

Schriftenreihe aus dem Institut für Massivbau

Ein Ansatz zur Optimierung des Luftströmungsverhaltens von Glas-Doppelfassaden unter Verwendung bionischer Prinzipien

Dipl.-Ing. Stefan Menzel



Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Peter Grübl Prof. Dipl.-Ing. Architekt Stefan Schäfer

Anschrift: TU Darmstadt Institut für Massivbau Alexanderstraße 5 und 35 64283 Darmstadt



#### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <u>http://dnb.ddb.de</u> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2004 Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2004 ISBN 3-86537-090-X

#### Ein Ansatz zur Optimierung des Luftströmungsverhaltens von Glas-Doppelfassaden unter Verwendung bionischer Prinzipien

Das architektonische Erscheinungsbild eines Gebäudes wird in hohem Maße von der formalen Gestaltung der Gebäudehülle geprägt. Um die bauphysikalische Funktionalität und damit das Gelingen des Gesamtkonzeptes zu gewährleisten, bedarf es in jedem Planungsprozess unter anderem einer Optimierung der individuell gewählten Fassadenkonstruktion.

Der im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagene Optimierungsansatz zur Steigerung der Effizienz von Glas-Doppelfassadensystemen beruht dabei auf den Konzepten der natürlichen Evolution, bei denen die Methoden der biologischen Vererbungslehre auf technische Fragestellungen übertragen werden. Zunächst werden in dieser Arbeit eingehend die experimentellen Untersuchungen an einem Fassadenmodell unter Verwendung der Particle Image Velocimetry vorgestellt, auf deren Grundlage die Computational Fluid Dynamics (CFD)-Anwendungen NAGARE und FLUENT erfolgreich validiert werden konnten. Die Verknüpfung der numerischen Strömungssimulation für den Auswertungsprozess einerseits und der Evolutionären Algorithmen für eine effektive Systemoptimierung andererseits resultiert in der Softwareentwicklung der Applikation GeDeNA – Genetic Designing with NAGARE. Das hohe Leistungspotential dieser Kombination zur effizienteren Gestaltung strömungsmechanischer Systeme wird abschließend verdeutlicht und anhand einiger Beispiele veranschaulicht.

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2004 Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen Telefon: 0551-54724-0 Telefax: 0551-54724-21 www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen. 1. Auflage, 2004 Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86537-090-X

# Ein Ansatz zur Optimierung des Luftströmungsverhaltens von Glas-Doppelfassaden unter Verwendung bionischer Prinzipien

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

### DISSERTATION

von **Dipl.-Ing. Stefan Menzel** aus Haan

> D17 Darmstadt 2004

#### **Dr.-Ing. Stefan Menzel**

Geboren 1972 in Haan. Von 1992 bis 1998 Studium des Bauingenieurwesens an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Von 1998 bis 1999 Tragwerksplaner in der Technischen Abteilung der Philipp Holzmann AG in Düsseldorf. Von 1999 bis 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Seit 2004 Senior Scientist bei der Honda Research Institute Europe GmbH in Offenbach/Main.

Referent: Korreferent: Tag der Einreichung: Tag der mündlichen Prüfung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Architekt Stefan Schäfer Univ.-Prof. (em.) Dr. rer. nat. Karl G. Roesner 21.01.2004 11.03.2004

### Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Konstruktives Gestalten und Baukonstruktion des Instituts für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Architekt Stefan Schäfer danke ich sehr herzlich für die Anregung zu dieser Arbeit, für die Betreuung und Förderung des Projektes sowie die in jeder Hinsicht gewährte Unterstützung während meiner gesamten Tätigkeit.

Herrn Univ.-Prof. (em.) Dr. rer. nat. Karl G. Roesner danke ich ganz besonders für die Übernahme des Korreferates, für seine immense Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen und die zahlreichen erfrischenden fachlichen Diskussionen, die weit über das Themengebiet der Strömungsmechanik hinausgingen.

Herrn Prof. Kunio Kuwahara vom Institute of Space and Astronautical Science in Kanagawa, Japan und Frau Prof. Satoko Komurasaki von der Nihon University in Tokio danke ich sehr für die Nutzungsmöglichkeit der CFD-Software NAGARE und ihre große Unterstützung bei den numerischen Berechnungen während des gesamten Projektes. Herrn Prof. Tomomasa Uemura von der Kansai University in Osaka gilt mein Dank für die Nutzungsmöglichkeit der PIV-Software, die bei der Auswertung des Bildmaterials der optischen Strömungsmessungen wertvolle Arbeit leistete. Frau Dr. Anke Bockreis vom Fachgebiet Abfalltechnik der TU Darmstadt danke ich sehr für die freundliche Unterstützung im Rahmen der experimentellen Untersuchungen mit der Thermokamera. Für die finanzielle Unterstützung der Experimente sei an dieser Stelle der Vereinigung von Freunden der Technischen Universität zu Darmstadt e.V. gedankt.

Mein herzlicher Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen am Institut für Massivbau. Für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit möchte ich stellvertretend dabei zum einen Heike Krückel-Diehl und Björn Briegert aus meiner Arbeitsgruppe danken, sowie zum anderen insbesondere Carina Neff, Andreas Bachmann, Heiko Denk und Holger Schmidt für ihre Freundschaft in den vergangenen Jahren. Bedanken möchte ich mich weiterhin bei allen Studierenden, die im Rahmen von Diplom- und Vertieferarbeiten wertvolle Beiträge zu der vorliegenden Arbeit geleistet haben. Hervorzuheben sind hier insbesondere die Leistungen von Tobias Dönigus, Christoph Pflug und Dirk Reinisch.

Meinen Eltern Gerda und Manfred Menzel bin ich ganz besonders dankbar für ihre große und liebevolle Unterstützung während meiner gesamten Studien.

Darmstadt, im März 2004 Stefan Menzel

## Inhaltsverzeichnis

| 1     | Einleitung   | 1       |
|-------|--|---------|
| 1.1   | Definition einer Glas-Doppelfassade                            | 2       |
| 1.2   | Zielsetzung und Aufbau der Arbeit                              | 4       |
| 2     | Stand der Forschung  | 7       |
| 2.1   | Kategorisierung von Glas-Doppelfassaden                        | 7       |
| 2.2   | Auftriebsinduzierte Luftströmungen in Glas-Doppelfassaden      | 9       |
| 2.2.1 | Kastenfenster-Fassade  | 9       |
| 2.2.2 | Auftriebsinduzierte Strömungen                                 | 10      |
| 3     | Grundlagen der Strömungsmechanik und numerische Umsetzung b    | oei der |
|       | <b>Computational Fluid Dynamics (CFD)</b>                      | 15      |
| 3.1   | Allgemeine Bewegungsgleichungen eines Fluids                   | 15      |
| 3.1.1 | Kontinuitätsgleichung  | 16      |
| 3.1.2 | Impulsgleichung  | 16      |
| 3.1.3 | Energiegleichung   | 17      |
| 3.2   | Ähnlichkeitstheorie und dimensionslose Kennzahlen              | 17      |
| 3.2.1 | Reynolds-Zahl  | 18      |
| 3.2.2 | Grashof-Zahl   | 19      |
| 3.2.3 | Prandtl-Zahl   | 19      |
| 3.2.4 | Eckert-Zahl  | 20      |
| 3.2.5 | Nusselt-Zahl   | 20      |
| 3.3   | Computational Fluid Dynamics (CFD) – Die numerische Berechnung |         |
|       | von Strömungen   | 20      |
| 3.3.1 | Allgemeine Grundlagen und Modellannahmen für eine Simulation   |         |
|       | von Strömungsfeldern   | 22      |
| 3.3.2 | Merkmale und Modellansätze der in dieser Arbeit verwendeten    |         |
|       | CFD-Programme NAGARE und FLUENT                                | 28      |

| 4     | Visualisierung und Quantifizierung von Strömungsvektorfeldern anhand   | l   |
|-------|--|-----|
|       | optischer Messverfahren  | 36  |
| 4.1   | Allgemeine Ansätze und Methodik der Planar Laser Velocimetry (PLV)     |     |
| 4.2   | Bestandteile und Ablauf einer optischen Strömungsmessung               |     |
| 4.2.1 | Licht und Beleuchtung  | 39  |
| 4.2.2 | Bildaufzeichnung   | 39  |
| 4.2.3 | Tracer Partikel  | 40  |
| 4.2.4 | Auswertung   | 41  |
| 5     | Experimentelle Untersuchung einer auftriebsinduzierten Strömung        |     |
|       | mittels der Particle Tracking Velocimetry (PTV)                        | 44  |
| 5.1   | Beschreibung des Versuchsaufbaus                                       | 44  |
| 5.1.1 | Der zentrale Baustein – das Versuchsmodell                             | 45  |
| 5.1.2 | Laser und Optik  | 50  |
| 5.1.3 | Glass-Bubbles als Tracer Partikel                                      | 51  |
| 5.1.4 | Foto- und Videoaufnahmen als Grundlage für die PTV Auswertung          | 53  |
| 5.1.5 | Computergestützte Berechnung der Geschwindigkeitsfelder anhand         |     |
|       | von PLV-Programmen   | 54  |
| 5.1.6 | Temperaturerzeugung und Temperaturmessung                              | 56  |
| 5.2   | Ablauf der optischen Strömungsmessungen                                | .60 |
| 5.2.1 | Phase I: Zusammenbau der Elemente                                      | .60 |
| 5.2.2 | Phase II: Aufheizen des Modells und Vorbereiten der Messungen          | 63  |
| 5.2.3 | Phase III: Aufzeichnen des Bildmaterials                               | 64  |
| 5.2.4 | Phase IV: Auswertung der Versuchsergebnisse                            | .65 |
| 5.3   | Beschreibung des vorliegenden Strömungsverhaltens und Zusammenstellung |     |
|       | der Versuchsergebnisse   | 71  |
| 5.3.1 | Fassadenabstand $d_f = 5$ cm   | 72  |
| 5.3.2 | Fassadenabstand $d_f = 10$ cm, 15 cm bzw. 20 cm                        | 80  |
| 5.3.3 | Vergleich der Versuchsergebnisse                                       | 85  |
| 5.3.4 | Der Temperaturgradient als antreibender Motor der Auftriebsströmung    | 88  |
| 6     | Validierung der CFD-Programme NAGARE und FLUENT anhand                 |     |
|       | experimenteller Untersuchungen von Konvektionsströmungen               | 95  |
| 6.1   | Numerische Strömungsberechnung der Versuchsreihe                       | 95  |
| 6.1.1 | Grundlegende Ansätze in FLUENT   | 95  |
| 6.1.2 | Grundlegende Ansätze in NAGARE   | 97  |

| 6.1.3 | Vergleich der Versuchsergebnisse mit NAGARE und FLUENT                | 98  |
|-------|---|-----|
| 6.2   | Versuche Woods/Gladstone  | 107 |
| 6.2.1 | Versuchsaufbau und Grundlagen   | 107 |
| 6.2.2 | Vergleich der Versuchsergebnisse mit FLUENT                           | 111 |
| 6.2.3 | Übertragbarkeit auf die Versuchsreihe aus Kapitel 5                   | 113 |
| 6.3   | Versuche Ziller   | 114 |
| 6.3.1 | Versuchsaufbau  | 114 |
| 6.3.2 | Vergleich der Versuchsergebnisse mit FLUENT                           | 115 |
| 6.3.3 | Ergänzende Untersuchungen zur Fassadenspaltbreite                     | 117 |
| 6.4   | Zusammenfassung und Fazit   | 119 |
|       |   |     |
| 7     | Evolutionäre Algorithmen – Die Optimierung strömungsmechanischer      |     |
|       | Systeme mit dem Softwarepaket GeDeNA                                  | 121 |
| 7.1   | Bionik – Die Ausnutzung biologischer Prinzipien in der Technik        | 122 |
| 7.1.1 | Begriffsdefinitionen  | 124 |
| 7.1.2 | Schematischer Ablauf einer evolutionären Optimierung                  | 127 |
| 7.2   | Voraussetzungen für die Softwareentwicklung                           | 128 |
| 7.3   | Programmtechnische Umsetzung der Evolutionären Algorithmen im         |     |
|       | Softwarepaket GeDeNA  | 129 |
| 7.3.1 | Bestandteile und Funktionalität des Softwarepakets GeDeNA             | 129 |
| 7.3.2 | Überblick über den Ablauf einer evolutionären Optimierung mit GeDeNA. | 130 |
| 7.4   | Evolutionäre Algorithmen – Evolutionsstrategie                        | 136 |
| 7.4.1 | Allgemeine Beschreibung der optimierbaren Systeme                     | 137 |
| 7.4.2 | Der Luftwechsel als Qualitätsmerkmal eines Individuums                | 138 |
| 7.4.3 | Die Auswahl der Eltern als Ausgangspunkt einer neuen Generation       | 141 |
| 7.4.4 | Lernen aus der Vergangenheit  | 142 |
| 7.4.5 | Eine neue Generation entsteht   | 145 |
| 7.5   | Beispiele für eine Optimierung des Luftströmungsverhaltens unter      |     |
|       | Anwendung Evolutionärer Algorithmen                                   | 149 |
| 7.5.1 | Beispiel 1: Vorteile der automatischen Strukturoptimierung            |     |
|       | und -glättung   | 149 |
| 7.5.2 | Beispiel 2a: Verbesserung des Luftwechsels durch eine Optimierung     |     |
|       | im Auslassbereich des Fassadenmodells d10                             | 151 |
|       |   |     |

| 7.5.3  | Beispiel 2b: Verbesserung des Luftwechsels durch eine Optimierung |     |
|--|---|-----|
|  | im Auslassbereich des Fassadenmodells d20                         | 155 |
| 7.5.4  | Beispiel 3: Verbesserung des Luftwechsels durch eine Optimierung  |     |
|  | des gesamten Zwischenraums des Fassadenmodells d10                | 157 |
| 8  | Zusammenfassung und Ausblick                                      | 160 |
| 8.1  | Zusammenfassung   | 160 |
| 8.2  | Ausblick  | 161 |
| Anha   | ng A: Kubische Splineinterpolation                                | 165 |
| Anhang B: Geschwindigkeitsprofile in der Übersicht |   | 167 |
| Anha   | Anhang C: Versuche Woods/Gladstone: Berechnung von $\lambda_G$    |     |
| Litera   | aturverzeichnis   | 181 |

