkt wieder in die Wabe eintritt, kann sich mit der Umgebungsluft vermischen. Tritt dadurch erwärmte anstatt kalter Luft in die Wabe ein, steigt das *arr*. Je stärker der Wind, desto geringer zum einen die Durchmischung. Zum anderen befindet sich durchmischte Luft bereits stromabwärts des Moduls, sodass sie nicht wieder in die Wabe eintritt.

Für den Bereich von höheren Strömungsgeschwindigkeiten als ca.  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  entwickelt sich ein asymptotisches Verhalten. Es war zu erwarten, dass ab einer bestimmten Geschwindigkeit die Änderung des *arr* über der Windgeschwindigkeit sehr klein wird. Diese Geschwindigkeit scheint mit ca.  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  gefunden zu sein. Der Wert liegt bei etwas unter 30 % für die stationären Ergebnisse. Die Rückführrate scheint nicht weiter stark zu sinken, da bereits fast nur noch Warmluft aus dem vorderen Spalt in die Wabe eintritt. Dieser Warmluftstrom aus dem stromaufwärts liegendem Spalt tritt unabhängig für die Windgeschwindigkeit fast vollständig in die Wabe ein. Dadurch scheint ein unterer Grenzwert von ca. 25 % gesichert. Dies stützt die Erwartung des asymptotischen Verhaltens in der Region von 25 % bis 30 %.

Dass der Übergang von hohen Gradienten des *arr* zum niedrigen bei ca.  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  liegt, hängt auch stark von der Wabengeometrie ab. Es wird angenommen, dass die Kantenlänge der Wabe dafür entscheidend ist. Ebenso ist das Verhältnis der Auströmgeschwindigkeit im Spalt und der Windgeschwindigkeit einflussreich.

Die stationären Ergebnisse zeigen zweimal eine unerwartete Erhöhung des *arr*. Zuerst steigen die Werte für hohe Geschwindigkeiten nochmals an, nachdem sie bei ca.  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ihren Tiefpunkt erreicht haben. Natürlich kann ein solches Verhalten der Realität entsprechen. Da der Autor in den Details der Strömung vor dem Receiver dafür keine Begründung gefunden hat, wird davon ausgegangen, dass die etwas erhöhte Unsicherheit in diesen Bereichen der Grund ist. Sie ist, wegen der nicht optimal angepassten Wandauflösung und dem deswegen steigenden Diskretisierungsfehler, erhöht. Das für alle Windgeschwindigkeiten genutzte Netz ist optimiert für den Base Case und schwache Winde. Ein für hohe Geschwindigkeiten optimiertes Netz würde deutliche Rechenzeiterhöhungen bei schwächeren Winden zur Folge haben. Außerdem sind dort die Werte wie erwartet im unakzeptablen Bereich (um 30 %).

Die zweite unerwartete Erhöhung des *arr* findet bei sehr schwachem Wind von  $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  auf  $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  statt. Festzustellen ist, dass entweder der Grund in der nicht instationär gerechneten Simu-

lation liegt, oder ein schwacher Wind die Rückföhrtrate begünstigt. Es ist davon auszugehen, dass ersteres zutrifft. Die veränderte Durchmischung der instationären Simulation hat einen stärkeren Einfluss bei schwachem Wind. Obwohl gezeigt ist, dass die Abweichung bei den zwei gerechneten Fällen prozentual unabhängig von der Windgeschwindigkeit ist (Abbildung 43), geht der Autor davon aus, dass dieser Zusammenhang noch nicht ausreichend belegt ist, um ihn auf den  $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  Fall zu übertragen. Deswegen ist davon auszugehen, dass eine Ungenauigkeit in der Simulation der Grund für die Erhöhung des *arr* bei dem Schritt von  $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  auf  $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ist.

Zuletzt soll der Zusammenhang mit dem als entscheidend eingestuften kritischen Punkt der Topologie, dem Sattelpunkt, und der Rückföhrluft dargestellt werden. Abbildung 59 zeigt das *arr* über den Abstand dieses Punktes. Wieder sind nur die eindeutig zu zuordneten Punkte im Ergebnis aufgenommen.

Es ist ein auf den ersten Blick ähnlicher Verlauf zu dem zuvor besprochenen erkennbar. Wichtig ist, dass für eine eindeutige Abhängigkeit der Rückföhrtrate von der Distanz des Sattelpunktes zur Wabe, die Distanzen der Windgeschwindigkeiten von ca.  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und höher eine ähnliche Distanz zeigen müssten, denn dort ist die Rückföhrtrate nahezu identisch. Dies ist nicht der Fall, sondern die Distanz nimmt zu.

Mit den bisher angeführten Ergebnissen wurden bereits Hauptziele der Arbeit erreicht. Das nächste Kapitel ist eine zusätzliche Untersuchung, die sich mit der Reynolds-Zahl für den Seitenwind befasst.

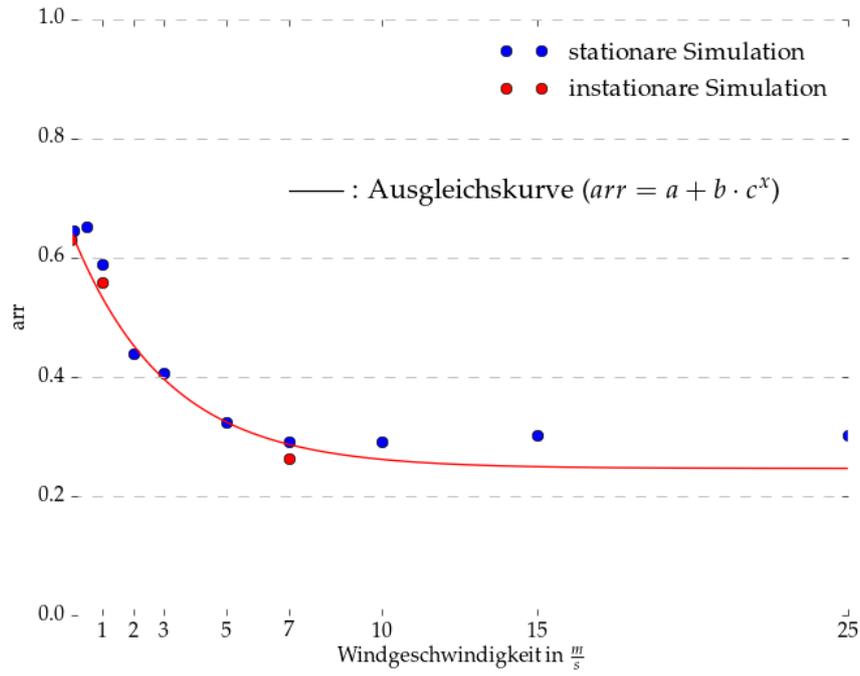


Abbildung 58: Rückföhrate über der Windgeschwindigkeit

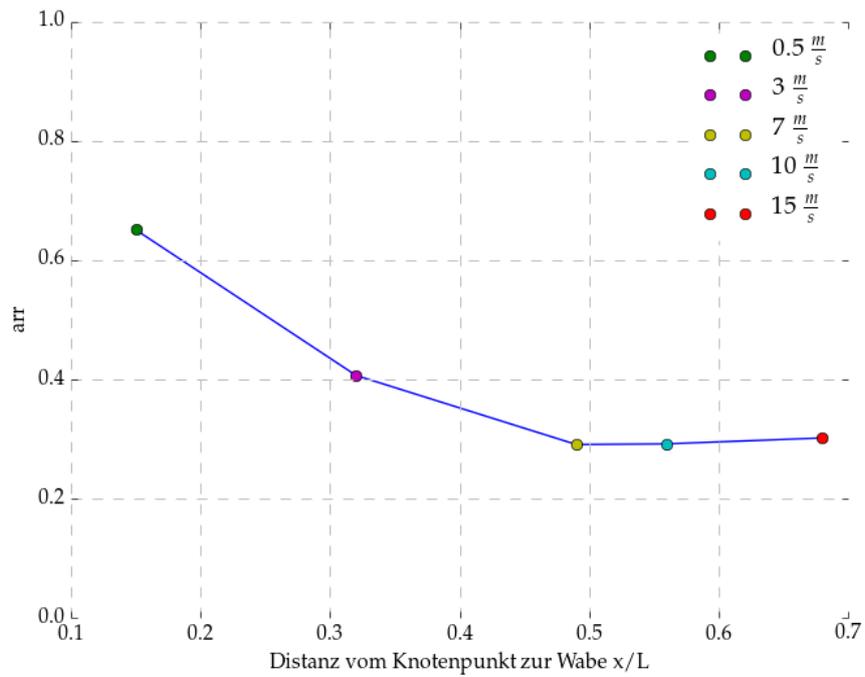


Abbildung 59: Rückföhrate über der Distanz des Knotenpunktes

## 5.7 Weitere Untersuchungen

Eine Änderung der Windgeschwindigkeit führt zu einer Änderung der Rückföhrtrate. Mit der Windgeschwindigkeit variiert ebenfalls die Reynolds-Zahl des Seitenwindes. Sie ist in Kapitel 5.1 definiert. Folgend werden Fälle mit unterschiedlicher Windgeschwindigkeit aber gleicher Reynolds-Zahl untersucht. Dazu wird die Geschwindigkeit und die Temperatur variiert. Es wird Bezug auf den Base Case mit  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und  $20^\circ\text{C}$  genommen, zu dem bereits Simulationsergebnisse vorliegen. Es werden Temperaturen für die Umgebungsluft von  $5^\circ\text{C}$  und  $35^\circ\text{C}$  gewählt. Die Temperaturabhängigkeit der kinematischen Viskosität führt zusammen mit der Restriktion einer konstanten Reynolds-Zahl zu den angepassten Geschwindigkeiten von  $6,370 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und  $7,647 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Die Simulationen sind stationär durchgeführt. Ebenso wird das Ergebnis der stationären Rechnung für den Base Case verwendet. Da, wie in Abbildung 25 zu sehen, das *arr* nach wenigen Iterationen zu einem stationären Wert tendiert, sind die Simulationen ausschließlich bis zu diesem Zeitpunkt iteriert.

Um die Warmluft-Temperatur kongruent zu wählen, wird der Temperaturunterschied zwischen der Warmluft und der Umgebungsluft konstant gehalten ( $T_{RA} - T_{amb} = \text{const.}$ ). Diese Differenz ist entscheidend, denn sie taucht in der Definition zur Ruckfohrrate auf. Zusätzlich ist sie bestimmend für die Auftrieb bzw. sie taucht auch in der Grashof-Zahl auf.

Das Ergebnis ist in Abbildung 60 zu sehen. Es ist die Ruckfohrrate über die Iterationsschritte aufgetragen. Auffällig ist, dass die Ruckfohrraten für die beiden verschiedenen Geschwindigkeiten gegen den Wert der Ruckfohrrate des Base Cases streben. Ebenso ist ein Fall eingezeichnet, der anstelle einer konstanten Temperaturdifferenz ein konstantes Temperaturverhältnis annimmt. Die Ruckfohrrate dieses Falles weicht klar ab. Für eine konstante Temperaturdifferenz und einer konstanten Reynolds-Zahl ist die Ruckfohrrate identisch. Abschließend bleibt zu bemerken, dass diese Untersuchung vor den Ergebnissen der anderen Fälle durchgeführt wurde. Im Nachhinein ist die Wahl von Fällen um  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  nicht optimal, da dort der Gradient der Ruckfohrrate klein ist.

Im nächsten Schritt gilt es, die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den ganzen Receiver abzuschätzen. Ist die Abschätzung erfolgt, kann im anschließenden Schritt nach Verbesserungsmaßnahmen gesucht werden.

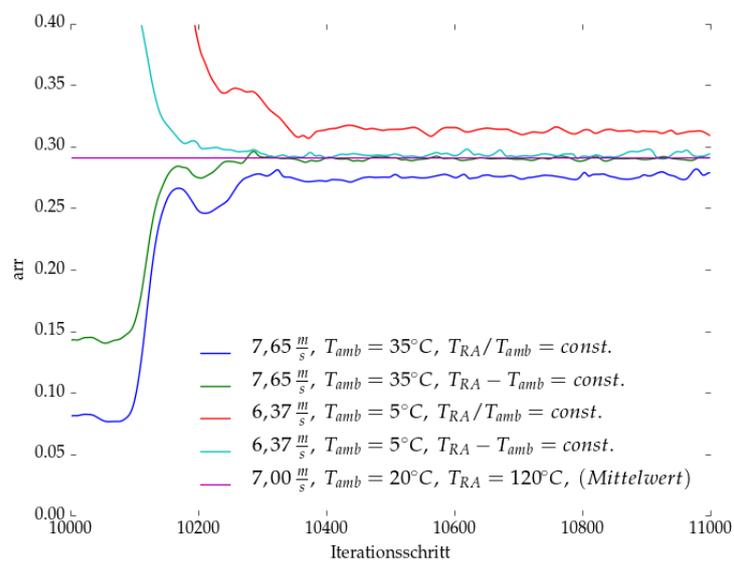


Abbildung 60: Reynoldsunabhängigkeit der Rückführrate

## 6 Übertragbarkeit auf den gesamten Receiver

Im vorherigen Kapitel sind die Ergebnisse zu den Simulationen mit einer Wabe diskutiert worden. Folgend soll die Fragestellung geklärt werden, was die gelieferten Ergebnisse für das Verhalten des ganzen Receivers bedeuten. Dazu soll der gegenseitige Einfluss benachbarter Waben untersucht werden. Die Ergebnisse dieses Kapitels sollen es ermöglichen, Vorschläge für Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. Es ist wichtig, die Übertragbarkeit vor den Verbesserungsvorschlägen zu prüfen um deren Erfolgswahrscheinlichkeit einschätzen zu können.

An dieser Stelle ist es ebenso wichtig festzuhalten, dass es aus Ressourcengründen nicht absehbar ist, den ganzen Receiver in 3D und der aktuellen Auflösung zu simulieren. Langfristig verfolgen die aktuellen Forschungen, von denen diese Arbeit einen Teil einnimmt, das Ziel, ein vereinfachtes Modell zu finden, welches das Verhalten der einzelnen Module abbildet um mit diesem Modell Parameterstudien für den gesamten Receiver durchzuführen.

Dennoch bleibt es immer interessant auch die jetzigen Ergebnisse auf die Übertragbarkeit zum ganzen Receiver zu prüfen. Das ermöglicht zielgerichtetes Forschen, denn genau diese Übertragbarkeit muss am Ende vom vereinfachten Modell gewährleistet sein.

Durch die folgenden Betrachtungen wird die Möglichkeit überprüft, eine fundierte Abschätzung des Einflusses von Seitenwind auf die konvektiven Verluste am gesamten Receiver zu treffen.

### 6.1 Methodik

Zuerst werden in Kapitel 6.1.1 verschiedene Ansätze erörtert. Schließlich wird dort die Einführung zum numerischen Modell gegeben, indem dessen Konzept und dessen globale Annahmen geschildert werden.

Folgend (Kapitel 6.1.2) wird das Modell im Detail beschrieben.

#### 6.1.1 Ansätze und Konzept des Modells

Prinzipiell soll die Übertragbarkeit untersucht werden, indem Wissen über die Interaktion mehrerer Module generiert wird. Die folgend aufgezeigten Ansätze liefern Zusammenhänge bezüglich der Interaktion mehrerer Waben. Damit geben sie indirekte oder direkte Aufschlüsse über die zu erwartenden Rückführraten.

#### XZ Ebenen

Bisher zeigen die Ergebnisse, dass der Wind hinter einem Modul abgebremst ist. Außerdem

steigt die Rückführtrate für fallende Windgeschwindigkeiten. Vermutlich steigt somit die Rückführtrate der Module, die, durch stromaufwärts liegende Module, vom Wind geschützt werden. Wie groß die schützende Wirkung ist, kann schon an den Ergebnissen von einem Modul beurteilt werden. Informationen liefert dazu der Vergleich der Geschwindigkeitsverteilungen in den XZ-Ebenen genau am stromaufwärts liegenden Beginn mit den am stromabwärts liegendem Ende des Spalts. So kann abgeschätzt werden, wie stark der Wind abgebremst wird.

Diese Methode ist nicht ausreichend um ein detailliertes Bild über die Interaktion der Module zu bekommen. Dennoch liefert sie eine Hilfestellung zur Abschätzung der Entwicklung des *arr* über mehrere Module. Da dieser Ansatz keinen neuen Simulationsaufwand erfordert, wird er verwendet. Weitere Methoden sollen weitere Erkenntnisse bringen.

### **Zweidimensionale Modulkette**

Eine weitere Möglichkeit die Interaktion mehrerer Module zu beurteilen, ist die Verkettung Vieler hinter einander. Um viele Module zu berechnen, ist ein zweidimensionaler Ansatz nötig. Zweidimensional könnte die Anzahl der Module, der eines realen Receivers entsprechen. Somit entstünde eine direkte Übertragbarkeit.

Das 2D-Modell benötigt eine repräsentative Ebene. Wie für die 3D-Simulation von einem Modul erklärt, ist diese nicht zu finden. Jede Ebene ist unterschiedlich. Dies ist auch in den Untersuchungen zum Verhalten der einzelnen Wabe deutlich geworden. Der Seitenwind ändert die Situation nicht. Die Rückführtrate ist maßgeblich durch die dreidimensionale Struktur des Moduls beeinflusst. Ein 2D-Modell kann die Rückführtrate nicht richtig ermitteln.

