

Simon Decher

**CFD gestützte Erarbeitung eines Leitfadens für die
Aufstellung befeuchteter Kühltürme**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau/Energie- und Anlagensysteme
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:

Imtech Deutschland GmbH & Co. KG
Abteilung Forschung und Entwicklung
Hammer Straße 32
22041 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Wulf
Industrieller Betreuer und Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Moritz Nimax
Abgabedatum: 20.01.2015

Zusammenfassung

Simon Decher

Thema der Bachelorarbeit

CFD gestützte Erarbeitung eines Leitfadens für die Aufstellung befeuchteter Kühltürme

Stichworte

Aufstellung von Rückkühlwerken, Rückkühlwerk, RKW, Kühlturm, zwangsbelüftete Nasskühlung, Rezirkulation, Rückströmung, Feuchtkugeltemperatur, Kühlgrenztemperatur, CFD, Fluent, UDF

Kurzzusammenfassung

An die Analyse vorhandener Untersuchungen anknüpfend werden verschiedene Aufstellsituationen von Rückkühlwerken ermittelt und untersucht, um die Kriterien für Rezirkulation zu erfassen. Mittels einer User Defined Function für die Simulationssoftware Fluent wird der Prozess in Rückkühlwerken approximiert und mit den gewonnenen Daten ein Werkzeug für die Beurteilung von Aufstellsituationen geschaffen.

Simon Decher

Bachelor Thesis title

The Development of a Guideline for Mechanical Drafted Cooling Tower Placement with CFD

Keywords

cooling tower placement, cooling tower, mechanical drafted cooling tower, recirculation, backflow, wet-bulb temperature, CFD, Fluent, UDF

Abstract

In addition to results from previous studies, various cooling tower placements will be analyzed to determine the criteria for recirculation. Utilizing a User Defined Function for the simulationsoftware Fluent, the process within a cooling tower can be approximated and the data thereby gained used to create a tool for placement estimation.

Aufgabenstellung Bachelorarbeit im Bereich Strömungssimulation bei Imtech Forschung und Entwicklung

CFD gestützte Erarbeitung eines Leitfadens für die Aufstellung befeuchteter Kühltürme

In der Forschung und Entwicklung bei Imtech Deutschland GmbH & Co. KG werden bereits seit dem Jahr 1989 Methoden der CFD (Computational Fluid Dynamics) eingesetzt. Die Anwendungsbereiche der CFD beinhalten Raumströmungen, Außenströmungen, Rauchausbreitung, Entrauchung, Klimatisierung, Schadstoffbelastung und Kombinationen dieser Anwendungen (HVAC - Heating Cooling Ventilation AirConditioning).

Aus den Projekten bei Imtech ergeben sich immer wieder Anfragen zu Minderleistungen von Rückkühlwerken. Mittels CFD Simulationen konnte aufgezeigt werden, dass in vielen Fällen eine ungünstige Aufstellung und daraus resultierende Rezirkulationen der feuchten Luft (Strömungskurzschluss Austritt-Eintritt) den Hauptgrund für die Minderleistung darstellt.

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Erarbeitung eines Aufstellungsleitfadens für Rückkühlwerke. Dazu sollen die bisher bei Imtech F&E durchgeführten CFD-Untersuchungen ausgewertet und durch eine Literaturrecherche weitere kritische Aufstellungssituationen identifiziert werden. In einfachen Simulationsmodellen sollen die verschiedenen Aufstellungssituationen untersucht und Hinweise und Ausschlusskriterien erarbeitet werden. Aus den Ergebnissen soll eine Matrix erstellt werden, die zur schnellen Prüfung einer Aufstellungssituation beim Kunden und eventueller Anmeldung von Bedenken genutzt werden kann.

Für die CFD-Untersuchungen ist eine UDF zur Ermittlung des Abluftzustandes zu entwickeln, um die Vorhersage einer durch Rezirkulation verursachten Minderleistung der Rückkühlwerke beurteilen zu können.

Die Bachelorarbeit teilt sich in folgende Aufgaben auf:

- Einarbeitung in Ansys Fluent, Design Modeler und Meshing
- Zusammenfassung der bisher bei Imtech F&E per CFD untersuchten kritischen Aufstellungssituationen
- Weitere Literaturrecherche zu kritischen Aufstellungssituationen von Rückkühlwerken
- Modellierung und Simulation der identifizierten kritischen Aufstellungssituationen mit einfachen Modellen mittels Fluent
- Entwicklung und Anwendung einer UDF zur Ermittlung des Abluftzustandes eines Rückkühlwerkes in Funktion des Zuluftzustandes und notwendiger Herstellerangaben
- Entwicklung einer Matrix zur schnellen Beurteilung der Aufstellungssituation von Rückkühlwerken

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	IX
Begriffe und Formelzeichen	XI
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Technische Nutzung von Rückkühlwerken	3
2.1.1 Bauarten von Rückkühlwerken	3
2.1.2 Kühlung mittels nasser Rückkühlwerke	5
2.1.3 Rezirkulation der Fortluft	6
2.2 Numerische Strömungssimulation	8
2.2.1 Grundlagen der numerischen Strömungssimulation	8
2.2.2 Turbulenzmodelle	9
2.2.3 Berechnungsnetz	10
2.2.4 Simulationstool Fluent	10
2.2.5 User Defined Function	11
3 Vorstudien und vorhandene Untersuchungen	13
3.1 Vorhandene Untersuchungen	13
3.1.1 Fallbeispiel 1	13
3.1.2 Fallbeispiel 2	16
3.1.3 Zusammenfassung beider Beispiele	19
3.2 Umströmung von stumpfen Körpern	20
3.2.1 Randbedingungen der Simulationen	20
3.2.2 Vorgehens- und Auswertungsbeispiel am Kubus	21
3.2.3 Ergebnisdarstellung	24
3.3 Netzanalyse am Kubus	26
3.4 Vergleich mit vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur	28
3.5 Programmergänzung zur Simulation der Rezirkulation	30
4 Untersuchung und Beurteilung verschiedener Aufstellsituationen	37
4.1 Randbedingungen und Simulation	37
4.2 Auswertungsbeispiel der Aufstellsituation am Kubus	37
4.3 Ergebnisse der Untersuchung	41
5 Leitfaden zur schnellen Beurteilung der Aufstellsituation	45

6	Fazit und Ausblick	49
6.1	Fazit	49
6.2	Ausblick	50
6.2.1	Simulationsergebnisse	50
6.2.2	UDF	50
6.2.3	Checkliste	51
	Literatur	53
A	Untersuchung zur Wahl des Rückkühlwerks	57
B	Beeinträchtigung der Ventilatoren	59
C	Rundungsfehler in der UDF	61
D	Checklistenergänzung als Excel-Arbeitsmappe	63

Abbildungsverzeichnis

2.1	Prinzipskizzen eines saug- und eines druckbelüfteten RKW	4
2.2	Luftzustandsänderung in einem RKW im h,x-Diagramm	5
2.3	Graphische Bestimmung der Feuchtkugeltemperatur	7
2.4	Rückströmung der Fortluft zu den Einlässen	7
3.1	RKW Anordnung im Fallbeispiel 1	14
3.2	Absolute Feuchte im Fallbeispiel 1	15
3.3	Feuchteverteilung bei +6 m im Fallbeispiel 1	15
3.4	Strömungsverhältnisse im Fallbeispiel 2	17
3.5	Fortluftschwade der RKW im Fallbeispiel 2	18
3.6	Optimierte Strömungsverhältnisse im Fallbeispiel 2	18
3.7	Druckverlauf der Strömung am Kubus über die Zeitschritte	22
3.8	Strömungsbild um einen Kubus	23
3.9	Geschwindigkeitsprofile im Lee des Kubus	24
3.10	Ergebnisse der Vorstudie	25
3.11	Darstellung der Netze im Bereich um den Kubus	27
3.12	Gegenüberstellung der Auswahlkriterien der Netze	27
3.13	Strömungsbild eines Kubus auf ebener Platte	28
3.14	Q-Kriterium und Drehrichtung am Kubus	29
3.15	Überlagerung der Geschwindigkeitsprofile aus Untersuchung und Literatur	30
3.16	Schema der UDF-Grundstruktur	31
3.17	Flussdiagramm-Abschnitt zur Feuchte- & Temperaturbegrenzung	35
3.18	Beispiele für Gegenüberstellungen der Austrittsenthalpie	36
3.19	UDF-Zustandsänderungen im h,x-Diagramm	36
4.1	Beispiel für Verläufe der Kriterien über Zeitschritte	38
4.2	Beurteilungskriterien über die Zeit dargestellt	38
4.3	Strömungssituation am Kubus im horizontalen Schnitt	39

4.4	Gegenüberstellung der Luftzustandsänderungen	40
4.5	Mittlere absolute und relative Feuchte im Eintritt	42
4.6	Säulendiagramm der Ergebnisse	44
4.7	Umströmung eines Gebäudedaches	44
A.1	Vergleich der RKW bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten	58
D.1	Eingabebereich und Detailbereich Ausschnitt der Excel-Arbeitsmappe . .	64
D.2	Säulendiagramm der berechneten Werte	65

Tabellenverzeichnis

1	Vergleich der Fallbeispiele	20
2	Liste der untersuchten Varianten	41
3	Ergebnistabelle der Hauptstudie	43
4	Vergleich der Feuchtkugeltemperaturberechnungen	61

Begriffe und Formelzeichen

Begriffe

CFD – Computational **F**luid **D**ynamics, dt. numerische Strömungsmechanik: Eine Methode zur computergestützten approximierten Lösung von strömungsmechanischen Problemen [21].

GUI – **G**raphical **U**ser **I**nterface: grafische Benutzeroberfläche zur Bedienung eines Programms

Lee – Vom Wind abgewandte Seite

Luv – Dem Wind zugewandte Seite

RKW – **R**ückkühlwerk: Überbegriff für Aggregate, die einem Kreislauf zugeführte Wärme an die Umgebung abgeben können.

twb – **T**emperature **W**et-**B**ulb, dt. Feuchtkugeltemperatur oder Kühlgrenztemperatur: „ist die tiefste Temperatur, die sich durch direkte Verdunstungskühlung erreichen lässt.“[18]

UDF – **U**ser **D**efined **F**unction: Vom Benutzer definierbare Programmergänzung hier für Fluent

Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
c_p	Isobare Wärmekapazität	$\frac{J}{kgK}$
E_{ij}	Verformungsgeschwindigkeit	$\frac{1}{s}$
g	Erdbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
h	spezifische Enthalpie	$\frac{J}{kg}$
k	turbulente kinetische Energie	$\frac{m^2}{s^2}$
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom in Kilogramm pro Sekunde	$\frac{kg}{s}$
p	Druck	Pa
Q	Wärmemenge	W
r_{d0}	Verdampfungsenthalpie von Wasser	$\frac{J}{kg}$
t	Temperatur in Grad Celsius	$^{\circ}C$
T	Temperatur in Kelvin	K
t_{wb}	Feuchtkugeltemperatur	$^{\circ}C$
u	Erste Komponenten des Geschwindigkeitsvektors \mathbf{U}	$\frac{m}{s}$
\mathbf{U}	Geschwindigkeitsvektor	
v	Zweite Komponente des Geschwindigkeitsvektors \mathbf{U}	$\frac{m}{s}$
\dot{V}	Volumenstrom in Kubikmeter pro Stunde	$\frac{m^3}{h}$
$v(z)$	Windgeschwindigkeit abhängig von z	$\frac{m}{s}$

$v(z_{ref})$	Referenzwindgeschwindigkeit im Windprofil	$\frac{m}{s}$
w	Dritte Komponente des Geschwindigkeitsvektors \mathbf{U}	$\frac{m}{s}$
x	absoluter Wassergehalt in kg Wasser pro kg Luft	$\frac{kg}{kg}$
y	Massenanteil bezogen auf die Gesamtmasse	
z	Laufvariable der Höhe	m
z_{ref}	Referenzhöhe im Windprofil	m
α	Höhenwindexponent	
Δ	Differenz	
∂	Symbol für partielle Ableitung	
∂t	Partielle Ableitung nach der Zeit	
ϵ	Dissipationsrate	$\frac{m^2}{s^3}$
μ_t	Dynamische Wirbelviskosität	$\frac{Ns}{m^2}$
ρ	Dichte in Kilogramm pro Kubikmeter	$\frac{kg}{m^3}$
φ	relative Feuchte der Luft	$\%$
ω	spezifische Dissipationsrate bzw. turbulente Frequenz	

Indizes Bedeutung

1	Eintrittszustand
2	Austrittszustand
Ges	Gesamt
i,j	Vektorkomponenten
ist	Ist-Wert
L	Luft
Ltr	trockene Luft
max	Maximalwert
satt	gesättigte Luft
soll	Soll-Wert
w	Wasser
wd	Wasserdampf
zu	zugeführt

1 Einleitung

Diese Arbeit ist mit Unterstützung der Abteilung Forschung und Entwicklung der Imtech Deutschland GmbH und Co. KG verfasst worden. Imtech Deutschland mit Sitz in Hamburg gehört zur niederländischen Konzerngruppe der Royal Imtech N.V. Rund 5 000 Mitarbeiter beschäftigen sich bei Imtech Deutschland unter anderem mit Bereichen wie Brandschutz, Powersystems und Building Management Solutions.

Neben einem Labor, in dem komplexe Versuchsaufbauten realisiert werden können, stehen der Forschung und Entwicklung bei Imtech Deutschland umfangreiche Soft- und Hardwareressourcen für energetische Bewertungen und Strömungssimulationen zur Verfügung.

Die Abteilung Forschung und Entwicklung ist mehrfach beauftragt worden, mittels Strömungssimulationen zu untersuchen, ob die Minderleistung eines oder mehrerer Rückkühlwerke durch Rezirkulation hervorgerufen wird. Belüftete Rückkühlwerke werden zur Abfuhr überschüssiger Wärme verwendet. Es gibt Bestandsanlagen, bei denen die Kühlleistung der Rückkühlwerke unter bestimmten Umgebungsbedingungen unzureichend ist. Bei einem technisch funktionsfähigen Rückkühlwerk kann Rezirkulation der Fortluft durch das Rückkühlwerk die Ursache für die Minderleistung sein.

Die Ergebnisse zeigen, dass Rezirkulation der Fortluft auftritt und die Rückkühlwerke beeinträchtigt. In welchem Maß die Beeinträchtigung auftritt, konnte nicht bestimmt werden. Da Rezirkulation festgestellt wurde, soll untersucht werden, welche Kriterien beim Aufstellen eines Rückkühlwerks Rezirkulation hervorrufen können und daher geprüft werden müssen.

Erste Vermutungen, welche Kriterien geprüft werden müssen, lassen sich aus den vorhandenen Untersuchungen ableiten. Um die Vermutungen zu festigen, werden verschiedene potentielle Aufstellungssituationen mittels numerischer Strömungssimulation auf kritische Bereiche hin untersucht. Die Modelle der Aufstellungssituationen werden in den kritischen Bereichen, an denen Rezirkulation erwartet wird, um ein Rückkühlwerk ergänzt und simuliert.

Für die Durchführung der Untersuchungen ist es nötig, das Maß der Beeinträchtigung des Rückkühlwerkes bestimmen zu können. Deshalb muss eine Programmergänzung entwickelt werden, die es der Simulation ermöglicht, den Einfluss der Rezirkulation zu bestimmen und zu berücksichtigen. Die Programmergänzung wird so umgesetzt, dass sie den Fortluftzustand in Abhängigkeit des Zuluftzustandes berechnet.

Ziel ist es, durch die Untersuchung zukünftig bereits vor der Strömungssimulation eine Abschätzung der Situation geben zu können. Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Untersuchungen werden entsprechend zusammengetragen und in einer Checkliste zur schnellen Beurteilung von Aufstellungssituationen gebündelt.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Damit die zugrunde liegende Problemstellung der Rezirkulation verstanden werden kann, wird zunächst auf das Rückkühlwerk als Baugruppe eingegangen und werden verschiedene Merkmale beschrieben. Der Aufbau und die Funktion eines Rückkühlwerks wird ebenso erläutert wie das Zustandekommen von Minderleistung durch Rezirkulation.

Weiter wird die Methode der Strömungssimulation erläutert und die verwendete Theorie und Software vorgestellt.

2.1 Technische Nutzung von Rückkühlwerken

„Ein Kühlturm bzw. Rückkühlwerk ist eine Anlage, in der [...] überschüssige Wärme [...] an die Umwelt abgegeben wird.“ [19]

Rückkühlwerke werden eingesetzt, um ein Fluid zu kühlen. Das Fluid kann das Rückkühlwerk dabei nur einmal oder wiederholt durchlaufen. Ein Beispiel für das einmalige Durchlaufen eines Rückkühlwerks ist die Kühlung von Wasser, das einem Fluss zugeführt wird. Ein Beispiel für ein, das Rückkühlwerk mehrfach durchlaufendes Fluid, ist ein geschlossener Kühlkreislauf.

Die bekanntesten Beispiele für Rückkühlwerke sind Kühltürme von Kraftwerken, da sie mit Bauhöhen von bis zu 200 m leicht auffallen.

2.1.1 Bauarten von Rückkühlwerken

Rückkühlwerke (RKW) gibt es in unterschiedlichen Bauarten und Varianten. Sie reichen von großen Naturzug-Kühltürmen für Kraftwerke bis zu kleinen zwangsbelüfteten Rückkühlern von Klimaanlage an Hausfassaden. Die RKW, die Gegenstand dieser Arbeit sind, befinden sich, Kühlleistung und Baugröße betreffend, zwischen diesen beiden Extremen. Sie werden in Gewerbe und Industrie eingesetzt, um Wärmemengen bis 30 MW abzuführen [14].

Grundsätzlich unterscheiden sich RKW in drei Merkmalen. Ein Merkmal ist die Art des *Kühlkreislaufs*, der offen oder geschlossen ausgeführt werden kann. Beim offenen Kühlkreislauf kommt das zu kühlende Medium direkt mit der Umgebung in Kontakt. Ein Teil des Mediums (in der Regel Wasser) verdunstet dabei. Die aufgenommene Verdampfungsenthalpie führt zu einer Abkühlung des Kühlwassers. Geschlossene Kreisläufe bieten dem Kühlwasser keine Möglichkeit mit der Umgebung in Kontakt zu kommen. Hier wird der Wärmeübergang über möglichst große Wärmetauscherflächen begünstigt, welche dann mit der Umgebung in Kontakt stehen.

Für das zweite Merkmal, die *Kühlung* der Wärmetauscherflächen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Es kann rein konvektiv durch ausreichend große Luftvolumenströme gekühlt werden. Man spricht von trockenen RKW. Kommt eine zusätzliche Berieselung der Flächen mit Wasser hinzu, spricht man von nassen RKW. Sie nutzen, wie beim offenen Kreislauf den Wärmebedarf der Verdunstung des Wassers, um die Kühlung zu verbessern. Besonders im Sommer können nasse RKW sinnvoll sein, da auf Temperaturen unterhalb der Umgebungstemperatur gekühlt werden kann. Die Art der Kühlung ist eine

Unterscheidung bei RKW mit geschlossenen Kreisläufen, da es in der Natur der Sache liegt, dass trockene RKW nur bei geschlossenen Kreisläufen vorkommen. Das Merkmal der Art der Kühlung ist bei RKW für offene Kreisläufe auch vorhanden aber eindeutig.

Eine Kombination aus nassen und trockenen RKW bilden hybrid-Rückkühlwerke. Hybride RKW können rein konvektiv betrieben werden, bis die Umgebungstemperatur nicht mehr ausreichend gering ist, um die Wärme abzuführen. Dann können diese RKW auch nass betrieben und dadurch die Kühlleistung verbessert werden.

Das dritte Merkmal bildet die Art der *Belüftung*. Sie unterscheidet sich in saugbelüftete und druckbelüftete RKW, deren Funktionsprinzipien in Abbildung 2.1 beispielhaft veranschaulicht werden. Bei saugbelüfteten RKW sind Axialventilatoren in Luftrichtung hinter den Wärmetauscherflächen angeordnet und saugen somit die Luft durch das RKW. Durch ihre Bauweise sind sie platzsparender als druckbelüftete RKW, da bei saugbelüfteten RKW mehr Wärmetauscherfläche pro Grundfläche untergebracht werden kann [24]. Druckbelüftete RKW werden durch Radialverdichter vor den Wärmetauscherflächen realisiert, die Frischluft ansaugen und in das RKW-Gehäuse drücken. Sie werden bevorzugt, wenn beispielsweise durch Schalldämpfer vor und hinter dem RKW größere Druckverluste überwunden werden müssen. Diese Art der Belüftung weist eine deutlich geringere Austrittsgeschwindigkeit und somit einen geringeren Impuls der Fortluft auf, als saugbelüftete RKW.

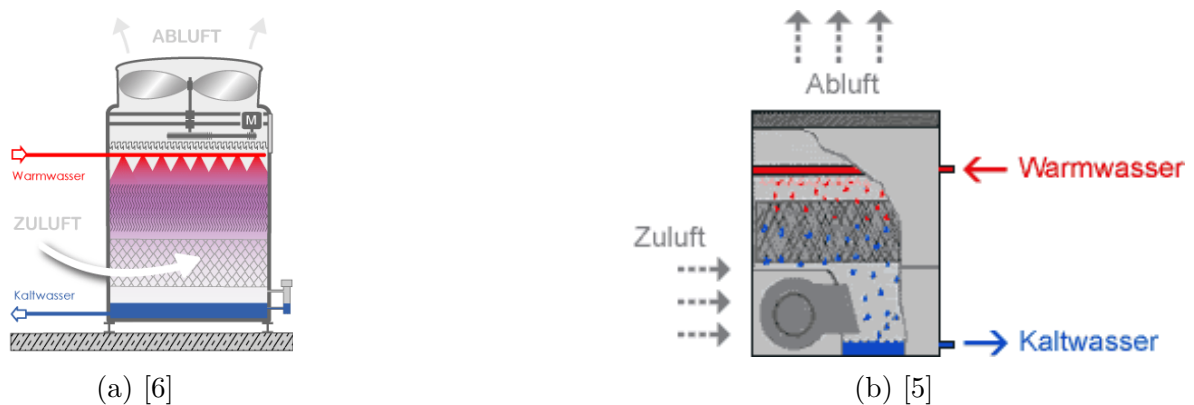
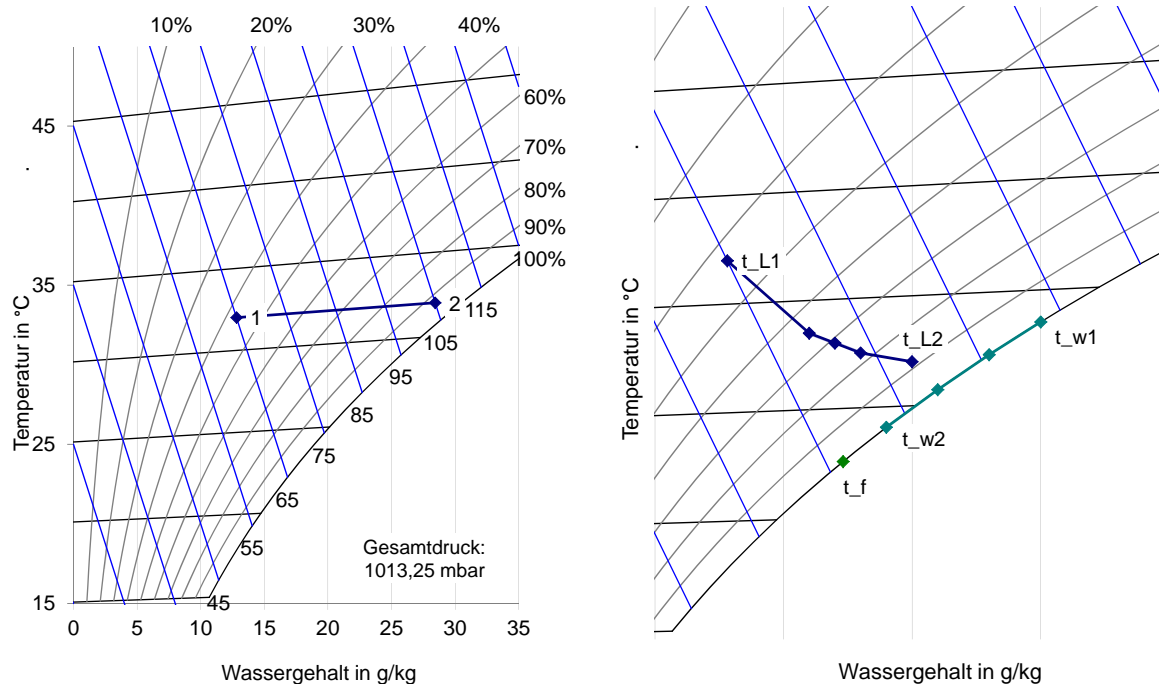


Abbildung 2.1: Prinzipskizzen eines saug- (a) und eines druckbelüfteten (b) RKW

2.1.2 Kühlung mittels nasser Rückkühlwerke

Nasse RKW nutzen die Verdampfungsenthalpie des Wassers beim Verdunsten, um ihre Kühlleistung zu erreichen. Dabei wird der durchströmenden Luft Wasser zugeführt. Die Zustandsänderung der Luft ist beispielhaft in Abbildung 2.2 dargestellt.