## Bezeichnungen und Abkürzungen

Die hier aufgeführten Bezeichnungen und Abkürzungen werden in dieser Arbeit weitestgehend verwendet. Falls in einem bestimmten Kontext eine Variable, ein Zeichen oder Symbol eine andere Bedeutung besitzt, so ist dies an entsprechender Stelle im Text vermerkt.

Abkürzungen:

| CFD    | Computational Fluid Dynamics    |
|--------|---------------------------------|
| DNS    | Direkte Numerische Simulation   |
| EA     | Evolutionäre Algorithmen        |
| ES     | Evolutionsstrategie             |
| GA     | Genetische Algorithmen          |
| GeDeNA | Genetic Designing with NAGARE   |
| LES    | Large Eddy Simulation           |
| PIAP   | Particle Image Analysis Project |
| PIV    | Particle Image Velocimetry      |
| PTV    | Particle Tracking Velocimetry   |
| TF     | Temperaturfühler                |

Kleine lateinische Buchstaben:

| Zeichen              | Beschreibung  | Einheit  |
|----------------------|---|----------|
| a                    | Beschleunigung  | $m/s^2$  |
| $a_x \; a_y$         | Koeffizient in der Netzgleichung                      | m        |
| $c_{k,i}, c_{k,i+1}$ | k. Individuum der i. bzw. (i+1). Generation, $k = 1n$ | -        |
| c <sub>p</sub>       | spezifische Wärmekapazität                            | J/(kg·K) |
| cq                   | Wärmeübertragungskoeffizient nach [7]                 | 1        |
| d                    | Durchmesser   | m        |
| $d_{\rm F}$          | Breite des Fassadenspalts                             | m        |

| Zeichen                             | Beschreibung   | Einheit                   |
|-------------------------------------|--|---------------------------|
| d <sub>p</sub>                      | Durchmesser des Partikels                                    | m                         |
| $f, f_k$                            | Gütewert bzw. Fitness eines Individuums                      | m/s oder 1/s              |
| $f_{min}, f_{max}$                  | minimale (maximale) Fitness einer Generation                 | m/s oder 1/s              |
| g                                   | Erdbeschleunigung  | $m/s^2$                   |
| h                                   | Schichtdicke der eintretenden kühleren Luft nach [18]        | m                         |
| $h_{\rm F}$                         | Höhe der Ein- bzw. Auslassöffnung                            | m                         |
| $h_{Zu,Ab}$                         | Höhe der Zu- und Abluftöffnungen                             | m                         |
| i, j                                | Nummer der Stützstelle                                       | 1                         |
| i <sub>max</sub> , j <sub>max</sub> | maximale Anzahl an Stützstellen                              | 1                         |
| $k_{\rm v}$                         | systemabhängiger Parameter                                   | $m/(s \cdot K^{0,5})$     |
| $k_{Qv} \\$                         | systemabhängiger Parameter                                   | $m^{3}/(s \cdot K^{0,5})$ |
| 1                                   | Achsmaß einer Fassade  | m                         |
| m                                   | im physikalischen Sinn: Masse                                | kg                        |
|                                     | in der Evolutionsstrategie: maximale Anzahl an Eltern        | 1                         |
| n                                   | im physikalischen Sinn: Luftwechsel                          | 1/h                       |
|                                     | in der Evolutionsstrategie: maximale Anzahl an<br>Nachkommen | 1                         |
| р                                   | Druck  | kN/m <sup>2</sup>         |
| $p_{j,i},p_{j,i+1}$                 | j. Individuum der i. bzw. (i+1). Generation, $j = 1m$        | -                         |
| $r_x, r_y$                          | sinnvoll zu wählender Parameter in der Netzgleichung         | 1                         |
| t                                   | Zeit   | S                         |
| u, v, w                             | Geschwindigkeiten im Raum                                    | m/s                       |
| Vgew                                | gewichtete Absetzgeschwindigkeit                             | m/s                       |
| $\overline{\mathrm{v}}$             | gemittelte bzw. Durchschnittsgeschwindigkeit                 | m/s                       |
| x                                   | Systemparameter  | -                         |
| x, y, z                             | Koordinaten im Raum  | m                         |
| $x_w, y_w$                          | Gesamtbreite des Netzes                                      | m                         |

| Zeichen              | Beschreibung  | Einheit                      |
|----------------------|---|------------------------------|
| А                    | Fläche  | m <sup>2</sup>               |
| $A_{a,eff}$          | aerodynamisch effektive Fläche Außenfassade nach [45] | m <sup>2</sup>               |
| Ai,eff               | aerodynamisch effektive Fläche Innenfassade nach [45] | m <sup>2</sup>               |
| $A_R$                | Heizfläche der Bodenplatte                            | m <sup>2</sup>               |
| F                    | Kraft   | Ν                            |
| Н                    | vertikaler Abstand zwischen Ein- und Auslassöffnung   | m                            |
|                      |   | 1 /1                         |
| LD                   | Luftdurchsatz   | 1/h                          |
| LU                   | Lüftungswert nach [45]                                | $m^3/(h\cdot m)$             |
| Μ                    | Maßstabsverhältnis                                    | 1                            |
| $Q_{\rm H1}$         | Energieeintrag  | W                            |
| $Q_{\rm H2}$         | Energieverlust  | W                            |
| $Q_{M}$              | Massenstrom   | kg/s                         |
| $Q_{\rm V}$          | Volumenstrom  | $m^{3}/s, m^{3}/(s \cdot m)$ |
| S                    | Schnittfläche   | m <sup>2</sup>               |
| Т                    | Temperatur  | K, °C                        |
| T <sub>Ext</sub>     | Umgebungstemperatur                                   | K, °C                        |
| T <sub>Heizung</sub> | Temperatur der Bodenheizung                           | K, °C                        |
| T <sub>Int</sub>     | Durchschnittstemperatur im Raum bzw. in der Fassade   | K, °C                        |
| V                    | Volumen   | m <sup>3</sup>               |
| $V_{\mathrm{f}}$     | Volumen des Fassadenzwischenraums                     | m <sup>3</sup>               |
| V <sub>Raum</sub>    | Raumvolumen   | m <sup>3</sup>               |

Große lateinische Buchstaben:

| Zeichen                | Beschreibung  | Einheit           |
|------------------------|---|-------------------|
| α                      | Wärmeübergangszahl  | $W/(m^2 \cdot K)$ |
| β                      | Volumenausdehnungskoeffizient   | 1/K               |
| $\Delta s$             | Wegdifferenz  | m                 |
| Δt                     | Zeitdifferenz   | S                 |
| $\Delta T$             | Temperaturdifferenz   | K, ℃              |
| κ                      | Temperaturleitfähigkeit   | m <sup>2</sup> /s |
| λ                      | Wärmeleitfähigkeit  | W/(m·K)           |
| $\lambda_G$            | Parameter für die Wärmeübertragung nach [14]                              | 1                 |
| $\lambda_x, \lambda_y$ | sinnvoll zu wählender Parameter in der Netzgleichung                      | [m]               |
| μ                      | dynamische Viskosität   | kg/(m·s)          |
| ν                      | kinematische Viskosität, $v = \mu/\rho$                                   | m <sup>2</sup> /s |
| ρ                      | Dichte  | kg/m <sup>3</sup> |
| $\rho_{k,i}$           | relativer Erfolgswert des k. Nachkommens der i. Generation                | 1                 |
| $ ho_i$                | gesamter relativer Erfolgswert sämtlicher Nachkommen<br>der i. Generation | 1                 |
| $ ho_p$                | Dichte des Partikels  | kg/m <sup>3</sup> |
| $\sigma_{j,i}$         | Mutationsschrittweite des j. Elter der i. Generation                      | -                 |
| $\sigma_{k,i}$         | Mutationsschrittweite des k. Nachkommen der i. Generation                 | -                 |

## Kapitel 1

## Einleitung

Die Gebäudehülle besitzt aufgrund ihres gestalterischen Elements einen außerordentlich prägenden Charakter für das Erscheinungsbild und den Gesamteindruck eines Bauwerks. Die Fassade als äußere Schutzhaut transportiert dabei allerdings nicht nur architektonisch begründete Leitmotive, sondern hat auch zahlreiche weitere Funktionen, insbesondere im Hinblick auf ein bauphysikalisches Anforderungsprofil, zu erfüllen. Seit Ende des 20. Jahrhunderts findet bei zahlreichen Entwürfen und Konzeptionen von modernen Bürogebäuden und innerstädtischen Hochhäusern der Typ der Glas-Doppelfassade eine weitverbreitete Anwendung. So konnten in der Vergangenheit einige Gebäude, die diesen Fassadentyp in ihrer Planung berücksichtigten, realisiert werden, und auch in dem weiten Spektrum der Gebäudesanierung fand diese Fassadenart als eine sinnvolle ergänzende Maßnahme ihre Verwendung.



Abbildung 1.1: Beispiele realisierter Projekte links: Victoria Ensemble, Köln [27] rechts: RWE AG, Essen [5]

### 1.1 Definition einer Glas-Doppelfassade

Im allgemeinen Fall besteht eine doppelschalige Fassadenkonstruktion aus zwei Ebenen, die den Übergang und die Schnittflächen des zu schützenden Innenraums eines Gebäudes zur natürlichen Umwelt mit all ihren dynamischen Einflüssen bilden. Die Innenräume werden dabei von einer verglasten, transparenten oder teilweise opaken Primärfassade zu einem vorgelagerten, luftdurchströmten Zwischenraum abgegrenzt, dessen Abschluss zur Umgebung eine meist vollflächig verglaste Sekundärfassade übernimmt. Dieser äußeren "Haut" werden dabei zum einen der überwiegende Teil der bauphysikalischen Schutzfunktionen gegenüber wetterbedingten Einflüssen zugewiesen, zum anderen ist sie aber auch aus tragwerksplanerischer Sicht für die sichere Aufnahme und Weiterleitung der Lasten aus Eigengewicht und teilweise aus Winddruck, dem insbesondere bei Hochhäusern eine wichtige Bedeutung zukommt, verantwortlich [25], [46].



Abbildung 1.2: links: Einschalige Fassade – Doppelfassade [45] rechts: Schematischer Vertikalschnitt durch eine Doppelfassade [46]

Die Primärfassade wird konsequenterweise von diesen Aufgabenbereichen entlastet und kann aus diesen Gründen zumeist einfacher konstruiert sein. Der Abstand zwischen den Fassadenebenen variiert von Bauwerk zu Bauwerk und kann von wenigen Zentimetern bis über einen Meter betragen, wenn dieser z.B. als Aufenthaltsfläche bzw. begehbar ausgeführt werden soll. In diesem Zwischenraum oder Fassadenspalt befindet sich häufig der erforderliche Sonnenschutz, der dadurch sehr gut vor Windeinflüssen geschützt werden kann und aufgrund dieser Lage keine zusätzlichen Wärmeeinträge in den Innen-

raum mit sich bringt. Die Verbindung zu der Außenluft wird über Luftein- und -auslassöffnungen gewährleistet, deren Lage und Gestaltung von der gewählten Systemvariante, die je nach Art der Segmentierung der Fassade unterschieden werden können, abhängig ist [25], [46].