Ein Ansatz um dieses Problem zu beseitigen wäre es, nicht die Rückführtrate aus dem 2D-Modell zu entnehmen, sondern die Topologie. So könnte die 2D Topologie mit dem Mittelschnitt durch die Wabe verglichen werden. Falls diese übereinstimmen, könnte so basierend auf den bisherigen Ergebnissen, die Korrelation zwischen Topologie und Rückführtrate genutzt werden.

Auch diese Methode ist nicht umzusetzen. Erstens zeigen die bisherigen Ergebnisse nur eine deutliche Topologie in Ebenen Senkrecht zum Wind. Zweitens gibt es keinen Zusammenhang zwischen Topologie und Rückführtrate bei Modulen, die hinter anderen liegen. So könnte die Topologie identisch sein, die Rückführtrate aber höher, weil die Umgebungsluft mit der warmen Abluft von vorderen Modulen durchmischt ist. Drittens basiert dieser Ansatz auf der nicht verifizierten These, dass die Topologie direkt mit der Rückführtrate zusammenhängt.

Der Schritt zur Zweidimensionalität ist in dieser Arbeit nicht sinnvoll.

### **Multiple Module**

Die Methode der Wahl ist eine dreidimensionale Simulation mehrerer Module. Sie ermöglicht das Bestimmen von genauen Ergebnissen und das bessere Verständnis der Strömung durch

Schnittebenen Senkrecht zum Wind (XZ) sowie parallel zur Wabenvorderseite (YZ).

Die Ergebnisse in Kapitel 5 zeigen, dass über- und unterhalb des Moduls, die Strömung ab einer Windgeschwindigkeit von  $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  sehr homogen ist. Sie beeinflusst die Rückführrate nicht. Deswegen wird in diesem neuen Modell keine seitliche (oben und unten) Interaktion untersucht. Umgesetzt wird diese Methode, indem vier Module hinter einander positioniert werden. Rechenkapazitäten begrenzen die Anzahl der Module. Es werden vier gewählt. Zur Netzerstellung wird das bestehende Modell als Basis verwendet. Der Netzbereich um die Wabe wird dupliziert. Die äußeren Abmaße der Domain vergrößern sich so nur in Windrichtung (Y).

Da die Module oben und unten keine Nachbarn haben, findet sich auch diese Konstellation nicht in der Realität am Turm wieder. Wie schon bei der Betrachtung zur einzelnen Wabe, sind die parallel zum Wind liegenden Spalten möglicherweise durch die Umströmung der Waben beeinflusst. Dieser Einfluss wurde für das Modell mit einem Modul für weite Bereiche als marginal eingestuft. Dennoch muss dieser Aspekt in der Ergebnisanalyse erneut berücksichtigt werden, da das neue Modell in Windrichtung länger ist.

Von hervorgehobenem Interesse sind die Waben an zweiter und dritter Stelle. Sie befinden sich zwischen zwei anderen Waben und ähneln somit der Realität am ehesten. Dennoch ist die vierte Wabe interessant. Bisherige Ergebnisse des 1-Modul-Modell zeigen, dass die Rückwirkung von stromabwärts liegenden als sehr gering eingeschätzt werden kann.

Aus den vier Konzepten wurden zwei ausgewählt. Es wird zum einen untersucht wie stark der Wind durch ein Modul gebremst wird. Dazu werden XZ-Ebenen betrachtet. Zum anderen wird ein neues rechenintensives Modell mit vier Modulen erstellt. Damit sollen Erkenntnisse über die Interaktion mehrerer Module entstehen. Das Modul soll auf dem bisherigen Modell basieren und hat damit den wichtigen Vorteil, dass es sehr nah am validierten Modell bleibt. Es wird nicht erwartet, eine Aussage über den Verlauf der Rückführrate über deutlich mehr als vier Module treffen zu können. Dennoch bietet diese Herangehensweise eine gute Möglichkeit, um Abschätzungen zur Übertragbarkeit zu machen.

Als nächster Abschnitt dieser Arbeit folgt die Beschreibung des neuen numerischen Modells.

### 6.1.2 Numerische Modell

In diesem Unterkapitel wird kurz das verwendete Modell vorgestellt. Es beruht auf dem bereits genutzten Modell. Das Ein-Modul-Modell wird in drei Teile geteilt. Die Schnittebenen liegen in der XZ-Ebene, sprich sie befinden sich senkrecht zum Wind. Der erste Bereich entspricht dem Einlauf. Er grenzt an den äußeren Rand des Spalts. Der zweite Bereich startet mit dem stromaufwärts liegenden Rand des Spalts und endet mit dem stromabwärts liegenden. Der dritte Bereich ist der Austritt, welcher nach dem Ende des Spalts beginnt.

Zur Netzerzeugung wurde der dritte Teil in Richtung stromabwärts verschoben. Anschließend

wurden an die erste Wabe drei weitere angehängt. Somit ergibt sich ein analoges Modell mit vier anstatt einer Wabe.

Die Domain Abmessungen sind nur in Windrichtung gestiegen und zwar genau um die Länge der drei hinzugefügten Module. Eine erste Untersuchung galt den Abmessungen der Domain. So wurde betrachtet, ob die Domain groß genug ist. Es muss davon auszugehen sein, dass die Randbedingung an diesen Grenzen die Rückführrate nicht beeinflussen. Dazu ist das Temperaturprofil im XZ Schnitt am Austritt der Domain in Abbildung 61 gezeigt.

Zu sehen ist das Ergebnis bei einem schwachen Wind ( $1 \frac{m}{s}$ ). Deutlich ist, dass die warme Luft noch weit von der Domaingrenze entfernt ist. Für die anderen Fälle sind höhere Windgeschwindigkeiten vorgesehen, sodass die warme Luft noch weiter von der Domaingrenze entfernt bleiben wird.

### Randbedingungen

Alle Randbedingungen wurden analog übernommen. Interessant ist der Umgang mit den Randbedingungen an den Symmetrieebenen des Spalts, sowie an der Warmlufteintrittsfläche. Zwei nebeneinander liegenden Module erzeugen zwischen ihnen einen kompletten Spalt. Bisher war stets ein halber Spalt betrachtet. Dieser halbe Spalt tritt weiter an den Rändern der vier Module auf, nicht aber zwischen den einzelnen Modulen. Dort wird die bisher Symmetrie erzeugende Randbedingung (eine Wand ohne Haftreibungsbedingung) überflüssig. Theoretisch kann diese Grenze entfernt werden. Sie liegt senkrecht zum Seitenwind und würde diesen bremsen und unnatürlich beeinflussen. Wird sie jedoch entfernt, kommt es zu numerischen Schwierigkeiten. Das Modell wird instabil.

Diese Instabilität liegt am Umgang mit den Einritten der Warmluft. Die einzelnen Ringspalte sind nicht zusammengefasst. Jeder Spalt passt das Geschwindigkeitsfeld und das Druckfeld so an, dass der gewählte Massenstrom in die Domain eintritt. Dies führt zu einer numerischen Instabilität an den Zellen aneinander grenzender Spalte von zwei Modulen, sofern die trennende Ebene entfernt wird. Es ist gewünscht, den Massenstrom für die Module einzeln einzustellen. Dies ermöglicht eine flexible Nutzung des Modells. Angedachte Konzepte, in denen der Massenstrom pro Modul geregelt wird, können so untersucht werden. Außerdem kann so explizit ermittelt werden wie sich die Warmluft der einzelnen Module aufteilt. Mit Hilfe eines passiven Skalars kann so bestimmt werden, von welchem Modul die in ein anderes Modul eintretende Warmluft kommt.

Um diesen Nutzen zu erhalten und gleichzeitig den Wind nicht unnatürlich zu beeinflussen, wird die trennende Ebene nur für einen Bereich nahe dem Warmlufteintritt beibehalten. Der Wind wird unbeeinflusst von dieser Bedingung bleiben. Das numerische Modell ist in dieser Version stabil und flexibel für weiter Untersuchungen.

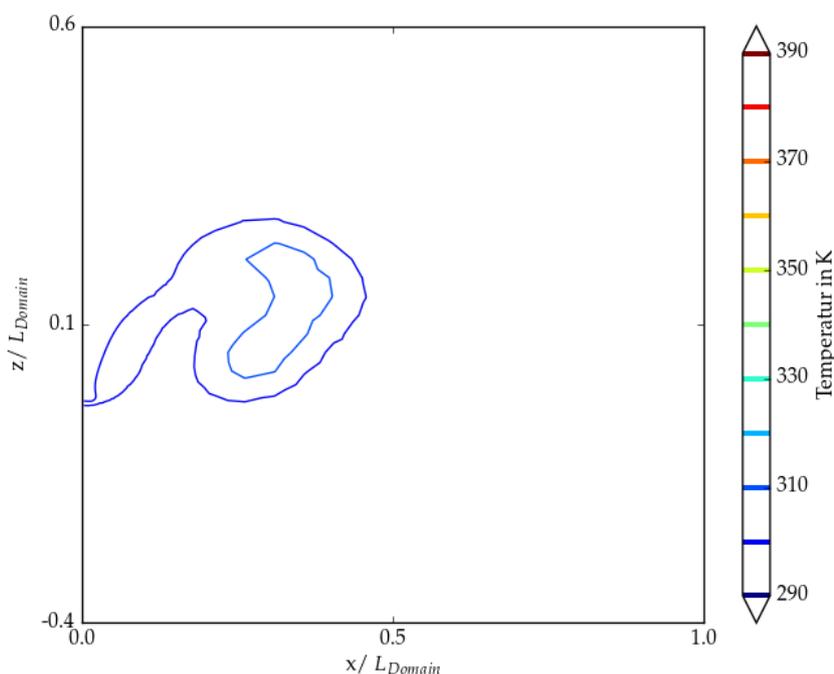


Abbildung 61: Temperaturverteilung, XZ Ebene, Austritt aus Domain, 4 Module,  $1 \frac{m}{s}$

## 6.2 Ergebnisse

Dieses Kapitel zeigt die Ergebnisse zur Abschätzung der Übertragbarkeit. Zuerst wird definiert wie die Rückführrate berechnet wurde (Kapitel 6.2.1). Dann sind die betrachteten Fälle aufgeführt (Kapitel 6.2.2). Anschließend wird in Kapitel 6.2.3, in einem ersten Schritt die Strömung beschrieben, sodass ein Verständnis für die Interaktion entsteht. Mit diesem Wissen kann ein zweiter Schritt in Richtung Beurteilung zur Übertragbarkeit getan werden. Er erfolgt über die Betrachtung der XZ-Ebenen in Kapitel 6.2.4. Abgeschlossen werden die Ergebnisse mit Betrachtungen zur Rückführrate (Kapitel 6.2.5).

### 6.2.1 Berechnung der Rückführrate

Die bisher gegebene Methode um die Rückführrate zu bestimmen, ist ebenfalls für mehrere Module geeignet. Dennoch gibt sie keine Auskunft darüber, woher die jeweilige Warmluft in der jeweiligen Wabe kommt. So kann Warmluft aus dem Spalt des ersten Moduls in spätere Module eintreten. Über die bisherige, energetische Betrachtung wird dieses Verhalten nicht erfasst.

Es wird erwartet, dass die Rückführrate stromabwärts ansteigt. Das liegt zum einen am geschwächten Seitenwind und zum anderen an der mit Warmluft durchsetzten Umgebungsluft. Um zu klären, welcher dieser Anteile einflussreicher ist, wird eine neue Methode zur Berech-

nung des *arr* eingeführt (Gleichung 41).

Mit der Konvektions-Diffusions-Gleichung kann der Transport von Fluidpartikeln beschrieben werden. Diese zusätzliche partielle Differentialgleichung muss dafür ebenfalls in der gesamten Domain gelöst werden.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D\nabla c) - \nabla \cdot (uc) + R \quad (41)$$

Die betrachtete Größe ist  $c$  und  $D$  der Diffusionskoeffizient. Das Geschwindigkeitsfeld ist  $u$  und  $R$  ist ein Reaktionsterm, welcher in der vorliegenden Anwendung nicht auftritt. Die Schmidt Zahl  $Sc$  beschreibt das Verhältnis zwischen kinematischer Viskosität und dem Diffusionskoeffizienten. Sie ist, wie üblich bei Gasen, zu eins gewählt.

Mit diesem Verfahren wird, bildlich gesprochen, in jedem Spalt eine Farbe der Warmluft zugemischt. Über die Farbzusammensetzung im Austritt der Module lässt sich die Herkunft der Warmluft feststellen. Dies wird realisiert, indem die Konzentration für die vier eingeführten passiven Skalare entsprechend gesetzt wird. So ist die Konzentration jeweils im Spalteinlass eins und im Rest der Domain Null. Über die Konzentration am Modulaustritt „outlet“ wird der gegenseitige Einfluss quantifiziert. Es ist zu beachten, dass die Partikel eine Zeit brauchen um von Einlass von Modul 1 bis zum Auslass des letzten Moduls zu gelangen. Erst nach einer gewissen simulierten Zeit stellt sich ein stationäres Verhältnis ein.

### 6.2.2 Simulationsparameter

Die betrachteten Simulationen sind in Tabelle 6 aufgeführt. Alle Fälle sind sowohl stationär als auch instationär gerechnet, wobei die simulierte Zeit eher gering ist, was am hohen Rechenaufwand liegt. Die simulierte Zeit ist ebenfalls in die Tabelle aufgenommen. Die Methode des passiven Skalars wurde jeweils erst nach etwas simulierter Zeit angewandt.

Windgeschwindigkeit [ $\frac{m}{s}$ ]	1	2	7	25
Stationär	✓	✓	✓	✓
Instationär	✓	✓	✓	✓
Reynolds-Zahl [-1000]	9	18	63	225
Simulierte Zeit [Sek.]	0,6	1,4	2,2	1,0
Startpunkt passiver Skalar [Sek.]	-	0,8	1,3	0,5

Tabelle 6: Simulationsparameter 4 Module

### 6.2.3 Interaktion mehrerer Waben

Um die Interaktion zu beschreiben, werden zuerst Abbildungen angeführt, welche die Temperatur vor den Waben darstellen. Anschließend soll mit Hilfe von Geschwindigkeitsplots unter anderem die bisher auftretende Topologie untersucht werden.

Zuerst ist ein XY Plot des Base Cases in Abbildung 62 zu sehen. Die XY Plots sind so dargestellt, dass kurze schwarze Striche an der Ordinate die Position der Waben andeuten. Zusehen ist, dass das erste Modul ein nahezu identisches Verhalten zum 1-Modul-Modell zeigt. Die Warmluft des ersten Spalts wird in etwas mehr als der Hälfte der Wabe wieder eingesaugt. Es entsteht ein Bereich, indem kalte Umgebungsluft in die Wabe eintritt. Für die zweite Wabe verschwindet dieser. Der Spalt von der zweiten Wabe ist doppelt so breit wie der halbe Spalt vor der Ersten. Nicht die gesamte Warmluft wird erneut in die Wabe eintreten können. Dies ändert sich zur dritten Wabe. Dort kann die gesamte Warmluft des Spalts zwischen Modul 2 und 3 wieder eintreten. Das liegt an der bis dahin deutlich verminderten Windgeschwindigkeit. Schon die Ergebnisse aus Kapitel 4 zeigen, dass bei schwächerem Wind die Warmluft bereits vor der Hälfte der Wabe eingesaugt ist. Bei der letzten Wabe ist dieses Verhalten nicht mehr eindeutig zu klären. Die Luft aus den oberen und unteren Spalten durchmischt sich in der Mitte der Wabe und bildet einen Warmluftschwall vor der Wabe.

Die Durchmischung von oben und unten austretender Warmluft ist gut in der YZ Ebene zu sehen (Abbildung 63). Der Einflussbereich der oberen und unteren Spalte steigt kontinuierlich an. In dieser gezeigten Ebene tritt bereits vor dem vierten Modul keine Fläche mit Umgebungstemperatur mehr auf. Der Bereich eintretender, kalter Umgebungsluft variiert nicht nur, wie beschrieben stromabwärts, sondern stark mit der Höhenkoordinate  $z$ . In äußeren Bereichen ist die Durchmischung bereits im Bereich des zweiten Moduls deutlich. Dies ist in den XZ Ebenen zu erkennen.

Eine dieser XZ Ebenen ist in Abbildung 64 zu sehen. Es ist ein Schnitt durch die Mitte des dritten Moduls. Nur der gezeigte und genau mittig liegende XY Schnitt (Abbildung 62) zeigt an dieser Stelle noch keine Durchmischung von Warmluft mit der Umgebungsluft.

Um das stetige Anwachsen der beiden ovalen Bereiche zu zeigen, ist Abbildung 65 gezeigt. Zu sehen ist der XY Schnitt an der Oberkante des oberen Spalts. Kurz hinter dem vierten Modul erreicht der Bereich der mit Warmluft durchmischter Umgebungsluft fast die Marke von  $1x/L$ . Wie erwartet wächst dieser Bereich mit fallender Windgeschwindigkeit und schrumpft analog mit steigender.

Nun soll der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Temperaturverteilung besprochen werden. Interessant ist, wie der Unterschied von Modul zu Modul mit steigender Geschwindigkeit abnimmt. Dazu sind die zwei Abbildungen 66 und 67 aufgezeigt. Sie zeigen den  $25 \frac{m}{s}$  Fall. Unabhängig von den Unterschieden zum Base Case, welche analog zum Fall mit einem Modul sind, ändert sich die Strömung stromabwärts kaum. Diese nicht vorhandene Änderung ist sehr bedeutend hinsichtlich der Übertragung der Ergebnisse auf noch mehr Module.