- (a) Vereinfachte Zustandsänderung der Luft (b) Reale Zustandsänderung der Luft in Anlehnung an Recknagel [25]
 t_L : Zustandsänderung der Luft
 t_w : Zustandsänderung des Wassers
 t_f : Feuchtkugeltemperatur

Abbildung 2.2: Luftzustandsänderung in einem RKW im h,x -Diagramm

Abbildung 2.2a zeigt eine idealisierte isotherme Zustandsänderung im h,x -Diagramm nach Mollier, wie sie in der UDF in Abschnitt 3.5 umgesetzt ist. Die spezifische Enthalpie der Luft wird nur durch Zunahme des Wassergehaltes x der Luft erhöht. Es wird gerade soviel Wasser verdunstet, dass weder die Luft erwärmt werden muss, um zusätzlich Wärme abzuführen, noch wird die Luft durch die Verdunstung des Wassers gekühlt. Die gesamte Wärmemenge zur Verdunstung wird aus den Kühlflächen bezogen. Die Enthalpiedifferenz zwischen Zustand 1 und 2 entspricht der Wärme, die pro Kilogramm trockener Luft abgeführt werden kann.

Beim realen Prozess läuft die Zustandsänderung nicht isotherm ab. Ein Beispiel für eine reale Zustandsänderung im h,x -Diagramm ist in Anlehnung an Recknagel [25] in Abbildung 2.2b dargestellt. Die Temperaturänderung des Wassers wird auf der Taulinie eingetragen, da in der Grenzschicht von gerade gesättigter Luft ausgegangen wird. Die gesättigte Luft besitzt die Temperatur des Wassers. Treibende Kraft für die Verdunstung

ist die Partialdruckdifferenz zwischen dem Wasser und dem Wasserdampf in der Luft. Die reale Zustandsänderung bei der Verdunstung im RKW ist eine Kombination aus Energie- und Stoffaustausch. Das warme Wasser gibt Wärme an die Luft ab, während der verdunstende Teil des Wassers Wärme zur Verdampfung bezieht und von der Luft aufgenommen wird.

Bei der Kühlung durch Verdunstung kann auf eine Temperatur unterhalb der Umgebungstemperatur gekühlt werden. Die Temperatur, auf die maximal gekühlt werden kann, heißt Feuchtkugel- oder Kühlgrenztemperatur und ist von der Umgebungstemperatur und der relativen Feuchte bzw. dem Sättigungsgrad abhängig. Die Abhängigkeit vom Sättigungsgrad erschließt sich daraus, dass nur bis zur Sättigung der Luft Wasser aufgenommen und somit lediglich bis zu diesem Punkt verdunstet werden kann. Bei einer höheren Sättigung der Luft im Eintrittszustand ist die verdunstende Wassermenge im RKW geringer. Dies führt zu einer geringeren Kühlleistung als bei einer niedrigeren Sättigung der Luft. Die Temperaturabhängigkeit resultiert daraus, dass der Sättigungsgrad ebenfalls temperaturabhängig ist. Linien konstanten Sättigungsgrades sind in Abb. 2.2a und 2.3 als graue Linien dargestellt.

Die Feuchtkugeltemperatur gibt den Auslegungspunkt eines RKW an. Allerdings muss im Bezug auf den Umgebungszustand von einer Auslegungsgeraden gesprochen werden, denn die Feuchtkugeltemperatur kann für alle Zustände entlang einer Geraden im h,x -Diagramm erreicht werden. Die zugehörige Temperatur und Feuchte sollte bekannt sein. Abbildung 2.3 zeigt die graphische Bestimmung der Feuchtkugeltemperatur t_{wb} im h,x -Diagramm. Der Umgebungszustand 1 ist gegeben. Durch die Verlängerung der Nebelisotheorie durch den Punkt 1 erhält man im Schnittpunkt mit der Taulinie die zugehörige Feuchtkugeltemperatur t_{wb} . Alle Kombinationen aus Temperatur und Feuchte entlang der verlängerten Nebelisotheorie führen zu dieser Feuchtkugeltemperatur.

Die Feuchtkugeltemperatur wird beim RKW also in Verbindung mit der Umgebungstemperatur und -feuchte angegeben, für die das RKW ausgelegt wurde. Im Beispiel in Abb. 2.3 hat die Umgebung eine Temperatur von $35,0^\circ\text{C}$ und einen Wassergehalt von $20,0\text{ g/kg}$, was einer relativen Feuchte von etwa $55,0\%$ entspricht. Die ermittelte Feuchtkugeltemperatur bei diesem Umgebungszustand liegt bei $27,5^\circ\text{C}$.

Da die Feuchtkugeltemperatur ein wesentliches Kriterium für die Funktionalität eines RKW darstellt und diese von Temperatur und Feuchte der Zuluft abhängt, kann eine Rückströmung von Fortluft zu den Einlässen der RKW zu Beeinträchtigungen führen.

2.1.3 Rezirkulation der Fortluft

Aufgrund der geringen Baugrößen von zwangsbelüfteten RKW und daraus resultierenden geringen Abständen zwischen Ein- und Austritt der Luft sowie ungünstiger Wetter- und Umgebungsverhältnisse, kann es zur Rezirkulation der Fortluft durch das RKW kommen. Abbildung 2.4 visualisiert durch Stromlinien die Rezirkulation. Die Stromlinien beginnen an den runden Austrittsöffnungen und führen zurück zu den Eintrittsflächen an den Seiten des RKW.

Dies führt bei andauernder Rezirkulation von Fortluft zu einer höheren Wasserbeladung der Zuluft als der Umgebungsluft. Die höhere Wasserbeladung kann zu einer verminderten Kühlung führen. Grund dafür ist die in Abschnitt 2.1.2 erläuterte Feucht-

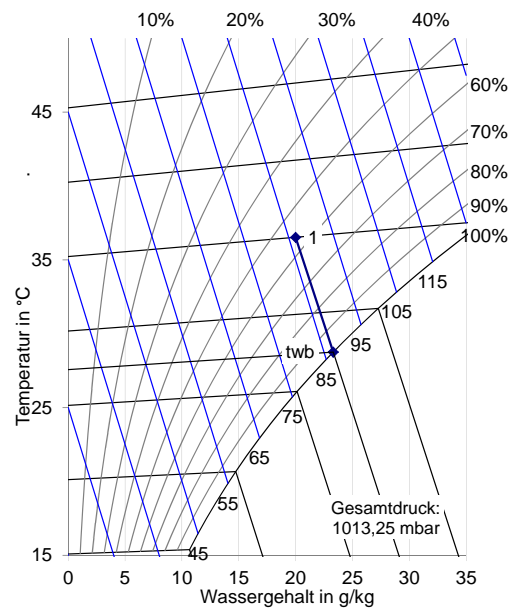


Abbildung 2.3: Graphische Bestimmung der Feuchtkugeltemperatur

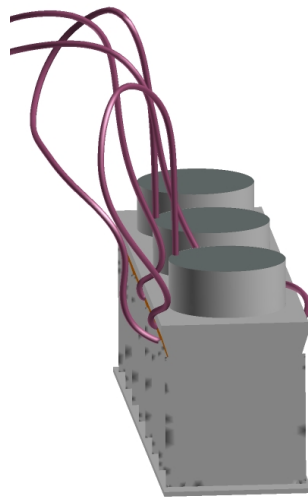


Abbildung 2.4: Rückströmung der Fortluft zu den Einlässen dargestellt durch Stromlinien [15]

kugeltemperatur. Wird durch zu hohe Wasserbeladung der Luft die Feuchtkugeltemperatur im Auslegungspunkt überschritten, kann das RKW nicht mehr genügend Wärme an die Umgebung abführen.

Im Abschnitt 2.1.1 wird auf die geringeren Austrittsgeschwindigkeiten von druckbelüfteten RKW hingewiesen. Vorab-Untersuchungen haben gezeigt, dass die geringen Austrittsgeschwindigkeiten druckbelüftete RKW für Rezirkulation anfälliger machen als saugbelüftete (vgl. Anhang A). Die höheren Austrittsgeschwindigkeiten bei saugbelüfteten RKW begünstigen den Austrag der Fortluft und sie gelangt weiter vom RKW weg. In den folgenden Simulationen sind druckbelüftete RKW modelliert und es wird die Anfälligkeit für Rückströmung untersucht.

Naturzug-Kühltürme und ventilatorunterstützte Naturzug-Kühltürme sollen hier nicht betrachtet werden, da diese Bauarten für das Geschäftsfeld von Imtech Deutschland nicht relevant sind.

2.2 Numerische Strömungssimulation

Zur Analyse der Umströmung verschiedener Körper und den Einfluss auf RKW wird numerische Strömungssimulation (engl.: computational fluid dynamics, CFD) verwendet. Mittels Strömungssimulationen können strömungsmechanische Probleme approximativ gelöst werden [21].

Es gibt verschiedene Softwarepakete, die Strömungssimulationen ermöglichen. Die für diese Arbeit verwendete Software ist Fluent der Ansys Incorporation.

2.2.1 Grundlagen der numerischen Strömungssimulation

Die häufigste Methode zum Lösen strömungsmechanischer Probleme mittels Strömungssimulation ist die Finite-Volumen-Methode, kurz FVM. Hier wird das durchströmte Gebiet durch eine endliche Anzahl von Zellen dargestellt. Für jede dieser Zellen werden die Erhaltungsgleichungen für Kontinuität, Impulserhalt sowie Energieerhalt gelöst.

Die Kontinuitätsgleichung sagt aus, dass keine Masse vernichtet oder erschaffen werden, wohl aber über die Grenzen des System einfließen kann, wenn die gleiche Masse aus dem System ausfließt und umgekehrt, oder die Dichte sich ändert. Eine weitere Erhaltungsgleichung ist die Impulserhaltung. Sie besagt nach Newtons Axiomen, dass die Änderung des Impulses von den einwirkenden Kräften abhängt. Zusammen mit der Energieerhaltung, die besagt, dass keine Energie geschaffen oder vernichtet werden kann, bilden die Erhaltungssätze die Grundlage für die Navier-Stokes-Gleichungen.

Für turbulente Strömungen werden Schwankungen der Strömungsgrößen über die Zeit gemittelt. Die zeitliche Mittelung führt zu einer Aufteilung der Geschwindigkeitskomponenten zum Zeitpunkt t in den zeitunabhängigen Mittelwert $\bar{\bullet}$ und der zeitabhängigen Differenz \bullet' :

$$u = \bar{u} + u'; \quad v = \bar{v} + v'; \quad w = \bar{w} + w' \quad (2-1)$$

Werden diese Mittelungen auf die Navier-Stokes-Gleichungen angewendet, spricht man von Reynolds Averaged Navier Stokes Gleichungen, kurz RANS. Dabei kommt es zu sechs

weiteren Unbekannten in der Form des Reynolds'schen Spannungstensors:

$$\rho \overline{\mathbf{U}'\mathbf{U}'} = \rho \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix} \quad (2-2)$$

mit der Dichte ρ und dem Geschwindigkeitsvektor \mathbf{U} . Diese Unbekannten führen zum Schließungsproblem des Gleichungssystems. Um das System lösen zu können, müssen weitere Gleichungen gefunden werden. Diese Gleichungen werden in Turbulenzmodellen zur Verfügung gestellt.

Für eine vollständige Herleitung der RANS-Gleichungen sei auf [27, 31] verwiesen, sowie auf den Abschnitt *Theory Guide* im Kapitel *Fluent* der ANSYS Help [1]. Hier ist die Umsetzung der Gleichungen in der verwendeten Software ebenfalls zu finden.

2.2.2 Turbulenzmodelle

Turbulenzmodelle modellieren nicht, wie der Name vermuten lässt, die Turbulenzen an sich, sondern schließen das Strömungsgleichungssystem. Das Gleichungssystem wird durch Gleichungen oder Beziehungen geschlossen, die einen Zusammenhang zwischen den gemittelten Strömungsgrößen und der Reynoldsspannung herstellen. Sie sind in der Regel empirischer Natur, beruhen also auf experimentell ermittelten Daten.

Es gibt verschiedene Ansätze, um das Schließungsproblem zu lösen. Im Folgenden sollen aber nur die weit verbreiteten Zweigleichungsmodelle k - ϵ und k - ω -SST erläutert werden.

Das k - ϵ -Modell fügt dem Gleichungssystem zwei Transportgleichungen für die turbulente kinetische Energie k und Dissipation ϵ hinzu. Es schließt das Gleichungssystem, indem es einen Zusammenhang zwischen Wirbelviskosität und Geschwindigkeitsfeld der Strömung herstellt und dabei eine isotrope Turbulenz annimmt [17, 22].

Die Bewegungsgleichungen lauten in Infixschreibweise nach [1, 9, 17, 27, 31, 32]:

Turbulente kinetische Energie k

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (2-3)$$

Dissipation ϵ

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t}}_{\text{Änderungsrate}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i}}_{\text{Konvektiver Transport}} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right]}_{\text{Diffusiver Transport}} + \underbrace{C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij}}_{\text{Produktion}} - \underbrace{C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}}_{\text{Dissipation}} \quad (2-4)$$

mit der Dichte ρ und der partiellen Ableitung nach der Zeit ∂t , u_i für die Geschwindigkeitskomponenten und x_i und x_j für die Raumrichtungen, E_{ij} für die Verformungsgeschwindigkeit und mit der Wirbelviskosität μ_t

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}. \quad (2-5)$$

Die Modellkonstanten σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$ und $C_{2\epsilon}$ stellen die eingangs erwähnte empirische Natur der Turbulenzmodelle dar. Sie werden in Versuchen ermittelt und validiert. Einen Vorschlag für die Konstanten, die auch als Standardwerte bei der Auswahl des Modells eingestellt sind, liefert beispielsweise ANSYS Help [1].

Das k - ω -shear-stress transport (SST) - Modell ist ein Hybridmodell, das die Vorteile des standard k - ω -Modells nach Wilcox [31] in wandnahen Bereichen mit den Vorteilen des k - ϵ -Modells in wandfernen Bereichen vereint [22].

Das k - ω -Modell ist wie das k - ϵ -Modell ein Zweigleichungsmodell, das zwei zusätzliche Transportgleichungen liefert, um bei turbulenter Strömung das Gleichungssystem zu schließen. Die transportierte Größe neben der turbulenten kinetischen Energie k ist hier die spezifische Dissipationsrate bzw. turbulente Frequenz ω .

Eine ausführliche Beschreibung des k - ω -Modells nach Wilcox liefert zum Beispiel [31] und für das SST-Modell nach Menter zum Beispiel [13], sowie [1].

Für die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Simulationen wurde das k - ω -SST-Modell verwendet.

2.2.3 Berechnungsnetz

Jede Strömungssimulations-Software – und damit auch die verwendete Software Fluent – benötigt zum Lösen eines strömungsmechanischen Problems den Raum, den das Fluid durchströmt, in Form eines dreidimensionalen Netzes. Das Netz als räumliche Diskretisierung legt fest, an welchen Raumpunkten die Bewegungs- und Transportgleichungen gelöst werden. Die Diskretisierung macht das Lösen der Gleichungen erst möglich.

Die Schwierigkeit beim Vernetzen ist der Kompromiss zwischen Genauigkeit und Performance. Je feiner das Netz ist, also je mehr Zellen es besitzt, desto genauer sind die Ergebnisse. Der Grund dafür liegt darin, dass die Parameter der Strömung an den Rändern der Elemente bestimmt und über das Element gemittelt werden. Sind die Elemente sehr groß, ergeben sich auch große Abstände zwischen den Elementrändern. Da die Strömung zwischen den Rändern nicht berechnet, sondern gemittelt wird, kann beispielsweise ein Wirbel, welcher komplett von einem Element umschlossen wird, nicht berechnet und somit nicht abgebildet werden. Daher sollten die Elemente möglichst klein gewählt werden.

Daraus, dass die Transportgleichungen für jedes Element gelöst werden, lässt sich direkt auf den Nachteil eines sehr feinen Netzes, also mit sehr vielen Elementen, schließen: An jedem Elementrand werden die Strömungsgleichungen gelöst, was zu erheblichem Rechenaufwand führen kann. Somit muss festgestellt werden, welches Netz grob genug ist, um die Rechenleistung gering zu halten, aber fein genug, um realitätsnahe Resultate zu liefern. Dafür bietet die Software zum Vernetzen einige Einstellmöglichkeiten, um das Netz individuell anpassen zu können.

2.2.4 Simulationstool Fluent

Die für diese Arbeit verwendete Strömungssimulations-Software Fluent der Ansys Inc. in der Version 15.0.7 stellt ein GUI bereit, welches die Einstellmöglichkeiten und Rand-

bedingungen abfragt, die zur Lösung der Transportgleichungen benötigt werden. Zur Lösung dieser Transportgleichungen für unterschiedliche strömungsmechanische Probleme werden verschiedenste Modelle und Löser angeboten.

Während der Berechnung werden die sog. Residuen über Iterationen oder Zeitschritte dargestellt. Sie bieten eine Möglichkeit zur Einschätzung, ob eine Simulation konvergiert, sich also einer Lösung annähert oder nicht. Die Residuen stellen dabei ein Maß für den Fehler der momentanen Lösung der Transportgleichungen dar. Sie sollten im Laufe der Simulation um einige Größenordnungen sinken.

Gerade bei instationären Aufgabenstellungen reichen die Residuen oft nicht aus, um einschätzen zu können, ob eine Simulation sich einer Lösung angenähert hat. Dann können zusätzlich Strömungsparameter über Iterations- oder Zeitschritte grafisch dargestellt werden.

Reichen die von Fluent bereitgestellten Parameter nicht aus, bzw. müssen Parameter zunächst bestimmt werden, muss dies in einer individuellen Funktion durchgeführt werden. Fluent nennt eine solche Funktion *User Defined Function*.

2.2.5 User Defined Function

User Defined Functions oder kurz UDF bieten dem Benutzer eine Schnittstelle, um den Berechnungen pro Iteration zusätzliche Funktionen hinzuzufügen. Sie wird in Form eines Quellcodes in einer zusätzlichen Datei in Fluent eingebunden. Fluent erwartet eine solche UDF in der Programmiersprache C. Wobei Fluent selbst noch einige zusätzliche Funktionen zur Verfügung stellt, die unter anderem das Lesen und Schreiben von Parametern in das Netz und die Verarbeitung dieser durch mehrere Prozesse ermöglicht.

In der vorliegenden Arbeit werden UDF verwendet, um Randbedingungen zu implementieren und einige Parameter der Zustandsänderung im RKW während der Berechnung grafisch darzustellen.

Eine UDF bietet aber eine Reihe mehr Möglichkeiten, Einfluss auf die Löser zu nehmen. Eine detaillierte Anleitung über die Funktionen sowie die Umsetzung einer UDF bietet [1].

3 Vorstudien und vorhandene Untersuchungen

Ziel dieser Arbeit ist es, durch die Untersuchung und Beurteilung von Aufstellsituationen von Rückkühlwerken einen Leitfaden zur schnellen Bewertung von Aufstellsituationen hinsichtlich der Möglichkeit auftretender Rückströmung zu erarbeiten. Vor der Untersuchung von Aufstellsituationen von RKW sind Voruntersuchungen durchzuführen. Die Auswertung vorhandener Untersuchungen, die Umströmungen verschiedener Körper und die Entwicklung einer UDF, die die Beurteilung der Aufstellsituation ermöglicht, als Bestandteile der Voruntersuchungen, schaffen Grundlagen für die Untersuchung der Aufstellsituationen. Die Vorstudien sollen in diesem Abschnitt erläutert werden.

3.1 Vorhandene Untersuchungen

Die Problemstellung dieser Arbeit resultiert aus vorhandenen Untersuchungen der Abteilung Forschung und Entwicklung von Imtech Deutschland. Die Untersuchungen befassten sich mit Rückkühlwerken, die unter bestimmten Umgebungsbedingungen nicht genügend Wärme abführen konnten, obwohl der vom Hersteller angegebene Auslegungszustand noch nicht überschritten war.

Zwei dieser Untersuchungen sollen kurz vorgestellt und zusammengefasst werden. Sie werden im Folgenden als Fallbeispiel 1 & 2 bezeichnet.

3.1.1 Fallbeispiel 1

Diesem Abschnitt liegt der interne Bericht zum Fallbeispiel 1 der Abteilung Forschung und Entwicklung von Imtech Deutschland [15] zugrunde. Alle Daten und Abbildungen stammen aus diesem Bericht.

Zunächst ist der Zustand, in dem die Auffälligkeiten auftraten, reproduziert und simuliert worden. Dies beinhaltet Umgebungsverhältnisse, technische Daten und die Aufstellungssituation. In diesem Fall sind acht Rückkühlwerke auf einem Dach aufgestellt und von einer Mauer umgeben. Abbildung 3.1 zeigt das erstellte Modell der Umgebung.

Da die RKW ihre geforderte Leistung nicht liefern konnten, ein technischer Defekt aber auszuschließen ist, wird angenommen, dass jedes RKW seinen Auslegungspunkt – also den Zustand, in dem gerade noch die projektierte Leistung erreicht werden kann – erreicht hat. Als technische Daten und Parameter werden in der Simulation folglich die vom Hersteller angegebenen Daten im Auslegungspunkt herangezogen:

- Bauweise: geschlossener Kühlkreislauf, saugbelüftet
- Feuchtkugeltemperatur: $24,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – bei $35,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $36,0\%$ rl.F.
- Wasserverbrauch: $2,1\text{ m}^3/\text{h}$
- Luftmenge: $320\,000\text{ m}^3/\text{h}$

Es herrschte eine Temperatur von $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ und eine absolute Feuchte von $7,5\text{ g/kg}$. Dies ergibt eine relative Feuchte von etwa $21,5\%$. Zusätzlich wehte ein Wind aus westlicher Richtung mit einer Geschwindigkeit von $4,5\text{ m/s}$. Die Daten sind in Tabelle 1 auf Seite 20 noch einmal zusammengefasst.

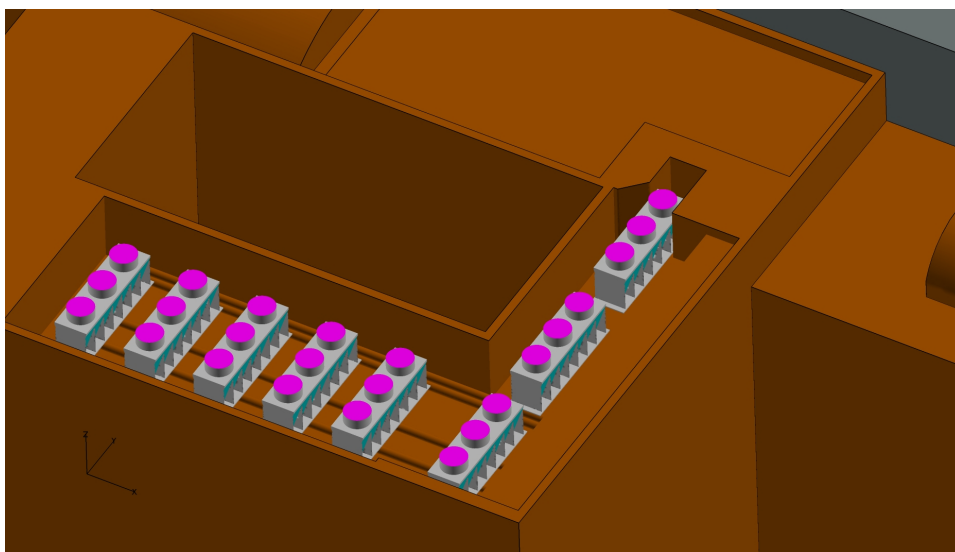


Abbildung 3.1: Anordnung der RKW auf dem Dach [15]

Ergebnis der Simulation des Ist-Zustandes Es zeigte sich, dass durch die umliegenden Gebäude und die Ummauerung, welche einen verengten Querschnitt bilden, in Kombination mit dem Luftbedarf der RKW bereits ein Unterdruck im Bereich der RKW entsteht. Die Abluft der Aggregate kann nicht in höhere, horizontal gerichtete Strömungsschichten eindringen. Aufgrund dieser vorherrschenden Verhältnisse entstehen abwärts gerichtete Strömungen im Bereich der RKW. Es kommt zur Rückströmungen der ausgeblasenen Luft an die Ansaugöffnungen der RKW. Die zurückströmende Luft hat eine absolute Feuchte von bis zu $11,5 \text{ g/kg}$. Abbildung 3.2 veranschaulicht die Rückströmung der Fortluft zu den Einlassöffnungen der RKW als ISO-Fläche einer Feuchte von $8,7 \text{ g/kg}$.

Eine Beeinträchtigung der RKW wäre erst ab einem mittleren Wassergehalt der Luft an den Einlassöffnungen von $12,7 \text{ g/kg}$ zu erwarten, da dies bei $35,0^\circ\text{C}$ einer relativen Feuchte von $36,0\%$ entspricht. Der Grund dafür, dass in dieser Simulation keine Überschreitung des Auslegungszustandes auftritt, liegt darin, dass Rückströmung nicht simuliert wurde.

Lösungsvorschlag Einige Meter über den RKW-Auslässen sind horizontal ausgerichtete Strömungen ermittelt worden. Daher war das Ziel, durch Erhöhen der Auslässe diese Strömungsschichten zu erreichen. Dies wurde in der Simulation durch Rohre gleichen Durchmessers auf den Auslässen umgesetzt.