Die wesentlichen Zielsetzungen, die mit dem Einsatz der Glas-Doppelfassade bei der Realisierung eines Gebäudes verfolgt werden, sind äußerst vielfältig und entstanden aus den unterschiedlichsten Motivationen. Aus architektonischer Betrachtungsweise bieten die großflächigen Glaselemente zahlreiche neue Gestaltungsformen und verleihen den Gebäuden bei einer sinnvollen Verwendung dieses Fassadentyps einen modernen, lebendigen, kommunikativen und einladenden Charakter. Bei den Verwaltungs- und Bürogebäuden im städtischen Raum, die gleichermaßen als Aushängeschilder der ansässigen Unternehmen oder Behörden fungieren, kann und soll der Betrachter dieses positive Image im Sinne einer "corporate identity" auf die jeweiligen Nutzer übertragen. Aus technischer Sicht können an dieser Stelle die oft zitierten Vorteile einer Energieersparnis im Winter durch die Nutzung des im Fassadenzwischenraum entstehenden Wintergarteneffekts, die Möglichkeit einer natürlichen Belüftung der Büroräume in hohen Gebäuden und die Verbesserung des Schallschutzes angeführt werden. Weiterhin reduziert die Sekundärfassade die im Gebäude auftretenden Staudrücke und kann bei Einbau von Horizontal- und Vertikalschotten die Brandausbreitung vorteilhaft begrenzen. Einhergehend mit den genannten Vorteilen ergibt sich für den Nutzer eine Reduzierung des sogenannten "sick-building-syndrom", das bei einer Verwendung von HLK (Heizung, Lüftung, Klima)-Anlagen auftreten kann, und für den Betreiber eine Verringerung der Betriebskosten aufgrund der genannten Energieeinsparungen. Im Gegensatz dazu sind an eine derartige Konstruktion auch zahlreiche Nachteile gekoppelt, die bei einer sorgfältigen Planung minimiert werden sollten und die den noch bestehenden immensen Forschungsbedarf andeuten. Aus energetischen Gesichtspunkten kann bei mangelhafter Durchlüftung des Fassadenzwischenraums im Sommer durch die hohen Übertemperaturen im Spalt ein großer Kühlbedarf für die dahinterliegenden Räume entstehen, ein Effekt der zusätzlich durch die hohen internen Lasten, die aufgrund der technischen Ausstattung in den Büroräumen vorhanden sind, verstärkt wird. Dies wiederum erfordert in vielen Fällen den Einsatz einer HLK-Anlage und kann die oben angeführten Energieund Kostenvorteile aufbrauchen und eine natürliche Belüftung verhindern. Zusätzliche Kosten zu einer herkömmlichen Fassadenausführung entstehen durch den Aufbau der zweiten verglasten Ebene, die höhere Unterhaltskosten nach sich zieht. Die angesprochene Reduktion des Schalleintrags von außen, die die Verwendung dieser Fassadenart gerade in Gebieten mit hohem Verkehrsaufkommen interessant macht, kann allerdings die Wahrnehmbarkeit der internen Geräusche erhöhen und zusätzliche bauliche Maßnahmen, z.B. den Einsatz höherwertiger und somit kostenintensiverer Materialien nach sich ziehen [13].

Anhand dieses Auszugs von Beweggründen für eine Anwendung dieses Fassadentyps einhergehend mit den dazugehörigen konträren Auswirkungen kann schon die Vielzahl der unterschiedlichen Themenspektren erahnt werden, die für eine optimale Konstruktion beachtet werden sollten. So sind Fragestellungen z.B. aus den Bereichen des Schall- und Wärmeschutzes ebenso zu untersuchen wie aus den Gebieten der Wärmeübertragung und der Strömungsmechanik. Zusätzlich zu diesen objektivierbaren Einflüssen spielt das Verhalten der Nutzer eines Gebäudes eine weitere wichtige Rolle. Aufgrund der Komplexität des Zusammenwirkens der verschiedenen Teildisziplinen wären für den planenden Ingenieur abgeleitete überschaubare Diagramme wünschenswert, bedürfen aber einer breitgefächerten Untersuchung der maßgebenden Einflussgrößen und ihrer Effekte, die zueinander in Korrelation gebracht werden müssen. Die Erforschung der Zusammenhänge wurde in jüngerer Vergangenheit mit unterschiedlichen Methoden angegangen und führte zu einigen veröffentlichten Ergebnissen über z.B. den konvektiven Wärmetransport in Doppelfassaden [46] und ein Auslegungsverfahren für die Abschätzung der Lüftungswerte in Glas-Doppelfassadensystemen aufgrund von thermisch induzierten Luftströmungen [45]. Ergänzt werden diese experimentellen und numerischen Untersuchungen mit Studien an bereits realisierten Gebäuden, dem sogenannten Gebäudemonitoring, z.B. [24], [28], die einen Einblick in die tatsächlich praktisch auftretenden Messdaten liefern. Die Komplexität der einzelnen Einflussparameter und ihre Interaktion erschwert die Erstellung von allgemeingültigen Leitlinien ungemein. Letztendlich muss man sich vor Augen führen, dass jedes Gebäude ein Unikat unterschiedlichster Form mit einem individuell gestaltetem Fassadensystem ist, das lokalen und äußerst variablen Umwelteinflüssen ausgesetzt ist und auf diese Effekte individuell angepasst und optimiert werden muss.

### 1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, aufgrund der angesprochenen einzigartigen und von Gebäude zu Gebäude unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Einflüsse einen Ansatz für ein allgemeingültiges Konzept zu entwickeln, das aufgrund seiner Optimierungsstrategie für definierte individuelle Ausgangssituationen einen jeweils einzigartigen Lösungsvorschlag für die Gestaltung einer Doppelfassade unterbreiten kann. Die Vorteile, die sich dadurch ergeben sollen, sind in einem besseren Lüftungswert der Fassadenkonstruktion, geringeren Übertemperaturen im Fassadenspalt und einer auf die Strömung individuell zugeschnittenen Geometrie zu sehen. Konsequenzen könnten sich z.B. dahingehend ergeben, dass die Ein- und Auslässe optimal auf die Strömung angepasst werden oder sich die Fassadenzwischenraumbreite verringert und dadurch mehr Nettogeschossfläche für eine Nutzung zur Verfügung steht. Das zu entwickelnde Konzept soll äußerst flexibel sein, so dass es auf eine Vielzahl von Bedingungen reagieren und adaptiert werden kann, ohne die Allgemeingültigkeit in Frage zu stellen. Einen maßgeschneiderten hochwertigen Lösungsansatz für ein derartiges Anforderungsprofil können in diesem konkreten Fall die Evolutionären Algorithmen in Kombination mit der numerischen Strömungsmechanik liefern. Der in dieser Arbeit vorgeschlagene Ansatz setzt sich aus zwei wesentlichen Teilaspekten zusammen. Der erste Teilaspekt wird dabei durch den Einsatz der Evolutionären Algorithmen bestimmt, die die Grundlage für die Optimierungsmethode an sich bilden und die "Overall"-Strategie verfolgen, Systeme effizient in eine neue und günstigere Form zu verändern, so dass diese eine höhere Leistungsfähigkeit besitzen. Die Evolutionären Algorithmen entstammen dem Wissenschaftszweig der Bionik und beruhen auf den biologischen Ansätzen aus der Vererbungslehre, die auf moderne technische Systeme übertragen werden und dort ihr Leistungspotential ausspielen können. Ihre Aufgabe ist es, den Optimierungsprozess gezielt voranzutreiben, um ein effizientes geometrisches System zu erstellen, das die zugrundeliegenden strömungsmechanischen Randbedingungen effektiv erfüllen kann. Der zweite wichtige Teilaspekt beinhaltet die Methode, anhand derer die Leistungsfähigkeit der einzelnen Systeme überprüft und verifiziert wird. Im Rahmen dieses Projekts soll dieser Auswertungsprozess über die numerische Strömungssimulation mittels sogenannter Computational Fluid Dynamics (CFD)-Programme realisiert werden. Es stellt sich nun vorab zum einen die Frage, ob auftriebsinduzierte Luftströmungen, die einen kritischen Lastfall für die Auslegung eines Glas-Doppelfassadensystems bilden, von CFD-Programmen qualitativ hochwertig abgebildet und quantitativ hinreichend genau berechnet werden können, und zum anderen, wenn dieses erfolgreich bestätigt werden kann, nach welchen Kriterien man die Leistungsfähigkeit der Systeme beurteilt bzw. wie man die Zielfunktion für den Optimierungsprozess definiert. Aus diesem Grund wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, um einerseits eine durch Temperaturgradienten erzeugte Luftströmung innerhalb des Fassadenspalts visualisieren, vermessen und analysieren zu können, und andererseits die experimentell bestimmten Messdaten für eine Validierung der CFD-Programme heranziehen und somit deren Einsatzmöglichkeiten verifizieren zu können. Des Weiteren ergaben sich aus diesen Modellversuchen Kennlinien für die untersuchten Geometrien. Diese lieferten in Zusammenhang mit einem in [45] veröffentlichten Ansatz das gesuchte Optimierungskriterium. Den Abschluss bildete die Entwicklung einer Softwareapplikation namens GeDeNA – Genetic Designing with NAGARE –, in der die Evolutionären Algorithmen implementiert sind und die die Verknüpfung mit einer CFD-Software herstellt, so dass in Kombination beider Programme eine effiziente individuelle Optimierung strömungsmechanischer Systeme möglich ist.

Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an den beschriebenen Zielen. Im folgenden Kapitel wird zunächst ein Überblick über den aktuellen Stand der Forschung gegeben, soweit dieser für die in dieser Arbeit behandelten Themenkomplexe relevant ist. Daran anschließend werden in Kapitel 3 die wichtigsten Grundlagen der Strömungsmechanik und ihre Umsetzung in der Computational Fluid Dynamics beschrieben. Es erfolgt eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Softwareprogramme und der in ihnen implementierten Berechnungsmodelle. In Kapitel 4 werden in allgemeiner Form die wesentlichen Bestandteile eines Experiments und die Vorgehensweise bei der Vermessung einer Luftströmung mittels optischer Strömungsmessverfahren erläutert, bevor in Kapitel 5 detailliert auf die im Rahmen dieses Projekts durchgeführte Versuchsreihe mit den wichtigsten Ergebnissen eingegangen wird. Diese Messergebnisse bildeten den Ausgangspunkt für eine umfangreiche Vergleichsanalyse, anhand derer die Modelle und Berechnungsansätze der CFD-Programme NAGARE und FLUENT verifiziert werden sollten. Diese Validierung wird ausführlich in Kapitel 6 thematisiert. Durch Hinzuziehen weiterer Versuchsergebnisse aus Veröffentlichungen, die sich ebenfalls dem Thema der auftriebsinduzierten Strömungen widmen, konnten weitere Simulationsrechnungen verglichen werden, um zu gewährleisten, dass beide Programme aussagekräftige Prognosen im Bereich der auftriebsinduzierten Luftströmungen erstellen können. Aufgrund dieses Nachweises konnte die Softwareentwicklung von GeDeNA vorgenommen werden. In GeDeNA wurden dabei zum einen die Evolutionären Algorithmen implementiert und zum anderen die Techniken des Verteilten Rechnens angewandt. Die Grundlagen dieser Konzepte, die Vor- und Nachteile dieser Vorgehensweise und deren programmtechnische Umsetzung wird detailliert in Kapitel 7 beschrieben. Anhand einiger Beispiele wird ergänzend das enorme Leistungspotential dieses Ansatzes verdeutlicht. In Kapitel 8 werden die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf gegeben.

## Kapitel 2

## **Stand der Forschung**

### 2.1 Kategorisierung von Glas-Doppelfassaden

In den vergangenen Jahren ist eine Vielzahl von Beiträgen und wissenschaftlichen Untersuchungen veröffentlicht worden, die sich dem weiten Themengebiet der Glas-Doppelfassaden widmen. Aufgrund der vielfältigen Ausführungsmöglichkeiten dieser Fassadenkonstruktion und der zu berücksichtigenden Einwirkungsarten ist es ein außerordentlich komplexes Anliegen, allgemeingültige Korrelationen zwischen sämtlichen geometrischen und physikalischen Einflüssen zu finden. Das Ziel, diese Vorgänge zu erfassen und zu verstehen und den planenden Ingenieur mit hochwertigen Hilfsmitteln für realitätsnahe Prognosen unterstützen zu können, zeigt den Bedarf auf, der die Grundlage zu einer weitverzweigten Forschungstätigkeit bot.