Das Verhalten bei schwächerem Wind ( $1 \frac{m}{s}$ ) zeigen die Abbildungen 68 und 69. Zuerst ist

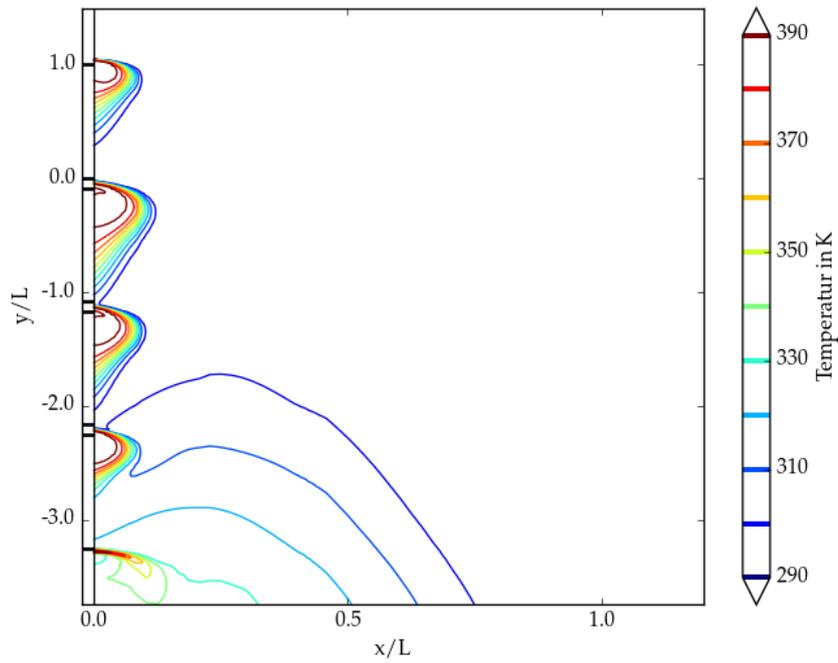


Abbildung 62: Temperaturverteilung, XY Ebene, Base Case, 4 Module, Mitte Modul

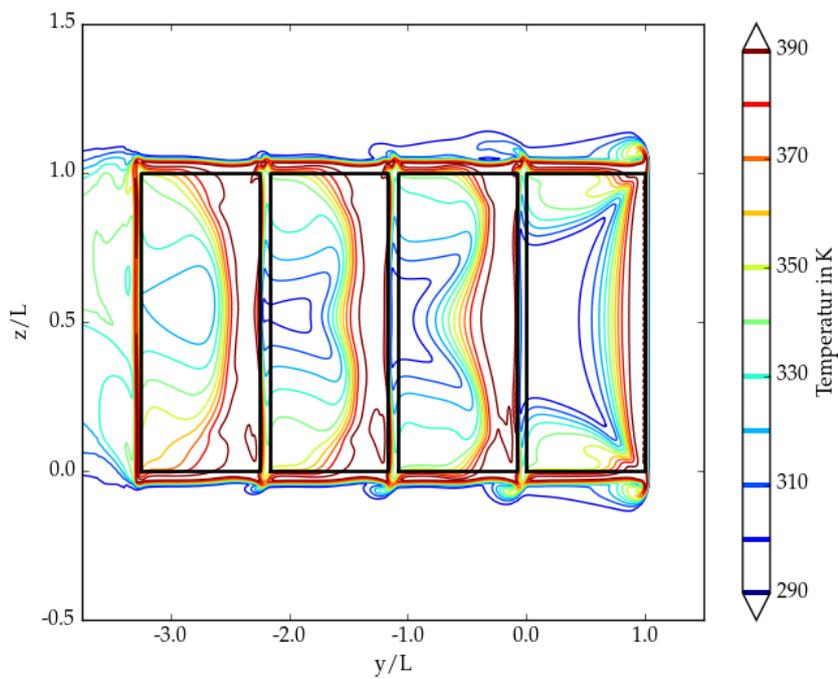


Abbildung 63: Temperaturverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe  $0,004 x/L$ , 4 Module, Base Case

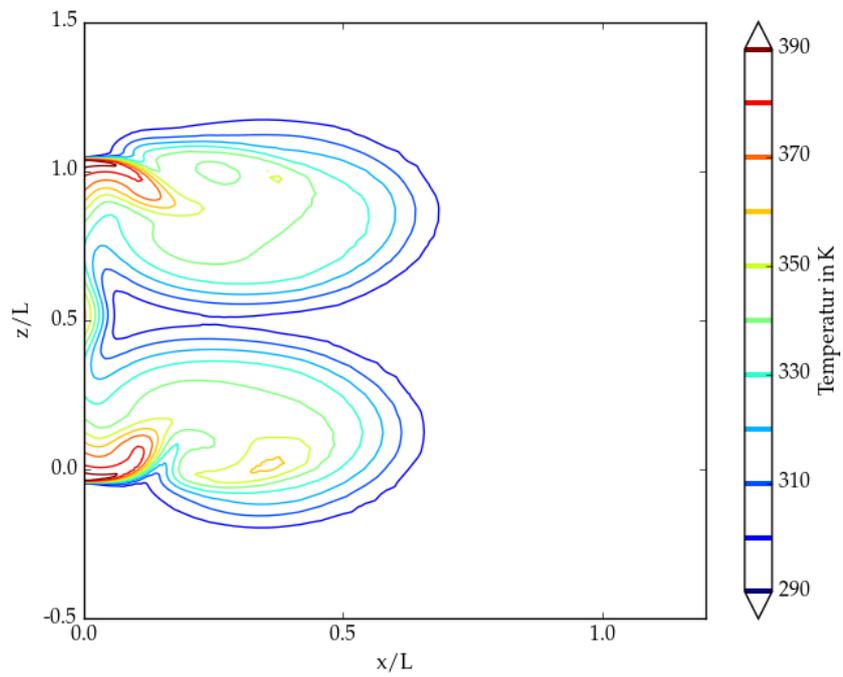


Abbildung 64: Temperaturverteilung, XZ Ebene, Base Case, 4 Module, Mitte Modul 3

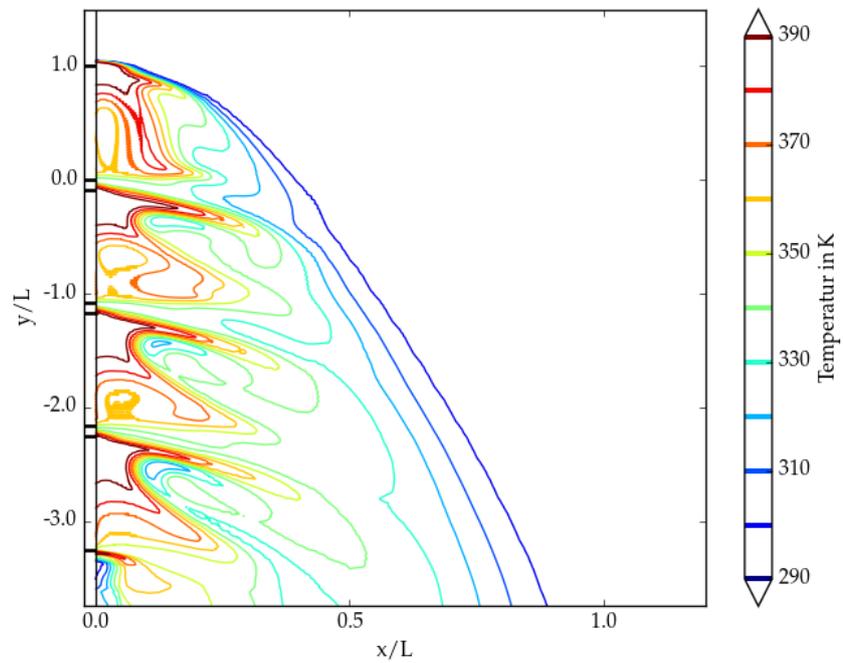


Abbildung 65: Temperaturverteilung, XY Ebene, Base Case, 4 Module, Oberkante Spalt

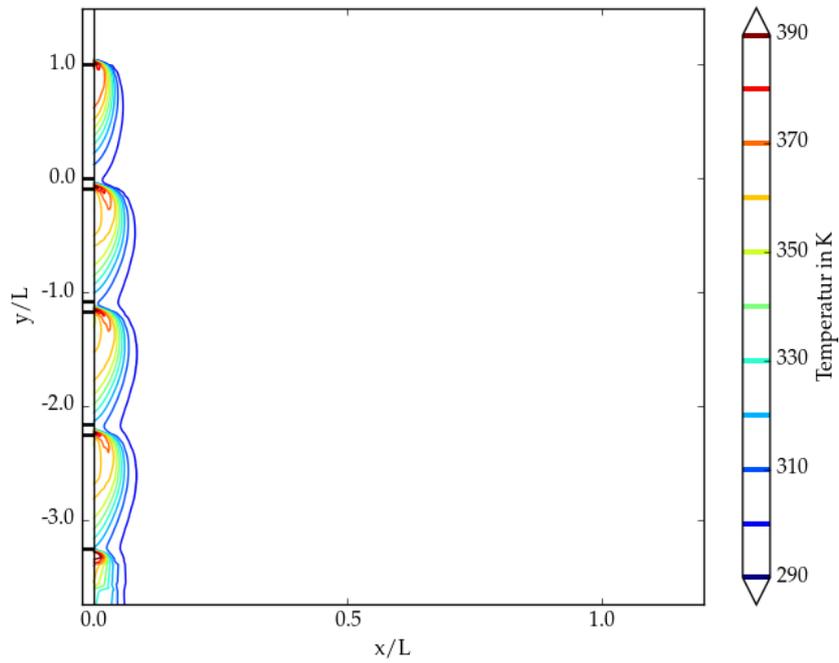


Abbildung 66: Temperaturverteilung, XY Ebene,  $25 \frac{m}{s}$ , 4 Module, Mitte Modul

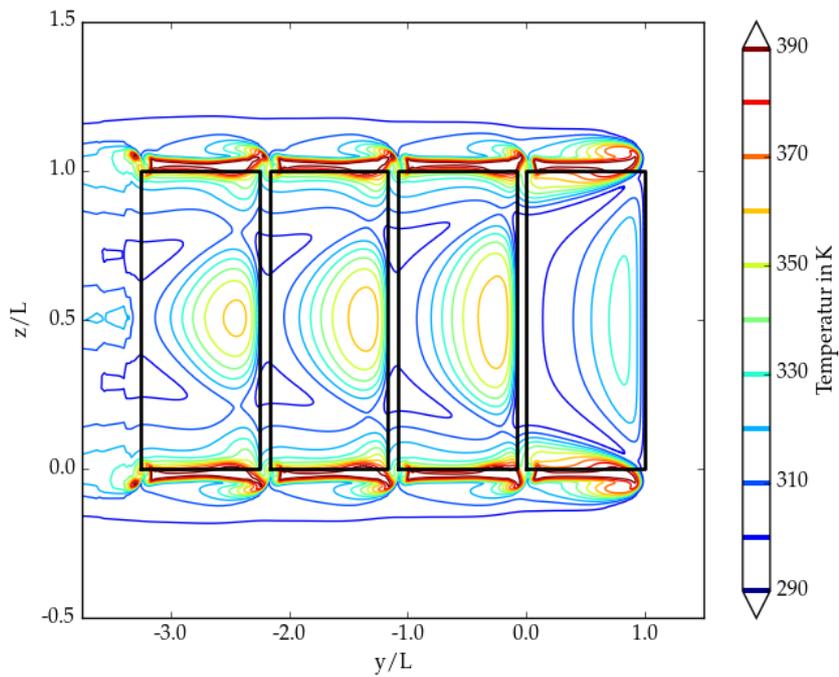


Abbildung 67: Temperaturverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe  $0,004 x/L$ , 4 Module,  $25 \frac{m}{s}$

die XZ Ebene der Mitte des dritten Moduls zu sehen. Auffallend ist ein über 370 K heißer Bereich nahe und mittig vor der Wabe. Die Luft mit diesem Abstand zur Wabe wird zumindest teilweise in diese oder die nächste Wabe eintreten. Der heiße Bereich entsteht durch die zuvor liegenden Module. Bemerkenswert ist der großflächige Abschnitt, der pilzförmig ist und weit von der Wabe entfernt liegt. Die sich dort befindende Luft wird nicht wieder in ein Modul eintreten. Das große Volumen von durchmischter Luft, was dadurch entsteht, ist in der YZ Ebene abzuschätzen (Abbildung 69). Bei einer Distanz von  $1x/L$  ist bei stärkeren Winden keine Temperaturdifferenz zur Umgebung vorhanden.

Nach den Temperaturplots werden folgend die Geschwindigkeitsfelder betrachtet. Zuerst ist ein XY Schnitt für den  $1 \frac{m}{s}$  Fall zu sehen (Abbildung 70). Jeweils gut zu erkennen sind die Umlenkungen der vor einem Modul liegenden Spalte. Sie bilden einen großen Teil der zurückgeführten Luft. Ebenso gut zu erkennen ist der Punkt, an dem die Warmluft der oberen und unteren Spalte in die mittlere XY Ebene eintritt. Dieser Punkt liegt noch vor der Mitte der ersten Wabe. Es ist eine rapide Änderung der Strömungsrichtung zu sehen. Diese Luft trägt viel Wärmenergie (siehe Kapitel Abbildung 47), welche durch ihr Davonströmen verloren geht. Diese deutliche Bewegung weg von den Modulen ist stromabwärts nicht mehr zu erkennen. Hinter der 1. Wabe entsteht somit ein großer Bereich warmer durchmischter Luft. Diese warme Luft sollte dazu beitragen das *arr* der folgenden Waben zu erhöhen.

Die XZ Geschwindigkeitsplots gleichen denen des Modells mit nur einem Modul. Es bildet sich die selbe Topographie auch in den hinteren Waben. Die Bewegung des Sattelpunktes stromabwärts ist nicht aus allen Simulationen zu lesen. Deutlich ist eine Bewegung von der Wabe weg bei den Fällen  $7 \frac{m}{s}$  und  $25 \frac{m}{s}$ .

Abbildung 71 zeigt den Base Case in der YZ Ebene. Die Geschwindigkeitsverteilung sehr nahe an der Wabe sieht insgesamt homogen aus. Das gibt die Erwartungen nach den Simulationen aus dem Kapitel 5 wieder. Wichtig für die Übertragbarkeit ist, dass über allen Waben eine Veränderung stattfindet. Der Einfluss des Windes variiert noch.

Der  $25 \frac{m}{s}$  Fall ist in Abbildung 71 dargestellt. Er ist deutlich homogener. Auch das gibt das Ergebnis von einem Modul wieder. Außerdem sind kaum Unterschiede zwischen den Waben vorhanden. Eine Änderung des *arr* noch weiter stromabwärts wird nicht erwartet. Diese Erwartung ist eine wichtige Erkenntnis für die Übertragbarkeit der bisherigen Ergebnisse.

Der Base Case und der  $25 \frac{m}{s}$  Fall haben gemeinsam, dass ähnlich zum 1-Modul-Fall die ober- und unterhalb vom Modul auftretenden Winde parallel zu der Wabenreihe strömen. Sie beeinflusst die Rückführrate nicht.