Die Erhöhung der Auslässe führt in der Simulation zu einer signifikanten Verbesserung der Situation. Unter den gegebenen Bedingungen wird bei einer zusätzlichen Höhe von 4 m eine deutlich reduzierte absolute Feuchte im Bereich der Eintrittsöffnungen der RKW erzielt. Werden die Auslässe um 9 m nach oben verschoben, tritt nahezu keine Rückströmung mehr auf, sodass fast keine Differenz der absoluten Feuchte am Eintritt der RKW gegenüber der Umgebung resultiert.

Durch weitere Eingrenzungen zeigte sich, dass eine Erhöhung um 6 m ausreicht, um eine Rezirkulation weitestgehend zu vermeiden, wie Abbildung 3.3 zeigt.

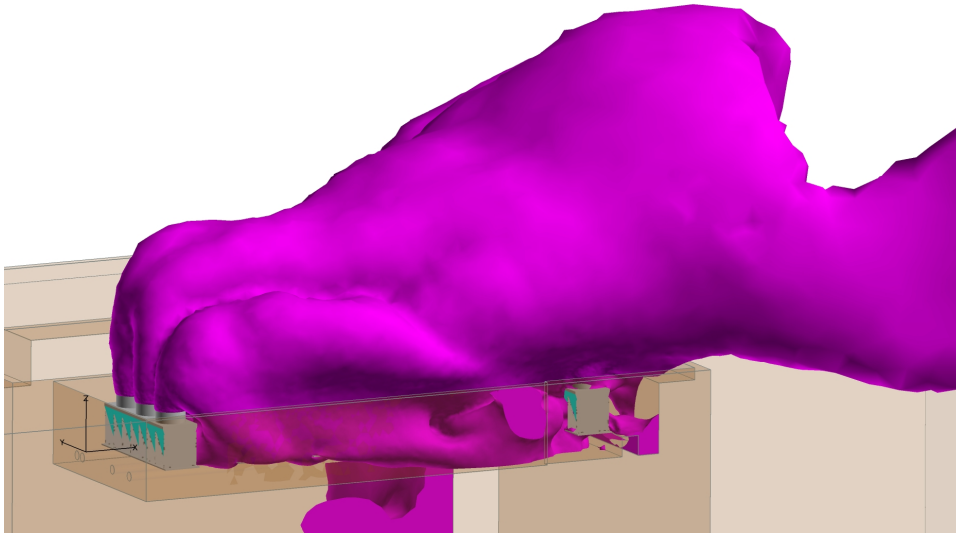


Abbildung 3.2: ISO-Fläche konstanter Feuchte von $8,7 \text{ g/kg}$ [15]

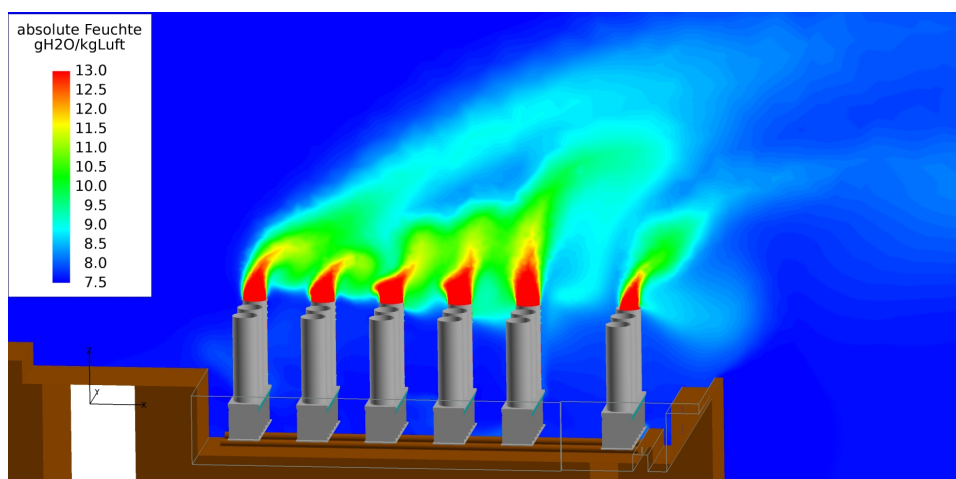


Abbildung 3.3: Feuchteverteilung im Bereich der RKW bei einer Erhöhung um 6 m [15]

Zusammenfassung des Fallbeispiels 1 Der Impuls der Fortluft reicht nicht aus, um höher gelegene Strömungsschichten zu erreichen und damit das Totwassergebiet zu verlassen. Als Totwassergebiete werden Bereiche im Lee umströmter Körper bezeichnet, die Wirbel und stark verminderten Stoffaustausch mit der Hauptströmung aufweisen. Entstehender Unterdruck aufgrund des verengten Querschnitt durch die Umbauung beeinträchtigt die Ventilatoren, was den Impuls zusätzlich abschwächt. Die Druck- und Strömungsverhältnisse im Bereich der RKW und der verengte Querschnitt zu den Einlässen verursachen ein Totwassergebiet und abwärtsgerichtete Strömungen. Diese führen die Fortluft zurück nach unten zu den Einlässen.

Eine Erhöhung der Auslassöffnung verbessert die Situation durch deutlich reduzierte Rückströmung der Fortluft zu den Einlassöffnungen.

3.1.2 Fallbeispiel 2

Diesem Abschnitt liegt der interne Bericht zum Fallbeispiel 2 der Abteilung Forschung und Entwicklung von Imtech Deutschland [2] zugrunde. Alle Daten und Abbildungen stammen aus diesem Bericht.

Bei einem Verbund aus zwei Rückkühlwerken ist bei bestimmten Umgebungsbedingungen eine zu geringe Leistung festgestellt worden. Angenommen wurde, dass Fortluft durch die Windbedingungen am Standort erneut zu den Einlässen gelangt. Als Optimierungsansatz war die Erhöhung der Auslässe der RKW vom Kunden geplant worden, um die Rückströmung zu reduzieren. Vor der Umsetzung sollte eine Simulation zeigen, ob diese Lösung das Problem behebt.

Die beiden zu untersuchenden RKW sind unmittelbar neben einem Gebäude aufgestellt. Die Gebäudeoberkante überragt die RKW-Auslässe um $8,5\text{ m}$. In Abbildung 3.4 ist die Lage des RKW zum nahe liegenden Gebäude zu erkennen. Die unten gelisteten technischen Daten entsprechen denen im Auslegungspunkt. Wie bei Fallbeispiel 1 wird davon ausgegangen, dass die RKW ihre Leistungsgrenze im Auslegungspunkt erreichen. Die relevanten technischen Daten lauten wie folgt:

- Bauweise: Offener Kühlkreislauf, druckbelüftet
- Feuchtkugeltemperatur: $22,0^\circ\text{C}$ – bei $32,0^\circ\text{C}$ und $36,0\%$ rl.F.
- Wasserverbrauch: $2,3\text{ m}^3/\text{h}$
- Luftmenge: $240\,000\text{ m}^3/\text{h}$

Zum betrachteten Zeitpunkt herrschten vor Ort $32,0^\circ\text{C}$ und eine absolute Feuchte von $18,0\text{ g/kg}$. Aus süd-südwestlicher Richtung wehte ein Wind mit 3 m/s . Die Daten sind in Tabelle 1 auf Seite 20 noch einmal zusammengefasst.

Ergebnis der Simulation des Ist-Zustandes Aus der Simulation wird deutlich, dass sich hinter dem Gebäude in der Nähe des RKW eine Rückströmung zum Gebäude bildet. Die Rückströmung führt die Fortluft des RKW mit sich und drückt sie an die Gebäudewand. Von dort gelangt die Fortluft zurück an die rückwärtigen Eintrittsöffnungen des RKW. Abbildung 3.4 zeigt die Richtungen der Geschwindigkeit sowie den Wassergehalt

der Luft in einem vertikalen Schnitt durch das RKW. Die Rückströmung zwischen RKW und Gebäudewand ist dort gut zu erkennen.

Weiter ist zu sehen, dass die Fortluft nicht über die Gebäudeoberkante hinaus gelangt und somit keine höher gelegenen Strömungsschichten erreicht. Dadurch erreicht Fortluft mit einer absoluten Feuchte von $>20,0 \text{ g/kg}$ die Eintrittsöffnungen. Der Auslegungspunkt wird bereits bei einem Wassergehalt von $10,7 \text{ g/kg}$ und einer Temperatur von $32,0^\circ\text{C}$ überschritten. Eine Minderleistung konnte aus der Simulation also erwartet werden, obwohl Rezirkulation nicht simuliert wurde.

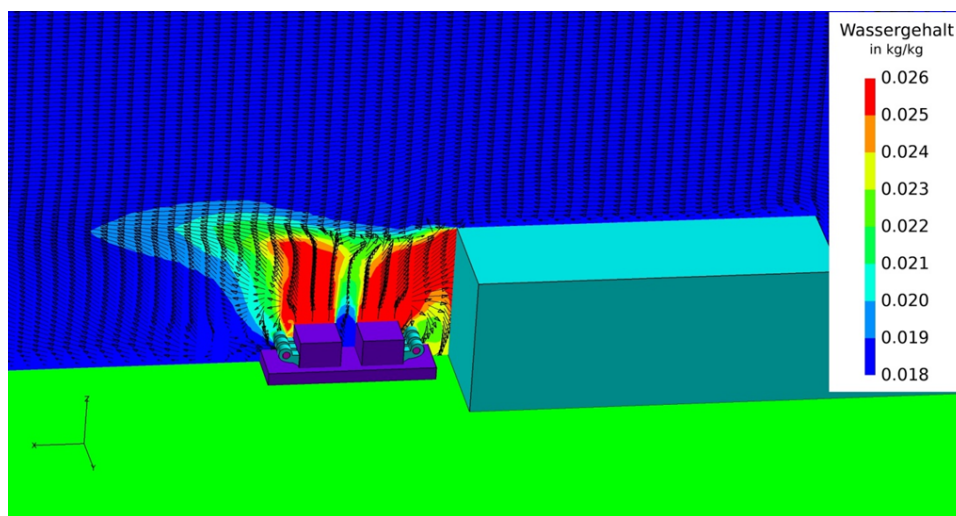


Abbildung 3.4: Geschwindigkeitsverteilung und Wassergehalt in vertikaler Schnittebene [2]

In Abbildung 3.5 ist eine ISO-Fläche dargestellt, die mit einer absoluten Feuchte von $18,3 \text{ g/kg}$ einen Bereich umschließt, dessen Feuchte nur wenig über dem Umgebungswert liegt. Dadurch soll die „Fortluftfahne“ der RKW sichtbar gemacht werden. Deutlich zu erkennen ist, dass die Fortluft nicht über die Gebäudeoberkante hinaus gelangt und auch nach einiger Entfernung stromabwärts keine höheren Strömungsschichten erreicht. Außerdem gelangt die Fortluft in das Totwassergebiet des benachbarten Gebäudes. Dort kommt es an der windabgewandten Seite ebenfalls zu Rückströmung und ein Eindringen in höhere Strömungsschichten wird verhindert.

Lösungsvorschlag Vom Auftraggeber ist ein expliziter Lösungsansatz zur Simulation vorgegeben worden. Die Auslässe sollen um $5,85 \text{ m}$ auf $9,25 \text{ m}$ erhöht werden. Damit sind sie immer noch $2,75 \text{ m}$ unterhalb der Gebäudeoberkante.

Wie in Abb. 3.6 zu erkennen, verbessert diese Maßnahme die Ist-Situation, liefert aber kein zufriedenstellendes Ergebnis: Teile der Fortluft gelangen über die Gebäudekante hinaus in höhere Strömungsschichten, doch tritt weiterhin Rückströmung zu den Eintrittsöffnungen der Ventilatoren auf. Allerdings ist der Wassergehalt dieser zurückströmenden Fortluft geringer als ohne Erhöhung.

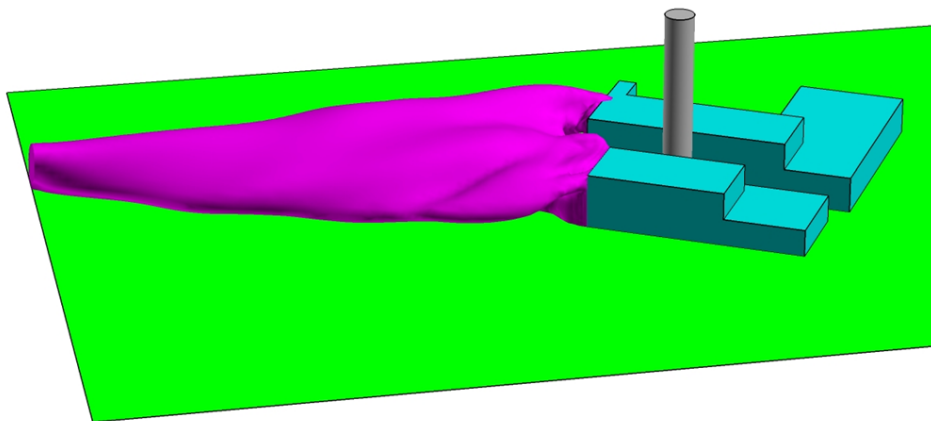


Abbildung 3.5: Fortluftschwade mit absoluter Feuchte von $\geq 18,3 \text{ g/kg}$ [2]

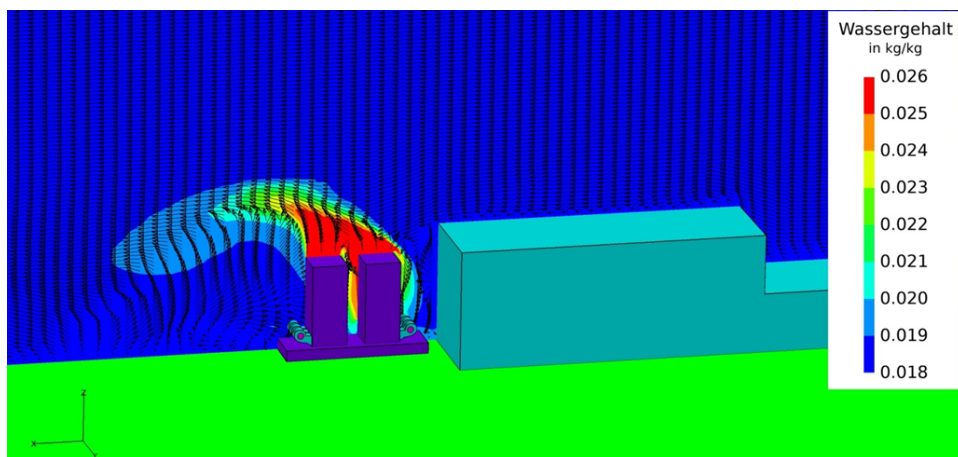


Abbildung 3.6: Optimierte Geschwindigkeitsverteilung und Wassergehalt im vertikalen Schnitt durch das RKW [2]

Zusammenfassung des Fallbeispiels 2 Auch hier reicht der Impuls der Fortluft nicht, um diese vom RKW fort zu tragen. In diesem Fall liegt der Grund für das unzureichende Forttragen der Fortluft an dem Höhenunterschied zwischen RKW-Auslässen und dem Gebäude. Das RKW befindet sich in einem Totwassergebiet, das aus der Umströmung des vorgelagerten Gebäudes resultiert. Erschwerend kommt hinzu, dass durch die Ausführung als druckbelüftetes RKW der Impuls der Fortluft geringer ist, als er bei einem saugbelüfteten wäre.

Eine Erhöhung der Auslässe brachte zwar eine Verbesserung, es trat aber weiterhin Rückströmung auf. Eine Erhöhung auf mindestens Gebäudehöhe hätte eine weitere Verbesserung bringen können.

3.1.3 Zusammenfassung beider Beispiele

Bei der Betrachtung der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Durchströmung des RKW sowie die Ventilator Kennlinien nicht Teil der Simulation sind und somit keinen Einfluss haben. Es ist immer von einem konstanten Volumenstrom pro RKW ausgegangen worden, welcher sich gleichmäßig über alle Ein- bzw. Auslässe verteilt.

Die durch auftretende Rückströmung zu den Einlässen der RKW entstehende höhere Feuchte der Zuluft ist ebenfalls nicht simuliert worden. An den Auslässen werden konstante Temperaturen und Feuchten ausgeblasen, unabhängig vom Einlass.

Diese Vereinfachungen führen dazu, dass eine Rezirkulation der Fortluft in die Zuluft der RKW folgenlos bleibt. Es kann somit keine Abschätzung über die Minderleistung der Aggregate gegeben werden. Allerdings kann die Rückströmung aufgezeigt werden, indem die absoluten Feuchten an den Einlässen ermittelt werden.

Die Fallbeispiele beschäftigten sich mit bereits aufgestellten RKW und wie deren Situation verbessert werden kann. Die Verbesserung war jeweils durch Optimierung des Fortluftaustrags zu erreichen. Tabelle 1 fasst die Randbedingungen und den Lösungsansatz knapp zusammen. Es ist zu sehen, dass die beiden Beispiele sich kaum ähneln. Abschätzungen, welche Bedingungen Einfluss haben und mit welcher Gewichtung sind nicht möglich.

Bei der Betrachtung der Strömungssituationen zeigte sich jedoch, dass in beiden Fällen Totwassergebiete bei bestimmten Umgebungsbedingungen zur Rückströmung der Fortluft zurück zu den Einlässen der RKW führen. Die Umbauung der RKW spielt dabei eine große Rolle. Erst die Umbauung sorgt abhängig oder unabhängig von der Windrichtung für Wirbel und Totwassergebiete im Bereich der RKW.

Die zu untersuchenden Aufstellungssituationen werden deshalb durch Körper geschaffen, die den meisten Umbauungen ähneln. Diese Körper sind stumpfe Körper, die das Gegenteil einer Stromlinienform bilden und dadurch das Ablösen der Strömung begünstigen.

Tabelle 1: Vergleich der Fallbeispiele

		Fallbeispiel 1	Fallbeispiel 2
Technische Daten	Feuchtkugeltemperatur	24,0 °C	22,0 °C
	bei	35,0 °C; 36,0 %	32,0 °C; 36,0 %
	Wasserverbrauch	2,1 $\frac{m^3}{h}$	2,3 $\frac{m^3}{h}$
	Luftmenge Bauart	320 000 $\frac{m^3}{h}$ saugbelüftet	240 000 $\frac{m^3}{h}$ druckbelüftet
Aufstellungssituation	Anzahl Aggregate	8	2
	$\dot{V}_{L,Ges}$	2 560 000 $\frac{m^3}{h}$	480 000 $\frac{m^3}{h}$
	$\dot{V}_{w,Ges}$	16,8 $\frac{m^3}{h}$	4,6 $\frac{m^3}{h}$
	Aufgestellt	auf Dach	hinter Gebäude
Umgebungs- & Wetterbedingungen	Temperatur	35,0 °C	32,0 °C
	Absolute Feuchte	7,5 g/kg	18,0 g/kg
	relative Feuchte	21,5 %	60 %
	Windgeschwindigkeit	4,5 $\frac{m}{s}$	3,0 $\frac{m}{s}$
Optimierung	zielführender Ansatz	Abströmen der Fortluft verbessern	

3.2 Umströmung von stumpfen Körpern

Die Leistungsfähigkeit von RKW kann stark von ihrem Aufstellungsort abhängen. Die Strömungssituation an ihnen resultiert aus der Umgebung, oft aus den umliegenden Gebäuden, welche je nach Windrichtung größeren oder kleineren Einfluss haben. Um die Situation eines RKW beurteilen zu können, müssen auch in der Simulation solche Umgebungen geschaffen werden. Bei der Abbildung der Umgebung liegt die Schwierigkeit darin, jeden individuellen Fall in einem oder mehreren Modellen abzubilden und vergleichbar zu machen.

Dazu werden verschiedene Grundgeometrien modelliert, die die meisten Umgebungen, in denen RKW aufgestellt werden, wiedergeben sollen. Es werden hauptsächlich Körper herangezogen, die stromabwärts mindestens eine stumpfe Kante haben, an der sich die Strömung ablöst und ein Totwassergebiet bildet.

3.2.1 Randbedingungen der Simulationen

Um eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Simulationen zu schaffen, werden nur die umströmten Körper variiert. Das Fluid und seine Eigenschaften sollen dieselben bleiben.

Das simulierte Medium ist in allen beschriebenen Simulationen Luft mit den Standardwerten von Fluent. An den Stellen, an denen der Wind in den untersuchten Bereich Eintritt, wird ein Geschwindigkeitsprofil nach Gleichung (3-1) aufgeprägt.

$$v(z) = v(z_{ref}) \cdot \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (3-1)$$

$$v(z_{ref}) = 4 \frac{m}{s}$$

$$z_{ref} = 10 \text{ m}$$

$$\alpha = 0,37$$

Hierbei ist $v(z)$ die Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe z und $v(z_{ref})$ die Referenzgeschwindigkeit in der Referenzhöhe z_{ref} . Der Exponent α heißt Höhenwindexponent und legt die Form des Geschwindigkeitsprofils fest. Der Wert entspricht hier dem Mittelwert zwischen Waldgelände und städtischen Siedlungsgebieten [11]. Die Referenzgeschwindigkeit mit zugehöriger Referenzhöhe stammt aus den Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes [4].

Für alle durchgeführten Untersuchungen werden die gleichen Lösereinstellungen und das gleiche Turbulenzmodell benutzt. Als Löser wird der PISO Algorithmus verwendet. Die Wahl dieses Lösers beruht auf den Erfahrungen im Bereich Strömungssimulation der Abteilung Forschung und Entwicklung von Imtech Deutschland. PISO ist vor allem für zeitlich veränderliche Simulationen mit größeren Zeitschritten geeignet und ist wenig anfällig für Ungenauigkeiten im Netz [1].

3.2.2 Vorgehens- und Auswertungsbeispiel am Kubus

Das Vorgehen bei den einzelnen Simulationen und deren Auswertung sollen in diesem Abschnitt beispielhaft für einen würfelförmigen Körper veranschaulicht werden. Außerdem werden die Ergebnisse und damit auch die Vorgehensweise validiert.

In Abschnitt 2.2.4 wird beschrieben, dass Kriterien gefunden werden müssen, die ausagen, ob die Simulation sich einer Lösung annähert. Konkret heißt das, es muss einen Strömungsparameter geben, von dem angenommen werden kann, dass er an einem bestimmten Ort, nach einer endlichen Zeit einen annähernd konstanten Wert erreicht.

Für die hier betrachteten Strömungen ist das Kriterium der statische Druck. Ablösungen der Strömung können periodisch sein und gehen mit einer Druckänderung einher. Es wird also erwartet, dass nach einigen Schritten der statische Druck um einen Wert oszilliert.

In der Domain werden drei Messstellen in Form von Punkten gesetzt, an denen während der Simulation der Druck bestimmt und in einem Graph visualisiert wird. Der Verlauf des statischen Drucks wird nach Beenden der Simulation und aufbereitet und ist in Abbildung 3.7 dargestellt. „Point1“ bis „Point3“ sind Messpunkte in der Nähe des Körpers, an denen der statische Druck ermittelt wird. Es ist zu erkennen, dass nach etwa 500 Zeitschritten der statische Druck an allen drei Messpunkten um einen Mittelwert schwankt. Um auszuschließen, dass nur ein semistabiler Punkt gefunden wird, werden noch gut 500 weitere Zeitschritte gerechnet.

Für die Auswertung wird der Strömungszustand nach Zeitschritt 925 gewählt, was bei einer Zeitschrittgröße von 0,1 s einer Fließzeit von etwa anderthalb Minuten entspricht

(seit die Randbedingungen auf den Anfangszustand wirken, ist die Fließzeit vergangen). Die vertikale Linie mit dem Legendeneintrag „gewählt“ skizziert den gewählten Zeitschritt für die Auswertung.

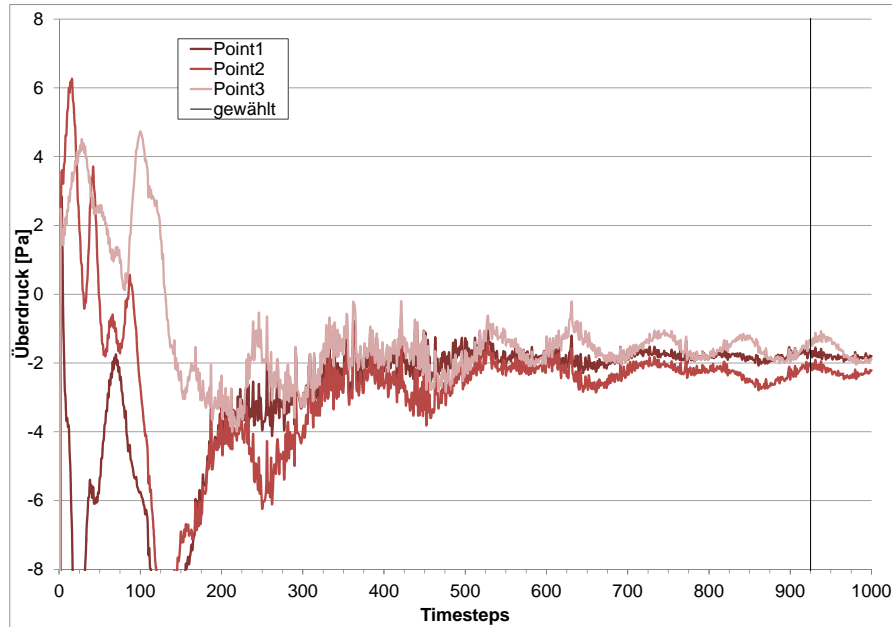


Abbildung 3.7: Druckverlauf der Strömung am Kubus über die Zeitschritte

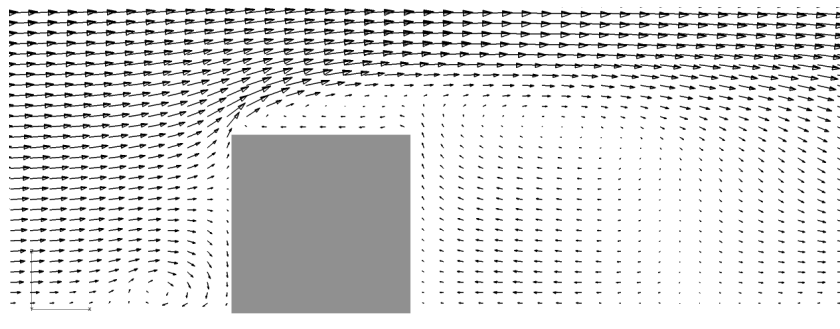
Der gewählte Strömungszustand wird auf kritische Standorte für ein RKW hin untersucht. Kritische Standorte werden in Totwassergebieten vermutet, die Rückströmungen aufweisen und damit ein Abfließen der Fortluft erschweren.