Abbildung 2.1: Schematisiertes Ordnungssystem für Glas-Doppelfassaden [13]

Aus geometrischer Sicht wird in Abbildung 2.1 ein erster Überblick über mögliche Realisierungsvarianten einer Glas-Doppelfassade und deren Kategorisierung anhand dreier Merkmale geboten. Diese sind die Anordnung der Fassade, die in Abbildung 2.2 als Prinzipskizze dargestellt ist, die Art der Lüftungsöffnungen und die Wahl der Segmentierungen.





Eine weitere Differenzierung der Konstruktionssysteme kann anhand von sechs funktionalen Leistungskriterien vorgenommen werden. Diese ergeben sich aus den verschiedenen Einwirkungen, die von einem Fassadensystem gelöst werden müssen. Dazu zählen der sommerliche und winterliche Wärmeschutz, Lüftung, Lichtführung, Schall- und Brandschutz [25]. Die Konstruktion der Fassade sollte im günstigsten Fall für alle Einwirkungen optimal ausgelegt sein, wobei die Maßnahmen der Erfüllung einzelner Leitfunktionen einander entgegenwirken können und somit Kompromisslösungen erforderlich machen. Aufgrund der angesprochenen System- und Einwirkungsvielfalt konzentriert sich die vorliegende Arbeit inhaltlich im Wesentlichen auf Untersuchungen zum Lüftungsverhalten von Kastenfenstersystemen und ihren angrenzenden Räumen. Abbildung 2.2 zeigt auf der rechten Seite die wichtigsten Einflussfaktoren, die bei diesen Systemen für den natürlichen Luftwechsel von Bedeutung sind. Dabei spielen nicht nur klimatisch bedingte Einflussfaktoren aus z.B. Wind- oder Temperatureinwirkungen, sondern auch die geometrische Beschaffenheit der Konstruktion eine große Rolle. Neben diesen noch objektivierbaren Faktoren gilt es zusätzlich, das menschliche Verhalten als subjektive Komponente zu berücksichtigen. Da in den folgenden Kapiteln eine natürliche Belüftung im Vordergrund steht, die auf Temperaturgradienten basiert, wird in Kapitel 2.2 auf die für dieses Thema relevante Literatur näher eingegangen. Zunächst soll dabei der Begriff der Kastenfenster-Fassade erläutert werden.

### 2.2 Auftriebsinduzierte Luftströmungen in Glas-Doppelfassaden

#### 2.2.1 Kastenfenster-Fassade

Die Kastenfenster-Fassade zeichnet sich insbesondere durch die Art der Segmentierung des Fassadenzwischenraums aus. Über horizontale und vertikale Schotte wird dieser Zwischenraum in einzelne Abschnitte unterteilt, wobei ein Abschnitt die Höhe eines Geschosses hat und in den Raumachsen durch die Lisenen begrenzt wird. Die Belüftung geschieht über zwei Zu- und Abluftöffnungen, die sich meist horizontal verlaufend am Boden und an der Decke des Fassadenkastens befinden.



Abbildung 2.3: links: Kastenfenster-Fassade: Funktionsschema [46] rechts: Aufbau einer doppelschaligen Fassade [27]

In der Praxis werden häufig zwei nebeneinanderliegende Abschnitte zusammengefasst, um mögliche Kurzschlussströmungen zu vermeiden. Bei dieser Konstruktionsform, deren Funktionsweise in Abbildung 2.3 dargestellt ist, wird je Abschnitt nur eine Zubzw. Abluftöffnung vorgesehen, die diagonal versetzt zueinander liegen. Durch diese Maßnahme kann ein direktes Eintreten der ausströmenden kontaminierten Luft eines Kastenfensters in das darüberliegende Element verhindert und somit eine nachhaltige Beeinträchtigung der Belüftung dieses Abschnitts vermieden werden. Ergänzend zeigt Abbildung 2.3 den typischen Verlauf der Strömung innerhalb des Zwischenraums und in der Fensterachse. Unter Annahme einer im Fassadenzwischenraum herrschenden Durchschnittstemperatur, die über der der Umgebung liegt, wird aufgrund von Dichteunterschieden unverbrauchte Luft durch die untenliegende Einlassöffnung eingesaugt. Unter Erwärmung strömt die Luft nun teils vertikal nach oben, teils vollzieht sie einen Austausch mit der sich im angrenzenden Raum befindenden Luft. Die beiden Luftströme vereinigen sich im oberen Teil des Fassadenspalts wieder und gelangen über die Auslassöffnung zurück in die Umgebung [45], [46].

#### 2.2.2 Auftriebsinduzierte Strömungen

Den maßgeblichen Antrieb für auftriebsinduzierte Luftströmungen bilden die Temperatur- bzw. die damit verbundenen Dichteunterschiede des Mediums Luft. Zwischen einem Raum und seiner Umgebung, bei dem die Innen- von der Außentemperatur abweicht, stellen sich Druckunterschiede ein, die einen Luftaustausch anregen. Wird dieser Druckgradient ausschließlich thermisch induziert, so spricht man auch von einer freien Konvektionsströmung. Konvektion kann nur in Fluiden auftreten und bezeichnet den "Energietransport durch Wärmeleitung, der ein makroskopischer Transport von an Masse gebundener Energie überlagert ist" [10]. Im Zusammenhang mit konvektiven Strömungen sind häufig auch die Wärmeübergänge, also der Energieaustausch zwischen einer festen Oberfläche und dem Fluid von Bedeutung. Für die natürliche Belüftung von Gebäuden ist den Konvektionsströmungen besonders bei Windstille oder nur sehr geringer Windeinwirkung eine hohe Aufmerksamkeit zu schenken, da sie sich in diesem Zeitraum alleine für die Aufrechterhaltung des erforderlichen Luftwechsels verantwortlich zeigen. So gilt es einerseits, eine ausreichende Frischluftzufuhr im Gebäude sicherzustellen, aber auch andererseits Zugerscheinungen für den Nutzer zu vermeiden. Im Sommer ist weiterhin zu berücksichtigen, dass sich im Fassadenzwischenraum hohe Übertemperaturen zur Außenluft aufgrund des schon eingangs erwähnten Wintergarteneffekts einstellen können. Auch diese sind zu vermeiden, da sie eine Aufheizung der dahinterliegenden Räume nach sich ziehen.



Abbildung 2.4: Definition der Bezeichnungen nach [45]

Ausführliche Studien zu diesem Thema wurden in [45] durchgeführt, die ein sehr gutes Verfahren zum Abschätzen der Lüftungswerte LU in Gebäuden mit einer Kastenfenster-Fassade zum Ergebnis haben. Der Lüftungswert LU beschreibt dabei den eintretenden Luftvolumenstrom pro laufendem Meter Fassadenlänge. Aus einer Vielzahl von experimentellen Studien, bei denen der Lüftungswert mit Hilfe von Spurengasmessungen bestimmt wurde, ergab sich das in Abbildung 2.5 dargestellte Diagramm. Im Prinzip kann anhand dieses Diagramms

- a) für gegebene geometrische Randbedingungen der theoretische Lüftungswert für eine Temperaturdifferenz  $\Delta T_R = 1$  K zwischen Raum- und Außenluft ermittelt werden,
- b) im Umkehrschluss für einen zu gewährleistenden Luftwechsel bei  $\Delta T_R = 1$  K die benötigten Öffnungsflächen der Außen- und Innenfassade berechnet werden.



Abbildung 2.5: Lüftungswerte abhängig von den Öffnungsflächen der Fassaden [45]

Für eine Vorgehensweise entsprechend a) wird zunächst das Achsmaß 1 der Fassade gewählt und die Öffnungsflächen  $A_{a,eff}$  und  $A_{i,eff}$  entsprechend Abbildung 2.4 ermittelt. In den beiden zuletzt genannten Größen sind gegebenenfalls zusätzliche Abminderungsfaktoren, die zum einen je nach Art und Gestaltung der Zu- und Abluftöffnungen und zum anderen je nach Fensterausführung festgelegt werden, zu berücksichtigen. Mit diesen beiden Eingangswerten kann der Lüftungswert LU abgelesen und der Luftdurchsatz LD des angrenzenden Raumes nach folgender Formel berechnet werden:

$$LD = \frac{LU \cdot l}{V_{Raum}}$$
(2.1)

mit: LD Luftdurchsatz [1/h]

LU Lüftungswert nach Abbildung 2.5  $[m^3/(h \cdot m)]$ 

1 Achsmaß der Fassade [m]

V<sub>Raum</sub> Volumen des angrenzenden Raumes [m<sup>3</sup>]

Für Fall b) wird im ersten Schritt der zu gewährleistende Luftdurchsatz festgelegt. Daraus kann wiederum der Lüftungswert ermittelt und eine Kombination aus  $A_{a,eff}/l$  und  $A_{i,eff}/l$  abgelesen werden. Anschließend lassen sich nach einer geeigneten Wahl der Gestaltung der Zu- und Abluftöffnungen und der Fensterart die erforderlichen minimalen Öffnungsflächen, die den benötigten Volumenstrom sicherstellen, berechnen. In [45] sind weitere Hinweise für eine geschickte Wahl der einzelnen Parameter gegeben, sowie einige Gleichungen und experimentell ermittelte Diagramme, die für die Bestimmung der Abminderungsfaktoren benötigt werden.

Um die einzelnen Lüftungswerte miteinander vergleichen und in einem einzigen Diagramm darstellen zu können, empfiehlt es sich, eine Kalibrierung der Luftgeschwindigkeiten auf eine Temperaturdifferenz  $\Delta T_R = 1$  K zwischen Raum- und Außenluft durchzuführen. Bei stationären auftriebsinduzierten Strömungen kann dies mittels der grundlegenden Gleichung 2.2 erfolgen, die den Zusammenhang zwischen einer Geschwindigkeit im System und der anliegenden Temperaturdifferenz herstellt. Eine Umrechnung auf andere Temperaturlastfälle kann anschließend über dieselbe Gleichung geschehen:

$$v = k_v \cdot \sqrt{\Delta T} \iff k_v = \frac{v}{\sqrt{\Delta T}}$$
(2.2)

mit: v Geschwindigkeit [m/s]

 $k_v$  systemabhängiger Parameter [m/(s·K<sup>0,5</sup>)]

 $\Delta T$  Temperaturdifferenz [K]

Die Gleichung 2.2 bietet den enormen Vorteil, aus einer bekannten Geschwindigkeit v mit zugehöriger Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zunächst auf einen systemabhängigen Parameter k<sub>v</sub> schließen zu können, der – anschaulich ausgedrückt – die Geschwindigkeit für ein  $\Delta T = 1$  K beschreibt. Basierend auf diesem Parameter kann nun auf weitere Geschwindigkeiten, die sich bei anderen anliegenden Temperaturdifferenzen einstellen, geschlossen werden. Dies lässt eine sehr gute Kalibrierung der Messdaten und allgemeingültigere Darstellung von Diagrammen und Kennlinien zu. Da der Volumenstrom  $Q_V$  über eine Integration der Geschwindigkeiten in einem betrachteten Schnitt hervorgeht, können die Volumenströme  $Q_V$ , bzw. im Falle eines inkompressiblen Fluids auch die Massenströme  $Q_M$ , sowie der Luftdurchsatz LD über die Temperaturdifferenzen im System  $\Delta T$  umgerechnet werden. Wichtig ist, dass bei jedem Diagramm eine eindeutige Definition der beiden Temperaturen angegeben ist, auf die sich die erzielten Schlussfolgerungen beziehen.

$$Q_{v} = \iint_{s} v(x, y) dx dy = \iint_{s} k_{v}(x, y) \cdot \sqrt{\Delta T} dx dy = k_{Qv} \cdot \sqrt{\Delta T}$$
(2.3)

mit:

 $Q_{\rm V}$ 

Volumenstrom [m<sup>3</sup>/s]

S Schnittfläche [m<sup>2</sup>]

 $k_{Qv}$  systemabhängiger Parameter  $[m^3/(s \cdot K^{0,5})]$ 

 $\Delta T$  Temperaturdifferenz [K]

Die Anwendbarkeit des oben beschriebenen Auslegungsverfahrens wurde in [45] anhand von Messdaten, die an einem realisierten Gebäude gewonnen wurden, überprüft und die gute Aussagekraft der Prognosen bestätigt. Weitere praxisnahe Untersuchungen über auftretende Luftvolumenströme und Luftwechsel in bereits realisierten Gebäuden, bei denen ebenso wie in der Versuchsreihe aus [45] die Konzentrations-Abkling-Methode mit Spurengasen zum Einsatz kam, werden in [24], [25] und [28] beschrieben. Mittels statistischer Auswertung dieser Messungen konnten Aussagen über die auftretenden Luftwechsel in Abhängigkeit von Temperaturen und Windgeschwindigkeiten zu den einzelnen Gebäuden getroffen werden. Diese sind aufgrund der äußerst komplexen Einwirkungen sowie der unterschiedlichen Gebäudegeometrien, -lagen und verwendeten Fassadenvarianten auf die untersuchten Projekte zugeschnitten.