Bei schwächeren Winden ist ein deutlicher Unterschied festzustellen. Wie in Abbildung 72 zu sehen, gibt es einen Wind von oben und von unten auf die Waben. Dieser Wind beeinflusst sicher die Strömung vor dem Modul. Dennoch bleibt zu sagen, dass der Einfluss nicht überschätzt werden darf, da die Geschwindigkeit in diesen Bereich gering ist. Weiterhin bemerkenswert ist, dass die Strömung innerhalb der Wabenkontur andeutenden Kästen, ähnlich

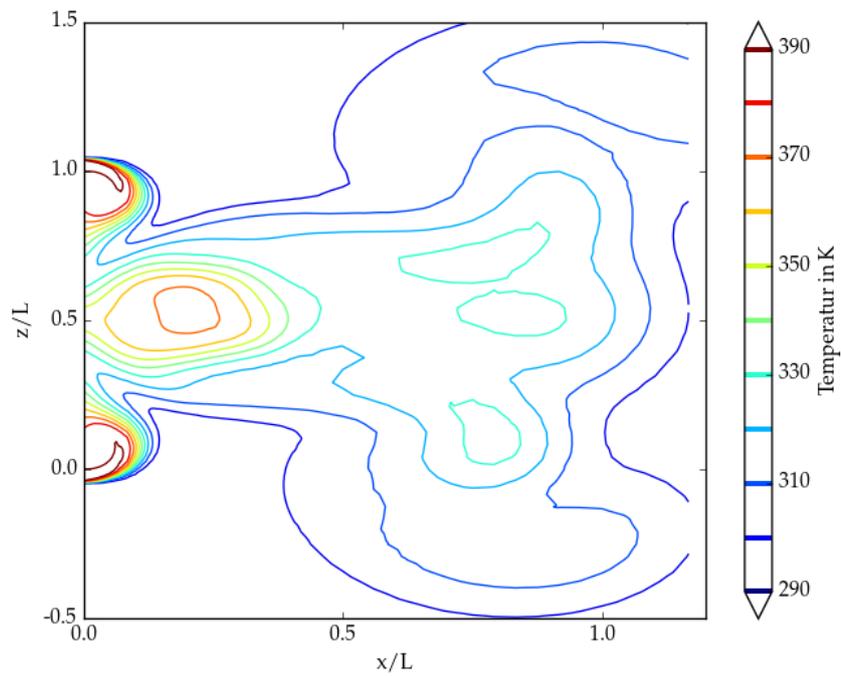


Abbildung 68: Temperaturverteilung, XZ Ebene,  $1 \frac{m}{s}$ , 4 Module, Mitte Modul 3

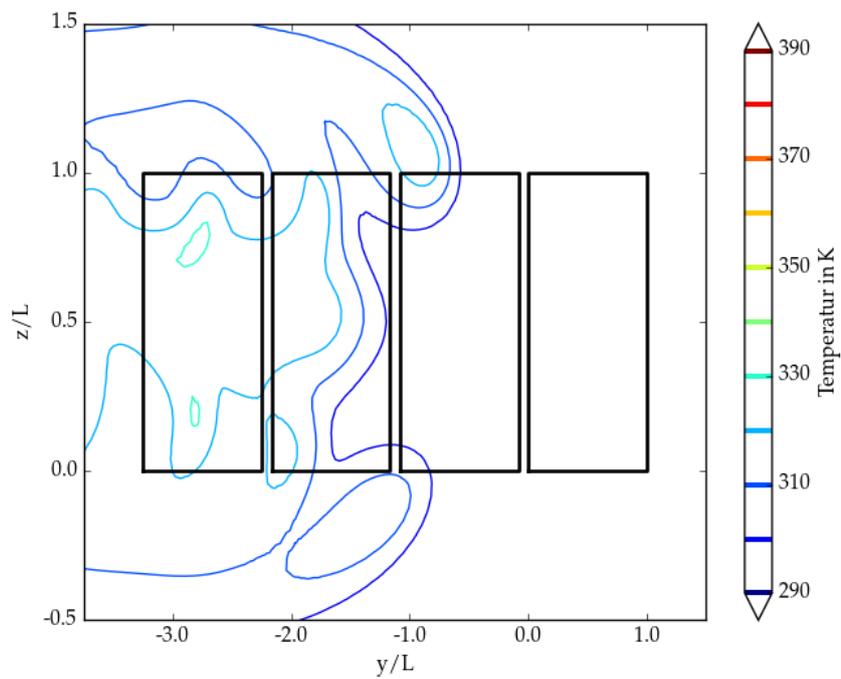


Abbildung 69: Temperaturverteilung, YZ Ebene, Distanz zur Wabe  $1 \frac{x}{L}$ , 4 Module,  $1 \frac{m}{s}$

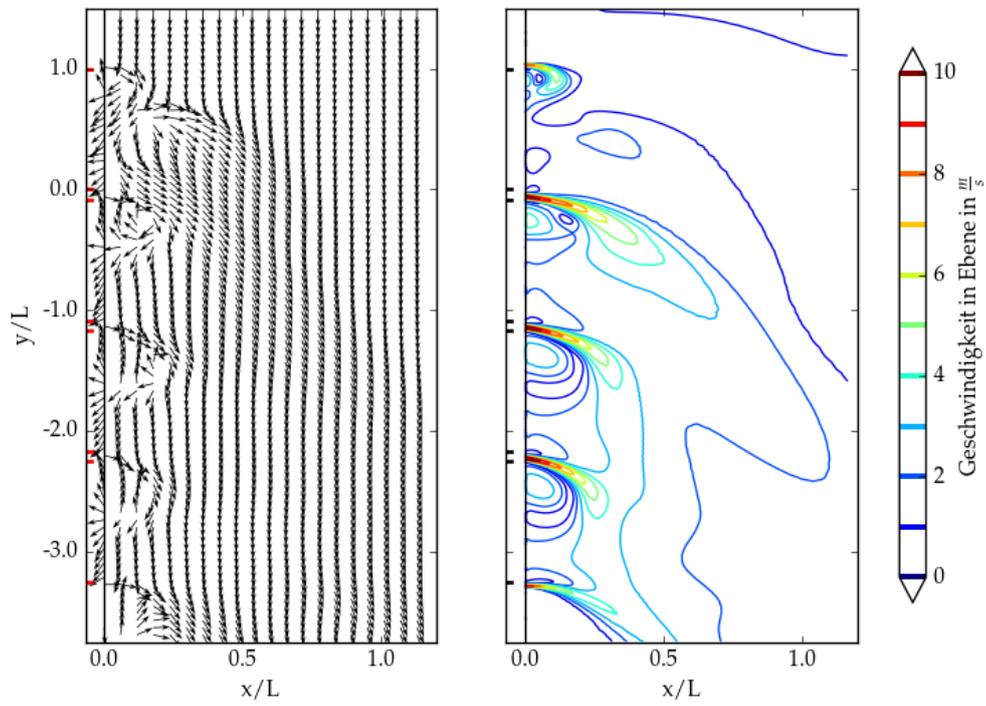


Abbildung 70: Geschwindigkeitsfeld, XY Ebene, 4 Module, Mitte Module,  $1 \frac{m}{s}$

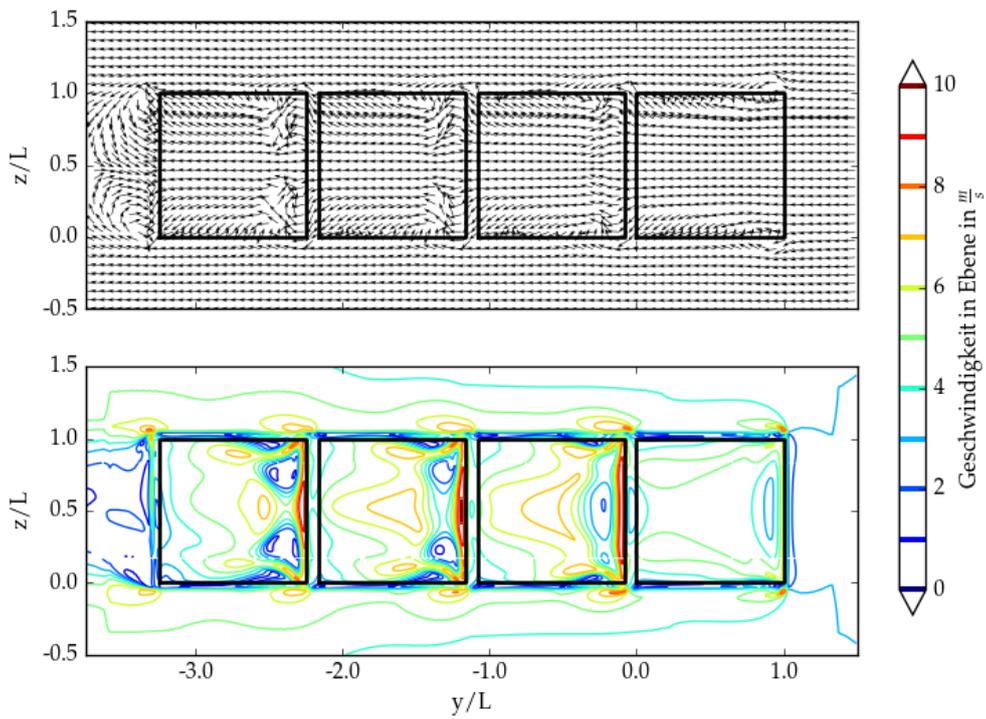


Abbildung 71: Geschwindigkeitsfeld, YZ Ebene, 4 Module, Distanz zur Wabe  $0,004 x/L$ , Base Case

zum Fall aus Kapitel 5 ist. Dennoch wird hier ein Aspekt viel deutlicher. Die Position des Sattelpunktes beeinflusst die Topologie. Er ist bei schwachem Wind deutlich näher an der Wabe. Dadurch sind die Konturlinien vom Spalt zum Sattelpunkt zu erahnen. Sie bilden ein Gewölbe von den oberen und unteren Spalten über die Wabe. Beim Formen dieses Gewölbes wird die Warmluft vom Wind weiter getragen. Zuletzt zeigt dieses Bild ebenfalls, dass die Lage des Sattelpunktes entlang der Strömung variiert. Oberhalb dieses Sattelpunktes unterscheidet sich die Topologie deutlich. Dieser Wandel ist auch in der gezeigten Abbildung zu erkennen. Es ist ein Sattelpunkt auch in der gezeigten YZ Ebene zu sehen. Vor diesem Punkt gehen Stromlinien zu den vorderen Ecken und zu der Mitte der stromabwärts liegenden Kante.

#### 6.2.4 XZ Ebenen am Spalt

Ein abgebremster Wind führt, nach den bisherigen Ergebnissen zu einer Steigerung des  $arr$ . Ebenso kann die Durchmischung der nicht wieder eintretenden Warmluft mit der Umgebung zu einem stromabwärts erhöhtes  $arr$  führen, denn die Umgebungsluft für die folgenden Module erwärmt sich dadurch. Das führt zu einer Steigerung des  $arr$ . Dieses Kapitel soll helfen, zu beurteilen inwiefern sich der Wind über die Module abschwächt. Dadurch kann unterschieden werden was der Hauptgrund für eine Änderung des  $arr$  ist.

Dazu sollen die Geschwindigkeiten jeweils vor und nach Modulen verglichen werden. Interessant ist in dieser Hinsicht die normal zur XZ Ebene auftretende Geschwindigkeit  $u_y$ . Es ist die in Windrichtung strömende Luft. Die folgend gezeigten Schnittebenen liegen immer in der Symmetrieebene der Spalte. Das heißt, bei zwei nebeneinander liegenden Modulen ist diese Ebene in der Mitte. Beim Modell mit nur einer Wabe ist mit dieser Ebene das Ende des „halben“ Spalts gemeint.

Das Kapitel ist so aufgebaut, dass zunächst der Vergleich der Ebenen vor und nach dem ersten Modul getätigt wird. Anschließend wird die Entwicklung über die Waben aufgezeigt. Sie wird abgeschlossen durch eine Betrachtung der Situation hinter dem vierten Modul.

##### Hinter dem ersten Modul

Der Vergleich der Strömung in der normal zur XZ Ebene vor und nach dem ersten Modul kann sowohl mit dem 4-Module-Modell aus auch mit dem 1-Modul-Modell erfolgen. Unterschiede geben Rückschlüsse auf die Auswirkung stromabwärts liegender Module. Dadurch können auch Ergebnisse zum vierten und damit letzten Modul besser eingeordnet werden.

Vor dem Modul ist die Strömung homogen und entspricht dem an der Randbedingung aufprägtem Wind (Abbildung 73). Lediglich die ausströmende Warmluft ändert dies in einem kleinen Bereich. Die Strömung nach dem ersten Modul des Base Cases im 4-Module-Modell ist in Abbildung 74 zu sehen. Sie ist identisch mit der des 1-Modul-Modells. Dies gilt auch für

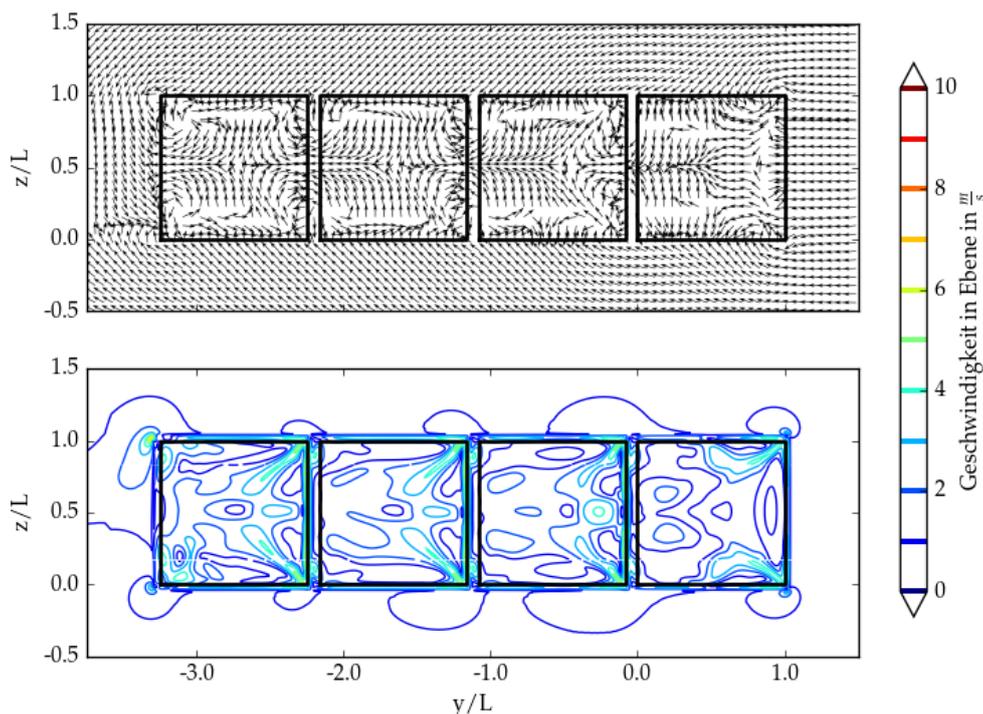


Abbildung 72: Geschwindigkeitsfeld, YZ Ebene, 4 Module, Distanz zur Wabe  $0,004 x/L$ ,  $1 \frac{m}{s}$

die höhere Windgeschwindigkeit von  $25 \frac{m}{s}$ . Es treten keine dem Wind entgegen wehende Strömungen auf. Die Strömung ist durch den Auftrieb leicht asymmetrisch. Der große Unterschied liegt in der Abbremsung des Windes durch die parallel zum Wind liegenden Spalte. Der erste quer zum Wind liegenden Spalt bremst den Wind kaum ab. Deutlich zu sehen ist, dass der abgebremste Bereich nicht symmetrisch um die Spalte liegt, sondern zur Wabenmitte geneigt ist. Die reduzierte Geschwindigkeit, die so auf das nächste Modul trifft, wird sich positiv auf die Rückführrate dieses Moduls auswirken.

Deutliche Unterschiede der beiden Modelle sind bei den Windgeschwindigkeiten  $1 \frac{m}{s}$  und  $2 \frac{m}{s}$  festzustellen. Es wird der letztere Fall gezeigt. Zunächst ist in Abbildung 75 das große Modell dargestellt. Es gibt wieder zwei Bereiche die stark durch die oberen und unteren Spalte abgebremst werden. Hinzukommt eine Überlagerung mit einer Reduktion der Windgeschwindigkeit durch den vorderen Spalt. Sie zeigt sich breit und homogen über die Wabenhöhe. Diese Überlagerung verlangsamt den Wind in diesem Bereich so stark, dass es sogar zu Rückströmungen kommt. In zwei Bereichen ist die Geschwindigkeit leicht negativ. Das bedeutet, dass sich Warmluft vom hinteren Spalt in Richtung des ersten Moduls bewegt.

Das 1-Modul-Modell zeigt ein anderes Verhalten. Unterschiedlich zu den Fällen mit mittlerem bis starkem Wind ist hier der Wind insgesamt so abgebremst, dass die Sogwirkungen der Waben deutlich an Einfluss gewinnen. Befindet sich keine weitere Wabe hinter dem ersten Modul, ist die Rückströmung deutlich größer. Das ist in Abbildung 76 verbildlicht.