Um diese Gebiete zu identifizieren, werden zunächst mehrere horizontale und vertikale Schnitte durch den durchströmten Raum gelegt, die einen ersten Überblick über die Strömungssituation liefern sollen. Zwei Beispiele für einen solchen Schnitt zeigt Abbildung 3.8. Die Schnitte gehen jeweils durch den Mittelpunkt des Kubus.

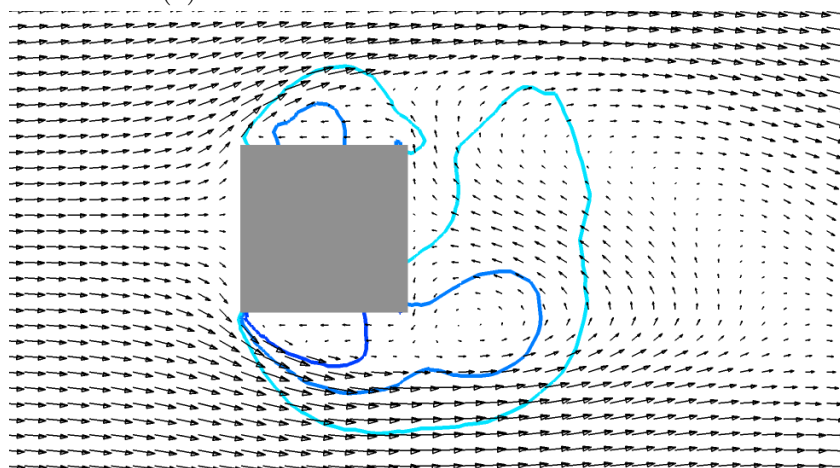
In beiden Unterabbildungen wird die Strömung als Vektorfeld dargestellt, das Betrag und Richtung der Geschwindigkeit zeigt. In Abbildung 3.8b sind zu den Geschwindigkeitsvektoren zusätzlich Isobaren im Bereich von $-1,8$ bis $-3,2 Pa$ Überdruck dargestellt. Die Isobaren sollen zum einen zeigen, dass in den Bereichen der Rückströmung und Totwassergebiete Unterdrücke auftreten können. Diese Unterdrücke können die Leistung der Ventilatoren von RKW zusätzlich beeinträchtigen. Auf dieses Phänomen wird im Folgenden aber nicht näher eingegangen.

Zum anderen lässt die Asymmetrie der Isobaren in Verbindung mit dem Vektorfeld der Strömung die Vermutung zu, dass die Ablösung und das Totwassergebiet hinter dem Kubus periodisch ihren Ort ändern, nämlich von der einen auf die andere Seite. Die Auswertung der instationären Ergebnisse bestätigt diese Vermutung. Die eingangs getroffene Annahme, dass die Ablösung der Strömung periodisch erfolgt, wird also durch die Druckverläufe und das Strömungsbild bestätigt.

Aus der Analyse des Strömungsbildes geht hervor, dass sich im Lee, also an der windabgewandten Seite des Kubus, ein kritischer Aufstellungsort befindet. Geschwindigkeitspro-



(a) Vertikaler Schnitt durch den Würfel



(b) Horizontaler Schnitt durch den Würfel
Isobaren von außen nach innen: $(-1, 8; -2, 5; -3, 2) Pa$

Abbildung 3.8: Strömungsbild um einen Kubus

file der Strömung in diesem Bereich sollen diese Vermutung festigen. Abbildung 3.9 zeigt diese Profile. Auf der Abszisse (oben) ist die Raumrichtung entlang der Strömung aufgetragen. Die Raumrichtung orthogonal zur Grundebene ist auf der Ordinate aufgetragen. Beide Richtungen sind auf die Kantenlänge des Kubus normiert. Das erste Profil befindet sich also eine halbe Kantenlänge des Kubus von diesem entfernt.

Aufgetragen auf der Abszisse (unten) ist die Geschwindigkeitskomponente in Strömungsrichtung, normiert auf die Referenzgeschwindigkeit v_{ref} . Auf die Referenzgeschwindigkeit wird im Abschnitt 3.2.1 eingegangen. Negative Werte stellen eine Rückströmung entgegen der Hauptströmung dar. Eine solche Rückströmung tritt noch bei $x/L = 2, 5$ auf.

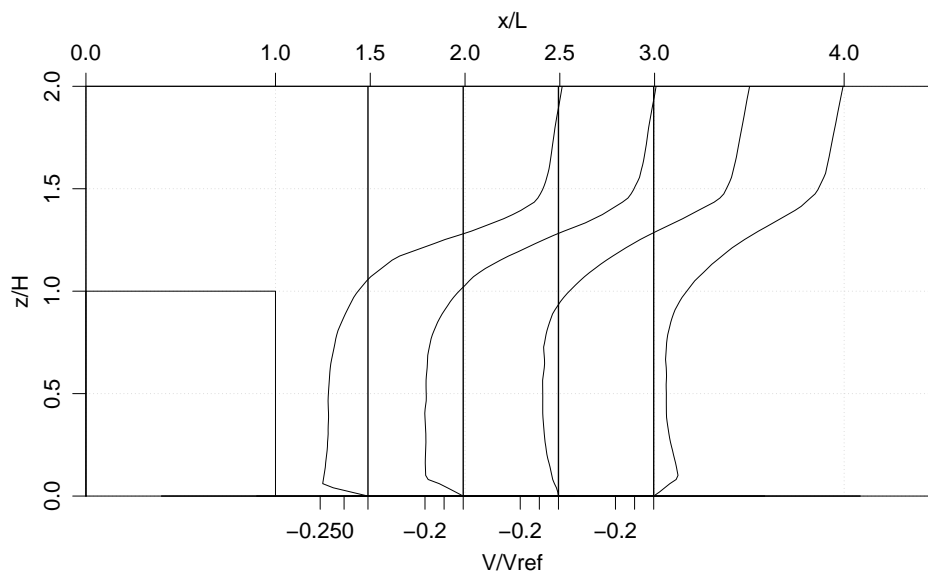


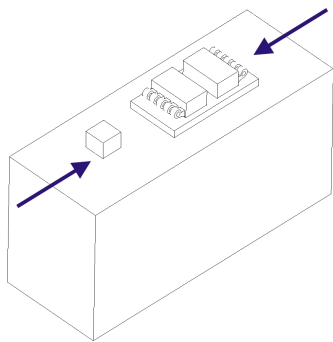
Abbildung 3.9: Geschwindigkeitsprofile im Lee des Kubus

Die auftretenden negativen Komponenten des Geschwindigkeitsfeldes lassen auf einen größeren Bereich mit Rückströmung schließen. Aufgrund dieser Verläufe und Ergebnisse wird ein kritischer Bereich zur Aufstellung eines RKW im Lee eines Kubus identifiziert und entsprechend untersucht.

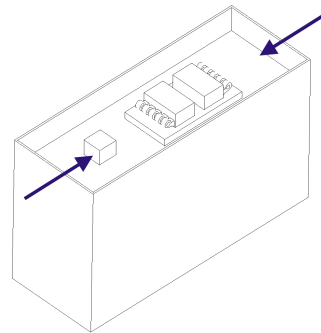
3.2.3 Ergebnisdarstellung

Abbildung 3.10 auf Seite 25 zeigt die Geometrien, die, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, untersucht werden. Ein RKW ist jeweils an der Stelle platziert, wo nach der Voruntersuchung ein hoher Einfluss auf die Funktionalität erwartet wird. Die Richtung der Strömung, die zu den Ergebnissen führte, ist mit Pfeilen gekennzeichnet. Diese Strömungsrichtungen werden bei der aufbauenden Untersuchung mit RKW erneut als Randbedingung implementiert.

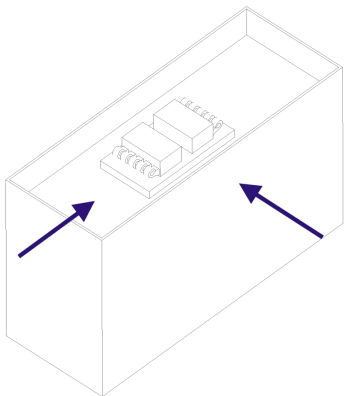
Die Auswahl der Geometrien und Strömungsrichtungen resultieren aus dem Ansatz, oft auftretende Aufstellungssituationen abzubilden. Diese lassen sich in zwei grundsätzliche Situationen teilen, die weiter untergliedert sind. Eine der beiden grundsätzlichen Situationen ist auf dem Dach eines Gebäudes. In [7] wird eine Aufstellung eines RKW auf



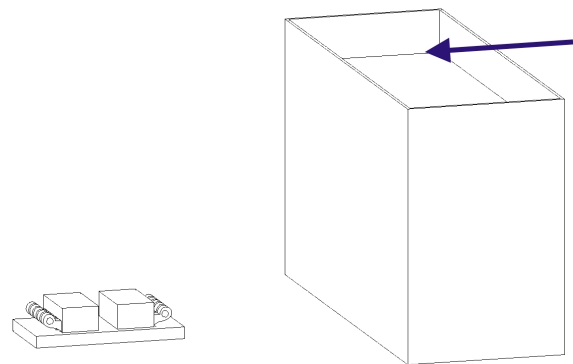
(a) Dach ohne Mauer mit Aufbau



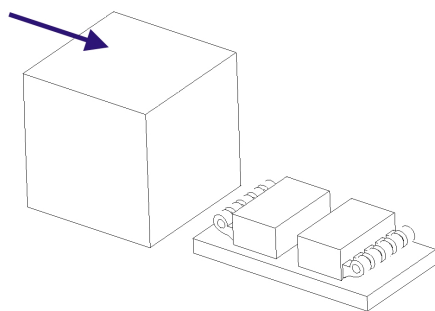
(b) Dach mit Mauer und Aufbau



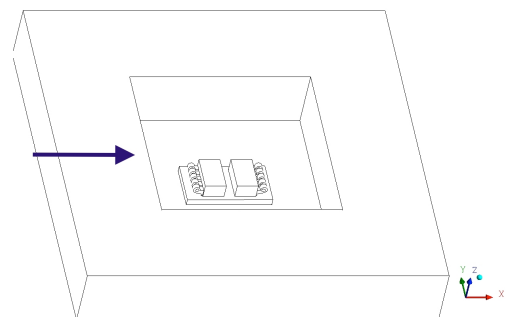
(c) Dach mit umlaufender Mauer



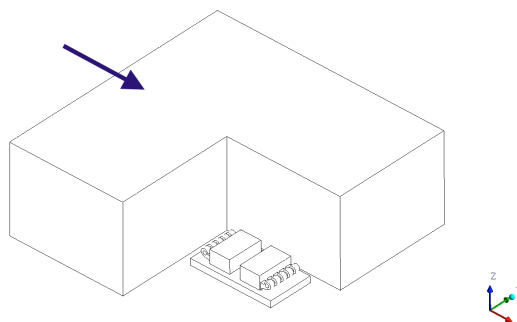
(d) Gebäuderückseite



(e) Kubus



(f) Innenhof



(g) L-förmiges Gebäude

Abbildung 3.10: Ergebnisse der Vorstudie

dem Dach empfohlen.

Die Form und Aufbauten des Daches können stark variieren. Ein Treppenausgang ist in den meisten Fällen mindestens vorhanden, was durch einen würfelförmigen Körper auf dem Dach (3.10a, 3.10b) abgebildet wird. Eine Mauer am Rand des Daches (3.10b, 3.10c) zum Sicht- und/oder Schallschutz ist ebenfalls häufig vorhanden.

Die zweite grundsätzliche Situation ist in der Nähe eines Gebäudes. Weiter untergliedern lässt sich diese Situation in ein, an einer Seite anschließendes, höheres Gebäude (3.10e), die Nähe eines deutlich größeren Gebäudes (3.10d), die Positionierung in der Nische eines L-förmigen Gebäudes (3.10g) und im Innenhof eines Gebäudes (3.10f), also von vier Seiten umschlossen.

Diese Situationen bilden nur einen Ausschnitt aller Situationen, die denkbar sind. In Verbindung mit den Strömungsrichtungen ergeben sich zehn Aufstellungssituationen. Sie werden in Abschnitt 4 untersucht.

3.3 Netzanalyse am Kubus

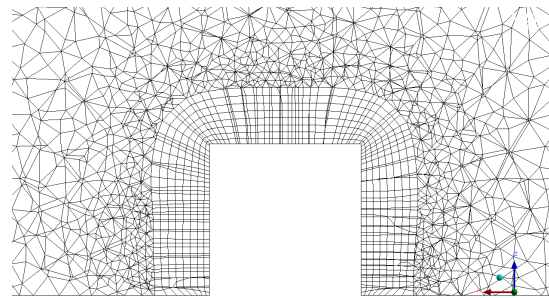
Steigende Genauigkeit eines Simulationsergebnisses geht mit höherem Rechenaufwand einher. Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, sollte ein Netz gefunden werden, das bei vertretbarem Rechenaufwand ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Zur Ermittlung eines geeigneten Netzes werden am durchströmten Raum (auch Domain genannt), der einen Würfel umgibt, verschiedene Netzeinstellungen und damit Netzgrößen getestet. Die Geometrie sowie Messpunkte bleiben dabei gleich und die Netzeinstellungen werden für drei Netze variiert.

Für die Netzeinstellung werden als Methoden die Inflation und das Sizing an Flächen (facesizing) und in Volumen (bodysizing) verwendet. Die Methode Inflation erzeugt Schichten auf einer gewählten Fläche mit definierbaren Dicken, Wachstumsraten und Anzahl der Schichten. Das Sizing ermöglicht das Begrenzen der Kantenlängen der Zellen an gewählten Flächen oder in einem Volumen.

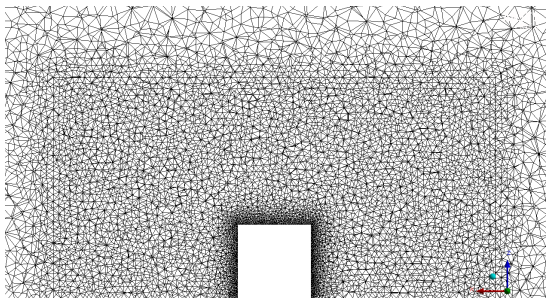
In Abbildung 3.11 sind die drei Netze gegenübergestellt. Die verschiedenen Methoden können in den Abbildungen veranschaulicht werden: Abbildung 3.11a zeigt ein vergleichsweise grobes Tetraedernetz mit Inflationlayers um den umströmten Körper. Das Netz wird bereits bei geringer Entfernung vom Würfel deutlich gröber. Die Abbildungen 3.11b und 3.11c zeigen ein feineres Netz. Grund dafür ist die Unterteilung des Raums in zwei Zellzonen. In der inneren Zellzone werden Bodysizings angewendet, die kleinere Elemente erzeugen als in der äußeren Zellzone. Bei den Netzen in den Abbildungen 3.11b und 3.11c sind Geometrie und Methoden identisch. Sie unterscheiden sich nur in den Einstellungen der Methoden.

Die Parameter, auf die hin die Ergebnisse der Netze untersucht und verglichen werden, sind hier die Schwankungen des statischen Drucks in Strömungsrichtung hinter dem Körper und die y^+ -Werte am Körper. Hier wird für das verwendete $k-\omega$ -SST-Modell zur Turbulenzdarstellung ein Bereich zwischen 20 - 200 empfohlen [16].

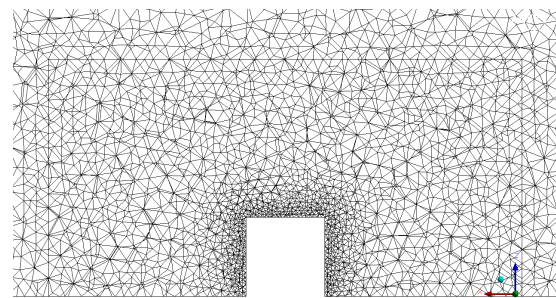
Abbildung 3.12 vergleicht die Auswertungskriterien der Netze. Ein Balkendiagramm, das die Anzahl der Zellen und die zugehörigen y^+ -Werte der jeweiligen Netze veranschaulicht, ist in Abbildung 3.12a dargestellt.



(a) Ausschnitt des ersten Netzes, mit Inflation-layers (Cube2 Netz)

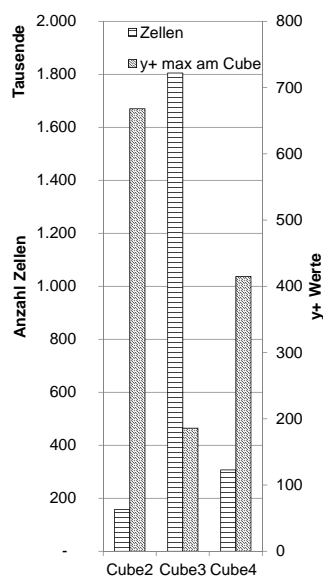


(b) Ausschnitt des zweiten Netzes, mit innerer Domain (Cube3 Netz)

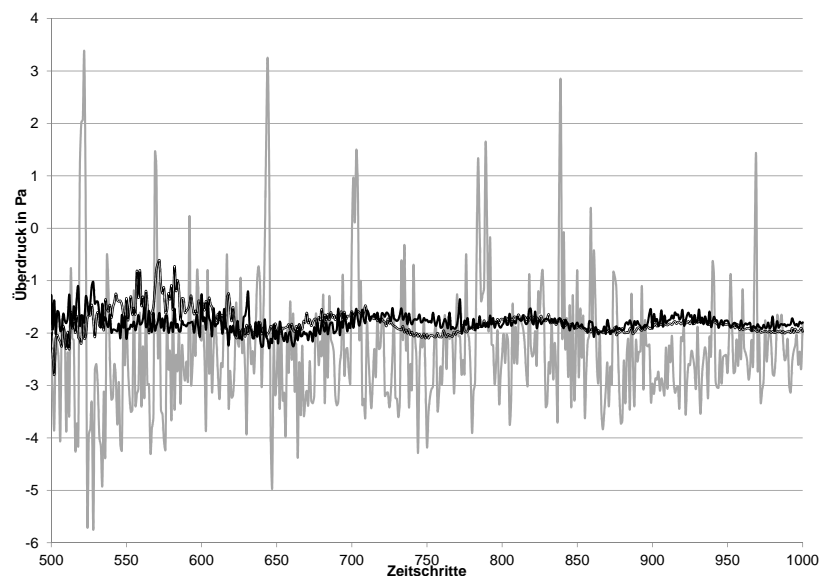


(c) Ausschnitt des dritten Netzes, mit innerer Domain (Cube4 Netz)

Abbildung 3.11: Darstellung der Netze im Bereich um den Kubus



(a) Balkendiagramm mit Zellenanzahl und y^+ -Werten



(b) Vergleich der Druckverläufe der verschiedenen Netze
 grau, Hintergrund: Cube2 Netz - erstes, grobes Netz
 schwarz umrandet: Cube3 Netz - zweites, feines Netz
 schwarz: Cube4 Netz - drittes Netz zwischen den beiden

Abbildung 3.12: Gegenüberstellung der Auswahlkriterien der Netze

Im Graphen in Abbildung 3.12b sind die Druckverläufe gegenüber gestellt. Der Grafik ist zu entnehmen, dass die Verläufe qualitativ ähnlich sind. In allen drei Netzen beginnen die Druckverläufe ab Zeitschritt 500 periodisch zu schwanken. Da es sich um eine dreidimensionale Strömung handelt und Totwassergebiete periodisch auftreten können, ist dies ein plausibles Ergebnis [9].

Allerdings bestehen die Druckverläufe des ersten Netzes (Cube2) im Wesentlichen aus Peaks, was auf ein zu grobes Netz hindeutet. Die Verläufe der Netze Cube3 und Cube4 decken sich hingegen gut. Somit erreichen die Netzeinstellungen des dritten Netzes trotz der erhöhten y^+ -Werte eine ausreichende Genauigkeit und werden auf alle folgenden Modelle angewendet. Sie sind folgend noch einmal zusammengefasst:

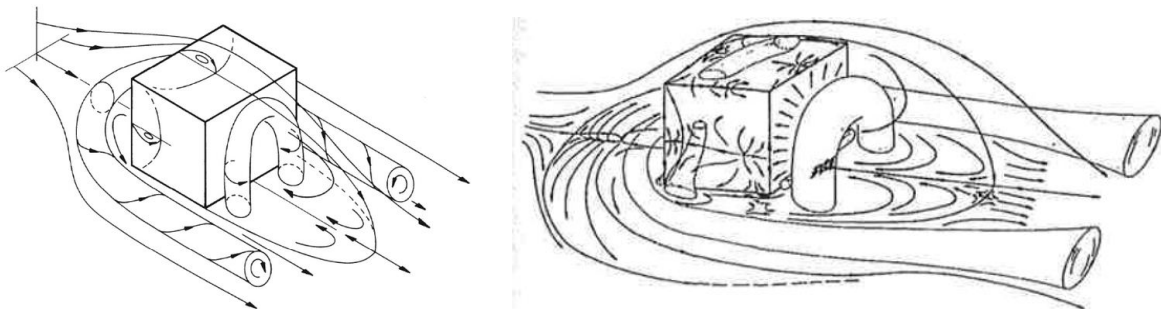
- Face Sizing am Körper: $0,25 m$
- Body Sizing innere Domain: $1 m$
- Globales Sizing: $0,25 - 10 m$

3.4 Vergleich mit vorhandenen Ergebnissen aus der Literatur

Die erzielten Resultate hängen vom verwendeten Löser sowie den verwendeten Modellen und Randbedingungen ab. Ob diese ausreichend gut gewählt sind und genaue Ergebnisse liefern, soll der Vergleich mit bereits existierenden Untersuchungen zeigen.

Der Kubus (in der Literatur auch Würfel, Cube oder cubic body) auf einer ebenen Platte ist mehrfach untersucht worden. Deshalb dient er hier zur Validierung der Simulationseinstellungen und Ergebnisse.

Zunächst seien die schematischen Darstellungen der Umströmung nach Hucho [9] dargestellt, der sich an die Darstellungen von Martinuzzi in [10, 12] anlehnt. Abbildung 3.13 zeigt zum einen Huchos Darstellung und zum anderen die Grundlage dieser.



(a) Umströmung nach Hucho [9] in Anlehnung an Martinuzzi & Tropea [12]

(b) Umströmung nach Martinuzzi & Tropea [12]

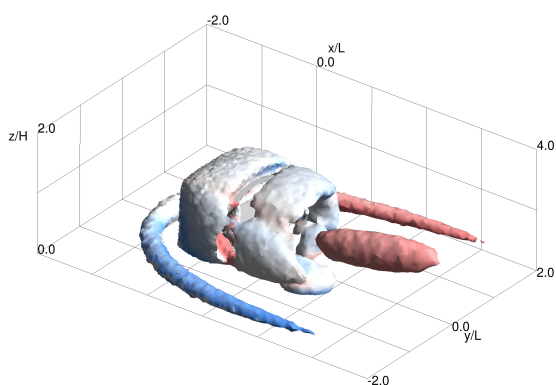
Abbildung 3.13: Strömungsbild eines Kubus auf ebener Platte

In beiden Unterabbildungen sind zwei hufeisenförmige Wirbel zu erkennen. Einer von ihnen legt sich horizontal unmittelbar über der Bodenplatte um den Kubus. Der andere steht (wie ein Torbogen) stromabwärts hinter dem Kubus. Die Drehrichtung des liegenden

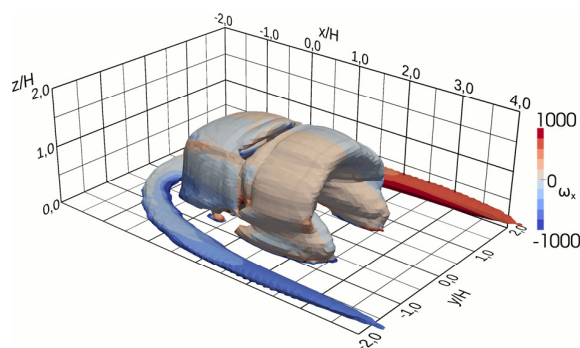
Hufeisenwirbels ist jeweils zum Kubus hin, also im rechten Teil mathematisch positiv und im linken negativ um die Achse entlang der Hauptströmung.