Experimentelle und theoretische Untersuchungen des Wärmetransports in Doppelfassaden werden in [46] thematisiert. In dieser Arbeit wird die Entwicklung eines Simulationsprogramms beschrieben, mit dem es möglich ist, Strömungs- und Wärmetransportvorgänge in transparenten vertikalen Spalten zu beschreiben. Die Simulationsergebnisse konnten anhand von experimentellen Daten verifiziert werden, die in einer Versuchsreihe an einem Outdoor-Versuchsstand mit wirklichkeitsnahen Abmessungen ermittelt wurden. Als ein wesentliches Ergebnis zeigte sich, dass die Durchströmung des Fassadenspalts stark von den zugrundeliegenden räumlichen Abmessungen abhängt und somit insbesondere die Geometrie im Vorfeld der Planung eines Fassadensystems optimiert werden sollte.

Exemplarisch für die Vielzahl von Untersuchungen zur Beschreibung und Erfassung der Fensterlüftung einer einschaligen Fassade sollen an dieser Stelle die in [14], [17] und [18] veröffentlichten Ergebnisse erwähnt werden. Da diese Studien auf eine Analyse der natürlichen Belüftung von Räumen abzielen, die über eine interne, flächig verteilte bzw. punktförmig wirkende Wärmequelle verfügen sowie über Öffnungen mit ihrer Umwelt in Kontakt stehen, weisen sie eine Verwandtschaft zu den in Kapitel 5 thematisierten Experimenten auf. Anhand umfangreicher experimenteller und theoretischer Studien werden in diesen Arbeiten Gleichungen für die Berechnung des in den Raum ein- und austretenden Volumenstroms  $Q_V$  angegeben. Die Versuche wurden an maßstäblich verkleinerten Modellen mit dem Medium Wasser durchgeführt, wobei die Konvektionsströmung über Wärmeenergiezufuhr oder Fluide unterschiedlicher Dichte angeregt wurde. Die ermittelten Gleichungen für einen flächig beheizten Raum mit zwei Öffnungen, die sich in Boden- und Deckennähe befinden, spielen bei der Validierung der Simulationsprogramme, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet wurden, eine wichtige Rolle und werden aus diesem Grund in Kapitel 6.2 detailliert erläutert.

## Kapitel 3

# Grundlagen der Strömungsmechanik und numerische Umsetzung bei der Computational Fluid Dynamics (CFD)

Dieses Kapitel widmet sich zunächst der allgemeinen Darstellung der strömungsmechanischen Grundgleichungen, den Bewegungsgleichungen eines Fluids. In diesem Zusammenhang wird auch ein Einblick in die Ähnlichkeitstheorie geboten, da diese bei der Planung und Durchführung von Experimenten eine große Rolle spielt. Im weiteren Verlauf werden die wichtigsten Methoden und Modelle für eine numerische Umsetzung dieser Gleichungen beleuchtet, soweit diese bei der Validierung der Computational Fluid Dynamics (CFD)-Programme NAGARE und FLUENT ihre Anwendung finden bzw. bei weiterführenden Überlegungen, bei denen diese Softwareprodukte eingesetzt werden, von Bedeutung sind.

### 3.1 Allgemeine Bewegungsgleichungen eines Fluids

Die Strömung eines Fluids, das im physikalischen Sinne sowohl ein Gas als auch eine Flüssigkeit sein kann, wird im Allgemeinen durch einen Satz von Gleichungen beschrieben, das – präzise formuliert – ein System von nichtlinearen partiellen Differentialgleichungen 2. Ordnung bildet. Zu diesen Gleichungen zählen die Kontinuitäts-, die Impuls- und die Energiegleichung. Aufgrund der Anzahl der unabhängigen Variablen, die in diesem Fall die räumlichen Koordinaten x, y und z sowie die Zeit t sind, bezeichnet man sie als partiell. Weil in ihnen weiterhin Produkte der abhängigen Variablen und ihrer Ableitungen auftreten, sind sie nichtlinear. Die Ordnung bestimmt sich nach der höchsten auftretenden Ableitung und beträgt für dieses System zwei. Auf eine ausführliche Herleitung der einzelnen Gleichungen wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, da diese auf sehr unterschiedliche Weise geschehen kann, und auch die Darstellungsweisen der Gleichungen sich von Autor zu Autor unterscheiden. Sie kann zahlreichen Literaturstellen, z. B. [26], [31], [37] und [40] entnommen werden.

#### 3.1.1 Kontinuitätsgleichung

Die Kontinuitätsgleichung beschreibt die Massenerhaltung in einem Volumenelement. Konkret bedeutet dies, dass für eine gegebene Volumeneinheit die Summe der pro Zeiteinheit ein- und ausfließenden Massenströme der Massenänderung pro Zeiteinheit durch eine Dichteänderung entsprechen muss. Ausgehend von einem Geschwindigkeitsfeld  $\vec{u} = \vec{u}(x, y, z, t)$  und einem Dichtefeld  $\rho(x, y, z, t)$  lautet die Kontinuitätsgleichung in allgemeiner Form [37]

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = 0,$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{u}) = 0.$$
(3.1)

Für ein inkompressibles Fluid mit  $\rho$  = const. vereinfacht sich Gleichung 3.1 zu

 $\Leftrightarrow \nabla \vec{u} = 0. \tag{3.2}$ 

#### 3.1.2 Impulsgleichung

Die Impulsgleichung leitet sich aus dem Newtonschen Grundgesetz her.

$$m \vec{a} = \sum_{i} \vec{F}_{i}$$
(3.3)

Die Beschleunigung auf der linken Seite der Gleichung ergibt sich aus der substantiellen Ableitung der Geschwindigkeit, während auf der rechten Seite Massen- bzw. Gewichtskräfte sowie Oberflächen- bzw. Druck- und Reibungskräfte, die auf das System einwirken, zu berücksichtigen sind [37]. Als Ergebnis erhält man die Navier-Stokesschen Gleichungen für inkompessible Fluide [40]

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{\rho} \vec{F}$$
(3.4)

mit:

р

ν

kinematische Viskosität [m<sup>2</sup>/s]

Druckfeld  $[kN/m^2]$ 

#### 3.1.3 Energiegleichung

Die Energiegleichung basiert auf dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik und beschreibt die Zunahme der Gesamtenergie an einem Massenelement durch dem Element zugeführte Wärme und am Element verrichtete Arbeit [37].

$$\rho c_{p} \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \lambda \nabla^{2} T + \beta T \left( \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla p \right) + \Phi$$
(3.5)

mit:

- c<sub>p</sub> spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]
  - T Temperatur [K]
  - $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]
  - β Volumenausdehnungskoeffizient [1/K]
  - Φ = Dissipationsfunktion nach [37] Der Begriff Dissipation
     bezeichnet die Umwandlung von kinetischer Energie in Wärmeenergie.

Zusammengefasst erhält man für den allgemeinen Fall eines inkompressiblen Fluids fünf Differentialgleichungen für die fünf Unbekannten u, v, w, p, T, mit denen das strömende Fluid unter Hinzunahme von Anfangs- und Randbedingungen hinreichend beschrieben werden kann. Die Grundgleichungen 3.1 bis 3.5 können auch in integraler Form dargestellt werden. Bei der numerischen Umsetzung in computerbasierte Rechenverfahren wird häufig die Erhaltungsform oder konservative Form gewählt, da diese besser für eine programmtechnische Umsetzung geeignet ist [26].

### 3.2 Ähnlichkeitstheorie und dimensionslose Kennzahlen

Anhand von Ähnlichkeitsbetrachtungen der oben genannten Gleichungen lassen sich dimensionslose Kennzahlen ableiten, von denen die Lösungen abhängig sind. Mit diesen Kennzahlen ist es zudem möglich, bei der Abbildung realer Systemstrukturen im Modellmaßstab nicht nur geometrische, sondern auch physikalische Ähnlichkeit herzustellen, ein Zusammenhang, der bei Modellversuchen besonders zu beachten ist. Durch eine Ähnlichkeit der geometrischen Begrenzungen einerseits und der strömungsmechanischen Größen andererseits kann die Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen in die Realität gewährleistet werden. Da es allerdings oftmals nicht möglich ist, in einem Experiment sämtliche dimensionslosen Kenngrößen einzuhalten, ist aber in jedem Fall sicherzustellen, dass die für die zu untersuchende Strömung maßgebenden Kennzahlen eingehalten werden. So besitzt z.B. bei einer Windanströmung von Gebäuden die

Reynolds-Zahl eine wesentlich höhere Bedeutung als die Grashof- bzw. Rayleigh-Zahl. Die Erläuterung einiger wichtiger Kennzahlen wird in den Kapiteln 3.2.1 bis 3.2.5 thematisiert.

### 3.2.1 Reynolds-Zahl

Die Reynolds-Zahl wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{v}$$
(3.6)  
v Strömungsgeschwindigkeit [m/s]  
l typische Länge [m]  
 $\mu$  dynamische Viskosität [kg/(m·s)]

v kinematische Viskosität  $[m^2/s]$ 

Anhand dieser dimensionslosen Kennzahl kann man die Art einer Strömung in laminar oder turbulent unterscheiden. Der Übergang zwischen beiden Strömungsformen wird mit der kritischen Reynolds-Zahl Re<sub>krit</sub> angegeben, die mit Hilfe von Versuchen ermittelt werden kann. In einer laminaren Strömung, gleichbedeutend mit Re < Re<sub>krit</sub>, kann man sich die Bewegung als Schichtenströmung vorstellen. Vergrößert sich die Reynolds-Zahl, z.B. durch eine Zunahme der Geschwindigkeit, findet ein Übergang in den turbulenten Bereich statt. Es bilden sich mehr und mehr Wirbel, die der Hauptströmung Energie entziehen.



Abbildung 3.1: Geschwindigkeitsverteilung in einer laminaren und einer turbulenten Einlaufströmung [21]

Abbildung 3.1 zeigt den Vergleich der Geschwindigkeitsprofile in einer laminaren und einer turbulenten Spaltströmung. Es entstehen die beiden typischen Geschwindigkeits-

mit:

verläufe über den Spaltquerschnitt, einerseits der parabelförmige Verlauf einer laminaren Strömung und andererseits der flachere Verlauf der turbulenten Strömung mit den beiden charakteristischen lokalen Maxima nahe der Ränder [21].

#### 3.2.2 Grashof-Zahl

Die Grashof-Zahl ist bei den Strömungen von übergeordneter Bedeutung, bei denen Dichteunterschiede, die durch Temperaturdifferenzen hervorgerufen werden, die wesentliche Antriebsursache für eine Bewegung des Fluids sind. Zu derartigen Strömungen sind die natürlichen bzw. freien Konvektionsströmungen zu zählen. Die Grashof-Zahl ist gegeben durch:

$$Gr = \frac{g\beta l^3 \Delta T}{v^2}$$
(3.7)

mit:

g 1

typische Länge [m]

Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]

ΔT Typische Temperaturdifferenz im Strömungsfeld [K]

Im englischsprachigen Raum ist die verwandte Rayleigh-Zahl weiter verbreitet, die sich aus der folgenden Beziehung ergibt:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g\beta 1^{3}\Delta T}{v^{2}} \cdot \frac{v}{\kappa} = \frac{g\beta 1^{3}\Delta T}{v\kappa}$$
(3.8)  
Pr Prandtl-Zahl, s. Kapitel 3.2.3

mit:

κ Temperaturleitfähigkeit m<sup>2</sup>/s

### 3.2.3 Prandtl-Zahl

Als weitere dimensionslose Kennzahl ergibt sich aus den Ähnlichkeitsbetrachtungen die Prandtl-Zahl, die sich aber im Gegensatz zur Reynolds- und zur Grashof- bzw. Rayleigh-Zahl allein aus materialspezifischen Stoffwerten ableiten lässt.

$$\Pr = \frac{\nu}{\kappa} = \frac{\mu c_p}{\lambda}$$
(3.9)

Für Luft bei 20 °C erhält man somit eine Prandtl-Zahl von

$$\Pr = \frac{17.9 \cdot 10^{-6} \cdot 1005}{0.0257} = 0.7.$$

#### 3.2.4 Eckert-Zahl

Die Eckert-Zahl kann in der folgenden Form abgeleitet werden:

$$Ec = \frac{v^2}{c_p \Delta T}$$
(3.10)

Strömungsgeschwindigkeit [m/s] mit: V

Die Eckert-Zahl steht in engem Zusammenhang zu der Mach-Zahl, die das Verhältnis der Anströmgeschwindigkeit eines Körpers zur Schallgeschwindigkeit angibt. Sie gewinnt aus diesem Grund allerdings nur an Bedeutung, wenn die Geschwindigkeit nahe der Schallgeschwindigkeit c, wie z.B. beim Raketenflug, liegt, da dann Reibungs- und Kompressionseffekte berücksichtigt werden müssen.