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass bereits nach einer Wabe eine Reduktion der Windgeschwindigkeit auftritt. Je schwächer der Wind, desto umfassender ist diese Reduktion. Bei mittlerem bis starkem Wind beschränkt sich die Reduktion auf Bereiche nahe der oberen und

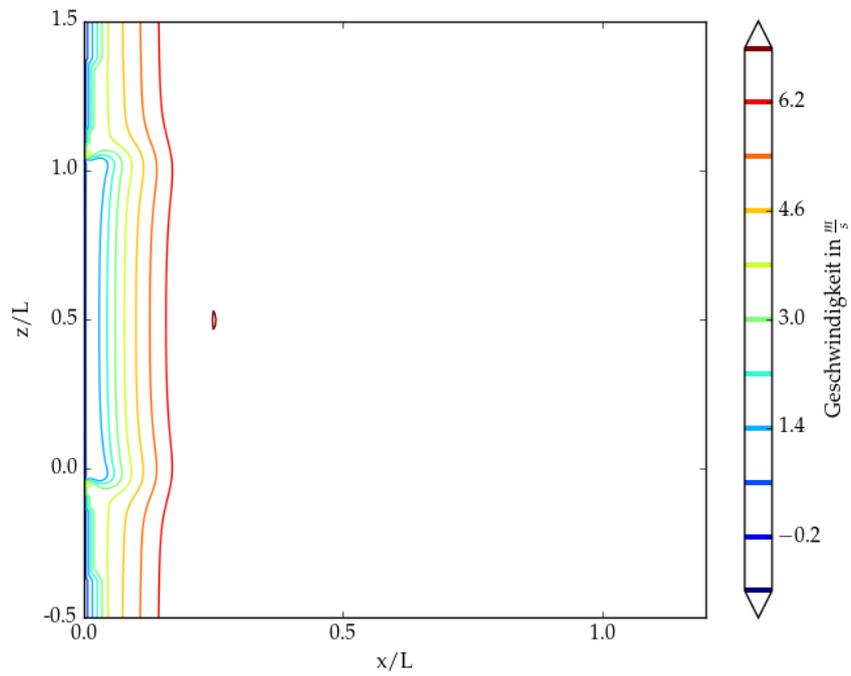


Abbildung 73: Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene, Base Case, 4 Module, vor Modul 1

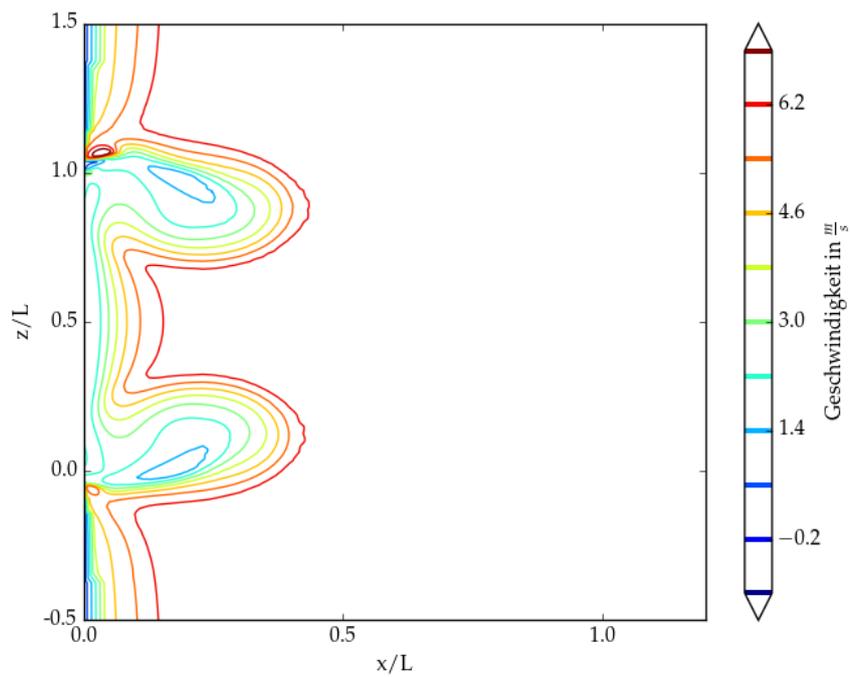


Abbildung 74: Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene, Base Case, 4 Module, hinter Modul 1

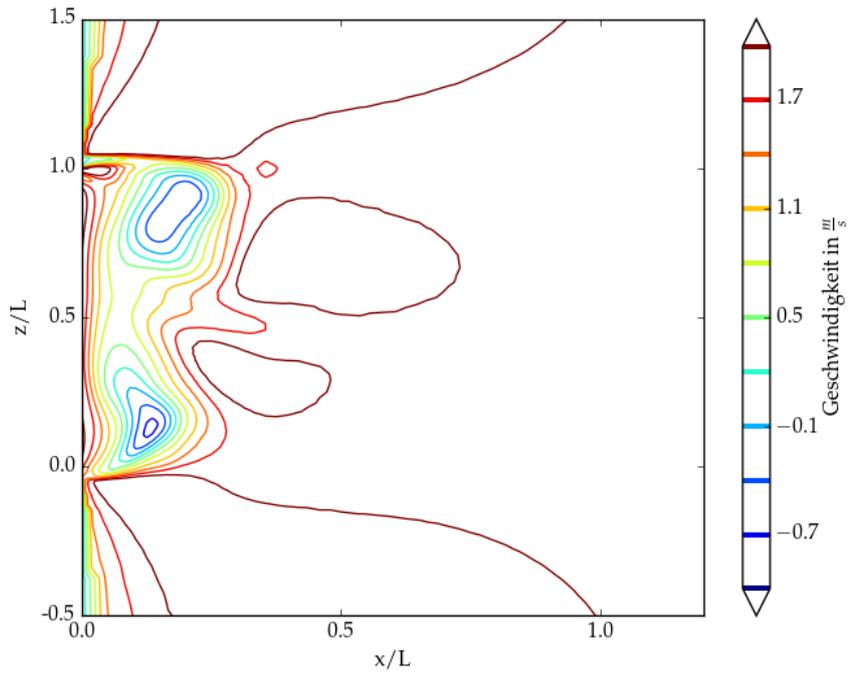


Abbildung 75: Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene,  $2 \frac{m}{s}$ , 4 Module, hinter Modul 1

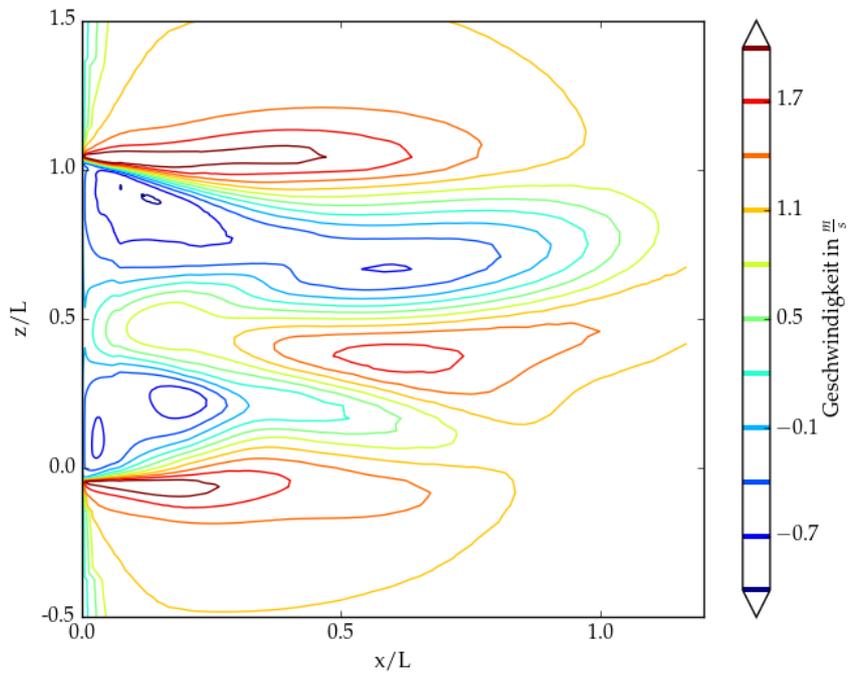


Abbildung 76: Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene,  $2 \frac{m}{s}$ , 1 Modul, hinter Modul

unteren Spalte. Durch die Reduktion der Windgeschwindigkeit sollte die Rückführrate des nächsten Moduls steigen.

### Entwicklung über die Module

Als nächstes wird die Entwicklung des zuvor beschriebenen Verhaltens entlang der vier Waben gezeigt. Es wird untersucht, inwiefern sich die Reduktion der Windgeschwindigkeit fortsetzt. Dazu wird die Ebene hinter der dritten Wabe betrachtet, denn stromabwärts der Vierten befindet sich kein weiteres Modul.

Für den Base Case ist ein stetiges Wachsen der verlangsamteten Fläche zu erkennen (Abbildung 77). Es ist zu sehen, wie die zwei Bereiche gewachsen und in der Mitte verbunden sind. Auf das vierte Modul trifft so eine fast homogene und stark verlangsamte Strömung. Der  $25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  Fall zeigt das gleiche Verhalten.

Die schwachen Winde zeigen ein anderes Verhalten. Hier ist keine kontinuierliche Reduktion der Geschwindigkeit festzustellen. Abbildung 78 zeigt die Verteilung nach dem dritten Modul. Die verlangsamteten Bereiche sind kleiner geworden. Wie schon in dem XY Plot der Geschwindigkeit zu sehen (Abbildung 70), ist die Geschwindigkeit vor der zweiten und den folgenden Waben ähnlicher zum initialen Wind als vor der ersten Wabe. Der Autor vermutet, dass die turbulente Durchmischung mit einer Kombination der Sogwirkung der Module dafür verantwortlich ist. Festzustellen bleibt, dass für schwache Winde die Strömungsgeschwindigkeit abnimmt, jedoch nicht kontinuierlich.

### Hinter dem vierten Modul

Hinter der vierten Wabe verhalten sich die mittleren und hohen Geschwindigkeiten erwartungsgemäß. Die Strömung verhält sich trotz fehlendem Modul gleichbleibend. Es kommt nie zu negativen Strömungsrichtungen.

Bei den schwachen Winden nehmen die Rückströmungen erneut zu. Wie bereits im 1-Modul-Modell gesehen, entstehen dreieckige Formen, in denen die Strömungsrichtung negativ ist. Für schwache Winde kann davon ausgegangen werden, dass die Rückführrate von der Abwesenheit eines stromabwärts liegenden Moduls beeinflusst wird.

Das ist eine wichtige Erkenntnis. Die Ergebnisse aus Kapitel 5 sind zum einen unabhängig (für mittlere bis starke Winde) von der Tatsache, dass stromabwärts des einen Moduls kein weiteres liegt. Zum anderen wird die Strömung durch diese Tatsache für schwache Winde beeinflusst.

Inwiefern sich dieser Zusammenhang auf die integrale Größe  $arr$  auswirkt, wird im nächsten Unterkapitel betrachtet.

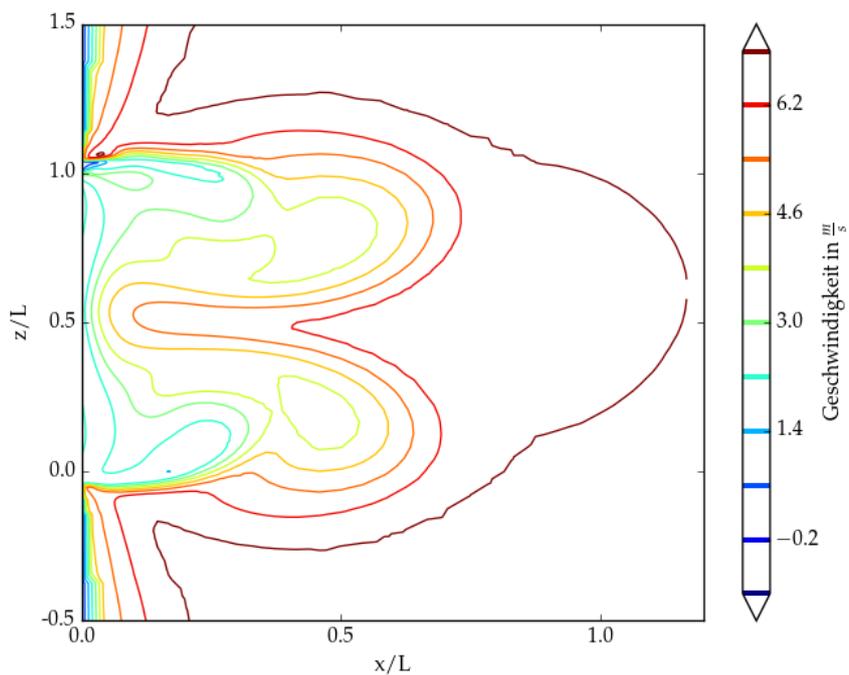


Abbildung 77: Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene, Base Case, 4 Module, hinter Modul 3

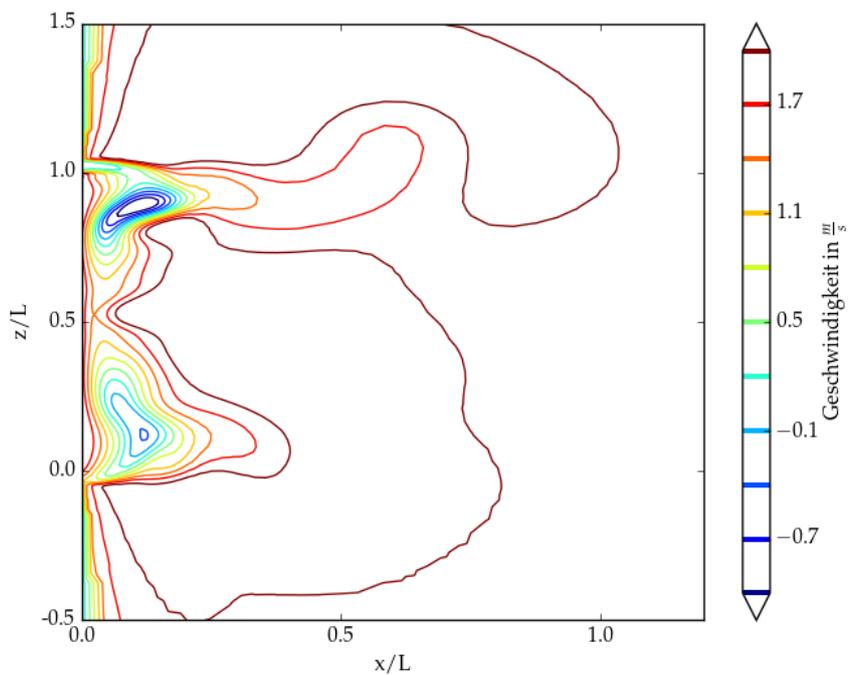


Abbildung 78: Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene,  $2 \frac{m}{s}$ , 4 Module, hinter Modul 3

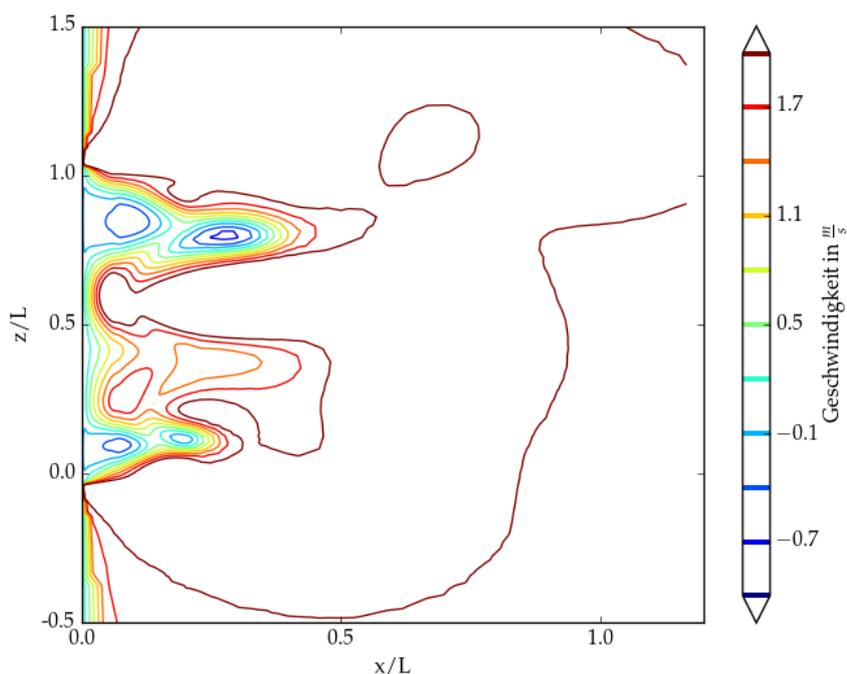


Abbildung 79: Geschwindigkeitsverteilung Normal zur Ebene, XZ Ebene,  $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , 4 Module, hinter Modul 4

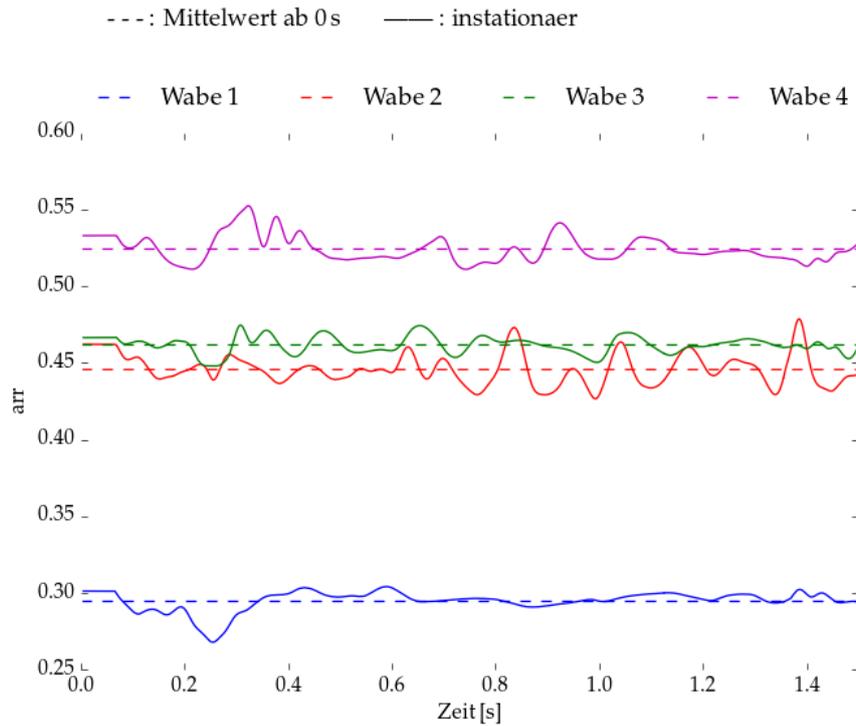
### 6.2.5 Verhalten der Rückföhrate

Nachdem die Entwicklung der Strömung stromabwärts über die Module beschrieben wurde, sollen im folgenden die Resultate zur Rückföhrate dargestellt werden. Es wird erörtert, inwiefern sich die zuvor präsentierten Ergebnisse in der Rückföhrate wieder finden.

Die zeitlichen Schwankungen des *arr* sind in Abbildung 80 aufgezeigt. Dargestellt ist der Base Case. Festzuhalten bleibt an dieser Stelle, dass die Schwankungen des neuen Modells die selbe Größenordnung haben wie das vorherige 1-Modul-Modell. Es ist nicht zu erwarten, dass die zeitliche Variation der Rückföhrate noch weiter stromabwärts liegender Module zunimmt.