Bereiche von Rückströmungen werden ebenfalls in beiden Abbildungen, anschließend an den stehenden Hufeisenwirbel skizziert.

Eine numerische Untersuchung eines solchen Kubus (mit Wasser als Medium) führten Rückborn et al. [26] durch. In Abbildung 3.14 ist das Q -Kriterium bei der Umströmung des Kubus dargestellt. Das Q -Kriterium kann verallgemeinert als Kriterium für Wirbel betrachtet werden. Ist $Q > 0$ überwiegt die Rotation. Die ISO-Fläche des Q -Kriteriums ist mit dem Betrag der Wirbelstärke eingefärbt. Blaue Einfärbung bedeutet eine Rotation mathematisch negativ, eine rote Einfärbung eine mathematisch positive Rotation um die Achse in Hauptströmungsrichtung.



(a) Simulationsergebnis aus der vorliegenden Arbeit



(b) Simulationsergebnis nach [26]

Abbildung 3.14: Q -Kriterium als ISO-Fläche und Drehrichtung (Farbskala)

Abbildung 3.14a zeigt das Ergebnis aus einer Simulation aus der vorliegenden Arbeit. In der direkten Gegenüberstellung mit Abbildung 3.14b nach Rückborn sind Übereinstimmungen zu erkennen. Die bereits erwähnten Hufeisenwirbel treten entsprechend auf, wobei der Wirbel in Bodennähe ebenfalls die Drehrichtungen aufweist, die bereits in früheren Untersuchungen festgestellt wurden. So zeigen die Darstellungen in Abbildung 3.13 die gleichen Hufeisenwirbel und Drehrichtungen.

Lediglich der in Abbildung 3.14a auftretende Wirbel hinter dem Kubus (rot eingefärbt) ist in den Darstellungen aus der Literatur nicht zu erkennen. Bei der Betrachtung weiterer Zeitpunkte fiel auf, dass dieser Wirbel seine Position leicht ändert, nämlich von der einen auf die andere Seite. Auch seine Drehrichtung ändert sich. Somit liegt die Vermutung nahe, dass es sich um einen Wirbel handelt, der durch die periodische Ablösung am Kubus entsteht. Möglicherweise werden zeitliche Schwankungen in der Literatur herausgemittelt.

Der Feinheit des Netzes ist geschuldet, dass die Ergebnisse nicht exakt deckungsgleich sind. Für die vorliegende Arbeit lag der Fokus für die Netzeinstellungen nicht darin, die Strömung unmittelbar an der Geometrie abzubilden, sondern im Hinblick auf die Simulationen mit Wassergehalt der Luft und großen Domains den Rechenaufwand zu minimieren.

Eine ausreichende Deckung mit den Literaturergebnissen wurde dennoch erreicht, was anhand der Geschwindigkeitsverläufe und Vektorfelder bestätigt werden kann. Dazu ist in Abbildung 3.15 das Geschwindigkeitsprofil des Kubus (Hintergrund) mit dem nach Hussein & Martinuzzi [10] überlagert.

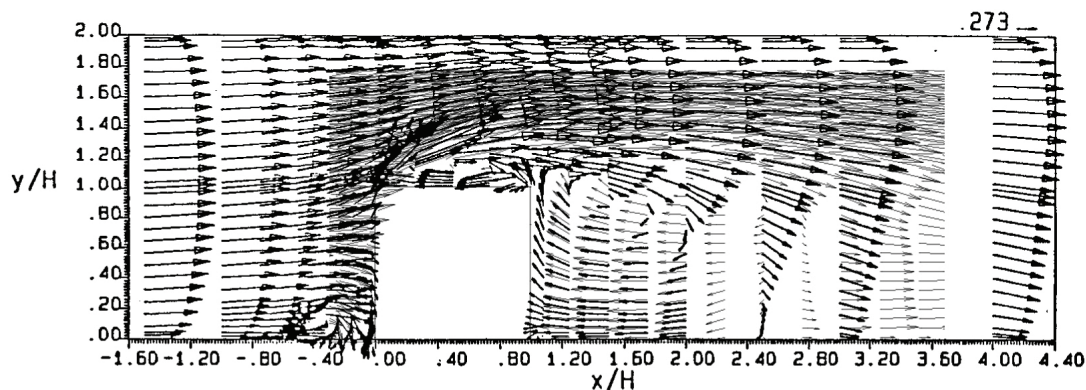


Abbildung 3.15: Überlagerung der Geschwindigkeitsprofile aus Untersuchung (grau, Hintergrund) und Literatur nach [10] (schwarz, Vordergrund)

Das Vektorfeld der Simulation ähnelt überwiegend dem aus der Literatur. Abweichungen könnten darauf zurückzuführen sein, dass Hussein & Martinuzzi den Kubus in einem Kanal untersucht haben, der nur doppelt so hoch ist wie der Kubus. In der zu vergleichenden Simulation beträgt der Abstand zur oberen Begrenzung zehn Kantenlängen. Weiter ist die obere Begrenzung nicht als undurchlässig definiert, sondern nähert eine offene Umgebung an. Die Struktur des Netzes fließt auch hier in das Ergebnis mit ein und kann zu Abweichungen führen.

Anhand der Gegenüberstellungen und Vergleiche der durchgeführten Simulation mit der Literatur kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse im realitätsnahen Bereich liegen. Die Grundlagen dafür sind durch die Ähnlichkeiten mit vorhandenen Simulationen und Versuchen gegeben.

3.5 Programmergänzung zur Simulation der Rezirkulation

Prinzipiell ist es möglich, das gesamte Innere eines RKW zu modellieren und entsprechend zu parametrisieren. Aufgrund des hohen Aufwandes, der mit der Modellierung und Parametrisierung verbunden ist, werden nur feste Parameter an Ein- und Austrittsflächen berücksichtigt. Sollen die Parameter der Austrittsfläche von den Parametern der Eintrittsfläche abhängen, müssen die Abhängigkeiten Fluent in einer UDF (vgl. Abschnitt 2.2.5) mitgeteilt werden.

Die UDF, die im Rahmen dieser Arbeit erstellt wird, hat die Aufgabe, die Auswirkungen der Rezirkulation der Fortluft zurück zu den Einlässen eines RKW zu berücksichtigen und damit Aussagen über den Grad der Beeinträchtigung des RKW zu ermöglichen. Die Struktur der UDF ist in Abbildung 3.16 dargestellt und kann stark zusammengefasst so beschrieben werden:

1. Parameter an der Eintrittsfläche auslesen

2. Den Prozess im RKW abhängig von den oben genannten Parametern durchlaufen und dadurch die Parameter im Austritt bestimmen
3. Die Austrittsparameter an Fluent übergeben (die Auswahl, an welche Fläche diese übergeben werden, geschieht im Fluent-GUI)

Zusätzlich zu den ausgelesenen Parametern sind in der UDF technische Angaben zum RKW zu machen, die den Prozess des RKW maßgeblich beeinflussen. Dazu gehören die abzuführende Wärmemenge Q , die verdampfende Wassermenge $\Delta \dot{m}_w$ und die maximal erreichbare Ablufttemperatur $t_{2,max}$.

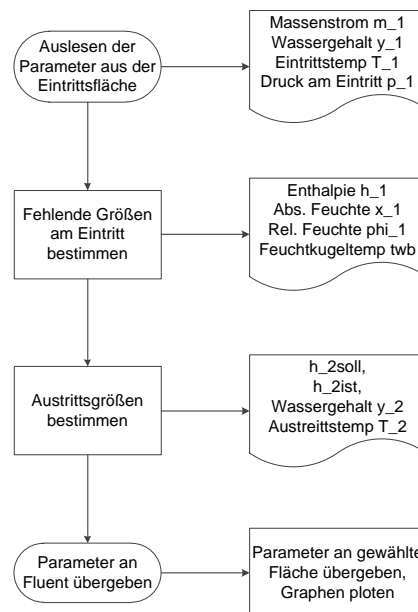


Abbildung 3.16: Schematische Darstellung der Grundstruktur der UDF

Der Prozess, der in einem RKW abläuft, ist komplex und setzt sich aus einer Temperaturerhöhung und einer Feuchtezunahme zusammen. Diese beiden Parameter sind, wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, direkt von einander abhängig, sodass eine exakte Lösung nur mittels Iteration gefunden werden kann. Iterationen sollen in der UDF aber vermieden werden, da diese die Rechendauer weiter erhöhen. Es sind folglich Vereinfachungen getroffen worden, die aber den Austrittszustand ausreichend genau reproduzieren und allgemein anwendbar sind. Die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen sind im folgenden zusammengefasst:

- Die Wassermenge, die im RKW verdunstet und der Luft zugeführt wird, ist konstant.
- Die Austrittsenthalpie wird über die Energiebilanz bestimmt. Das Verhalten des RKW als Kreuzstrom- oder Gegenstromwärmetauscher wird dabei vernachlässigt. Die Berücksichtigung dieses Verhaltens setzt bei jeder Simulation die genauen Kenngrößen und Geometrien des verwendeten RKW voraus.

- Die relative Feuchte im Austritt kann 100 % erreichen. Welche Feuchte tatsächlich erreicht werden kann, hängt von der Durchmischung im RKW und damit wieder von individuellen Kenngrößen und Geometrien ab.

Die Vereinfachungen setzen der UDF folgende Grenzen: Durch die Annahme einer konstanten verdunstenden Wassermenge werden rechnerisch Austrittszustände im Nebelgebiet erreicht. Die Zustände werden durch Neubestimmung der Temperatur korrigiert und entlang konstanter absoluter Feuchte x nach oben bis zur Taulinie verschoben. Die Enthalpiedifferenz zwischen den korrigierten Zuständen und dem Eintrittszustand ist nun ungleich der nötigen Enthalpiedifferenz zur Abfuhr der Wärme. Ein Maß der Abweichung soll (während der Simulation) die Gegenüberstellung der Soll-Austrittsenthalpie mit der Ist-Austrittsenthalpie darstellen. Soll- und Ist-Enthalpie können dann punktuell zur Kontrolle im h,x -Diagramm eingetragen und die tatsächlichen Austrittstemperaturen und -feuchten mit den berechneten verglichen werden.

Die möglichst genaue Bestimmung des Austrittszustandes ist Voraussetzung für eine verwendbare Berechnung der Feuchtkugeltemperatur. Wird sie überschritten, kann das Rückkühlwerk nicht das Temperaturniveau erreichen, das nötig ist, um die Wärme abzuführen. Die UDF gibt deshalb den Verlauf der Feuchtkugeltemperatur am Eintritt über die Zeitschritte als Graph aus, der mit der Soll-Feuchtkugeltemperatur verglichen werden kann.

Die Berechnungen, die in der UDF gemacht werden, um die Zustandsänderung im RKW abzubilden, sollen anhand der folgenden Gleichungen erläutert werden. Dazu sind zunächst einige Grundgleichungen der Physik und Thermodynamik aufgeführt, die im Wesentlichen die Funktion der UDF bilden.

Fluent berechnet den Massenanteil y_A einer Spezies A mit der Masse m_A bezogen auf die Gesamtmasse m_{Ges} :

$$y_A = \frac{m_A}{m_{Ges}} \quad (3-2)$$

Die Gesamtmasse setzt sich aus den Massen der enthaltenen Spezies zusammen. Für feuchte Luft gilt also:

$$m_{Ges} = m_w + m_{Ltr} \quad (3-3)$$

Für die Berechnungen von feuchter Luft ist die Masse des Wasser m_w in der Luft auf die Masse der trocknen Luft m_{Ltr} relevant:

$$x = \frac{m_w}{m_{Ltr}} \quad (3-4)$$

x wird auch absolute Feuchte genannt und wird entweder in $\left[\frac{g_w}{kg_{Ltr}}\right]$ oder $\left[\frac{kg_w}{kg_{Ltr}}\right]$ angegeben. Aus den Gleichungen (3-2) bis (3-4) können folgende Beziehungen aufgestellt werden, mit denen die Massenanteile ineinander umgerechnet werden können:

$$x = \frac{1}{\frac{1}{y} - 1} \quad (3-5)$$

$$y = \frac{1}{\frac{1}{x} + 1} \quad (3-6)$$

Die spezifische Enthalpie der feuchten Luft ist eine Funktion der Wärmekapazitäten der Luft c_{pL} und des Wassers c_{pwd} sowie der Temperatur t , absolute Feuchte x und der Verdampfungsenthalpie des Wassers r_{d0} nach [28]:

$$h = c_{pL} \cdot t + x \cdot (c_{pwd} \cdot t + r_{d0}) \quad (3-7)$$

Die Energiebilanz bei feuchter Luft wird mit dem Massenstrom der trockenen Luft berechnet. Der Wasseranteil fließt über die spezifischen Enthalpien (Gl. (3-7)) ein.

$$0 = Q - \dot{m}_{Ltr} \cdot \Delta h \rightarrow Q = \dot{m}_{Ltr} \cdot \Delta h = \dot{m}_{Ltr} \cdot (h_2 - h_1) \quad (3-8)$$

Die abgeführte Wärme Q setzt sich also aus der Differenz der spezifischen Enthalpien Δh und dem Massenstrom der trocknen Luft \dot{m}_{Ltr} zusammen.

Zur Bestimmung der relativen Feuchte ist der Sättigungsdruck p_{satt} in Abhängigkeit von der Temperatur nötig. Diese kann mit folgender empirischen Beziehung nach [25] bestimmt werden.

$$p_{satt} = 611 \cdot \exp \left(-1,91275 \cdot 10^{-4} + 7,258 \cdot 10^{-2} \cdot t - 2,939 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 + 9,841 \cdot 10^{-7} \cdot t^3 - 1,92 \cdot 10^{-9} \cdot t^4 \right) \quad (3-9)$$

Mit dem Sättigungsdruck kann die relative Feuchte φ bestimmt werden:

$$\varphi = \frac{p}{\frac{0,622 \cdot p_{satt}}{x} + p_{satt}} \quad (3-10)$$

mit p für den statischen absoluten Druck.

Die Feuchtkugeltemperatur t_{wb} kann über die empirische Beziehung nach [30] angenähert werden, die für den betrachteten Bereich eine ausreichende Genauigkeit aufweist:

$$t_{wb} = t \cdot \arctan \left(0,151977 \cdot (\varphi + 8,313659)^{0,5} \right) + \arctan(t + \varphi) - \arctan(\varphi - 1,676331) + 3,91838 \cdot 10^{-3} \cdot \varphi^{1,5} \cdot \arctan \left(2,3101 \cdot 10^{-2} \cdot \varphi \right) - 4,686035 \quad (3-11)$$

Die Funktion in (3-12) beschreibt die Taulinie im Bereich zwischen 15°C und 40°C ausreichend genau. Sie stammt aus einem Auswertungstool für Kurvenverläufe eines Tabellenkalkulationsprogramms. Die ausgewertete Kurve stellte Punkte auf der Taulinie dar.

$$t_{satt}(x) = 16,542 \cdot \ln(x) + 89,848 \quad (3-12)$$

Mit diesen Gleichungen kann der Prozess im RKW näherungsweise abgebildet und die Austrittsgrößen t_2 und x_2 zu bestimmt werden. Die einzelnen Rechenschritte sollen im Folgenden erörtert werden. Die Umsetzung dieser im Quelltext sowie die Funktionen zum Lesen und Schreiben von Parametern sollen nicht näher beschrieben werden.

Zunächst werden die Parameter Massenstrom \dot{m}_1 , Temperatur t_1 , Druck p_1 und Wassermassenanteil y_1 an der Eintrittsfläche (Index 1) ausgelesen und für die weiteren Berechnungen aufbereitet. Dies und die folgenden Berechnungen werden in jedem Iterationsschritt durchgeführt. Der eintretende Wassermassenstrom \dot{m}_{w1} ergibt sich nach (3-2) zu

$$\dot{m}_{w1} = \dot{m}_1 \cdot y_1 \quad (3-13)$$

Aus den Gleichungen (3-2) und (3-3) ergibt sich der Massenstrom der trockenen Luft zu

$$\dot{m}_{Ltr} = \dot{m}_1 \cdot (1 - y_1) \quad (3-14)$$

Der austretende Gesamtmassenstrom \dot{m}_2 setzt sich aus dem eintretenden Massenstrom \dot{m}_1 und dem zugeführten Wassermassenstrom $\dot{m}_{w,zu}$, der im RKW verdunstet, zusammen.

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 + \dot{m}_{w,zu} \quad (3-15)$$

Die daraus resultierenden Austrittsfeuchte x_2 berechnet sich nach (3-4):

$$x_2 = \frac{\dot{m}_{w,zu} + \dot{m}_{w1}}{\dot{m}_{Ltr}} \quad (3-16)$$

Wie bereits erwähnt, berechnet Fluent Massenanteile bezogen auf Gesamtmassen. Für feuchte Luft wird der Massenanteil bezogen auf die Masse der trockenen Luft verwendet. Die Umrechnung geschieht nach (3-5).

Die Enthalpie h_1 der eintretenden Luft, abhängig von den Eintrittsparametern t_1 und x_1 , wird nach (3-7) bestimmt.

Die Austrittsenthalpie h_2 ergibt sich aus der abzuführenden Wärmemenge Q als Differenz zwischen Eintritts- und Austrittsenthalpie aus der Energiebilanzgleichung (3-8)

$$h_2 = h_1 + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_{Ltr}}. \quad (3-17)$$

Wird (3-7) nach t umgestellt kann mit dem Wassergehalt und der Enthalpie im Austritt die Austrittstemperatur t_2 bestimmt werden.

$$t_2 = \frac{h_2 - x_2 \cdot r_{d0}}{c_{pL} + x_2 \cdot c_{pwd}} \quad (3-18)$$

Anschließend wird die Austrittsfeuchte φ_2 auf maximal 100 % begrenzt. Die relative Feuchte φ_2 wird dafür zuerst über Gleichung (3-9) und (3-10) mit $t = t_2$, $x = x_2$ und $p = p_1$ bestimmt. Der von Fluent bestimmte mittlere Absolutdruck an den Eintrittsflächen ist p_1 .

Ist $\varphi_2 > 100\%$ wird φ_2 gleich 100 % gesetzt und für x_2 die Temperatur bei Sättigungsdruck bestimmt. Dazu dient (3-12).

$$t_{satt}(x_2) = 16,542 \cdot \ln(x_2) + 89,848 \quad (3-19)$$

t_{satt} ist dann die neue Austrittstemperatur t_2 .

Im nächsten Schritt wird die Austrittstemperatur begrenzt. Die Austrittstemperatur hängt von der Eintrittstemperatur des Kühlwassers ab und kann diese nicht überschreiten. De facto wird die Eintrittstemperatur des Kühlwassers nie erreicht und die Austrittstemperatur der Luft bleibt immer etwas unterhalb dieser Temperatur. Die maximal erreichbare Austrittstemperatur $t_{2,max}$ muss bekannt sein.

Ist $t_2 > t_{2,max}$ wird t_2 gleich $t_{2,max}$ gesetzt. Für diese Temperatur muss dann die entsprechende absolute Feuchte $x(t_{2,max})$ bestimmt und x_2 gleich diesem Wert gesetzt

werden. Da dieser Wert der Schnittpunkt von $t_{2,max}$ und der Taulinie ist, ist (3-12) zu diesem Zweck nach x umgestellt worden:

$$x(t_{2,max}) = \exp\left(\frac{t_{2,max} - 89,848}{16,542}\right) \quad (3-20)$$

Der Ablauf dieser Begrenzungen ist schematisch in Bild 3.17 dargestellt.

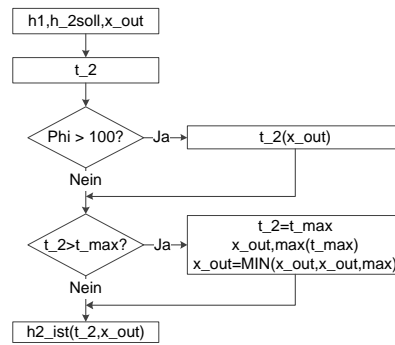


Abbildung 3.17: Abschnitt des Flussdiagramms für die Begrenzung von Temperatur und Feuchte

Abschließend wird die abs. Feuchte im Austritt x_2 mittels (3-6) in y_2 überführt und zusammen mit t_2 in das Netz geschrieben.

Zusätzlich werden, wie oben genannt, die Soll- und Ist-Enthalpie im Austritt bestimmt und gegenübergestellt. Die Soll-Enthalpie ist gleich h_2 , welche mittels der Energiebilanz in (3-8) bestimmt wird. Somit ist $h_{2,soll} = h_2$. Die Ist-Enthalpie wird hingegen über die tatsächlichen Größen im Austritt bestimmt:

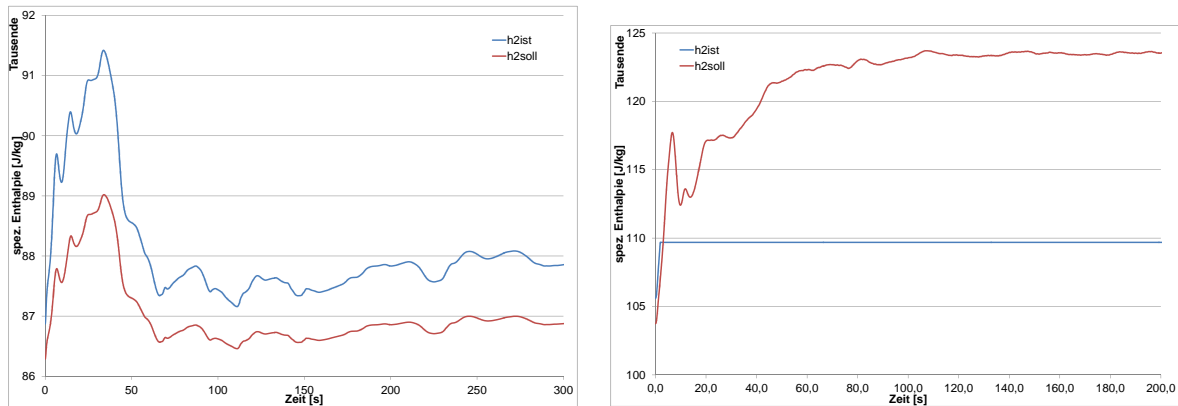
$$h_{2,ist} = c_{pL} \cdot t_2 + x_2 \cdot (c_{pvd} \cdot t_2 + r_{d0}) \quad (3-21)$$

In Bild 3.18 sind zwei Beispiele für Verläufe von Ist- und Sollwert der Enthalpie im Austrittszustand gegeben. In der Abbildung 3.18a ist zu sehen, dass die tatsächliche spezifische Enthalpie im Austritt höher ist, als die tatsächlich notwendige. Durch die Korrektur der relativen Feuchte auf maximal 100% werden hier Zustände höherer Enthalpien im Austritt erreicht als notwendig. Das RKW funktioniert in diesem Bereich.

Das zweite Beispiel in Bild 3.18b zeigt die Begrenzung der tatsächlichen Enthalpie im Austritt durch die Begrenzung der Austrittstemperatur. Dies führt dazu, dass die nötige Differenz der Enthalpien zwischen Eintritt und Austritt nicht erreicht wird. Das RKW kann somit seine geforderte Kühlleistung nicht erreichen.

Wie eine von der UDF berechnete Zustandsänderung im RKW aussieht, zeigt Abbildung 3.19. Hier sind die Zustände im h,x -Diagramm nach Mollier eingetragen. In Worten zusammengefasst läuft die Zustandsänderung im RKW durch die UDF berechnet so ab, dass dem Umgebungszustand 1 die verdunstende Wassermenge hinzugefügt und die Temperatur über die nötige Energiedifferenz bestimmt wird. Führt dies zu einem Zustand im Nebelgebiet (Zustand 2), wird der Punkt solange senkrecht nach oben verschoben, bis er auf der Taulinie liegt (Zustand 3). Weist Zustand 3 gleichzeitig eine höhere Temperatur

auf als möglich, wird der Punkt entlang der Taulinie nach unten geschoben, bis ein Zustand mit möglicher Temperatur und Wassergehalt erreicht ist (Zustand 4). Werden diese Korrekturen von der UDF durchgeführt, erreicht die Enthalpie im Austritt (Zustand 4) dort ihren Maximalwert.



(a) Verlauf bei Begrenzung von φ auf 100% (b) Verlauf bei Begrenzung von t_2 auf $t_{2,max}$

Abbildung 3.18: Beispiele für Gegenüberstellungen der Austrittsenthalpie

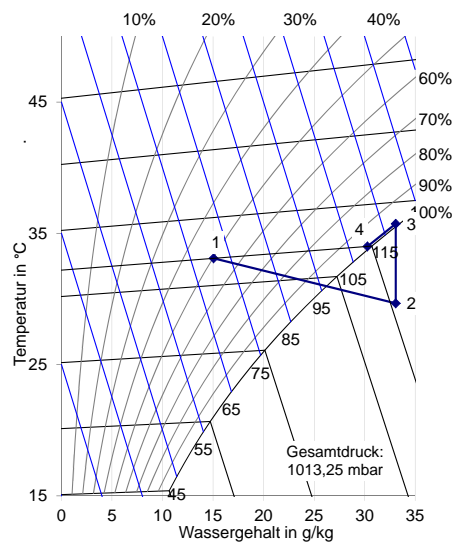


Abbildung 3.19: Luftzustandsänderung durch UDF im h,x-Diagramm nach Mollier

4 Untersuchung und Beurteilung verschiedener Aufstellsituationen

In den Untersuchungen der Umströmung stumpfer Körper sind mögliche kritische Aufstellsituationen identifiziert worden. Diesem Abschnitt liegen die Ergebnisse aus den Simulationen der stumpfen Körper aus Abschnitt 3.2 zu Grunde. Die in Abschnitt 3.5 beschriebene UDF wird dabei angewendet, um die Rezirkulation zu berücksichtigen.