#### 3.2.5 Nusselt-Zahl

Für Fragestellungen, bei denen die Wärmeleitung in der Grenzschicht beachtet werden muss, kann die Nusselt-Zahl von Bedeutung sein. Dafür bezieht man den Wärmestrom q, der von einem umströmten Körper auf das Fluid bzw. von dem Fluid auf den festen Körper übergeht, auf den Wärmeübergang durch Leitung an der Grenze zwischen Fluid und Körper und erhält eine dimensionslose örtliche Wärmeübergangszahl [37]:

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$$
(3.11)

mit:

α

Wärmeübergangszahl  $[W/(m^2 \cdot K)]$ 1 typische Länge [m]

λ Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]

#### **Computational Fluid Dynamics (CFD)** – 3.3 Die numerische Berechnung von Strömungen

Die Lösung strömungsmechanischer Fragestellungen kann auf unterschiedliche Weise angegangen werden. Da eine exakte analytische Berechnung in nur ganz wenigen Spezialfällen möglich ist, wurden weitere Methoden entwickelt, die in der Praxis zum Einsatz kommen, um die gesuchten Ergebnisse bestimmen zu können. Im Prinzip kann man zwischen zwei wesentlichen Verfahrensweisen unterscheiden. Zum einen ist hierbei die experimentelle Methode zu nennen, die unter realitätsnahen Bedingungen bei Einhaltung der Ähnlichkeitsgesetze die Abbildung und Analyse einer zu untersuchenden Strömung ermöglichen kann. Den Vorteilen der konkreten Modellierung der Realität stehen allerdings die Nachteile eines meist aufwendigen Versuchsprogrammes und einer eingeschränkten Variantenvielfalt nebst hohen Kosten gegenüber. Die numerische Methode zum anderen bietet aufgrund ihrer rechnergestützten Vorgehensweise einen hohen Variantenreichtum an Systemen, mit ihr können Parameterstudien in einfacher Weise durchgeführt werden und auch Randbedingungen, die in einem Experiment nicht zu realisieren wären, lassen sich in einer Simulation erfassen. Als Ergebnisse können sowohl qualitative als auch quantitative Prognosen über komplette Geschwindigkeitsund Temperaturfelder getroffen werden, die durch weitere Angaben zu theoretischen Größen, z.B. dem Turbulenzgrad oder der Energiedissipation ergänzt werden können. Aufgrund des hohen Rechenleistungsbedarfs, den eine numerische Simulation benötigt, sind aber Vereinfachungen und Modellannahmen notwendig, die anhand von Versuchsergebnissen oder Vergleichsrechnungen validiert werden müssen.



Abbildung 3.2: Visualisierung von Netzdiskretisierung, Temperaturen und Geschwindigkeitsvektoren als Ergebnis einer CFD-Simulation links: FLUENT, rechts: NAGARE

In der numerischen Strömungsmechanik bilden die in Kapitel 3.1 angegebenen allgemeinen Bewegungsgleichungen die Grundlage für eine erfolgreiche Beschreibung einer Strömung. Für eine Implementierung der komplexen Berechnungsvorgänge und -algorithmen in Computerprogrammen werden diese durch eine Vielzahl von Modellen und Lösungsansätzen ergänzt, die in ihrer Gesamtheit eine numerische Auswertung er-
möglichen. Im Rahmen des Projektes, das in der vorliegenden Arbeit vorgestellt wird, werden die beiden Computational Fluid Dynamics (CFD)-Programme NAGARE und FLUENT für die Strömungsberechnungen eingesetzt. Das Softwarepaket FLUENT gliedert sich hauptsächlich in zwei Teilanwendungen. Dies ist zum einen das mit CAD-Fähigkeiten ausgerüstete Programm GAMBIT, in dem die Eingabe der Geometrie und die Netzdiskretisierung vorgenommen wird, und zum anderen FLUENT selbst, das die Lösung des strömungsmechanischen Gleichungssystems übernimmt und die so ermittelten Ergebnisse grafisch visualisiert. NAGARE wurde von Prof. Kunio Kuwahara am Institute of Computational Fluid Dynamics (ICFD) in Tokio entwickelt und ist in der Lage, die Navier-Stokesschen Gleichungen und die Energiegleichung, die die wesentlichen Rollen bei der numerischen Berechnung der hier behandelten auftriebsinduzierten Strömungen spielen, zu lösen. Die Eingabe der Geometrie und die Netzdiskretisierung erfolgt in dem Hauptprogramm NAGARE selbst, die Visualisierung der Ergebnisse geschieht mit Hilfe der Software CLEF2D bzw. CLEF3D. Zur Anwendung kommt in der vorliegenden Arbeit ebenfalls die Applikation NAGARE II, bei der die Ausgangssoftware NAGARE im Hinblick auf ein "generalized coordinate system", also ein verallgemeinertes Koordinatensystem weiterentwickelt wurde und eine optimale Gestaltung und individuelle Anpassung der Netzdiskretisierung an die zu berechnenden Systeme ermöglicht. Diese flexiblere Art der Netzgestaltung, auf die in Kapitel 3.3.2.1 genauer eingegangen wird, erwies sich in sämtlichen Simulationen als außerordentlich vorteilhaft und nahm bei der Entwicklung des Softwarepaketes GeDeNA eine zentrale Schlüsselfunktion ein.

## 3.3.1 Allgemeine Grundlagen und Modellannahmen für eine Simulation von Strömungsfeldern

## 3.3.1.1 Prinzipielle Vorgehensweise zur Berechnung von Strömungen mit CFD-Programmen

Es gibt einige grundlegende Lösungsstrategien und -verfahren, die bei der numerischen Berechnung von Strömungen mit CFD-Programmen vorgegeben und einzuhalten sind. Diese sind softwareunabhängig, die wesentlichen Unterschiede ergeben sich erst bei der Umsetzung der Verfahren innerhalb der Programme.

Eine komplette Berechnung bzw. Simulation einer Strömung mit CFD-Programmen gliedert sich in die drei Schritte Preprocessing, Mainprocessing und Postprocessing.

Beim Preprocessing werden sämtliche Eingaben erstellt und Randbedingungen vorgegeben, die einen ordnungsgemäßen Ablauf der Simulation begründen. Dazu zählen im Wesentlichen die Eingabe der Systemstruktur, die Netzgenerierung und räumliche Diskretisierung, genaue Angaben zu den zu verwendenden Berechnungsmodellen und eine exakte Definition der physikalische Parameter und Anfangsbedingungen. Im Mainprocessing findet die Berechnung der Strömung anhand der im Preprocessing definierten Modelle statt. Es erfolgt hierbei die numerische Auswertung der strömungsmechanischen Gleichungen nach einem gewählten numerischen Verfahren und liefert für die diskreten Stützstellen Lösungen u.a. für Geschwindigkeiten, Temperaturen und Drücke. Die so gewonnenen Ergebnisse können im Postprocessing dargestellt und analysiert werden. Dies geschieht meist über grafische Visualisierungswerkzeuge, die sowohl den Verlauf der Strömung, die Geschwindgkeits- oder Temperaturverteilung sichtbar machen, als auch quantitative Aussagen über diese Größen treffen können [26].



Abbildung 3.3: Strukturierter Ablauf einer CFD-Simulation

#### 3.3.1.2 Räumliche und zeitliche Diskretisierung

Für ein gegebenes System wird zunächst die Geometrie des Modells, z.B. mit Hilfe eines CAD-Programmes definiert. Handelt es sich bei dem Modell um einen umströmten Körper, wird daraufhin ein Netz generiert, das den Körper umschließt. Im Fall eines durchströmten Körpers wird das Modell selbst mit einem Berechnungsgitter ausgefüllt. Durch die Generierung des Netzes legt der Benutzer fest, an welchen Stützstellen im Gesamtsystem das strömungsmechanische Gleichungssystem ausgewertet werden soll. Anstelle der Differentialgleichungen mit stetigen Lösungen tritt nun eine diskretisierte Form der Gleichungen, die darauf abzielt, ein lineares Gleichungssystem für die gesuchten Strömungsgrößen zu erhalten, das numerisch gelöst wird.



Abbildung 3.4: Strukturierte – Unstrukturierte Netze

Die Netzgenerierung kann auf vielfältige Weise vor sich gehen und ist neben einer programmtechnischen Vorgabe in hohem Maße abhängig von der Erfahrung des Benutzers. Es stehen im Falle von FLUENT sowohl strukturierte Netze, d.h. ein Gitter, das im zweidimensionalen Raum nur aus Vierecken bzw. im dreidimensionalen aus Quadern besteht, als auch unstrukturierte Netze, bei denen zusätzlich dreieckige Zellen bzw. Tetraeder und Pyramiden ihre Anwendung finden, zur Verfügung. NAGARE hingegen setzt aufgrund der implementierten Diskretisierungsmethode die Verwendung eines strukturierten Gitters voraus.

Ein besonderes Augenmerk ist der Auflösung und der Verteilung der Stützstellen zu widmen. Bereiche der Systemstruktur, an denen große Gradienten im Feld erwartet werden, sollten feiner aufgelöst werden als Bereiche, bei denen von gleichmäßigeren Geschwindigkeits- bzw. Temperaturgradienten ausgegangen werden kann. Geometrischen Kanten und Ecken sollte ebenfalls eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Ein entscheidendes Kriterium für die Netzwahl ist meist das Leistungspotential des bzw. der zur Verfügung stehenden Rechner. Eine sehr feine Auflösung bedeutet eine große Anzahl an Stützstellen und erfordert eine dementsprechend hohe Rechenleistung und lange Rechenzeit. Allerdings ist die korrekte Netzabbildung der Strömung zwingende Voraussetzung für eine gute Näherungslösung des CFD-Programms. Dies erfordert zumeist einen Kompromiss bei der richtigen Netzwahl, um möglichst alle Bedingungen einzuhalten. FLUENT bzw. GAMBIT lassen lokale Verdichtungen des Netzes zu, wohingegen NAGARE ein gleichmäßig verteiltes, äquidistantes Netz benötigt. Bei der Erweiterung NAGARE II kann aufgrund des zugrundeliegenden verallgemeinerten Koordinatensystems das Netz im Rahmen bestimmter Randbedingungen ver-

dichtet werden. Ein äußerst wichtiges Kriterium für gute Ergebnisse einer CFD-Simulation ist die Frage nach der Netzunabhängigkeit einer numerischen Lösung. Es ist bei allen untersuchten Systemen sicherzustellen, dass das gefundene Ergebnis unabhängig von der Wahl des Netzes ist, d.h. eine weitere Erhöhung der Anzahl oder eine Veränderung der Lage der Stützstellen darf keine bzw. nur sehr geringe Auswirkungen auf das Endresultat haben. Falls dies nicht explizit in dieser Arbeit erwähnt wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Netzunabhängigkeit der jeweiligen Berechnung gewährleistet ist.

Die Wahl der Netzart und der Aufbau des Netzes wird allerdings nicht nur von der Geometrie des Körpers und der verfügbaren Rechenkapazität bestimmt, sondern auch durch die verschiedenen Lösungsverfahren, die bei der numerischen Berechnung eingesetzt werden. Die wichtigsten Verfahren sind Finite-Elemente Methoden (FEM), Finite-Volumen Methoden (FVM), Finite-Differenzen Methoden (FDM), Spektralmethoden (SM) sowie spektrale Elementverfahren (SEM), die auf unterschiedlichste Weise die diskretisierten Gleichungen auswerten. Nachfolgende Abbildung 3.5 bietet einen vereinfachten Überblick über den Zusammenhang zwischen Flexibilität und Genauigkeit der Verfahren. Anzumerken ist, dass sich die hier getroffenen Aussagen zur FEM lediglich auf die strömungsmechanische Anwendung und nicht auf Verfahren der Festkörpermechanik beziehen [26].