Die Rückföhrate über die vier Module ist in Abbildung 81 abgebildet. Farblich kenntlich sind die verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Zuerst auffallend ist, dass erneut alle instationären Ergebnisse leicht unterhalb der stationären liegen. Weiterhin sofort erkenntlich ist, dass es stromabwärts eine erwartungsgemäße, einheitliche Tendenz zu höheren Rückföhraten gibt. Die Steigerung von Modul zu Modul ist jedoch sehr unterschiedlich zwischen den einzelnen Windgeschwindigkeiten und auch innerhalb einer Windgeschwindigkeit.

Begonnen wird mit der höchsten Windgeschwindigkeit. Der  $25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  Fall zeigt eine sehr kleine Zunahme des *arr*. Dies spiegelt die bisher gezeigten Ergebnisse wider. Die Änderung in den Geschwindigkeits- und Temperaturfeldern ist sehr gering. Es wird erwartet, dass sich die Rückföhrate weiterhin nur sehr langsam steigert. Gerade die Unterschiede der Temperaturen von vor der dritten und vierten Wabe sind sehr gering. Dies drückt sich im sehr flachen Anstieg des *arr* aus. Möglicherweise ist die Rückföhrate schon nach vier Modulen nahe einem

Abbildung 80: Rückföhrtrate über die Zeit,  $7 \frac{m}{s}$ 

Grenzwert.

Beim Base Case gibt es eine deutliche Steigerung zum zweiten Modul. Zu erklären ist das dadurch, dass der Warmluftspalt von der 2. Wabe doppelt so breit ist, wie der vor der Ersten. Der XY-Temperaturplot (Abbildung 62) zeigt wie ein deutlich größerer warmer Bereich in die Wabe eintritt. Dieser erste rapide Anstieg verflacht zum dritten Modul. Auch in den Temperaturplots ist kein großer Unterschied erkenntlich. Eine leichte Steigerung ist durch den weiter abgebremsten Wind begründet. Außerdem wächst der Bereich durchmischter Luft um die oberen und unteren Spalte. Insgesamt befindet sich mehr warme Luft vor der Wabe, die eingesaugt werden kann. Zur vierten Wabe steigt der Gradient nochmals. Die fehlende nachfolgende Wabe hat keinen Einfluss auf die Details der Strömung vor der Wabe. Damit ist dies nicht der Grund für die Änderung des Gradienten der Rückföhrluft über die Wabenposition. Vielmehr findet auf Höhe des dritten Moduls die Vermischung der oberen und unteren warmen Bereiche statt. Somit wird das vierte Modul sozusagen mit durchmischter Luft überdeckt. Es wird keine reine Umgebungsluft in das vierte Modul eintreten (siehe Abbildung 63). Es wird vermutet, dass der Sprung von der dritten zur vierten Wabe der letzte Große war. Danach wird sich die durchmischte Luft weiter aufwärmen bis sie einen Grenzwert erreicht hat, sodass ab dann auch das *arr* konstant bleibt. Dies bleibt zu untersuchen.

Für den  $2 \frac{m}{s}$  Fall steigt die Rückföhrtrate erst schnell und dann langsamer an. Die vierte Wabe wird vermutlich durch die fehlende fünfte beeinflusst. Sie sollte nicht für die Interpretation des Verlaufs heran gezogen werden. Der abflachende Verlauf stützt einmal mehr die These, dass sich ein asymptotisches Verhalten für die Rückföhrtrate einstellt. Der Grenzwert lässt sich

nicht abschätzen. Der Autor verzichtet auf eine Extrapolation auf Basis der Daten der ersten drei Waben, da diese eine zu große Unsicherheit birgt. Sehr interessant ist, dass das *arr* des zweiten Moduls bereits höher ist als der des  $1 \frac{m}{s}$  Falls.

Für die Rückführrate des  $1 \frac{m}{s}$  Falls ist keine Steigerung über die ersten drei Module erkennbar. Es ist in den Details keine Tendenz zu sehen, die zeigt, dass der Wind stark genug ist um Warmluft vor die Wabe zu bringen. Vielmehr verhält sich die vordere Spaltausströmung weitgehend unbeeinflusst (siehe Abbildung 70). Die nicht direkt eingesaugte Warmluft sammelt sich weit vor der Wabe, in einer Distanz, von der sie nicht wieder in die Wabe eintritt. Schon in der Abbildung des Windaustritts der Domain (Abbildung 61) war zu sehen wie sich der durchmischte warme Luftstrom vom Strahlungsschutz losgelöst bewegt. Die Steigerung zum letzten Modul hin scheint durch das Fehlen des Nachfolgenden zu entstehen.

Nach der Erklärung der Verläufe des *arr* folgt nun die Ergebnisdarstellung und Interpretation der Methode des passiven Skalars. Festgestellt wird, wie groß der Einfluss der Durchmischung von Warmluft aus vorherigen Waben mit der Umgebungsluft ist. Dazu wird ermittelt, wie viel Warmluft aus vorherigen Modulen in das untersuchte Modul eintritt. So soll beurteilt werden, ob die Abschwächung des Windes oder die Durchmischung größere Effekte erzielt.

Der zeitliche Verlauf der Anteile an der Heißluft des vierten Moduls des Base Cases ist in Abbildung 82 dargestellt. Farblich kenntlich sind die einzelnen Ursprünge der Heißluft. Direkt zu sehen ist, dass die simulierte Zeit noch nicht ausreicht, damit die Summe der Anteile des gesamten *arr* entspricht. Nach ca. 0.15 s treten die ersten „markierten“ Partikel durch die vierte Wabe aus der Domain aus. Beim  $25 \frac{m}{s}$  Fall fällt dieser Wert auf ca. 0.07s, beim  $2 \frac{m}{s}$  Fall liegt er bei ca. 0.13s. Der für die Untersuchungen mit dem passiven Skalar angepasste Solver wurde auf eine bereits für eine Zeit instationär berechnete Simulation angewendet. Es ist zu sehen, wie sich eine klare Tendenz ausbildet und aus welchen Modulen sich die Heißluft zusammensetzt.

Abbildung 83 zeigt diese für die Windgeschwindigkeiten  $2 \frac{m}{s}$ ,  $7 \frac{m}{s}$  und  $25 \frac{m}{s}$ , jeweils von links nach rechts dargestellt. Die Größe des unbestimmten Bereichs ist von der simulierten Zeit und der jeweiligen Windgeschwindigkeit abhängig. Die Warmluft aus dem ersten Modul braucht mehr Zeit um in das vierte Modul einzutreten, sofern die Windgeschwindigkeit kleiner ist. Die Daten zeigen den letzten Zeitschritt der instationären Simulation. Es ist kein Mittelwert gewählt, da sonst der Anteil der unbestimmten Herkunft steigt. Weiterhin ist hier der Wert der Rückführrate nicht interessant. Der Fokus liegt auf den Anteilen. Die simulierte Zeit liegt bei ca. 0.5 s bzw. 0.4 s.

Als erstes Ergebnis dieser Betrachtung ist zu nennen, dass wie erwartet stromabwärts liegende Module die Rückführrate der stromaufwärts Liegenden nicht durch ihre Warmluft beeinflussen. Weiterhin ist festzustellen, dass das erste Modul das *arr* des Vierten beeinflusst, am stärksten für den Base Case. Es ist jedoch keine Korrelation mit der Windgeschwindigkeit zu erkennen.

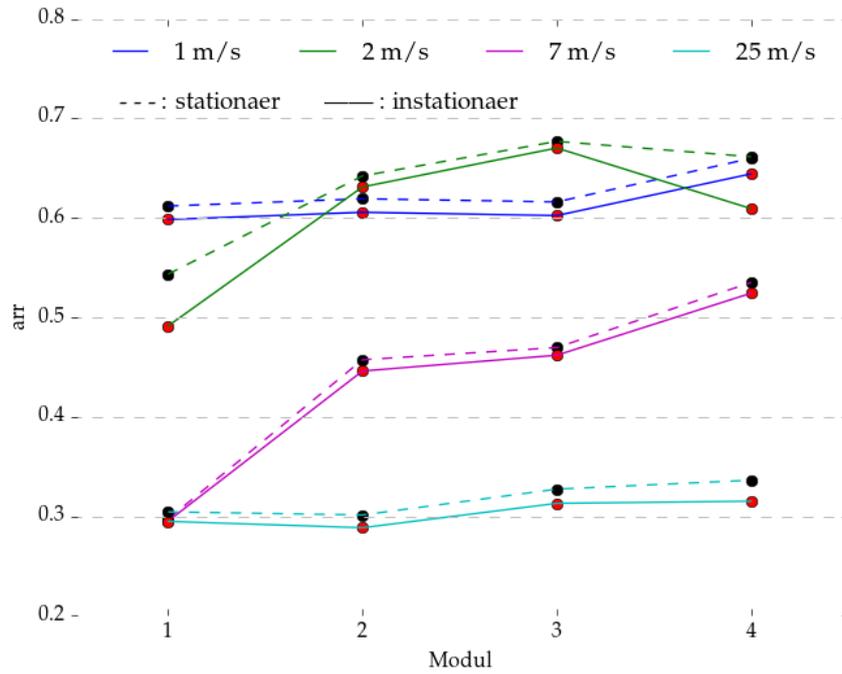


Abbildung 81: Rückföhrate über die Position des Moduls

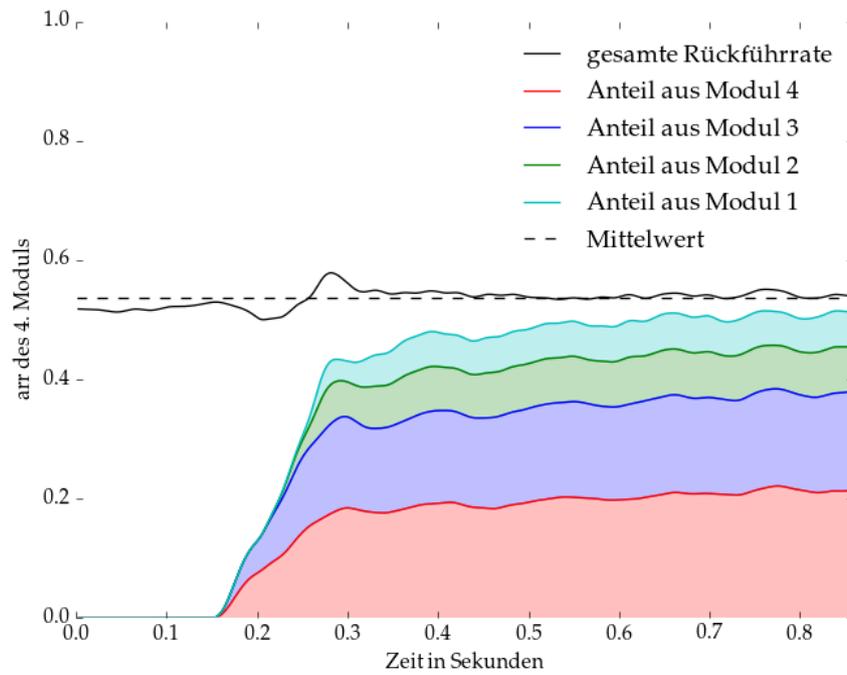


Abbildung 82: Zeitlicher Verlauf der Anteile an der Rückföhrluft des vierten Moduls, BC

Die prozentualen Anteile sind in Abbildung 84 dargestellt. Dadurch wird deutlich, dass beim Base Case die vorherigen Module einen größeren Einfluss auf die Rückführrate haben als bei stärkeren oder schwächeren Winden. Für den schwachen Wind ist der Einfluss, der nicht direkt vor dem betrachteten Modul liegenden Module, sehr gering und nahezu vernachlässigbar. Das heißt, Modul 1 beeinflusst Modul 3 kaum und Modul 2 kaum Modul 4. Dies ist ein wichtiger Aspekt für die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den gesamten Receiver. Er ist damit zu erklären, dass sich die nicht eingesaugte Warmluft von den Waben entfernt. Für stärkere Winde wird diese jedoch an die Receiverfront gedrückt und kann so eher in nachfolgende Module eintreten. Dennoch zeigt sich auch für starke Winde die selbe Tendenz. Die Reduktion ist jedoch nicht so deutlich wie beim schwachen Wind. Wahrscheinlich ist der Wind zu stark, als dass Warmluft aus Modul 1 nach wenigen Modulen in ein anderes eintritt. Es ist zu erwarten, dass die Warmluft von Modul 1 in spätere Module eintritt als bei schwächeren Winden.

Zuletzt scheint der Anteil der „moduleigenen“ Warmluft für die Rückführluft nahezu konstant ab dem zweiten Modul. Dieser Anteil ist in Abbildung 85 aufgetragen. Mit „moduleigen“ ist der Anteil der aus dem betrachteten Modul entspringenden Warmluft an der Heißluft gemeint. In blau ist die absolute Rückführrate und in rot die Prozentuale gezeigt. Mit der moduleigenen Rückführrate kann ein guter Bezug zum 1-Modul-Modell hergestellt werden. Eine Abschwächung des Windes über die Module müsste zu einer Erhöhung des moduleigenen  $arr$  führen. Für schwache Winde ist die Absolute für alle Module nahezu konstant. Es ist ein leichter Abfall zu registrieren. Beim Base Case ist ein kleiner Abfall zum zweiten Modul und eine anschließende leichte Steigerung zu sehen. Beide Effekte verstärken sich bei starken Winden. Die Reduktion zum zweiten Modul ist durch eine Durchmischung der Warmluft verschiedener Module, die bereits im Spalt stattfindet, zu erklären. Da für mittlere bis hohe Geschwindigkeiten beispielsweise Warmluft aus dem vorderen Spalt über die Wabe hinweg getragen wird, kann durch die vorherige Durchmischung der moduleigene Anteil des  $arr$  sinken. Der folgende Anstieg ist durch die fortlaufende Abbremsung des Windes zu erklären. Dadurch ist deutlich zu sehen, dass diese Abbremsung einen geringen Einfluss auf die Rückführrate hat. Für den Fall schwachen Windes ist ebenfalls die Abbremsung für die Änderung verantwortlich. Wie bereits bei einem Modul erkannt, sinkt die Rückführrate von Winden um ca.  $2 \frac{m}{s}$  hin zum windstillen Fall.

Prozentual ist die Reduktion zum zweiten Modul hin stärker, da die Rückführrate in allen Fällen steigt. Betrachtet man nur die Module 2 bis 4, so sind auch diese Änderungen gering.

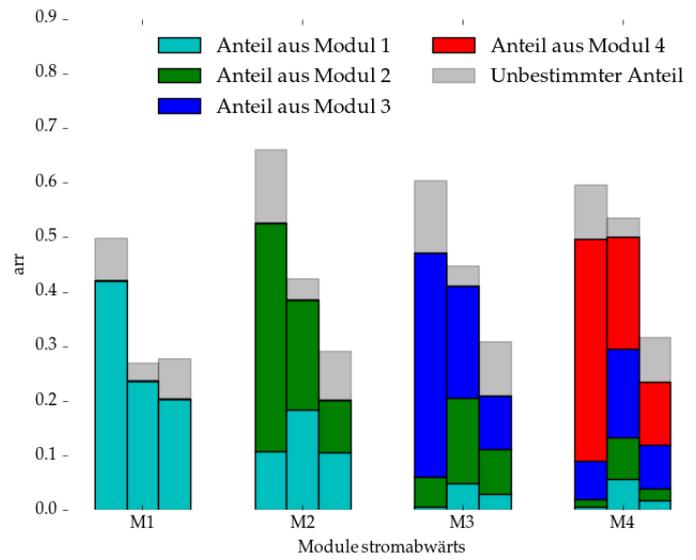


Abbildung 83: Anteile verschiedener Module an der Rückführluft eines Moduls für  $2 \frac{m}{s}$ ,  $7 \frac{m}{s}$  und  $25 \frac{m}{s}$

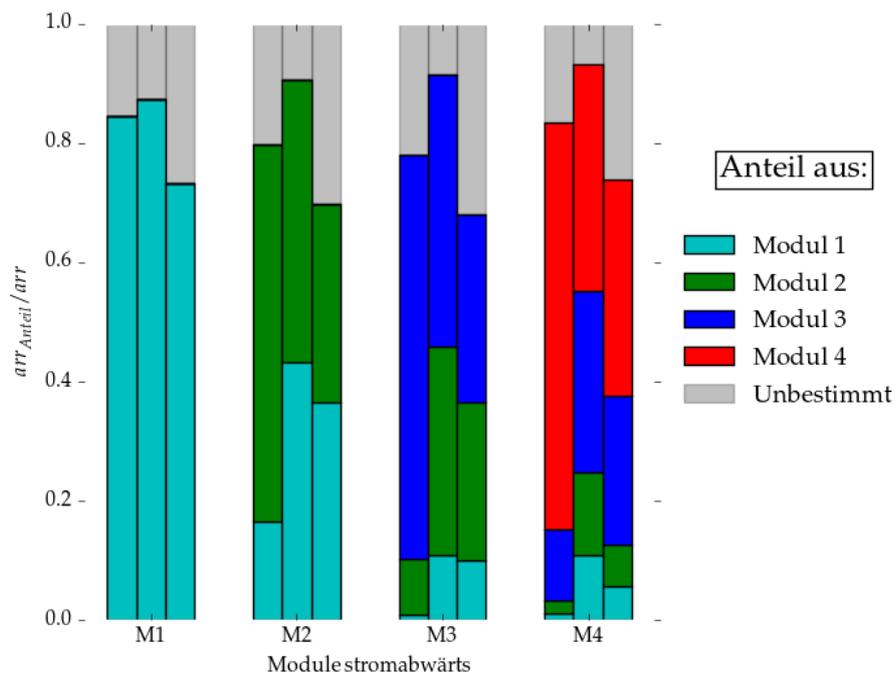


Abbildung 84: Prozentuale Anteile verschiedener Module an der Rückführluft eines Moduls für  $2 \frac{m}{s}$ ,  $7 \frac{m}{s}$  und  $25 \frac{m}{s}$