4.1 Randbedingungen und Simulation

Den Geometrien aus Abschnitt 3.2 wird das Rückkühlwerk an der entsprechenden Position hinzugefügt, das Netz mit den gleichen Parametern erstellt und werden die Lösungseinstellungen identisch mit denen der Vorstudie gesetzt. Die Randbedingungen aus Abschnitt 3.2.1 werden entsprechend der technischen Daten des RKW und der UDF ergänzt. Das bedeutet im Einzelnen eine relative Feuchte von 36,0 % (entspricht 10,7 g/kg) bei einer Umgebungstemperatur von 32,0 °C. Diese Parameter entsprechen dem Auslegungszustand des RKW. Die Randbedingungen an Ein- und Auslässen des RKW werden anhand der technischen Daten und der UDF hinzugefügt und Parameter zur Beurteilung der Lösung in Monitoren visualisiert. Die visualisierten Parameter sind die in Abschnitt 3.5 beschriebenen Enthalpien, die Feuchtkugeltemperatur und Feuchte sowie Temperatur in Ein- und Austritt.

Abbildung 4.1 zeigt ein Beispiel für die grafischen Darstellungen der Monitore während der Simulation. Die Monitore sollen Abschätzungen ermöglichen, ob die Simulation bereits eine ausreichende Anzahl an Schritten durchlaufen hat. Im abgebildeten Beispiel haben sich bei knapp 600 Zeitschritten schon näherungsweise konstante Verläufe eingestellt. In den Monitoren oben links und unten rechts sind noch steigende Tendenzen zu erkennen. Die Simulation wird deshalb zu diesem Zeitpunkt noch nicht abgebrochen.

4.2 Auswertungsbeispiel der Aufstellsituation am Kubus

Die Simulationen werden über so viele Zeitschritte durchgeführt, bis die Monitore die Annahme zulassen, dass sich die Strömung nicht mehr signifikant über die Zeit ändert. Auch hier ist das Problem, dass die Ablösungen der Strömung periodisch erfolgen und somit kein eindeutiger Zustand gefunden werden kann. Es kann lediglich ein Zustand gefunden werden, der die Schwankungen im Mittel ausreichend gut abbildet.

Ein Beispiel für die periodische Schwankung zeigt Abbildung 4.2 für die Simulation der Aufstellsituation am Kubus. Die Daten der Monitore sind in einem Tabellenkalkulationsprogramm aufbereitet und in einem Diagramm dargestellt. Die absolute Feuchte ist in diesem Zuge in die relative Feuchte umgerechnet und zusammen mit der Eintritts- und der Feuchtkugeltemperatur dargestellt. Ab etwa 100 Sekunden, das entspricht 1000 Zeitschritten, oszillieren die Parameter um einen Mittelwert.

Anhand der Verläufe aus Abbildung 4.2 wird für diese Simulation der Zustand zu einem Zeitpunkt bei etwa $t = 180 \text{ s}$ für die Auswertung ausgewählt. Für die Auswertung sind einige Schnittebenen durch die Strömung gelegt worden, um die Strömung darzustellen.

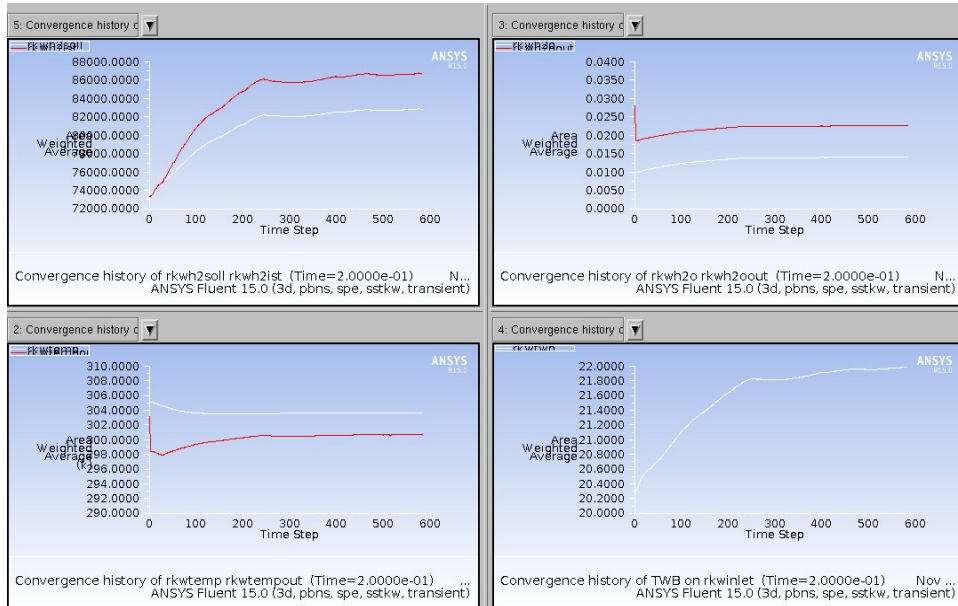
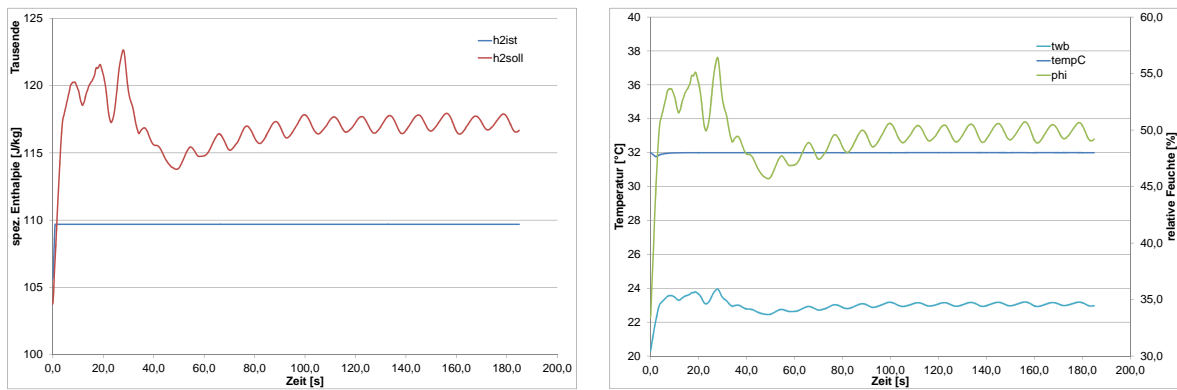


Abbildung 4.1: Beispiel für Verläufe der Kriterien über Zeitschritte



(a) Verlauf der Enthalpien

(b) Verlauf von Feuchtkugeltemperatur, Temperatur und Feuchte

Abbildung 4.2: Beurteilungskriterien über die Zeit dargestellt

Von den Schnitten soll hier der Schnitt in Höhe der Eintrittsöffnungen (Abbildung 4.3) gezeigt werden. In Abbildung 4.3a ist der Wassergehalt in der Luft dargestellt. Zur Verbesserung der Übersicht sind Bereiche mit einem Gehalt von mehr als 15 g/kg farblich ausgefüllt. Bereiche geringeren Gehalts sind durch deren Rand bzw. Kontur dargestellt.

Es ist gut zu erkennen, dass feuchte Fortluft zwischen RKW und Geometrie gedrückt wird. Dies führt dazu, dass der mittlere Wassergehalt der Luft über die Eintrittsöffnungen etwa 15 g/kg beträgt, wie Tabelle 3 und Abbildung 4.5 zu entnehmen ist. Die maßgebliche Ursache für den erhöhten Wassergehalt wird darin vermutet, dass das RKW sich im Totwassergebiet der Geometrie befindet.

In Abbildung 4.3b sind zwei Stromlinien dargestellt, die den Grenzbereich zum Totwassergebiet markieren. Außerhalb der Stromlinien werden Geometrie und RKW umflossen, ohne Wirbel zu bilden. Zwischen ihnen entstehen Rückströmungen und Wirbel. Das RKW ist zwischen diesen Stromlinien im Totwassergebiet aufgestellt.

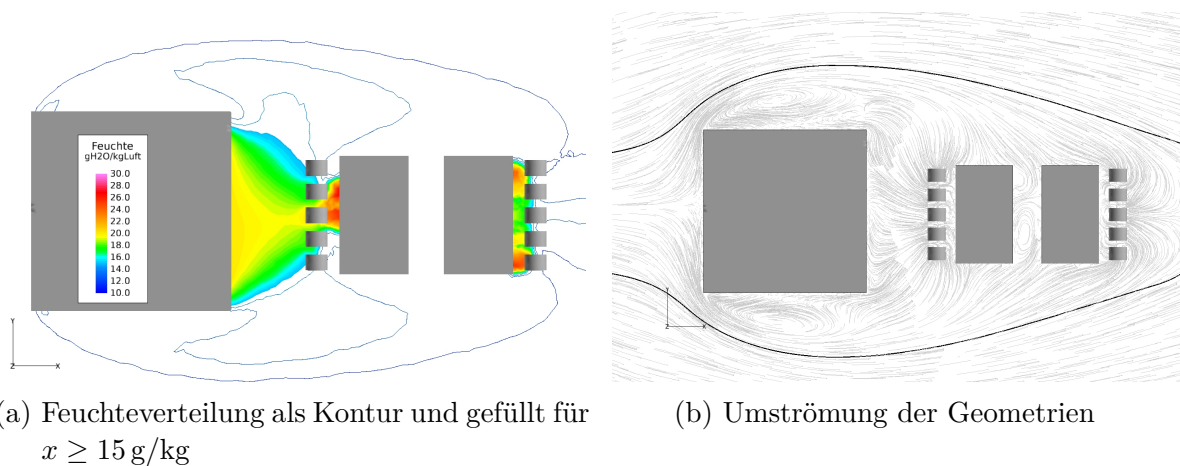


Abbildung 4.3: Strömungssituation am Kubus im horizontalen Schnitt in Höhe der Eintrittsöffnungen

Aus dieser Strömungssituation ergibt sich ein neuer Eintrittszustand, der vom Auslegungszustand abweicht. Die Zustandsänderungen der Luft im RKW sind in Abbildung 4.4 gegenübergestellt. Die mit A bezeichneten Punkte beschreiben die Zustandsänderung bei Betrieb im Auslegungszustand, wohingegen die Punkte mit einem I in der Benennung die Zustandsänderung zum Zeitpunkt $t \approx 180\text{ s}$ darstellen. Es wird davon ausgegangen, dass diese Zustandsänderung nach unendlich (Infinitas) vielen Zeitschritten in der Simulation unverändert bleibt. Die Zustandsänderung zwischen I3 und I4 sowie der Eintrittszustand I1 lassen bereits die Vermutung zu, dass das RKW beeinträchtigt wird. Die Änderung von I3 zu I4 beeinflusst die Wärmemenge, die abgeführt werden kann. Der Eintrittszustand I1 gibt die Feuchtkugeltemperatur vor. Hier lässt sich bereits erkennen, dass die Feuchtkugeltemperatur des Auslegungszustandes überschritten wird (vgl. Abbildung 2.3).

Wie stark die Beeinträchtigung ist, soll im Rahmen der Vereinfachungen und getroffenen Annahmen durch die Enthalpiedifferenz und Feuchtkugeltemperatur als maßgebliche Kriterien eines RKW bestimmt werden. Anhand des neuen Eintrittszustandes I1 wird abhängig von Feuchte und Temperatur die Enthalpie der Luft nach (3-7) berechnet. Für

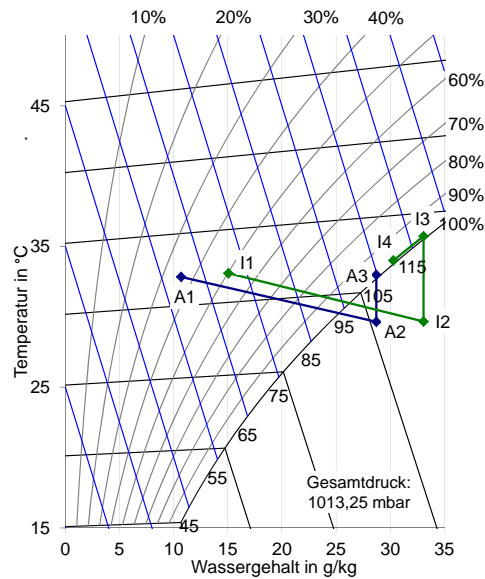


Abbildung 4.4: Gegenüberstellung der Luftzustandsänderungen im h,x-Diagramm nach Mollier
 blau: Zustandsänderung im Auslegungspunkt
 grün: Zustandsänderung im unendlichen

die Abfuhr der Wärme ist die Differenz zwischen der Enthalpie im Ein- und im Austritt ausschlaggebend. Um diese Differenz zu bilden, ist somit die Enthalpie der Luft im Austritt nötig.

Da in allen betrachteten Fällen die Enthalpie im Austritt ihren maximalen Wert erreicht, kann sie direkt mit $t_{2,max}$ und $x_{satt}(t_{2,max})$ bestimmt werden. Sie bleiben für alle betrachteten Fälle gleich. Wäre dies nicht der Fall, könnte die Enthalpie im Austritt über die von der UDF berechneten Austrittsfeuchte und -temperatur bestimmt werden. Für die Aufstellsituation im Kubus bedeutet das konkret:

Spezifische Enthalpie der Luft im Austritt

$$\begin{aligned}
 h_2 &= h_{2,max} = c_{pL} \cdot t_{2,max} + x_{satt}(t_{2,max}) (c_{pwd} \cdot t_{2,max} + r_{d0}) & (4-1) \\
 &= 1005 \frac{J}{kg K} \cdot 32,0^\circ C + 0,0303 \frac{kg}{kg} \left(1870 \frac{J}{kg K} \cdot 32,0^\circ C + 2500000 \frac{J}{kg} \right) \\
 &\approx 109700 \frac{J}{kg}
 \end{aligned}$$

Spezifische Enthalpie der Luft im Eintritt

$$\begin{aligned}
 h_1 &= c_{pL} \cdot t_1 + x_1 (c_{pwd} \cdot t_1 + r_{d0}) & (4-2) \\
 &= 1005 \frac{J}{kg K} \cdot 32,0^\circ C + 0,0151 \frac{kg}{kg} \left(1870 \frac{J}{kg K} \cdot 32,0^\circ C + 2500000 \frac{J}{kg} \right) \\
 &\approx 70700 \frac{J}{kg}
 \end{aligned}$$

Enthalpiedifferenz Δh_{1-2} zwischen Aus- und Eintritt

$$\Delta h_{1-2} = h_2 - h_1 = (109\,700 - 70\,700) \frac{J}{kg} = 39\,000 \frac{J}{kg} \quad (4-3)$$

Die Feuchtkugeltemperatur im Eintritt wird nach (3-11) mit der Temperatur und relativen Feuchte im Eintritt bestimmt. Danach ergibt sich mit $t = 32,0^\circ C$ und $\varphi = 50,4\%$ für die Feuchtkugeltemperatur t_{wb} am Kubus

$$t_{wb} = 24,0^\circ C \quad (4-4)$$

4.3 Ergebnisse der Untersuchung

Die in Abschnitt 4.2 beschriebene Auswertung wird auf verschiedene untersuchte Varianten angewendet. Übersicht der Varianten liefert Tabelle 2. Die Varianten beruhen auf den Ergebnissen der Vorstudie in Abschnitt 3.2.3.

Tabelle 2: Liste der untersuchten Varianten

Bezeichnung	Beschreibung
Kubus	würfelförmiger Körper, wie Bild 3.10e
Dach mit umlaufender Mauer längs	wie Bild 3.10c; Gebäude entlang seiner Längsachse angeströmt
Dach mit umlaufender Mauer quer	wie Bild 3.10c; Gebäude orthogonal zu seiner Längsachse angeströmt
Gebäuderückseite	Hinter einem Gebäude aufgestelltes RKW, wie Bild 3.10d
Dach mit Mauer und Aufbau längsPos	wie Bild 3.10b; die Anströmung erfolgt in positive Koordinatenrichtung
Dach mit Mauer und Aufbau längsNeg	wie Bild 3.10b; die Anströmung erfolgt in negative Koordinatenrichtung
Dach ohne Mauer mit Aufbau längsPos	wie Bild 3.10a; Die Anströmung erfolgt in positive Koordinatenrichtung
Dach ohne Mauer mit Aufbau längsNeg	wie Bild 3.10a; Die Anströmung erfolgt in negative Koordinatenrichtung
Innenhof	wie Bild 3.10f
L-förmiges Gebäude	wie Bild 3.10g

Die Erhöhung der Zuluftfeuchte infolge von Rezirkulation der jeweiligen Aufstellungssituationen zeigt Abbildung 4.5. Die Werte für den Auslegungspunkt sind auch als Umgebungszustand zu sehen. In ausreichender Entfernung vom RKW würden diese Werte

gemessen werden. Das Diagramm zeigt somit das direkte Ausmaß der Rezirkulation von Fortluft.

Da die Eintrittstemperatur in allen Fällen $32,0^{\circ}\text{C}$ beträgt, kann die relative Feuchte der einzelnen Varianten verglichen werden. Auch weil die Feuchtkugeltemperatur aufgrund konstanter Temperatur maßgeblich von der relativen Feuchte bestimmt wird, wird die absolute Feuchte als Ergebniss der Simulation in die relative Feuchte umgerechnet.

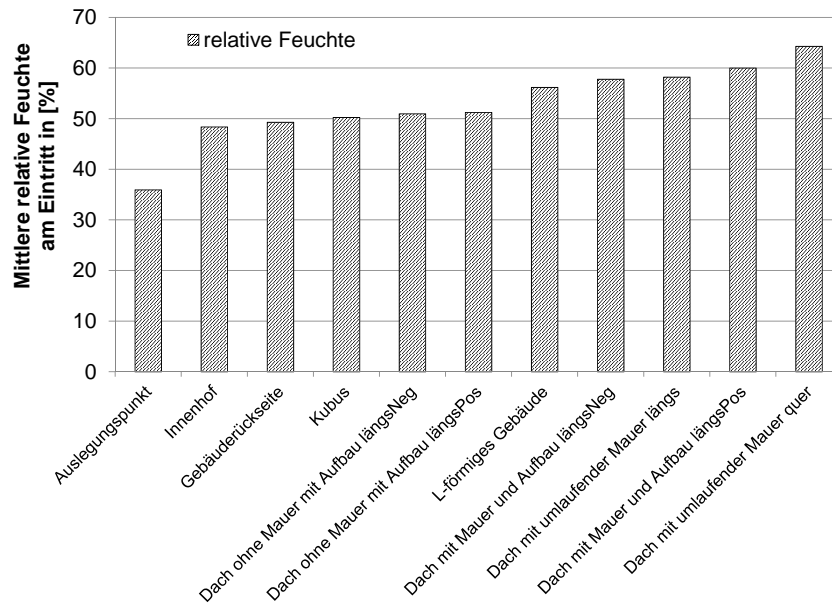


Abbildung 4.5: Mittlere absolute und relative Feuchte im Eintritt

Für die Auswertung wird die Enthalpiedifferenz zwischen Eintritt und Austritt aus dem Simulationsergebnis berechnet und in Tabelle 3 zusammen mit der Feuchtkugeltemperatur und der mittleren absoluten Feuchte am Eintritt für die einzelnen Aufstellsituationen aufgelistet. In der ersten Zeile ist zusätzlich der Auslegungszustand aufgeführt. Die Feuchtkugeltemperatur t_{wb} des Auslegungszustandes sollte nicht über-, und die Enthalpiedifferenz dh nicht unterschritten werden. Das ist allerdings in allen Aufstellsituationen der Fall, wie Abbildung 4.6 auf Seite 44 zeigt. Die Abbildung stellt die Werte als Säulendiagramm gegenüber. Die Aufstellsituationen sind dabei am Grad der Beeinträchtigung aufsteigend sortiert.

Grundlegend ist den Ergebnissen in Abbildung 4.6 zu entnehmen, dass keine Aufstellungssituation untersucht wurde, die Werte im Bereich der Auslegung oder besser liefert. Es sind also beim betrachteten RKW in allen untersuchten Fällen Beeinträchtigungen zu erwarten.

Obwohl zur Aufstellung auf dem Dach geraten wird [7], fallen alle Ergebnisse von RKW auf dem Dach negativ aus. Sie liegen sogar deutlich hinter Aufstellungsorten, von denen abgeraten wird, wie hinter einem Gebäude (Kubus, Gebäuderückseite, L-förmiges Gebäude).

Betrachtet man die Umströmung eines Gebäudedaches in Abbildung 4.7 auf Seite 44 so ist zu erkennen, dass an der windzugewandten Seite die Strömung an der Dachkante

Tabelle 3: Ergebnistabelle der Hauptstudie

Variante	x [g/kg]	t_{wb} [°C]	dh [$\frac{J}{kg}$]	Bemerkung
Auslegungspunkt	10,7	22,0	44 400	nach Energiebilanz
Kubus	15,0	24,0	39 000	Mittelwert(80-180)s
Dach mit umlaufender Mauer längs	17,5	25,5	32 700	Zeitpunkt 191 s
Dach mit umlaufender Mauer quer	19,4	26,6	27 900	Mittelwert(200-500) s
Dach mit Mauer und Aufbau längsPos	18,0	25,8	31 300	Zeitpunkt 200 s
Dach mit Mauer und Aufbau längsNeg	17,4	25,4	33 000	Zeitpunkt 160 s
Dach ohne Mauer mit Aufbau längsPos	15,4	24,3	38 200	Zeitpunkt 300 s
Dach ohne Mauer mit Aufbau längsNeg	15,3	24,2	38 400	Zeitpunkt 100 s
Gebäuderückseite	14,8	23,9	39 700	Mittelwert(300-500)s
Innenhof	14,5	23,7	40 400	Zeitpunkt 341 s
L-förmiges Gebäude	16,9	25,2	34 300	Zeitpunkt 498,9 s

ablöst und sich ein Totwassergebiet bildet, welches sich über den größten Teil des Daches erstreckt. Dieses Totwassergebiet scheint die Rezirkulation der Fortluft stärker zu fördern als die Gebiete, die sich hinter einem Körper bzw. Gebäude bilden (vgl. Abbildung 4.3). Mauern, die ein Dach umranden, verschlechtern die Situation zusätzlich.

Die stärkste Beeinträchtigung resultiert bei der Aufstellung des RKW auf dem Dach eines Gebäudes mit umlaufender Mauer, die höher als die Auslässe des RKW ist, wenn das Gebäude orthogonal zu seiner Längsachse angeströmt wird.