Abbildung 3.5: Räumliche Diskretisierungsverfahren, modifiziert nach [26]

Im Bereich der Strömungsmechanik sind die Finite-Elemente Methoden als die flexibelsten anzusehen, da diese auf unstrukturierten Netzen durchgeführt werden können. Die Zustandsgrößen in den Elementen werden anhand einfacher Basisfunktionen approximiert. Dadurch ist die erzielte Genauigkeit nicht so hoch wie die der Finite-Volumen Methode, bei den am Volumenelement jeder Zelle die Flüsse der Strömungsgrößen über die Zellwände hinweg berechnet werden. Die Formulierung kann dabei sowohl in den Zellmittelpunkten (cell-centered scheme) als auch in den Zelleckpunkten (cell-vertex scheme) geschehen. Für dieses Verfahren sind die Navier-Stokesschen Gleichungen in der Erhaltungsform besonders geeignet, und die zugrundeliegenden Netze können bei dieser Methode strukturiert oder unstrukturiert sein. Für eine höhere Genauigkeit kann die Finite-Differenzen Methode bzw. ein Differenzenverfahren verwendet werden, wobei auf ein kartesisches Netz, gleichbedeutend mit einem strukturierten Netz, zurückgegriffen wird. Dabei werden die Differentialquotienten durch Differenzenquotienten ersetzt, und es entstehen Differenzengleichungen, die iterativ gelöst werden können. Dieses Verfahren bietet eine sehr genaue Approximation der Lösung, weist aber Einschränkungen bei der Flexibilität auf. Spektralmethoden, denen wie den Finite-Elemente Methoden in dieser Arbeit keine weitere Bedeutung zukommt, sind aufgrund global definierter Funktionensysteme am genauesten, jedoch nur für sehr einfache Geometrien anwendbar [4], [26]. Während sich die räumlichen Diskretisierungsverfahren in NAGARE und FLUENT unterscheiden, wird die zeitliche Diskretisierung, die aufgrund der instationären Konvektionsströmungen erforderlich ist, bei beiden CFD-Programmen mit einer impliziten Formulierung gelöst.

#### 3.3.1.3 Angaben zu Materialien und Anfangs- bzw. Randbedingungen

Nach einer genauen Definition der geometrischen Struktur des zu untersuchenden Systems und der räumlichen Diskretisierung sind in beiden Programmen Aussagen zu dem verwendeten Fluid und weiteren Materialien zu machen. Es müssen ebenfalls die Randbedingungen des Systems genau beschrieben werden. Steht das System im Kontakt mit dem Außenraum, so sind Öffnungen in der Systemberandung vorzusehen und mit entsprechenden dynamischen Nebenbedingungen, wie z.B. der Außentemperatur oder einer Eintrittsgeschwindigkeit zu versehen. Handelt es sich um ein geschlossenes System, sind z.B. die Temperaturen oder/und die Ausgangsgeschwindigkeit des Strömungsfeldes festzulegen.

# 3.3.1.4 Die Berücksichtigung der Turbulenz als ein wichtiges Element der numerischen Berechnung eines Strömungsfeldes

Der wichtigste und interessanteste Unterschied zwischen FLUENT und NAGARE besteht jedoch in den Auswertungsverfahren des strömungsmechanischen Gleichungssystems. Bei turbulenten Strömungen existieren verschiedene Ansätze für eine erfolgreiche Lösung der Gleichungen, die sich hinsichtlich Anwendungsbreite, Rechendauer und Genauigkeit unterscheiden. Die bekanntesten dabei sind die Direkte Numerische Simulation (DNS), die Large-Eddy-Simulation (LES) und die Lösung anhand der gemittelten Reynolds-Gleichung. Die Direkte Numerische Simulation löst die Bilanzgleichungen für die Momentanwerte, um sowohl Turbulenzmechanismen als auch laminare Effekte für das gesamte Strömungsfeld simultan erfassen zu können. Dafür ist ein sehr feines Rechengitter notwendig, da bei diesem Verfahren sämtliche Wirbel aller Größen sowohl räumlich als auch zeitlich aufgelöst werden müssen. Als Konsequenz ergibt sich für dieses Verfahren eine sehr hohe erforderliche Rechenkapazität, wodurch die Anwendung auf einige wenige Spezialfälle eingeschränkt wird. Um diese Thematik zu verdeutlichen, ist in Abbildung 3.6 beispielhaft eine Strömung in einer Bauteilecke in zwei Netzauflösungsstufen dargestellt. In der gröberen Netzauflösung ist neben der Hauptströmung lediglich ein großer stehender Wirbel in der oberen linken Ecke auszumachen. Bei der feineren Auflösung ist aber deutlich zu erkennen, dass dieser große Wirbel noch von zahlreichen kleineren umgeben wird, die erst die Richtungsänderung der Hauptströmung in ihrer natürlichen glatten Form ermöglichen und die Ecke ausfüllen. Für die DNS müsste die Auflösung noch weiter verfeinert werden und der Rechenaufwand würde konsequenterweise ansteigen.

Abbildung 3.6: Auswirkung der Netzfeinheit auf die Wirbelauflösung

Das Verfahren der Large-Eddy-Simulation, das auch als Grobstrukturverfahren bezeichnet wird, erfasst im Unterschied zur DNS die kleinskaligen Turbulenzbewegungen des Fluids nicht mehr direkt, sondern über verschiedene Arten der Modellierung. Dadurch ergibt sich ein geringerer Rechenaufwand, der folgerichtig eine geringere Genauigkeit mit sich bringt. Alternativ zu diesen beiden Verfahren, entwickelte Reynolds einen halb-empirischen Ansatz, um den hohen Rechenaufwand, den die DNS und die LES mit sich bringen, zu verringern. Dabei wird zwischen stark fluktuierenden und mittleren Strömungsgrößen unterschieden. Anhand dieses Ansatzes können die Reynolds-averaged Navier-Stokes equation (RANS)-Modelle abgeleitet werden [36]. Da diese Modelle bei den Berechnungen mit FLUENT zur Anwendung kommen und sich grundlegend von den in NAGARE implementierten Ansätzen unterscheiden, werden beiden CFD-Programmen für die genauen softwarespezifischen Merkmale und Modellgrundlagen die Kapitel 3.3.2.1 und 3.3.2.2 gewidmet.

## 3.3.2 Spezifische Merkmale und Modellansätze der CFD-Programme NAGARE und FLUENT

#### **3.3.2.1 NAGARE**

Wie oben beschrieben, findet in NAGARE die Netzgenerierung im Hauptprogramm selbst statt. Die weiterentwickelte Version NAGARE II benötigt eine im Vorfeld produzierte Eingabedatei, in der die wesentlichen Informationen zur Beschreibung des Gitters und der geometrischen Struktur enthalten sind. Die verschiedenen Berechnungsmodelle sind komplett in NAGARE bzw. NAGARE II implementiert, so dass eine entsprechende Auswahl im Preprocessing entfällt. Aus diesem Grund stellen allerdings beide Programmversionen bestimmte Voraussetzungen an die zu berechnende Strömung. Es muss gewährleistet sein, dass die Strömung eine geringe Mach-Zahl besitzt, d.h. dass das Verhältnis von Strömungsgeschwindigkeit v zur Schallgeschwindigkeit c, die für Luft bei einer Temperatur von 20 °C ungefähr 340 m/s beträgt, wesentlich kleiner als eins ist. Bei dem verwendeten Fluid muss es sich weiterhin um ein Newtonsches Fluid handeln und die thermische Zustandsgleichung gelten. Newtonsche Fluide, zu denen auch Luft und Wasser zählen, zeichnen sich dadurch aus, dass die Schubspannungen direkt proportional mit dem Gradienten des Geschwindigkeitsfelds verknüpft sind. Die Proportionalitätskonstante ist die dynamische Viskosität µ [40]. Weitere Anforderungen bestehen dahingehend, dass das Fluid das Fouriersche Gesetz der Wärmeleitung und die Stokessche Hypothese erfüllt.

Die Turbulenzberechnung in NAGARE findet mittels der Large-Eddy-Simulation (LES) statt. Wie in Kapitel 3.3.1.1 bereits angedeutet, werden bei diesem Verfahren die Wirbel in einem Strömungsfeld gemäß ihrer Skalierung unterschieden. Die Auswertung der großskaligen Wirbel erfolgt dabei mittels der exakten Navier-Stokesschen Gleichungen, d.h. sie werden direkt numerisch berechnet. Dies bietet den immensen Vorteil, dass ein zusätzliches Turbulenzmodell, wie es für das Schließen der gemittelten Reynolds-Gleichungen benötigt wird, nicht erforderlich ist. Die räumliche Diskretisierung wird durch die Finite-Differenzen Methode realisiert. Aus diesem Grund ist die Verwendung eines strukturierten Netzes Voraussetzung für die CFD-Simulation mit NAGARE. Eine wichtige Weiterentwicklung hinsichtlich eines flexibleren Netzes wurde durch die Implementierung eines "generalized coordinate system" in NAGARE II erreicht. Im Gegensatz zu dem in NAGARE zugrundeliegenden äquidistanten Koordinatensystem kann in NAGARE II das Netz lokal verdichtet werden. So kann das Berechnungsgitter der Systemstruktur angepasst und auf geometrische und physikalische Besonderheiten, zu denen zum einen Ecken, Kanten oder kleine Einbauteile und zum anderen Bereiche mit hohen Geschwindigkeits- oder Temperaturgradienten zählen, reagiert werden. Allerdings müssen bei den Systemen, die mit NAGARE II untersucht werden, zwei wichtige Einschränkungen berücksichtigt werden. Einerseits muss es sich um ein geschlossenes System handeln, d.h. es darf kein Fluidaustausch zwischen dem Untersuchungsraum und der Umgebung stattfinden, und weiterhin muss die Strömung durch Temperaturgradienten bzw. Dichteunterschiede angeregt werden. Aufgrund der in dieser Arbeit betrachteten Systeme spielen diese beiden Einschränkungen keine weitere Rolle, da auch NAGARE für auftriebsinduzierte Strömungen einen geschlossenen Untersuchungsraum benötigt und die Anregung der Strömung in allen untersuchten Fällen allein über Temperaturdifferenzen geschieht. Für zukünftige Entwicklungen jedoch, insbesondere im Rahmen einer breiteren Anwendung der Evolutionären Algorithmen, die ausführlich in Kapitel 7 behandelt werden, sollte NAGARE II hinsichtlich einer möglichen Anströmung von Bauteilen ergänzt werden.



Abbildung 3.7: Vorbereitung der Systemstruktur für eine CFD-Simulation mit NAGARE II über das Programmpaket GeDeNA

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass dieser Vorteil der flexibleren Netzgestaltung mit einer aufwendigeren Eingabeprozedur einhergeht. Aus diesem Grund wurde eine Softwareapplikation entwickelt, die die System- und Netzgenerierung über eine grafische Benutzeroberfläche erleichtert und den gesamten Rechenablauf steuert [22]. Diese grafische Eingabeoberfläche (Graphical User Interface – GUI) ist Teil des in JAVA [39] implementierten Programmpakets GeDeNA – Genetic Designing with NAGARE –, das eine Optimierung strömungsmechanischer Systeme mittels sogenannter Evolutionärer Algorithmen vornehmen kann und ausführlich in Kapitel 7 erläutert wird. Das GUI kann aber auch losgelöst von einem evolutionären Optimierungsprozess genutzt werden, um einzelne Systeme für eine Berechnung mit NAGARE II vorzubereiten. Im Rahmen dieses Kapitels soll daher näher auf die grafische Eingabeoberfläche von GeDeNA eingegangen werden.