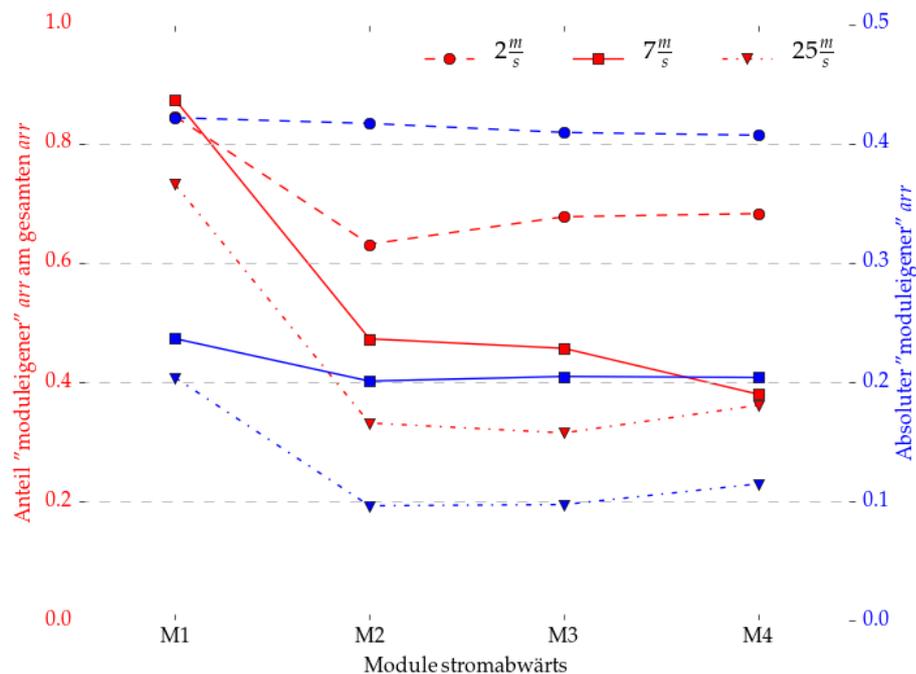


Abbildung 85: Anteil moduleigener Rückführrate an Rückführrate

### 6.3 Fazit zur Übertragbarkeit

Das Fazit zur Übertragbarkeit ist zweigeteilt. Zum einen soll die Übertragbarkeit von Details der Strömung beurteilt werden. Zum anderen wird die integrale Größe, die Rückführrate, betrachtet. Jeweils für diese beiden Aspekte soll wiederum einerseits betrachtet werden, ob das 1-Modul-Modell ein Randmodul gut abbildet. Andererseits soll der Bezug zur Veränderung hinsichtlich mehrerer Module und der Möglichkeit der Abschätzung dieser auf Basis des einen Moduls beurteilt werden.

Das 1-Modul-Modell gibt die Strömung eines Randmoduls gut wieder. Es ist erkannt worden, dass für die meisten Windgeschwindigkeiten, weder die ober- oder unterhalb fehlenden noch das stromabwärts fehlende Modul merkliche Auswirkungen auf die Situation vor der ersten Wabe haben. Lediglich für schwache Winde von weniger als  $2 \frac{m}{s}$  verändert sich dieser Zusammenhang. Für schwache Winde bildet das 1-Modul-Modell die Strömung vor dem Modul anders ab als das zum Vergleich genutzte 4-Module-Modell. Besonders die Rückströmungen hinter dem Modul unterscheiden sich.

Natürlich verändert sich die Situation vor den Waben für mehrere aufeinander folgende. Für schwache Winde ist diese Veränderung unstetig und somit nicht auf Basis des einen Moduls zu prognostizieren. Für mittlere bis starke Winde sind die Änderungen monoton, wobei bei starkem Wind kaum noch Änderungen erkennbar sind. Es ist somit möglich, das Verhalten von wenigen oder sogar nur einem Modul zu nutzen, um eine Aussage über viele zu machen. Die Rückführrate als integrale Größe verhält sich anders. Bezüglich dieser, ist das 1-Modul-

Modell gut zur Vorhersage von Randmodulen nutzbar. Die Abweichungen zum 4-Module-Modell sind für alle vier Fälle im Bereich der Abweichung von stationärer und instationärer Simulation trotz zu diesem Zeitpunkt noch kurzer simulierter Zeit.

Für den Verlauf des *arr* stromabwärts über mehrere Waben kann mittels des 4-Module-Modells kein allgemeiner Rückschluss von diesem und damit auch nicht vom 1-Module-Modell auf den ganzen Receiver gezogen werden. Der erwartungsgemäße Anstieg ist ungleichmäßig für die Windgeschwindigkeiten, sowie für die einzelnen Module. Dennoch ist ein Grenzverhalten abzuschätzen. Der  $25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  Fall zeigt kaum Veränderungen. Hier lässt sich eine einigermaßen verlässliche Prognose für den ganzen Receiver machen.

Eine Umstrukturierung der gezeigten Daten ist in Abbildung 86 zu sehen. Dargestellt ist die Rückführrate über der Windgeschwindigkeit. Farblich kenntlich sind die verschiedenen Modulpositionen. Der Verlauf für das erste Modul ähnelt dem in Kapitel 5 gezeigten Verlauf deutlich. Der Einbruch des *arr* bis zu mittleren Geschwindigkeiten verringert sich in der zweiten, dritten und vierten Modulreihe merklich. Für die vierte Modulreihe ist ein fast linearer Zusammenhang zwischen Wind und Rückführrate zusehen.

Aus den Ergebnissen zum passiven Skalar gehen weitere Erkenntnisse hervor. Die zuvor besprochenen Anteile an der Heißluft aus weiter als ein Modul stromaufwärts liegenden Modulen sind für schwache Winde sehr gering. Das zeigt, dass die Durchmischung über eine Distanz von zwei Modulen bei schwachen Winden vernachlässigbar ist. Die durchmischte Luft entfernt sich vom Receiver. Zusätzlich ist bei allen Winden die Abbremsung kaum relevant. Die Abbremsung zeigt eine stetige Auswirkung, die eher gering ist. Dieser wichtige Zusammenhang zeigt, dass für schwache Winde die Abschätzung der Rückführrate des gesamten Receivers über wenige Module gut möglich ist.

Für den Base Case sind sowohl die Abbremsung durch das erste Modul als auch die Durchmischung relevant. Es ist schwer, eine Aussage von wenigen Modulen auf Viele zu tätigen.

Für starke Winde ist der Einfluss der Durchmischung nicht nach vier Modulen zu beurteilen, da davon auszugehen ist, dass Module noch deutlich weiter stromabwärts Liegende beeinflussen.

Als Prognose aus den gezeigten Ergebnissen lässt sich ableiten, dass für schwache Winde die Rückführrate vieler Module leicht ansteigt. Ab ca.  $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  fällt sie mit steigender Windgeschwindigkeit leicht ab. Es ist zu erwarten, dass bei mittleren Winden um ca.  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  noch eine Rückführrate von über 60 % erreicht wird. Für noch stärkere Winde ändert sich die Krümmung der fiktiv skizzierten Kurve. Es stellt sich ein asymptotisches Verhalten ein. Für  $25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  werden Rückführraten von unter 45 % erwartet, möglicherweise noch unter 40 %.

Diese Prognose ist zu diesem Zeitpunkt der Forschung noch unsicher. Dennoch beschreibt sie gut die Erwartungen und vor allem die Ansatzpunkte für Verbesserungen. Die möglichen Ideen zu Verbesserungsmaßnahmen, die aus den in dieser Arbeit präsentierten Ergebnissen entstehen, werden im nächsten Kapitel beschrieben. Nachdem sie dargelegt sind, kann eine Zusammenfassung und ein Ausblick diese Arbeit abschließen.

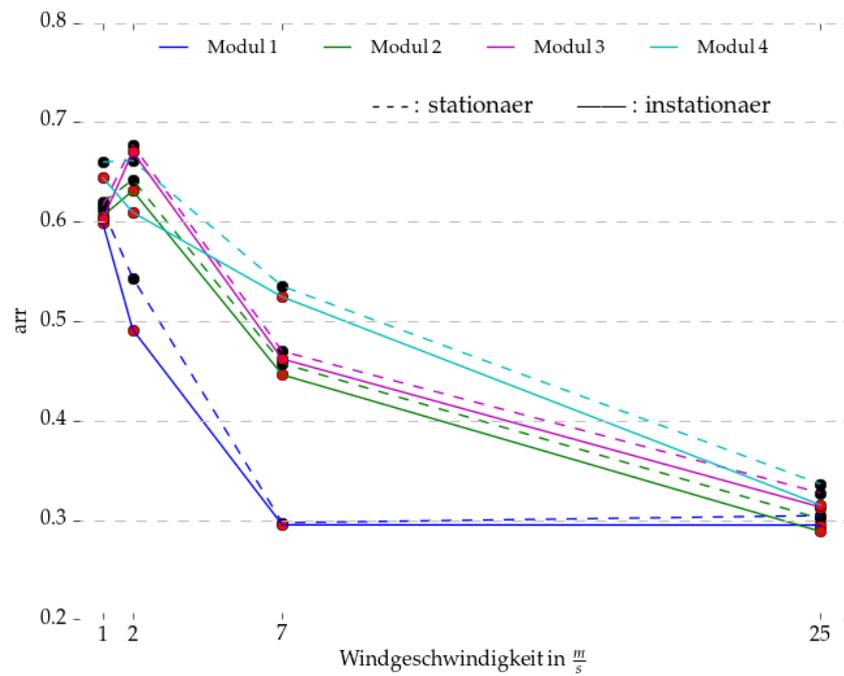


Abbildung 86: Rückführrate über die Windgeschwindigkeit, 4 Module

## 7 Verbesserungsmaßnahmen

Nachdem zunächst die Ergebnisse des einzelnen Moduls gezeigt und anschließend die Übertragbarkeit dieser untersucht wurde, können diese Erkenntnisse nun in Verbesserungsmaßnahmen, welche die Energiegestehungskosten senken, umgesetzt werden. Begonnen wird mit einer Bewertung des Potentials möglicher Verbesserungen. Anschließend werden Ideen zu Maßnahmen aufgezeigt. Diese Ideen werden nicht durch Simulation auf quantitative Effekte untersucht. Hier soll nur generell abgeschätzt werden, was zu Verbesserungen führen könnte.

Nach dem Abschluss des Kapitels kann im letzten Kapitel ein Ausblick gegeben werden, der zeigt, welche anschließenden Untersuchungen sinnvoll sind, um die negativen Effekte des Seitenwindes zu minimieren.

### 7.1 Potentialbeurteilung

Das Potential einer Steigerung des *arr* ist bereits in Kapitel 3.1 genannt. Dieses beschreibt das Potential einer generellen Steigerung des *arr*. In diesem Abschnitt wird jedoch der negative Einfluss des Seitenwindes abgeschätzt. Zu beachten ist, dass die Windgeschwindigkeit und -richtung zeitlich variieren. So ist eine Reduktion des *arr* bei beispielsweise  $7 \frac{m}{s}$  nicht sofort auf das ganze Jahr umzurechnen. Diese vermeidliche Reduktion erfolgt nur bei gegebenen Bedingungen. Genauso wirken sich Konzeptverbesserungen nur zu ebendiesen Bedingungen positiv aus. Diese zeitliche Varianz hat einen erheblichen Einfluss auf das Potential der Verbesserungsmaßnahmen. Wichtig ist, dass Konzepte, die lediglich im Windfall eine Steigerung, jedoch im Fall ohne Wind eine Senkung des *arr* herbeiführen, in der Jahresbilanz schlechter sein können. Da weder Verbesserungsmaßnahmen noch Einflüsse zum Fall ohne Wind im Detail geschildert wurden, führt der Autor zu den in dieser Hinsicht kritischen Vorschlägen immer eine Abschätzung an, ob diese Maßnahme auch Nachteile für Situationen ohne Wind haben könnten.

Neben der Windgeschwindigkeit kann sich der Effekt einer Verbesserungsmaßnahme auch mit der Windrichtung ändern. So führt eine Verbesserung bei Seitenwind nicht direkt zur Steigerung des *arr* generell bei Wind.

### 7.2 Verbesserungsmaßnahmen

Im Folgenden sollen Verbesserungsmaßnahmen besprochen werden. Sie basieren zum Teil auf intern kommunizierte Projekte aber ergeben sich zum Großteil direkt aus den zuvor präsentierten Ergebnissen. Die Maßnahmen haben alle die Absicht, die Energiegestehungskosten zu senken. So lassen sich zwei Ansatzpunkte formulieren, die bereits in der Motivation zu dieser

Arbeit genannt wurden. Als Ziele wurden dort benannt, einerseits die Rückführrate in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit zu bestimmen und andererseits die Strömung vor der Wabe im Detail darzustellen und zu analysieren. Daraus leiten sich direkt die beiden Kategorien der Maßnahmen ab. Erstens soll der Prozess an das bekannte *arr* angepasst werden. Zweitens soll das bekannte Verhalten der Strömung Konzepte zur Erhöhung des *arr* aufwerfen.

Ist die Rückführrate des Receivers in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und -richtung bekannt, kann zur Optimierung des Systemwirkungsgrads die Warmlufttemperatur gewählt werden. Dabei ist analog zur Potentialabschätzung die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen Windsituationen zu beachten. Würde für einen schwachen Wind ein sehr hohes *arr* erreicht, könnte die Warmlufttemperatur deutlich angehoben werden. An windigen Tagen oder Tageszeiten müsste das System insgesamt so flexibel sein, dass die Warmlufttemperatur vorausschauend wieder gesenkt würde. Die Anpassung der Warmlufttemperatur an die Rückführrate ist eine sehr einflussreiche Maßnahme.

Neben der Anpassung der Temperatur der Rückführluft kann ebenso bei starken Winden ein anderes Konzept verwendet werden. Sofern erkannt wird, dass zu bestimmten Bedingungen der Nutzen des Rückführkonzeptes sehr gering ist, kann über eine alternative Nutzung der Abwärme des Dampferzeugers diskutiert werden. Für den Prozess könnte dies bedeuten, dass ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit, die nicht zur Kühlung nötige Luft, nicht mehr zurückgeführt wird, sondern beispielsweise Wärmeaufgaben erfüllt.

Das Verhalten der Strömung unter Windeinfluss inspiriert zu einigen Verbesserungsmaßnahmen. Die Rückführrate soll erhöht werden, optimaler Weise für jede Windgeschwindigkeit. Natürlich ist der Effekt bei stärkeren Winden größer einzuschätzen. Dort besteht durch die deutliche Reduktion des *arr* ein höheres Verbesserungspotential. Die Konzeptideen lassen sich kategorisieren, indem sie den jeweiligen Erkenntnissen zugeordnet werden.

Die erste Erkenntnis ist sicherlich erwartungsgemäß. Ab  $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  fällt die Rückführrate mit steigender Windgeschwindigkeit. Deshalb sind massive Strukturen als Windschutz denkbar. Ein Beispiel dazu existiert bereits in Form der Cavity Bauart, bei der der Receiver in einer Art Höhle montiert ist. Diese Bauart bringt jedoch Nachteile mit sich. Zum Beispiel wird durch die Öffnung der Cavity das Heliostatenfeld begrenzt. Außerdem könnte der Wind durch an den Waben angebrachte Umlenkstrukturen gebremst werden. Diese Umlenkstrukturen hätten somit eine Doppelfunktion. Sie entspringen der Idee die Warmluft direkt am Spalt umzulenken, damit sie unmittelbar nach dem Austritt aus dem Spalt in Richtung Wabe strömt. Im Windfall würden diese Umlenkstrukturen zusätzlich Wind aus jeder Richtung bremsen.

Die nächste Erkenntnis ist ebenfalls erwartungsgemäß. Die Rückführrate steigt im Windfall über die Anzahl der Module, sprich in Richtung Receivermitte. In der Receivermitte ist der Seitenwind abgeschwächt. Um diese Abschwächung zu beschleunigen, könnten die Spalte am Rand etwas schmaler sein als in der Mitte. In der Mitte würde somit durch den verringerten flächenspezifischen Impuls auch ohne Wind die Rückführrate steigen. Dies geht aus Ergebnissen der bisherigen Forschung hervor. Im Randbereich bremst der erhöhte flächenspezifische Impuls, der aus dem Spalt austritt, den Seitenwind stärker ab. Diese Konzeptidee ist kritisch

zu beurteilen, denn ihr Verhalten ohne Wind ist noch ungewiss. Außerdem ist die reduzierte Absorberfläche in der Mitte, in der die Strahlungskonzentration am höchsten ist, bedenklich. Es trifft damit vermehrt Strahlung in den Spalt.

Eine weitere Idee, den Einfluss der schützenden Wirkung stromaufwärts liegender Module zu nutzen, ist das Bilden eines Windvorhangs. Der Receiver wird mit einem Spalt um die äußeren Module versehen. Aus diesem Spalt tritt ein Luftstrom, sodass ein Windvorhang entsteht. Sehr ähnlich dazu, könnten auch die äußeren Module mit mehr Spaltmassenstrom betrieben werden. Der erhöhte Impuls würde ebenfalls als Windvorhang dienen.