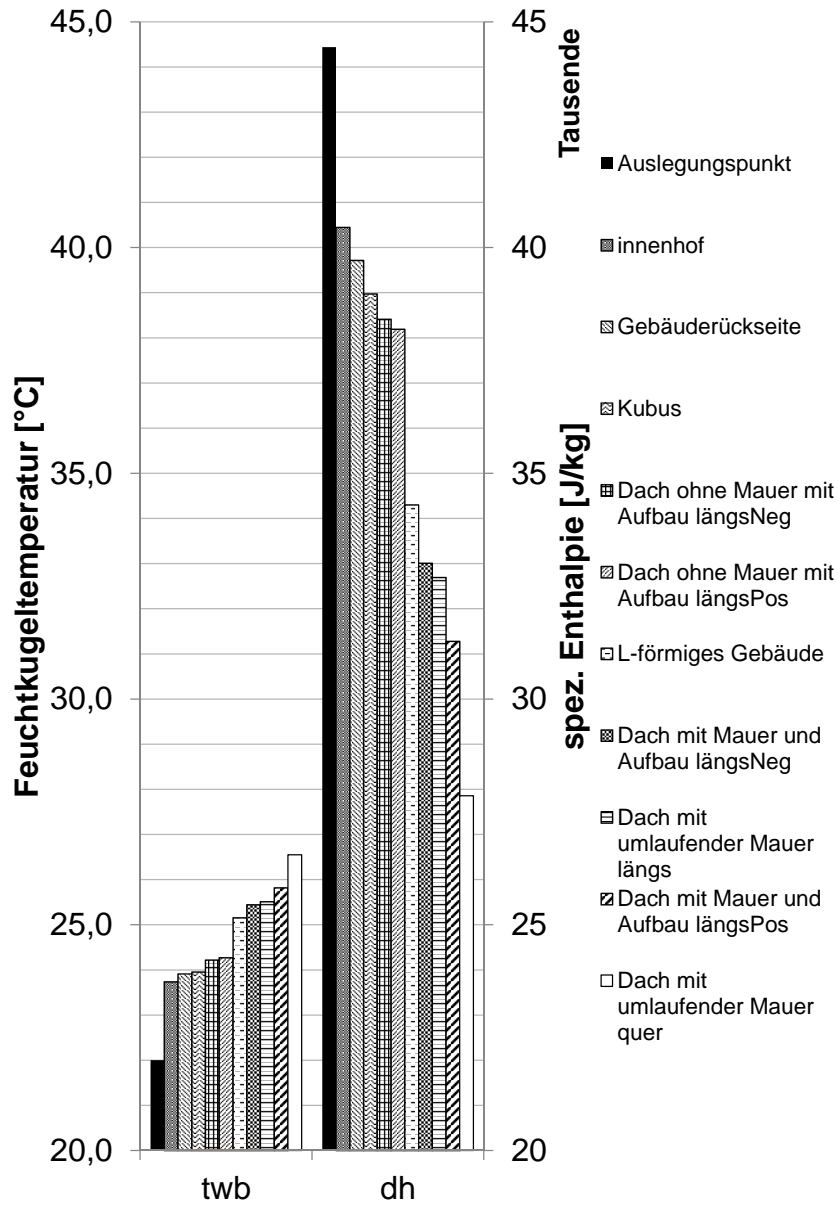


Abbildung 4.6: Säulendiagramm der Ergebnisse

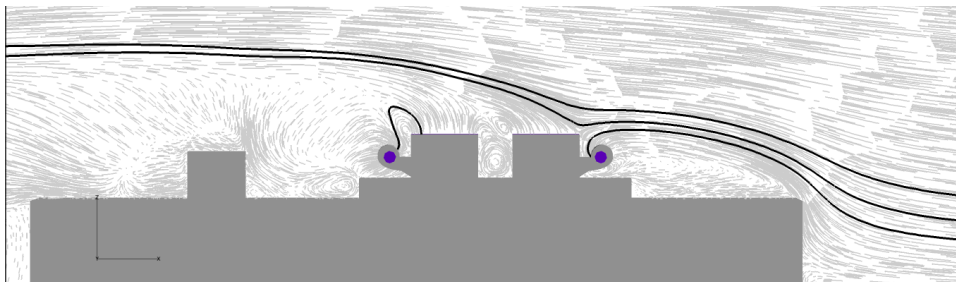


Abbildung 4.7: Umströmung eines Gebäudedaches

5 Leitfaden zur schnellen Beurteilung der Aufstellsituation

Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen zu allgemeingültigen Aussagen zur Beurteilung der Aufstellsituation eines RKW führen. Aufgrund der getroffenen Annahmen und Vereinfachungen kann der Leitfaden keine quantitative Aussage über Versagen oder Funktion eines RKW machen. Es können lediglich Tendenzen aufgezeigt werden. Ziel ist es, auch ohne Kenntnisse der Strömungsmechanik vor Ort eine erste Einschätzung der Aufstellsituation eines RKW im Hinblick auf Rezirkulation ermöglichen.

Der Leitfaden wird in Form einer Checkliste umgesetzt. Bekannte Schwierigkeiten werden in der Checkliste so abgefragt, dass bereits das Auftreten einer Schwierigkeit zur Einstufung als *bedenklich* führt. Allerdings bedeutet die konsequente Verneinung von Schwierigkeiten nicht, dass der bedenkenlose Betrieb gewährleistet ist. Die Checkliste beinhaltet nicht alle denkbaren Aufstellsituationen und Kombinationen. Es ist daher möglich, dass Aufstellsituationen existieren, die nicht erfasst sind und daher kein *bedenklich* erzeugen aber das RKW trotzdem beeinträchtigen.

In die Checkliste auf Seite 46 fließen sowohl die Untersuchungen dieser Arbeit ein als auch die bereits vorhandenen Untersuchungen von Imtech Deutschland sowie die Erfahrungen des RKW-Herstellers EVAPCO nach [7].

Die Checkliste ist in fünf Blöcke unterteilt. In den Blöcken werden Bauart, Zuluft-, Fortluftbedingungen, Gebäudenähe und Analogie zu Simulationen abgefragt. Mit Ausnahme des Blockes „Bauart“ können die Unterpunkte mit „Ja“ oder „Nein“ beantwortet werden. In einigen Fällen lassen sich bei „Ja“ noch Zusatzangaben machen.

Ein „Ja“ - unabhängig in welchem Block - führt zu einer Einschätzung der Aufstellsituation als *bedenklich*. Die Einschätzung als *bedenklich* hat zur Folge, dass

- eine Strömungssimulation in Betracht gezogen werden sollte,
- bei der Auslegung eines RKW die Anfälligkeit für Rezirkulation zum Beispiel durch eine Überdimensionierung berücksichtigt werden sollte oder
- Maßnahmen unternommen werden sollten, um die Anfälligkeit für Rezirkulation zu reduzieren.

Checkliste zur schnellen Beurteilung der Aufstellungssituation befeuchteter, zwangsbelüfteter Rückkühlwerke (RKW)

Diese Checkliste stellt einige Fragen zusammen, die dazu dienen sollen, die Aufstellungssituation eines oder mehrerer RKW im Hinblick auf Rezirkulation einzuschätzen. Sie beruhen auf Erfahrungen von Herstellern¹ sowie auf simulationsgestützten Untersuchungen. Es soll schnell festgestellt werden, ob eine Aufstellungssituation als bedenklich einzustufen ist. Das Ergebnis ersetzt keine Simulation und liefert keine Daten zur Minderleistung oder garantiert die Funktion.

Aufgrund der Tatsache, dass Strömungsmechanik komplexen Zusammenhängen unterliegt, sind Auswirkungen von Abweichungen in den Randbedingungen nur schwer abzuschätzen. Sollte Unsicherheit aufkommen, ob der zu beurteilende Fall im Rahmen dieser Checkliste berücksichtigt wird, sollte grundlegend davon ausgegangen werden, dass dies nicht der Fall ist und eine Untersuchung bzw. Simulation durchgeführt werden.

Zu den Checkpunkten:

Druckbelüftete (Ventilator am Lufteintritt positioniert) RKW sind grundsätzlich anfälliger für Rezirkulation als saugbelüftete (Ventilator am Luftaustritt positioniert). Der Grund liegt in der niedrigeren Austrittsgeschwindigkeit. Druckbelüftete RKW sind daher eher als bedenklich einzustufen.

Wird mindestens eine Frage mit „Ja“ beantwortet, so ist die Aufstellungssituation als bedenklich und anfällig für Rezirkulation einzustufen.

-
- | | | |
|----------------------------------|--|---|
| 1) Bauart: | <input type="checkbox"/> druckbelüftet | <input type="checkbox"/> saugbelüftet |
| 2) Erschwerte Zuluftbedingungen: | <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja, und zwar: |
| Ein RKW von Mauer umgeben | <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja |
| Mehrere RKW von Mauer umgeben | <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja, und zwar _____ Stück |
| Mehrere, dicht aufgestellte RKW | <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja, und zwar _____ Stück |
| Sonstiges | <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja, und zwar: |
-

- | | | |
|------------------------------------|-------------------------------|---|
| 3) Erschwerte Fortluftbedingungen: | <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja, und zwar: |
| Decke oder Prallplatte | <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja, und zwar _____ |
| Sonstiges | <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja, und zwar: |
-

4) Aufstellung in der Nähe einer Wand

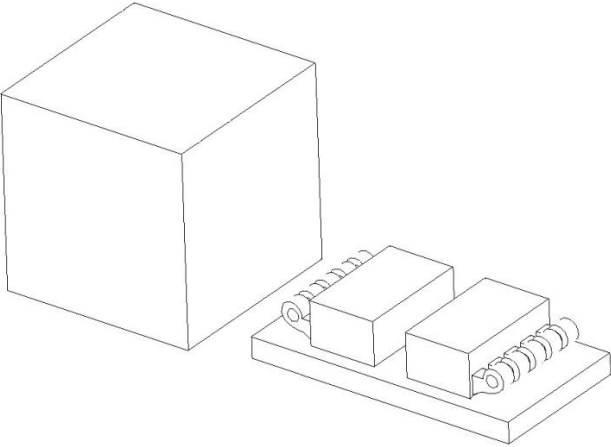
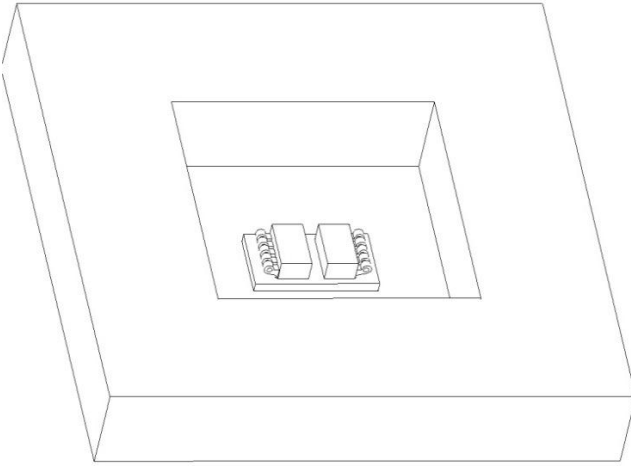
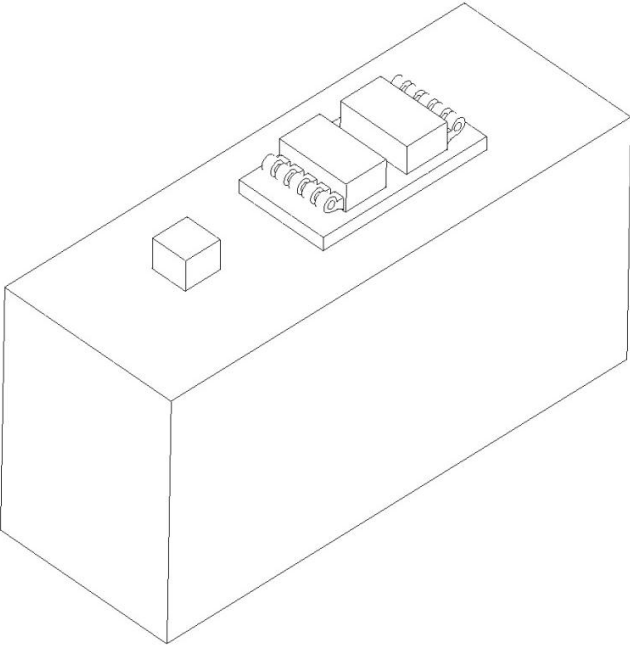
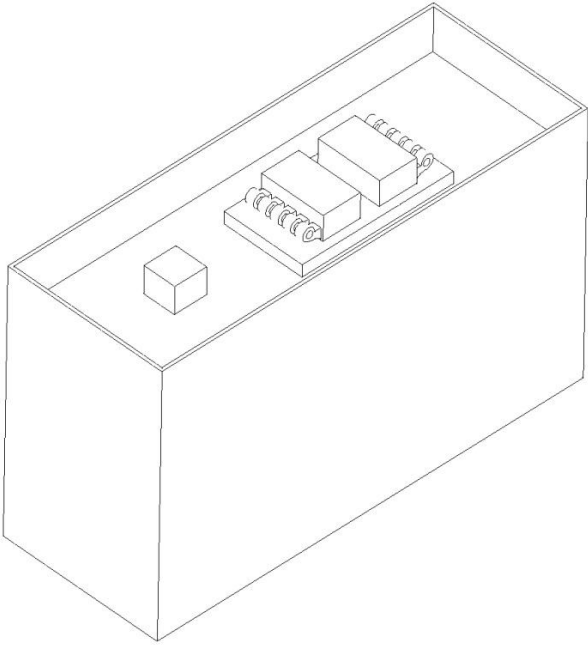
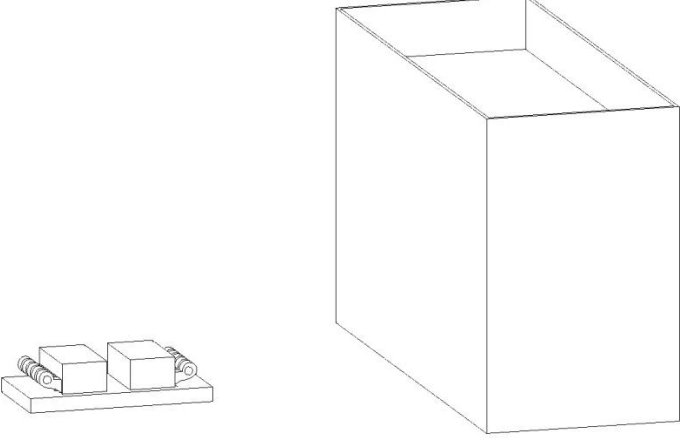
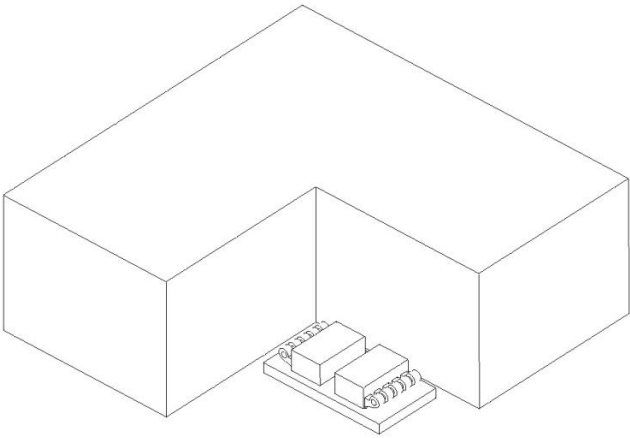
- | | | |
|---|-------------------------------|--|
| - Mit einer Entfernung kleiner 1*RKW-breite | <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja, etwa _____ Meter |
| - Mit Auslass niedriger als Wandoberkante | <input type="checkbox"/> Nein | <input type="checkbox"/> Ja, um etwa _____ Meter |

¹ Evapco: „Leitfaden für Aggregateaufsellung“

5) Aufstellung ähnelt einer der hier dargestellten Simulation:

Nein

Ja, und zwar:

<p>Würfel</p>  <p><input type="checkbox"/></p>	<p>Innenhof</p>  <p><input type="checkbox"/></p>
<p>auf Dach</p>  <p><input type="checkbox"/></p>	<p>Von Mauer umgeben auf Dach</p>  <p><input type="checkbox"/></p>
<p>Nähe verglw. großem Gebäude</p>  <p><input type="checkbox"/></p>	<p>L-förmiges Gebäude</p>  <p><input type="checkbox"/></p>

6 Fazit und Ausblick

6.1 Fazit

Die Ergebnisse vorhandener Untersuchungen zeigten unter anderem Totwassergebiete hinter stumpfen Körpern als Ursache für Rezirkulation von Fortluft bei RKW. Die Untersuchung von Aufstellsituationen, in denen stumpfe Körper umströmt werden, bestätigte den Einfluss der Körper auf die Rezirkulation. Es zeigte sich, dass saugbelüftete RKW aufgrund ihrer geringen Austrittsgeschwindigkeiten besonders anfällig für Rezirkulation sind.

Die Auswertung der unterschiedlichen Aufstellsituationen von RKW zeigte, dass alle betrachteten Aufstellsituationen das RKW beeinträchtigen. Die Ausmaße dieser Beeinträchtigung variieren hingegen. Auffällig ist, dass auch die Aufstellung eines RKW auf dem Dach zu einer signifikanten Beeinträchtigung des RKW führt, obwohl die Aufstellung auf Dächern von Herstellern von RKW empfohlen wird.

Im Rahmen der Untersuchung der Aufstellsituationen konnte eine Verbesserung der ersten Einschätzung von Aufstellsituationen von RKW im Hinblick auf Rezirkulation geschaffen werden. Eine allgemeingültige Aussage über die Funktion von RKW kann nicht getroffen werden, da jede Änderung der Randbedingungen signifikante Auswirkungen auf das Ergebnis hat. Auch die Vielzahl von möglichen Aufstellsituationen macht eine allgemeingültige Aussage schwierig.

Die Checkliste zur Beurteilung der Aufstellsituation ist entsprechend der Schwierigkeit einer allgemeinen Aussage gestaltet. Die Checkliste kann so einen Rahmen zur Beurteilung schaffen und Hinweise geben, ob genauere Untersuchungen und Simulationen durchgeführt werden sollten. Dabei muss sich auf eine Einschätzung als *bedenklich* beschränkt werden, da genauere Aussagen über Bedenklichkeit und Unbedenklichkeit einer Aufstellsituation im Hinblick auf Rezirkulation nur durch Simulationen oder Versuche möglich sind.

Die UDF zur Berücksichtigung der Rezirkulation bei RKW kann auch in zukünftigen Simulationen Anwendung finden. Trotz der Vereinfachungen in der UDF zur Abbildung des komplexen Prozesses, der im RKW zur Kühlung des Kühlwassers abläuft, können gute Ergebnisse im Bereich des Auslegungspunktes des RKW für den Austrittszustand berechnet werden. Aber auch in Bereichen unterhalb des Auslegungspunktes kann die UDF angewendet werden. Dadurch wird der Zustand im Austritt des RKW abhängig vom Zustand im Eintritt bestimmt. Dies hat Vorteil, dass keine fixen Parameter für den Austritt definiert werden müssen und Rezirkulation in jedem Fall berücksichtigt wird.

Insgesamt ist zu sagen, dass meist Totwassergebiete die Ursache für Rezirkulation sind, die durch verschiedene Eigenschaften der Geometrie und Randbedingungen der Aufstellsituationen von RKW hervorgerufen werden. Das Ausmaß der Beeinträchtigung des RKW hängt nicht nur vom Totwassergebiet ab, sondern auch von den technischen Daten des RKW.

6.2 Ausblick

Diese Arbeit schafft zwei Werkzeuge zum Umgang mit Rezirkulation bei RKW. Die Checkliste als Kern der Arbeit ist das erste Werkzeug. Der Stand der Checkliste wird im Folgenden eingeordnet. Eine entwickelte UDF liefert Daten zur Erstellung der Checkliste. Die UDF als zweites Werkzeug soll in diesem Kapitel ebenfalls evaluiert werden, da sie für die erhobenen Daten ausreichend genau und effizient arbeitet, aber Optimierungspotential hinsichtlich weiterer Simulationen bietet. Die Ergebnisse der Simulationen werden bezüglich der getroffenen Annahmen beurteilt.

6.2.1 Simulationsergebnisse

Die Simulationen werden mit bestimmten Randbedingungen für die Umgebung berechnet. Richtung und Profil der Windgeschwindigkeit sowie Temperatur und Feuchte sind im Vorfeld festgelegt. Die Parameter sind so gewählt, dass sie einen möglichst allgemeinen Zustand abbilden und sich gleichzeitig auf die Daten des untersuchten RKW beziehen. Für die Parameter des Windes werden Mittelwerte für Deutschland gewählt. Über das Jahr können, je nach Region, eine Vielzahl von abweichenden Kombinationen aus Windgeschwindigkeit und -richtung auftreten.

Bei strömungsmechanischen Phänomenen spielt die nähere und entferntere Umgebung eine Rolle. Die Umgebung ist in jedem Fall individuell, sodass sie nicht allgemeingültig modelliert werden kann. Um die Umgebung im Schnitt trotzdem berücksichtigen zu können, wird das in Abschnitt 3.2.1 beschriebene Windprofil verwendet. Es ist eine Näherung und gibt in Einzelfällen die Strömungssituation nicht ausreichend wieder, die aus der Umgebung resultiert.

Die Werte für Temperatur und Feuchte orientieren sich am Auslegungspunkt des RKW. Ein von dem untersuchten RKW verschiedenes RKW, das in einer Region aufgestellt ist oder aufgestellt werden soll, in der die angenommenen Umgebungsbedingungen nicht zutreffen, liefert entsprechend abweichende Resultate. Der Ansatz, den schlechtesten Fall zu untersuchen, kann also als Grundstein zur Erstellung einer Datensammlung aufgefasst werden. Eine wachsende Datensammlung mit Untersuchungen von RKW schafft langfristig ein Gespür zur Einschätzung von Aufstellungssituationen. Die Ergebnisse sind als Orientierung zu sehen, um verschiedene Aufstellungssituationen von RKW einschätzen zu können, aber auch als Vergleich für weitere Simulationen.

6.2.2 UDF

User Defined Functions werden für Fluent in der Programmiersprache C geschrieben. Beim Entwickeln der UDF lag der Schwerpunkt auf der Funktionalität und weniger auf der Optimierung des Quellcodes, was einen Ansatzpunkt zur Weiterentwicklung bietet. Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung bietet das Auslesen der Stoffdaten aus Fluent. Der entwickelten UDF müssen Stoffdaten wie Wärmekapazität, Dichte und Verdampfungsenthalpie im Quellcode mitgeteilt werden. Werden die Stoffdaten, die während der Simulation bestimmt werden, von Fluent an die UDF übergeben, werden die Berechnungen der UDF genauer und die Anwendung effizienter.

Eine Weiterentwicklung bietet auch ein anderer Ansatz zur Bestimmung des Austrittszustandes. So kann der Austrittszustand über die Enthalpiedifferenz der Zustände, die durch die abzuführende Wärme nötig ist, ermittelt werden. Das Problem dieses Ansatzes ist, dass weder der Wassergehalt x_2 noch die Temperatur t_2 bekannt sind. Es ist lediglich bekannt, auf welcher Isenthalpe sich der Austrittszustand befinden muss. Möglicherweise kann eine optimierte Iteration oder eine sinnvolle Annahme von Wassergehalt und Temperatur genauere Ergebnisse unterhalb des Auslegungszustandes liefern.

Beim Überschreiten des Auslegungszustandes sind sowohl Temperatur als auch Wassergehalt des Austrittszustandes durch den Schnittpunkt von der maximalen Austrittstemperatur mit der Taulinie definiert. In den Bereichen, in denen der Auslegungspunkt überschritten wird, sind deshalb keine Abweichungen zwischen den Ansätzen zu erwarten.

Während der Validierung der Ergebnisse der UDF fällt auf, dass bei der Berechnung der Feuchtkugeltemperatur Abweichungen zwischen den erwarteten Ergebnissen und denen der UDF auftreten. Das Problem wird in Anhang C auf Seite 61 näher beschrieben.

6.2.3 Checkliste

In Abschnitt 5 wird die Checkliste erörtert. Es wird erklärt, dass die Aussagen der Checkliste nur qualitativ sein können und Tendenzen aufzeigen. Eine Aufstellungssituation kann als *bedenklich* eingestuft werden, der Grad der Beeinträchtigung hingegen kann nicht ermittelt werden.

Dafür wird neben der Checkliste als Werkzeug zur qualitativen Beurteilung die Grundlage für ein weiteres Werkzeug geschaffen. Es soll, aufgebaut als Excel-Arbeitsblatt, durch die Eingabe der technischen Daten eines RKW zusätzlich Aussagen über den Grad der Beeinträchtigung des RKW machen können. Dazu müssen Kenngrößen ermittelt und Daten gesammelt werden. Die Daten aus den Simulationen dieser Arbeit bilden einen ersten Ansatzpunkt zur Erstellung eines solchen Werkzeuges. Eine Beschreibung des Excel-Arbeitsblattes ist in Anhang D auf Seite 63 zu finden.

Damit das Excel-Arbeitsblatt belastbare Ergebnisse liefern kann, müssen noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Dazu zählt die Ermittlung von Kenngrößen für die Zusammenhänge zwischen Windgeschwindigkeit und Geometrie sowie Windgeschwindigkeit und Austrittsgeschwindigkeit und die zugehörigen Funktionen, sofern vorhanden. Erst die Kenngrößen als mathematische Zusammenhänge der ausschlaggebenden Randbedingungen können es ermöglichen, approximierte Aussagen über die Beeinträchtigung eines RKW durch seinen Aufstellungsort zu treffen.

Ein Vorgehen zur Ermittlung solcher Kenngrößen könnte sein, dass die gleiche Geometrie mit dem gleichen RKW mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten umströmt wird. Für den Zusammenhang zwischen Austrittsgeschwindigkeit des RKW und Windgeschwindigkeit kann beispielsweise nur die Austrittsgeschwindigkeit des RKW variiert und der Austrag der Fortluft untersucht werden. Da die drei Parameter Geometrie, Windgeschwindigkeit und Austrittsgeschwindigkeit jeweils aber auch kombiniert den Austrag der Fortluft beeinflussen, ist fraglich, ob hier überhaupt belastbare Kennzahlen gefunden werden können. Ob Kennzahlen gefunden werden können, müssen weitere Untersuchungen zeigen.

Ein Ansatz könnte sein, für festgelegte Geometrien zunächst Wind- und Austrittsge-

schwindigkeit einzeln und anschließend kombiniert zu untersuchen. In Verbindung mit der Checkliste als „lebendes Dokument“ sind nach weiteren Erfahrungen bessere Einschätzungen der Aufstellsituation von RKW im Hinblick auf Rezirkulation zu erwarten.