Um die Steigerung des *arr* über die Anzahl der Module zu nutzen, könnten kleinere Module eingesetzt werden. Somit steigt die Anzahl der Module. Bisherige Ergebnisse zeigen, dass kleinere Module tendenziell höhere *arr* erreichen. Je kleiner die Waben werden, desto aufwändiger die Konstruktion des Receivers. Deswegen wird vermutet, dass eine deutliche Reduktion der Kantenlänge der Module nicht ökonomisch ist.

Weiterhin ist den Ergebnissen zu entnehmen, dass die horizontalen Spalte die größten Verluste an Warmluft erzeugen. Weil der Wind vorzugsweise parallel zum Boden weht und seltener Auf- oder Abwind auftritt, erhält dieser Aspekt noch mehr Bedeutung. Um diesen Verlust zu reduzieren, könnten die Waben des Receivers um  $90^\circ$  gedreht werden, sodass alle horizontalen Spalte verschwinden. Der Effekt dieser Idee kann leider schlecht abgeschätzt werden.

Besser abzuschätzen und damit vielversprechender ist folgende Idee. Der Receiver könnte rechteckig gebaut werden, sodass er höher als breit ist. Das ist in Abbildung 87 skizziert. Damit wäre die Spaltlänge der horizontalen Spalte reduziert. Gleichzeitig könnten die Waben in Zukunft ebenso rechteckig ausgeführt sein anstatt quadratisch. Jedoch sollte die Wabe, umgekehrt zum Receiver, breiter sein als hoch. Erstens bleibt die absolute Spaltlänge konstant. Zweitens hängt die Spaltbreite mit der Kantenlänge der Wabe in dieser Richtung zusammen, da der Spalt nicht nur Rückführluft führt, sondern auch Wärmedehnungen ausgleicht. Eine höhere als breite Wabe würde breitere horizontale Spalte bedeuten. Das ist genau das, was nicht erwünscht ist. Eine breitere als hohe Wabe hat schmale Spalte an den verlustreichen horizontalen Spalten und breite an den vertikalen. Die Warmluft aus den Vertikalen wird fast komplett wieder eingesaugt. Weiterhin wird durch die längere Wabe bei stärkeren Winden weniger Warmluft über die Wabe hinweg geblasen. Kritisch ist, dass die Receiverform auf das Heliostatenfeld angepasst wird. Sie ist nicht unabhängig zu wählen.

Zuletzt zeigen die Ergebnisse noch, dass für schwache Windgeschwindigkeiten (optimal um  $2 \frac{m}{s}$ ) das *arr*, im Gegensatz zum Fall ohne Wind, steigt. Durch eine seitlich von Receiver angeordnete Konstruktion könnte ein künstlicher Seitenwind erzeugt werden. Dieser könnte genau auf die optimale Windgeschwindigkeit eingestellt werden. Außerdem ist durch einen künstlichen Seitenwind die Möglichkeit geschaffen, die von der Windgeschwindigkeit abhängige Rückführrate etwas zu steuern und damit wiederum den Systemwirkungsgrad zu beeinflussen. Weiterhin würde diese Konstruktion, ähnlich zu massiven Windschutz, stärkere Winde abbremesen.

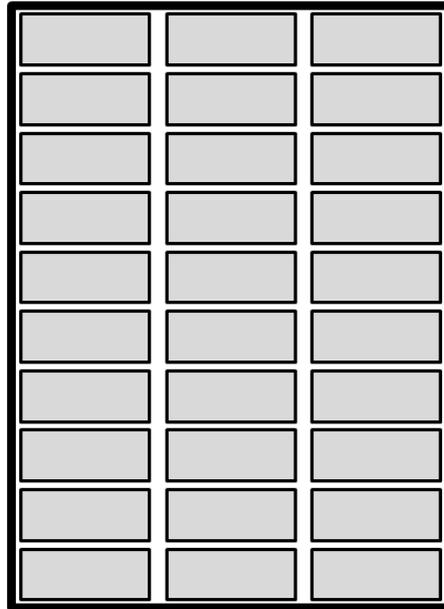


Abbildung 87: Skizze rechteckiger Receiver

Damit ist die zweite Möglichkeit die Energiegestehungskosten zu senken, die Erhöhung des *arr*, beschrieben. Es sind Ideen zusammengefasst die untereinander nicht verglichen wurden. Insbesondere die konstruktive Umsetzung wurde nicht diskutiert. Außerdem bestehen andere Konzeptideen, die nicht zusammen mit den oben aufgeführten umgesetzt werden können. Dazu gehören beispielsweise Ideen, welche eine Teilrückführung der Warmluft nutzen. Diese Abhängigkeiten sind umfangreich und sollen an dieser Stelle nicht diskutiert werden.

Im nächsten Kapitel wird die vorliegende Arbeit zusammengefasst und es wird ein Ausblick für zukünftige Forschungen gegeben.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Alle Ergebnisse wurden präsentiert. Dieses Kapitel fasst die wichtigsten Elemente dieser Arbeit zusammen. Abschließend wird sie offene Fragestellungen für weiterführende Arbeiten nennen.

### 8.1 Zusammenfassung

Die Energiegestehungskosten ist ein Hauptkriterium für die Wahl, welche Kraftwerkstechnik zum Einsatz kommt. Um diese zu reduzieren, wird unter anderem am Strahlungsempfänger geforscht. Ein Konzept, letzteren umzusetzen ist der modular aufgebaute, offene volumetrische Receiver. Seine Performance hängt stark von den konvektiven Verlusten ab, die durch das Rückführkonzept für die aus dem Dampferzeuger austretende Warmluft entstehen. Sie werden über die Rückführrate quantifiziert. Neben ihrem entscheidenden Einfluss auf den Receiverwirkungsgrad ist ihre Kenntnis notwendig um den Kraftwerksprozess optimal auszulegen.

Aktuelle Forschungen befassen sich damit, die Rückführrate zu quantifizieren. Dazu gibt es experimentell validierte Simulationen, die die Rückführrate in Abhängigkeit von verschiedenen Kennzahlen unter Laborbedingungen bestimmen. Die vorliegende Arbeit bringt ein neues Modell zum Vorschein, das den Schritt von den Laborbedingungen hin zur Realität geht. Es wird der Einfluss von Wind als Störgröße betrachtet.

Es wurde ein dreidimensionales CFD Modell eines einzelnen Moduls in OpenFOAM realisiert. Basis dieses neuen Modells ist das experimentell Validierte. Geometrische Daten und Prozessparameter orientieren sich dabei am Solar-Turm in Jülich als Stand der Technik. Es werden sowohl die Details der Strömung vor dem Modul analysiert, als auch die integrale Rückführrate bestimmt. Zusätzlich zu den Ergebnissen zu einem Modul wird deren Übertragbarkeit auf den ganzen Receiver untersucht.

Das Modell betrachtet reinen Seitenwind. Es verwendet kein Strahlungsmodell und berechnet keine Wärmeflüsse bezüglich des Festkörpers. Geometrisch wird ein Modul mit einem großen Umgebungsvolumen abgebildet. Es ist eine Unsicherheitsabschätzung gemacht worden, wobei der Modellfehler (ca. 5 %) als größte Unsicherheit ermittelt wurde. Der Diskretisierungsfehler wurde zu 0.12 % abgeschätzt. Das Modell wurde über eine Vergleichsrechnung mit dem validierten Modell validiert. Der Vergleich von dem neu berechneten  $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ -Wind-Fall mit dem ohne Wind des validierten Modells ergab eine Abweichung von ca. 1 %.

Insgesamt wurden Winde im Bereich von  $0,5 - 25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  betrachtet. Unabhängig von der Windgeschwindigkeit ist erkannt, dass der Teil der Warmluft aus dem stromaufwärts liegenden Spalt fast komplett wieder in die Wabe eintritt, ganz im Gegensatz zum stromabwärts Liegenden. Ebenfalls sehr verlustreich sind die sich parallel zum Wind befindenden Spalte. Der Einfluss des Auftriebs der hohturbulenten und stark dreidimensionalen Strömung ist für mittlere bis

hohe Geschwindigkeiten nicht mehr merklich. In der Schnittebene senkrecht zum Wind ist eine glockenförmige Topologie erkannt worden.

Zunächst fällt die Rückführrate mit steigender Windgeschwindigkeit rapide ab. Für stärkere Winde tritt ein asymptotisches Verhalten auf. Ab ca.  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bleibt die Rückführrate annähernd konstant bei knapp unter 30 %. Bemerkenswert ist, dass alle instationären Ergebnisse ca. 1 % unterhalb der stationären liegen.

Mit den bisher angeführten Ergebnissen, sind die Hauptziele der Arbeit, die Detailabbildung der Strömung sowie die Quantifizierung der Rückführrate, erreicht. Es konnte ein Verständnis für die Strömung erzeugt werden. Das Gezeigte stützt die, auf den bisherigen Forschungen basierenden, Annahmen. Die Strömung ist beispielsweise auch im Fall mit Seitenwind hochturbulent und komplex. Es ist nicht erkannt worden, dass die Strömung wider Erwarten als 2D Fall akkurat zu simulieren ist.

In einem nächsten Schritt ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Modell mit einem Modul auf den ganzen Receiver abgeschätzt. Dazu sind zwei Methoden benutzt. Zum einen ist über Ebenen senkrecht zum Wind abgeschätzt, wie stark sich der Wind durch das Modul verlangsamt. Zum anderen ist ein neues rechenintensives Modell mit vier Modulen erstellt. Das neue Modell gibt Aufschluss über die Details der Interaktion mehrerer Module. Es ist durch Duplizieren aus dem 1-Modul-Modell entstanden.

Ergebnisse sind zum einen, dass für mittlere bis starke Winde eine stetige Verzögerung des Windes stattfindet. Schwache Winde zeigen kein nicht Verhalten. Bei einer Windstärke von  $7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ist eine umfassende Verlangsamung bereits vor dem vierten Modul zu sehen.

Zum anderen ist die Rückführrate des ersten Moduls ist sehr ähnlich zum ursprünglichen Modell. Der Verlauf über der Windgeschwindigkeit der Vierten ist jedoch sehr unterschiedlich, er ist fast linear. Dazu ist zu sagen, dass sich die Rückführrate für den  $25 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  Fall kaum ändert. Bei mittleren Windgeschwindigkeiten steigt sie deutlich und vermutlich noch weiter auch nach dem vierten Modul. Interessant ist, dass der  $2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  Fall bereits beim zweiten Modul eine höhere Rückführrate aufzeigt als der  $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  Fall.

Als Fazit kann gezogen werden, dass das ursprüngliche Modell gut Randmodule abbildet. Weder die fehlenden seitlichen noch das fehlende stromabwärts gelegene Modul beeinflusst die Rückführrate. Lediglich bei schwachen Winden unterscheidet sich die Strömung vor dem Modul etwas von dem 4-Module-Modell. Für eine Prognose der Rückführrate eignet sich das ursprüngliche Modell ausschließlich für starke Winde.

Unabhängig von der Möglichkeit der Übertragung der Rückführrate von einem auf viele Module, eignen sich die Ergebnisse sehr gut um Verbesserungsmaßnahmen zu entwickeln. Um die Energiegestehungskosten zu reduzieren, kann zum einen der Prozess an die abgeschätzte Rückführrate angepasst werden. Ein flexibles Kraftwerk, welches sich an Windbedingungen anpassen kann, wäre optimal. Zum anderen bietet es sich an, zu untersuchen, ob alternative Nutzungen der Rückführluft bei starken Winden sinnvoll sind.

Basierend auf den Erkenntnissen sind auch Verbesserungsmaßnahmen entstanden speziell die Rückführrate zu steigern. Allgemein kann ein Windschutz sinnvoll sein. Eine Umsetzung exis-

tiert in der Cavity-Bauweise bereits. Ein Windschutz kann auch über einen Windvorhang realisiert werden. Um die Auswirkungen der verlustreichen horizontalen Spalte zu reduzieren, könnte der Receiver insgesamt höher als breit gebaut werden. So würde die Länge der horizontalen Spalte reduziert. Um ein Hinwegblasen der Warmluft über die Wabe zu verhindern, würde es sich positiv auswirken, wenn die Module breiter als hoch sind. Durch in der Höhe kürzere Module könnte auch der horizontale Spalt schmaler werden. Zuletzt ist erkannt worden, dass schwache Winde zu einer Verbesserung der Rückföhrtrate föhren. Über einen künstlichen Seitenwind könnte auch die gesteigerte Rückföhrtrate auch für den Systemwirkungsgrad künstlich ausgeglichen werden.

## 8.2 Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat die gesetzten Ziele erfüllt, dennoch bleiben offene Fragestellungen und Ansatzpunkte für weiterführende Arbeiten.

Um die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit weiter zu detaillieren, könnten weitere Simulationen instationär gerechnet werden. Insbesondere fehlt eine instationäre Berechnung von einem Modul bei starkem Wind. Ebenfalls bleibt im Detail zu klären, was für die Abweichung der instationären Ergebnisse von den stationären verantwortlich ist.

Um das genutzte Modell zu verbessern, sind Informationen zum Einfluss der Grenzschichthöhe sowie der Turbulenz interessant. Möglicherweise ermöglichen Ergebnisse zur Turbulenzbetrachtung eine Reduktion des Modells mittels Symmetrieebenen für mittlere bis starke Winde. Das Modell kann in einem weiteren Schritt auch an verschiedene Windrichtungen angepasst werden. Dies ermöglicht eine umfassendere Beurteilung von Verbesserungsmaßnahmen.

Eine quantitative Abschätzung des Potentials der Verbesserungsmaßnahmen ist mit Hilfe von Winddaten (Histogramm und Windrose) durchzuführen. Mit Hilfe dieser Daten und einem Zusammenhang von Wind, Windrichtung und Rückföhrtrate kann eine Jahresbilanz ermittelt werden. Hinzukommend können noch Modelle entworfen werden, die die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Verbesserungsmaßnahmen simulieren und analysieren.

Unabhängig von der vorliegenden Methodik können weitere Untersuchungen die bisher nicht betrachten Einflüsse auf die Rückföhrtrate, die transienten Effekte sowie Konzeptverbesserungen, analysieren. Außerdem ist es interessant, inwiefern bisherige Parameterstudien für den Windfall zutreffen.

Zuletzt bleibt das generelle Ziel der Findung eines reduzierten Modells für den gesamten Strahlungsempfänger eine Aufgabe der Zukunft.

## Literaturverzeichnis

- [Ahl12] AHLBRINK, N.: *Modellgestützte Bewertung und Optimierung der offenen Luftrezeivertechnologie*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Fakultät für Maschinenwesen, 2012.
- [BGS14] BHARGAV, K. R., F. GROSS und P. SCHRAMEK: *Life Cycle Cost Optimized Helio-  
liostat Size for Power Towers*. Energy Procedia, 49:40–49, 2014.
- [CFL28] COURANT, R., K. FRIEDRICHS und H. LEWY: *Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik*. Mathematische Annalen, 100(1):32–74, 1928.
- [Deu] DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E. V.
- [FP08] FERZIGER, J. H. und M. PERIĆ: *Numerische Strömungsmechanik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [GB12] GERLACH A.-K. und C. BREYER: *PV und Wind: Sich hervorragend ergänzende Energietechnologien am Beispiel Mitteldeutschlands*. Symposium Photovoltaische Solarenergie, (27):3, 2012.
- [Iss86] ISSA, R.I: *Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting*. Journal of Computational Physics, 62(1):40–65, 1986.
- [Kra03] KRAUSE, E.: *Strömungslehre, Gasdynamik und Aerodynamisches Laboratorium*. Teubner, Stuttgart, 2003.
- [Lem00] LEMMON, E. W.: *Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon, and Oxygen From 60 to 2000 K at Pressures to 2000 MPa*. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 29(3):331, 2000.
- [LO13] LAURIEN, E. und H. OERTEL JR.: *Numerische Strömungsmechanik*. 5. Aufl., Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2013.
- [Men94] MENTER, F. R.: *Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications*. AIAA Journal, 32(8):1598–1605, 1994.
- [MRP04] MARCOS, MA. J., M. ROMERO und S. PALERO: *Analysis of air return alternatives for CRS-type open volumetric receiver*. Energy, 29(5-6):677–686, 2004.
- [Neb10] NEBENFÜHR, B.: *OpenFOAM: A tool for predicting automotive relevant ow elds*. Masterarbeit, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2010.
- [PS72] PATANKAR, S.V und D.B SPALDING: *A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 15(10):1787–1806, 1972.

- [Sch04] SCHRÖDER, W.: *Fluidmechanik*, Band 7 der Reihe *Aachener Beiträge zur Strömungsmechanik*. Mainz, Aachen, 2004.
- [Sch13] SCHWARZE, R.: *CFD-Modellierung: Grundlagen und Anwendungen bei Strömungsprozessen*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.

## Eidesstattliche Versicherung

.....  
Name, Vorname Matr.-Nr.

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Studienarbeit mit dem Titel „CFD-Simulation der Strömungssituation vor einem offenen volumetrischen Luftreceiver zur Ermittlung der konvektiven Verlustmechanismen“ selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht haben. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Datum: .....  
(Unterschrift)

Belehrung: Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG - ) Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft. Die Technische Universität Dortmund wird gfs. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen. Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Datum: .....  
(Unterschrift)