Literatur

- [1] ANSYS Inc.: *ANSYS Help Release 15.0*. 2013. URL: <http://148.204.81.206/Ansys/readme.html>.
- [2] Dahncke, M.: *CFD-Simulation Dunsttürme*. interner Bericht. Imtech Forschung und Entwicklung, 2013.
- [3] Dede, A. und Krüger, C.: „CFD-Simulation zum Flugverhalten zylindrischer Fasern“. Diplomarbeit. Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg, 2009.
- [4] Deutscher Wetterdienst: *Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in 10 Meter über Grund 1981 - 2000*. URL: <http://tinyurl.com/mpabkfj> (besucht am 22. 09. 2014).
- [5] EVAPCO: *Funktionsprinzip druckbelüfteter Kühltürme*. URL: http://www.evapco.eu/sites/evapco.eu/files/imce/lsta_de.png (besucht am 06. 11. 2014).
- [6] EVAPCO: *Funktionsprinzip saugbelüfteter Kühltürme*. URL: http://www.evapco.eu/sites/evapco.eu/files/imce/at_function_de.png (besucht am 06. 11. 2014).
- [7] EVAPCO: *Leitfaden für Aggregateaufstellung für Kühltürme, Verdunstungsverflüssiger und Verdunstungskühler mit geschlossenem Kreislauf*. Prospekt 311-D Metric. 1999.
- [8] E.W. Gohl GmbH: *Dunsturm DT / DT XL / SK*. URL: www.gohl.de/uploads/media/Dunsturm_DT_DTXL.pdf (besucht am 22. 08. 2014).
- [9] Hucho, W.-H.: *Aerodynamik der stumpfen Körper physikalische Grundlagen der Anwendung in der Praxis; mit 56 Tabellen*. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011. URL: <http://d-nb.info/1010163663/04>.
- [10] Hussein, H. J. und Martinuzzi, R. J.: „Energy balance of turbulent flow around a surface mounted cube placed in a channel“. In: *Physics of Fluids* 8.3 (März 1996), S. 764–780.
- [11] Jungbauer, A.: „Windenergienutzung in einem regenerativen Energiesystem“. Diplomarbeit. Technische Universität Graz, 1998. URL: <http://elite.tugraz.at/diplomarbeiten/Jungbauer.pdf> (besucht am 14. 11. 2014).
- [12] Martinuzzi, R. und Tropea, C.: „The Flow Around Surface-Mounted, Prismatic Obstacles Placed in a Fully Developed Channel Flow“. In: *Journal of Fluid Engineering* 115 (März 1993), S. 85–92.
- [13] NASA Langley Research Center: *The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model*. Turbulence Modeling Resource. Aug. 2013. URL: <http://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html> (besucht am 13. 11. 2014).
- [14] Nickolay, M.: „Rückkühlsysteme im Vergleich: Wirtschaftlichkeit und CO₂-Bilanz“. In: *Kälte Klima Aktuell* (Apr. 2014). URL: http://www.kka-online.info/artikel/kka_Rueckkuehlsysteme_im_Vergleich_1464994.html (besucht am 22. 10. 2014).
- [15] Nimax, M.: *CFD-gestützte Untersuchung der Aufstellsituation der Rückkühlwerke*. interner Bericht. Imtech Forschung und Entwicklung, 2014.

- [16] Ohne Verfasser: *Best practice guidelines for turbomachinery CFD*. CFD-online. URL: http://www.cfd-online.com/Wiki/Best-practice_guidelines_for_turbomachinery_CFD#Boundary_layer_mesh (besucht am 18.09.2014).
- [17] Ohne Verfasser: *K-epsilon turbulence model*. Wikipedia. URL: http://en.wikipedia.org/wiki/K-epsilon_turbulence_model (besucht am 12.11.2014).
- [18] Ohne Verfasser: *Kühlgrenztemperatur*. Wikipedia. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%BChlgrenztemperatur> (besucht am 21.10.2014).
- [19] Ohne Verfasser: *Kühlturm*. Wikipedia. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%BChlturm> (besucht am 04.11.2014).
- [20] Ohne Verfasser: *Navier-Stokes-Gleichungen*. Wikipedia. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Navier-Stokes-Gleichungen> (besucht am 12.11.2014).
- [21] Ohne Verfasser: *Numerische Strömungsmechanik*. Wikipedia. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Numerische_Str%C3%B6mungsmechanik (besucht am 09.10.2014).
- [22] Ohne Verfasser: *Turbulenzmodell*. Wikipedia. URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Turbulenzmodell> (besucht am 09.10.2014).
- [23] Ohne Verfasser: *Y+ Wall Distance Estimation*. CFD-online. URL: <http://www.cfd-online.com/Tools/yplus.php> (besucht am 19.09.2014).
- [24] Rauchfuß, W.: *Persönliche Mitteilung vom 15.01.2015*. Mitarbeiter von Kühlturm Karlsruhe.
- [25] Recknagel, H., Sprenger, E. und Schramek, E.-R.: *Taschenbuch für Heizung- und Klimatechnik: einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik*. 75. Aufl. München: Oldenbourg-Industrieverl., 2011.
- [26] Rückborn, T., Menzel, P. und Leder, A.: „Numerische Simulation der Umströmung eines auf Sediment aufliegenden stumpfen Körpers“. In: *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*. 21. Fachtagung 2013. München, Sep. 2013, S. 45.1–45.7.
- [27] Schlichting, H.: *Grenzschichttheorie*. Hrsg. von Gersten, K. und Krause, E. 10., überarb. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2006.
- [28] Schröder, H. und Vinnemeier, F.: *Thermodynamik Vorlesungskript*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fachbereich Maschinenbau und Produktion. Hamburg, 2011.
- [29] Sockel, H.: *Aerodynamik der Bauwerke; mit 313 Bildern*. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg, 1984.
- [30] Stull, R.: „Wet-Bulb Temperature from Relative Humidity and Air Temperature“. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50.11 (Nov. 2011). URL: <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/JAMC-D-11-0143.1> (besucht am 24.10.2014).
- [31] Wilcox, D. C.: *Turbulence Modeling for CFD*. 3. ed. La Cañada, Calif.: DCW Industries, 2006.

- [32] Wulf, P.: *CFD EA Vorlesungsskript*. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Fachbereich Maschinenbau und Produktion. Hamburg, März 2014.

A Untersuchung zur Wahl des Rückkühlwerks

RKW gibt es, wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben, in unterschiedlichen Bauarten und damit verbundenen Charakteristiken. Für die Untersuchung von Aufstellungssituationen kann eine Vielzahl von RKW ausgewählt werden. Damit sich die Auswahl des RKW nicht dem Vorwurf der Willkür ausgesetzt sehen muss, ist der erste Ansatz zur Auswahl ein ökonomischer. Anhand des Marktes für RKW sowie Bestandszahlen in Verbindung mit Nutzungskriterien und Vor- und Nachteilen der verschiedenen RKW-Bauarten soll die Auswahl begründet werden.

Die Recherche der Daten und Zahlen gestaltete sich unerwartet schwierig, sodass keine belastbaren Daten gefunden werden konnten. Die Konsequenz ist eine andere Herangehensweise an die Auswahl des RKW. Ziel ist es nicht mehr den Markt, sondern den schlechtesten Fall, den worst-case, abzubilden.

Der worst-case wird durch die Gegenüberstellung der saug- und druckbelüfteten RKW ermittelt. Mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten an der gleichen Geometrie werden die beiden Bauarten untersucht. Die Windgeschwindigkeiten sind jeweils das deutsche Mittel von 4 m/s, ein langsamer Wind mit 1,5 m/s und ein starker Wind mit 20 m/s in 10 m Höhe. Auch in dieser Untersuchung findet das in (3-1) beschriebene Profil für die Windgeschwindigkeit Anwendung.

Im Diagramm in Abbildung A.1 ist auf der Abszisse die Flowtime aufgetragen. Also die Zeit, die das Fluid in der Simulation bereits erfahren hat. Auf der Ordinate ist die Differenz zwischen der Ist- und der Soll-Feuchtkugeltemperatur aufgetragen, wobei die Soll-Feuchtkugeltemperatur gleich der Auslegungs-Feuchtkugeltemperatur ist, also $\Delta t_{wb} = t_{wb,ist} - t_{wb,soll}$. Werte für Δt_{wb} im positiven Bereich stellen eine Überschreitung der Soll-Feuchtkugeltemperatur in Kelvin dar.

Das Diagramm zeigt zum einen, dass die Beeinträchtigung der RKW nicht proportional zur Windgeschwindigkeit ist; Sowohl niedrige, als auch hohe Windgeschwindigkeiten liefern bessere Ergebnisse als bei einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s.

Zum anderen zeigt sich, dass druckbelüftete RKW in allen Fällen ihre maximale Feuchtkugeltemperatur überschreiten. Saugbelüftete RKW sind weniger anfällig. So ist in Abbildung A.1 zu sehen, dass alle druckbelüfteten RKW (blau) die jeweilige Auslegungs-Feuchtkugeltemperatur überschreiten.

Aufgrund der Ergebnisse dieser Gegenüberstellung der RKW und Windgeschwindigkeiten werden für die Untersuchungen druckbelüftete RKW simuliert und als Windverhältnisse eine Geschwindigkeit von 4 m/s in einer Höhe von 10 m angesetzt.

Für eine Aussage, in wieweit die getroffene Auswahl den Bestand an RKW betrifft, sollte eine Marktanalyse durchgeführt werden.

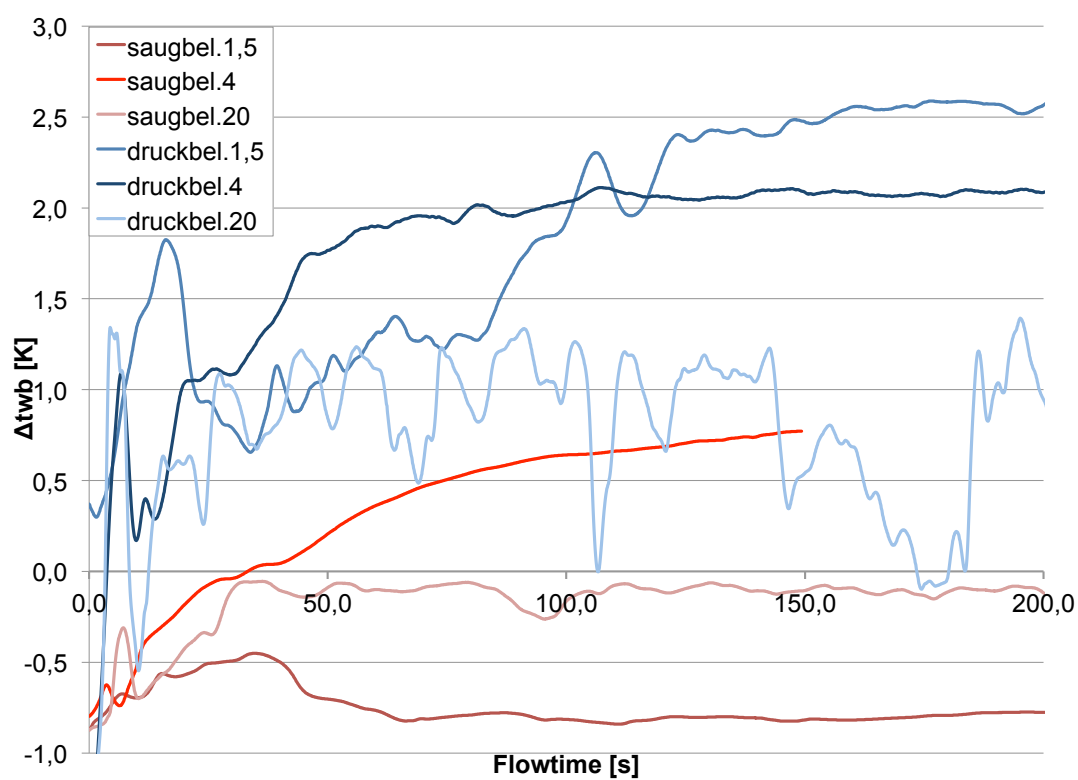


Abbildung A.1: Vergleich der RKW bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten

B Beeinträchtigung der Ventilatoren

Im Rahmen der Untersuchung im Fallbeispiel 1 wird festgestellt, dass die Strömungssituation im Bereich der RKW auch die Ventilatoren beeinträchtigt. Durch die Aufstellungssituation entstehen an den Eintrittsflächen der RKW höhere Unterdrücke, als an den Austrittsflächen. Die Ventilatoren müssen den Druckverlust durch die Aufstellungssituation zusätzlich zum Druckverlust der RKW überwinden [15].

Kann das RKW durch das Fehlen von Regelungstechnik oder Erreichen der maximalen Pressung nicht auf den erhöhten Druckverlust reagieren, kommt es zu einer Reduzierung des Luftvolumenstroms. Ein reduzierter Volumenstrom wirkt sich direkt auf die Kühlleistung eines RKW aus.

Der Luftvolumenstrom beeinflusst die Austrittsenthalpie der Luft und somit die Enthalpiedifferenz zwischen Ein- und Austritt. Durch einen reduzierten Volumenstrom erhöht sich die Enthalpiedifferenz, die nötig ist, um die Wärme abzuführen. Denn zum einen wird dadurch die Menge an Wasser reduziert, die die Luft aufnehmen kann, zum anderen muss die Temperatur der Luft stärker erhöht werden, um die gleiche Menge Wärme aufnehmen zu können.

Bei Umgebungsbedingungen weit unterhalb des Auslegungszustandes des RKW muss diese Beeinträchtigung nicht auffallen. Befindet sich das RKW aber bereits an seiner Leistungsgrenze beeinträchtigt ein reduzierter Volumenstrom das RKW zusätzlich.

Die Berücksichtigung des erhöhten Druckverlustes durch die Aufstellungssituation ist aufwendig. Die Ventilator Kennlinien müssen bekannt sein sowie der Druckverlust über das RKW. Eine Umsetzung des variablen Volumenstroms in einer UDF für Fluent setzt die Ventilator Kennlinie als mathematische Funktion voraus. Zur Bestimmung des Betriebspunktes zu jedem Zeitschritt muss dann zunächst die Druckdifferenz zwischen Ein- und Austritt bestimmt werden. Mit dem anschließend bestimmten Gesamtdruckverlust kann mit der Funktion der Ventilator Kennlinie ein neuer Volumenstrom bestimmt werden. Der neue Volumenstrom muss Fluent anschließend mitgeteilt werden.

Die Berechnungen des reduzierten Volumenstroms sind aufgrund des Aufwandes im Rahmen dieser Arbeit nicht realisiert worden. Es wird aber empfohlen, die Auswirkungen durch umgebungsbedingte Druckverluste zu beachten und beim Betrachten der Simulationsergebnisse als mögliche zusätzliche Beeinträchtigung zu erkennen. Eventuell ist zu prüfen, ob eine Erweiterung der UDF um die Berücksichtigung des reduzierten Volumenstroms sinnvoll ist.

C Rundungsfehler in der UDF

Die in Abschnitt 3.5 beschriebene UDF bestimmt zu jedem Zeitschritt die Feuchtkugeltemperatur im Eintritt. Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass die von der UDF bestimmten Feuchtkugeltemperaturen von den im Tabellenkalkulationsprogramm berechneten Temperaturen abweicht.

Um die Ursache für die Abweichung zu finden, sind die Rechenschritte in der UDF genau betrachtet worden. Bis zuletzt kann nicht festgestellt werden, worin die Ursache für den Fehler liegt. Es wird aber vermutet, dass die Abweichung durch Rundungsfehler beim Ausführen der UDF auftreten. Diese Vermutung liegt darin begründet, dass zur Berechnung der Feuchtkugeltemperatur (vgl. (3-11) auf Seite 33) zusätzliche Funktionen aufgerufen werden müssen. Zu den Funktionen gehören das Potenzieren mit rationalen Exponenten und die inverse Winkelfunktion Arkustangens. Abhängig davon, wie Fluent die Ergebnisse der Funktionen annähert, kann es hier zu Abweichungen kommen.

Die Gegenüberstellung der von Fluent bestimmten Feuchtkugeltemperaturen mit den separat berechneten zeigt Tabelle 4. Die Absolutwerte der Feuchtkugeltemperatur erhöhen sich mit steigender Zeilennummer. Die höchste Abweichung wird demnach beim *Dach mit umlaufender Mauer quer* erreicht. Die Feuchtkugeltemperatur liegt dort laut Tabellenkalkulationsprogramm bei $26,6^\circ\text{C}$. Fluent berechnet in der UDF mit $t_{wb} = 24,8^\circ\text{C}$ die Feuchtkugeltemperatur um 1,8 Kelvin geringer.

Tabelle 4: Vergleich der Feuchtkugeltemperaturberechnungen

Variante	Abweichung [K]	Abweichung [%]
Innenhof	-0,9	-4,2
Gebäuderückseite	-1,0	-4,5
Kubus	-1,0	-4,1
Dach ohne Mauer und Aufbau längsNeg	-1,1	-4,7
Dach ohne Mauer und Aufbau längsPos	-1,1	-4,7
L-förmiges Gebäude	-1,4	-5,6
Dach mit Mauer und Aufbau längsNeg	-1,4	-5,9
Dach mit umlaufender Mauer längs	-1,4	-5,9
Dach mit Mauer und Aufbau längsPos	-1,5	-6,3
Dach mit umlaufender Mauer quer	-1,8	-7,1

Damit festgestellt werden kann, welche Berechnung die genaueren Ergebnisse liefert, werden die zugehörigen Zustandspunkte im h,x-Diagramm eingetragen und die Feuchtkugeltemperatur grafisch konstruiert (vgl. Abschnitt 2.1.2 und Abbildung 2.3). Zusätzlich wird das Rechenbeispiel aus [30] nachgerechnet. Dort liefert eine relative Feuchte von

50,0% bei einer Temperatur von $20,0^{\circ}\text{C}$ eine Feuchtkugeltemperatur von $13,7^{\circ}\text{C}$. Das gleiche Ergebnis liefert die separate Berechnung im verwendeten Tabellenkalkulationsprogramm. Aufgrund dessen werden für die Auswertung die Ergebnisse des Tabellenkalkulationsprogramms herangezogen.

Bei der Betrachtung der Resultate aus der Simulation ist bei der Verwendung der UDF zu beachten, dass die berechnete Feuchtkugeltemperatur fehlerbehaftet ist. Der von der UDF berechnete Wert kann zwar zur Orientierung und Veranschaulichung des Verlaufs über die Simulation dienen. Zur Auswertung hingegen muss die Feuchtkugeltemperatur aus Eintrittstemperatur und -feuchte neu bestimmt werden.

D Checklistenergänzung als Excel-Arbeitsmappe

In Abschnitt 5 wird die erstellte Checkliste und ihre Handhabung beschrieben. Die Checkliste soll schnell eine erste Beurteilung einer Aufstellsituation eines RKW liefern. Zusätzlich ist ein Werkzeug geschaffen worden, das die erste Beurteilung weiter differenzieren und präzisieren soll. Dieses Werkzeug wird im Abschnitt 6.2.3 kurz vorgestellt und soll im folgenden näher beschrieben werden.

Die Schwächen der ergänzenden Excel-Arbeitsmappe sind im oben genannten Abschnitt erörtert. Ob die Arbeitsmappe ihren Zweck der Präzisierung der Beurteilung von Aufstellsituationen ohne vorherige Simulation (jemals) erfüllen kann, muss noch geprüft werden. Ungeachtet dessen wird der Aufbau und die Funktion der Arbeitsmappe in der derzeitigen Version 1.2 (Stand Januar 2015) beschrieben.

Abbildung D.1 zeigt Ausschnitte der Excel-Arbeitsmappe. Gelb unterlegte Felder stellen Formelfelder dar, die vom Kalkulationsprogramm berechnet werden. Alle übrigen Felder sind für die Eingabe des Benutzers freigegeben. In den Feldern müssen Angaben zum Rückkühlwerk und zur Umgebung sowie zu den Stoffdaten gemacht werden. Die Eingabefelder sind im Register *RKW* der Arbeitsmappe zusammengefasst. Der Inhalt des Registers *RKW* ist in Abbildung D.1a dargestellt.

Die Abschätzung wird für alle untersuchten Geometrien durchgeführt, für das jeweils ein eigener Faktor hinterlegt ist. Abbildung D.1b zeigt das Register für die Auswertung an einem würfelförmigen Körper, dem *Kubus*. Der hinterlegte Faktor ist der *Geomfaktor*, in der Abbildung oben. Außer dem Faktor und dem statischen Druck für die Feuchtkugeltemperatur sind in den einzelnen Registern für die Geometrien Berechnungsfelder enthalten.

Die Abschätzungen werden im Diagramm in Abbildung D.2 zusammengefasst. Das Balkendiagramm soll aussagen, welche Werte unter den angegebenen Randbedingungen bei unterschiedlichen Geometrien zu erwarten sind. Im Diagramm enthalten sind die Enthalpie, die der Luft zugeführt wird (grün), die Enthalpie, die nicht abgeführt werden kann (rot) und die Abweichung von der Auslegungs-Feuchtkugeltemperatur (blaue Linie).

Die Schwierigkeit ist, wie bereits erwähnt, die Ermittlung der Kenngrößen. Es ist klar, dass die ermittelten Kenngrößen nur für den betrachteten Fall Gültigkeit haben. Damit allgemeingültige Kenngrößen gefunden werden können, müssen deshalb weitere Untersuchungen folgen.

	A	B	C	D	E
3	Randbed		Berechnungsfeld		
4					
5		RKW	Q	3.491.000	W
6			Luftmenge	240.000	m ³ /h
7			t _{aus,max}	32,00	°C
8			Wassermenge	5,2	m ³ /h
9			dx _{RKW}	0,0180	-
10			Austrittsgeschw.	1,6	m/s
11			Auslegungspunkt		
12			twb	22,00	°C
13			Temp	32,00	°C
14			rl.Feucht	36,00	%
15		Umgebung	x _{ein}	0,0107	kg/kg
16			h ₁	59.550,29	J/kg
17			Windgeschw.	4,00	m/s
18			Verhältnis windAu	0,40	-
19			m _{ein,ges}	80,00	kg/s
20			m _{Ltr}	78,56	kg/s
22			h _{2max(32°C)}	109.689,79	J/kg
23			t _{aus}	31,12	°C
25			dh _{nötig}	44.438,25	J/kg
28					
29		Stoffwerte	c _{pLuft}	1.005,00	J/kgK
30			c _{pWasserdampf}	1.870,00	J/kgK
31			r _{d0}	2.500.000	J/kg
32			rho _{Luft}	1,20	kg/m ³
33			rho _{Wasser}	998,00	kg/m ³

	A	B	C	D	E	F	G	H
4		Kubus						
5		Geomfaktor	1,41					
6								
7								
8								
8								
9								
9								
10								
10								
11								
11								
12								
13								
13								
14								
14								
15								
15								
16								
16								
17								
17								
18								
18								
19								
19								
20								
20								
21								
21								
22								
22								
23								
23								
24								
24								
25								
25								
26								
26								
27								
27								
28								
28								
29								
29								
30								
30								
31								
31								
32								
32								
33								
33								
34								
34								
43								
43								
44								
44								
45								
45								
46								
46								
47								
47								
48								
48								

(a) Eingabebereich der Randbedingungen

(b) Auswertung für wurelformigen Körper

Abbildung D.1: Eingabebereich und Detailbereich Ausschnitt der Excel-Arbeitsmappe

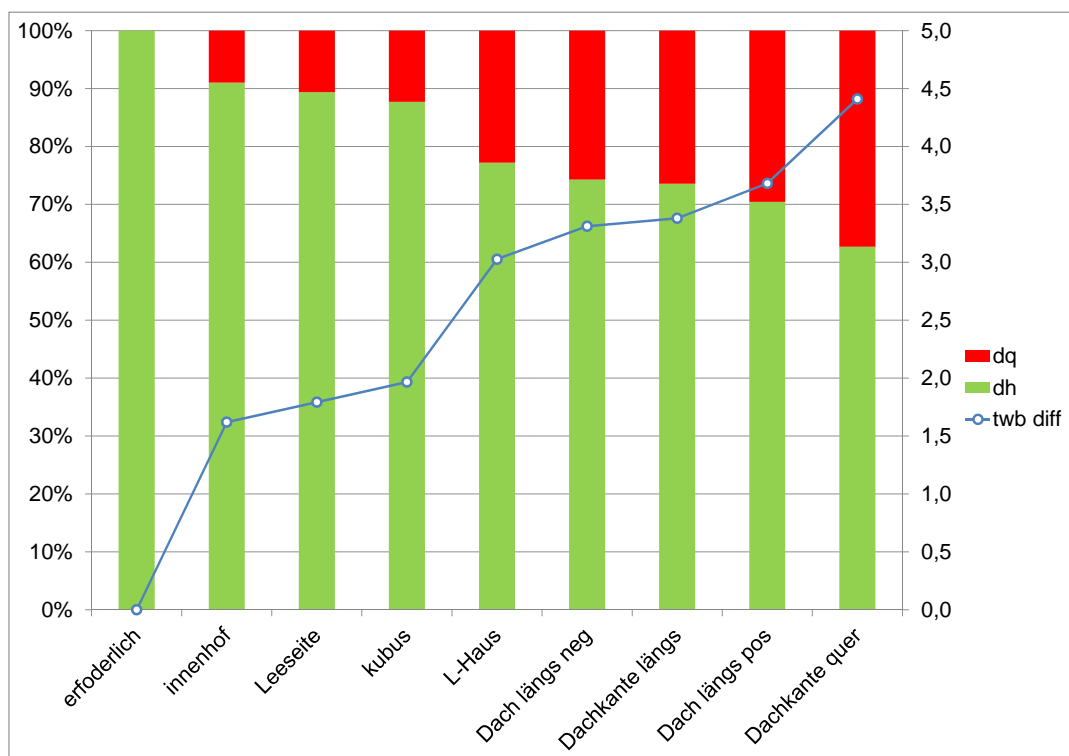


Abbildung D.2: Säulendiagramm der berechneten Werte