Als Ausgangsdateien für eine strömungsmechanische Simulation mit NAGARE II werden zwei ASCII-Dateien benötigt, die die System- und Netzstruktur sowie die Randund Anfangsbedingungen beinhalten. Für die Strukturdatei müssen dabei sämtliche Koordinaten der Geometrie und der Stützstellen erzeugt werden. Da dies bei dem Entwurf neuer Bauteile eine zeitintensive Anpassung sowohl der Netzdiskretisierung als auch der geometrischen Struktur bedeutet hätte, wurde dieser Prozess von leistungsfähigen Algorithmen übernommen, die über die Auswahl einer allgemeinen Gitterform, der Gesamtzahl der Knotenpunkte in den räumlichen Koordinatenachsen und den Parametern einer Netzgleichung gesteuert werden können. Anhand dieser Einstellungen können die Stützstellen automatisch erstellt und grafisch visualisiert werden. Die angesprochene Netzgleichung basiert auf der folgenden Formel [22]:

$$\mathbf{x} = \lambda_{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{a}_{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{i}^{\mathbf{r}_{\mathbf{x}}} \tag{3.12}$$

mit:

х

i

Nummer der Stützstelle [-]

x-Koordinate der i. Stützstelle [m]

- $\lambda_x$  frei wählbarer Wert, der so variiert werden kann, dass sich ein optimales Gitter für den zu untersuchenden Fall ergibt [m]
- rx frei wählbarer Wert, der so variiert werden kann, dass sich ein optimales Gitter f
  ür den zu untersuchenden Fall ergibt [-]
- a<sub>x</sub> Koeffizient nach der Gleichung [m]

$$a_{x} = \frac{x_{w} - \lambda_{x} \cdot i_{max}}{i_{max}^{r_{x}}}$$
(3.13)

mit:

 $X_{W}$ 

i<sub>max</sub>

Gesamtbreite des Gitters in der betrachteten Koordinatenrichtung [m] maximale Anzahl an Stützstellen [-]

Für eine Netzverdichtung in Richtung der y-Koordinatenachse müssen die Variablen x bzw. i entsprechend durch y bzw. j ersetzt werden. Abbildung 3.7 zeigt einen typischen Ausschnitt aus einer Systemgenerierung mit GeDeNA. Jede Netzdiskretisierung kann anhand einer grafischen Analyse der Stützstellenverteilung sowohl in x- als auch in y-Richtung kontrolliert werden. Die Abmessungen benachbarter Zellen sollten nur geringfügig voneinander abweichen, d.h. der Gradient der Verdichtung sollte möglichst konstant sein. Das Ergebnis dieser Berechnungen ist ein räumlich diskretisiertes Netz, das in GeDeNA dargestellt und in einfacher Weise durch die Geometrie des zu untersuchenden Systems über eine grafische Eingabe ergänzt werden kann. Eine weitere Veränderung bzw. Verfeinerung des Gitters ist jederzeit zulässig und somit kann flexibel auf die erzeugte Geometrie durch eine Anpassung der Parameterwahl in der Netzgleichung reagiert werden. Die Rand- und Anfangsbedingungen, z.B. Wandgeschwindigkeiten, Ausgangstemperaturen von Bauteilen, Anfangsgeschwindigkeit des Strömungsfeldes usw. können ebenfalls über eine interaktive Eingabe definiert werden. Aus diesen Daten werden von GeDeNA die beiden erforderlichen Dateien für NAGARE II erstellt. Für die Strukturdatei einerseits werden die genauen x- und y-Koordinaten der Stützstellen berechnet und die Geometrien auf die Stützstellen abgebildet. Der Eingangsdatei andererseits werden die Rand- und Anfangsbedingungen der Berechnung zugewiesen und in der Form, die NAGARE II als Schnittstelle benötigt, abgelegt [22]. Daraufhin kann eine Simulation mit NAGARE bzw. NAGARE II durchgeführt und die Berechnung in frei wählbaren Zeitabschnitten protokolliert werden. Nach abgeschlossener Simulation können die Ergebnisse mit den Visualisierungsprogrammen CLEF2D und CLEF3D dargestellt und in gewünschter Form ausgewertet werden.

#### 3.3.2.2 FLUENT

Da die Variations- und Auswahlmöglichkeiten für Gleichungslöser und Turbulenzmodellierung bei FLUENT sehr groß sind und sich je nach zu untersuchender Fragestellung erheblich unterscheiden, soll in diesem Kapitel im Wesentlichen auf die bei dem vorliegenden Projekt gewählten Parameter eingegangen werden. Vorschläge und Hinweise zu sinnvollen Annahmen für auftriebsinduzierte Strömungen finden sich z.B. in [12], [15], [16] und [44]. Ergänzt und überprüft wurden diese in der Literatur vorgeschlagenen Einstellungen durch eine Variantenstudie [29], die das Versuchsmodell unter den realen Randbedingungen des Experiments, welches detailliert in Kapitel 5 vorgestellt wird, berücksichtigte.



Abbildung 3.8: Preprocessing mit GAMBIT – Geometrie- und Netzdiskretisierung

Diese Einstellungen sind im Preprocessing von FLUENT festzulegen, da sie den Berechnungsablauf maßgeblich beeinflussen. Wie in Kapitel 3.3.1.1 beschrieben, wird in GAMBIT zunächst die Geometrie und die Netzstruktur erstellt, die anschließend in FLUENT eingelesen werden kann. Die räumliche Diskretisierung wird entsprechend dem verwendeten Lösungsalgorithmus nach der Finiten-Volumen-Methode vorgenommen. Dabei wird das Strömungsgebiet in kleine Kontrollvolumina aufgeteilt, für die das strömungsmechanische Gleichungssystem ausgewertet wird. Die dabei zur Anwendung kommenden Algorithmen und Modelle werden in den folgenden Absätzen erläutert.

Für instationäre Strömungen im Unterschallbereich, d.h. Mach-Zahl < 1, empfehlen sich Algorithmen, die auf der nicht gekoppelten Lösungsmethode, dem Segregated Solver basieren. Diese Art des Lösungsansatzes beinhaltet zunächst eine Lösung der Impulsgleichung in einem Prediktor-Schritt und anschließend der Kontinuitätsgleichung in einem Korrektor-Schritt. Zum Einsatz kommt bei den hier durchgeführten Berechnungen die von Issa begründete PISO-Methode, eine weiterentwickelte Variante der Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations, kurz SIMPLE-Methode, die von Patankar und Spalding formuliert wurde. Beide Druckkorrekturverfahren ermöglichen die Berechnung des Geschwindigkeits- und des Druckfeldes über eine Gleichung, die aus der Impulsbilanz und der Kontinuitätsgleichung entsteht [4]. Die PISO-Methode benötigt zwar mehr Rechenzeit für einen einzelnen Berechnungsschritt als die SIMPLE-Methode, kann aber dafür den Vorteil bieten, insgesamt weniger Berechnungsschritte für eine hinreichende Konvergenz der Iterationen durchführen zu müssen [15].

Wie schon angedeutet, spielt die korrekte Wahl des Turbulenzmodells für eine gute CFD-Lösung eine sehr große Rolle, da die einzelnen Turbulenzmodelle nicht allgemeingültig sind, sondern individuelle Vor- und Nachteile für die unterschiedlichen Strömungsarten aufweisen. So kann bei FLUENT unter einer Vielzahl von Turbulenzmodellen eine Auswahl getroffen werden, die sich je nach Aufgabenstellung und zur Verfügung stehender Rechenleistung anbieten. Es kann dabei zwischen den beiden wichtigen Hauptgruppen, den RANS-Modellen und der LES unterschieden werden. Aufgrund des effizientesten Verhältnisses von Rechenzeit zu optimalem Resultat einer Berechnung wird bei dem hier betrachteten Projekt ein sogenanntes Zwei-Gleichungsmodell, das auf der Methode der Reynolds-Mittelung basierende k-E-Modell, verwendet. Das k-ɛ-Modell, das von Launder und Spalding entwickelt wurde, bietet eine Lösung für das Schließungsproblem der gemittelten Reynolds-Gleichungen. Es ergänzt die Reynolds-Gleichungen um zwei zusätzliche Ansätze und modelliert zum einen eine Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie k und zum anderen für die turbulente Dissipationsrate ε [6], [36]. Konkret wird in dieser Arbeit das erweiterte RNG (Renormalization Group) k-ɛ-Modell benutzt. Weitere Modellvarianten, die je nach zu untersuchender Strömungsart verwendet werden können, sind ein EinGleichungsmodell von Spalart-Allmaras, ein weiteres Zwei-Gleichungsmodell, das  $k-\omega$ -Modell sowie ein Modell höherer Ordnung, das Reynolds-Spannungs-Modell. Diese schieden allerdings ebenso wie eine Large-Eddy-Simulation aufgrund ihrer benötigten Rechenkapazität oder ihrer geringeren Genauigkeit hinsichtlich der Ergebnisse für die vorliegende auftriebsinduzierte Strömung aus.

Da die oben aufgeführten Modelle (Ein-, Zwei-Gleichungsmodelle und das Reynolds-Spannungs-Modell) nur für Strömungen mit einer ausgebildeten Turbulenz gelten, müssen diese noch um sogenannte Wandmodelle ergänzt werden. In Wandbereichen haben Grenzschichten, in denen lokal niedrige Reynoldszahlen herrschen, den dominierenden Einfluss. Deswegen müssen in diesen wandnahen Bereichen zusätzlich eigens entwickelte Modelle hinzugezogen werden, um die Strömung besser beschreiben zu können. FLUENT stellt dazu Standard Wall Functions, Non-Equilibrium Wall Functions und ein Enhanced Wall Treatment zur Verfügung. Alle Modelle versuchen den Übergangsbereich zwischen der ausgebildeten Strömung und der Wandhaftung durch eine verbesserte Abbildung der laminaren Unterschicht und des turbulenten Bereiches genauer zu erfassen. Kontrolliert werden kann eine gute Wandmodellwahl anhand des dimensionslosen Wandabstandes y<sup>+</sup>. Bei Verwendung von Wandfunktionen sollte dieser Wert 30 anstreben und 60 nicht überschreiten, die verbesserte Wandbehandlung erfordert einen dimensionslosen Wandabstand  $y^+$  im Bereich von 1 und maximal 4 bis 5 [15], [12], [29]. Bei unzureichenden y<sup>+</sup>-Werten muss die Berechnung mit einem anderen Wandmodell und/oder einer feineren Netzauflösung in den kritischen Wandbereichen wiederholt werden, da die Qualität der Lösung von der korrekten Wandbehandlung in hohem Maße abhängig ist.

Eine weitere wichtige Einstellung, die hier explizit angegeben werden soll, ist die Verwendung des Boussinesq-Modells. Dieses Modell stellt Formeln für eine einfachere Berechnung der Terme, in denen die Dichte eine Rolle spielt, zur Verfügung. Es empfiehlt sich zwar bei auftriebsinduzierten Strömungen, besitzt aber nur Gültigkeit, wenn folgende Ungleichung erfüllt ist. Dies ist für den in Kapitel 5 beschriebenen Versuch mit 0,205 gewährleistet.

$$\beta \cdot (T - T_0) \ll 1 \implies 0.003413 \cdot (353 - 293) = 0.205$$
 (3.14)

Dieses Modell ist bei der Definition des verwendeten Fluidmaterials einzustellen, in dessen Rahmen auch weitere materialkennzeichnende Eigenschaften festzulegen sind. Im Einzelnen sind in FLUENT die Wärmeleitfähigkeit, die dynamische Viskosität und die spezifische Wärmekapazität über den Temperaturbereich einzugeben. Bei sämtlichen Berechnungen wurden die in Tabelle 3.1 zusammengestellten Werte verwendet, wobei die Zwischenwerte von FLUENT linear interpoliert werden sollen.

| θ    | ρ                    | c <sub>p</sub> | λ         | 10 <sup>5</sup> ·к  | 10 <sup>5</sup> ·μ | $10^6 \cdot v$      |
|------|----------------------|----------------|-----------|---------------------|--------------------|---------------------|
| [°C] | [kg/m <sup>3</sup> ] | [J/(kg·K)]     | [W/(m·K)] | [m <sup>2</sup> /s] | $[kg/(m \cdot s)]$ | [m <sup>2</sup> /s] |
| 0    | 1,293                | 1005           | 0,0243    | 18,7                | 1,72               | 13,30               |
| 20   | 1,205                | 1005           | 0,0257    | 21,4                | 1,82               | 15,11               |
| 40   | 1,128                | 1009           | 0,0271    | 23,9                | 1,91               | 16,97               |
| 60   | 1,060                | 1009           | 0,0285    | 26,7                | 2,00               | 18,90               |
| 80   | 1,000                | 1009           | 0,0299    | 29,6                | 2,10               | 20,94               |
| 100  | 0,946                | 1013           | 0,0314    | 32,8                | 2,18               | 23,06               |

**Tabelle 3.1:** Stoffwerte von trockener Luft bei 1,013 bar [10]

Die beispielhafte Visualisierung eines CFD-Simulationsergebnisses mit FLUENT ist in Abbildung 3.9 dargestellt. Dabei ist es möglich, sich einerseits quantitativ erfassbare Größen, wie z.B. Temperaturen, Geschwindigkeiten oder Druckverteilungen, die durch Messungen in einem Versuch bestimmt und zu einer Validierung der angesetzten Modelle herangezogen werden können, anzeigen zu lassen. Ergänzt werden können diese Ergebnisse durch rein rechnerische Größen, wie z.B. kinetische Energien, Enthalpien oder Dissipationen, die für theoretische Überlegungen von Bedeutung sein können.



Abbildung 3.9: Postprocessing in FLUENT – Darstellung der Temperaturverteilung bzw. der turbulenten kinetischen Energie k des k-ε-Modells

# Kapitel 4

# Visualisierung und Quantifizierung von Strömungsvektorfeldern anhand optischer Messverfahren

Zur Studie einer auftriebsinduzierten Luftströmung in einem Fassadenspalt wurden im Rahmen dieser Arbeit experimentelle Studien durchgeführt, die sich der Methode der Particle Tracking Velocimetry (PTV) bedienen. Inhalt dieses Kapitels ist eine allgemeine Erläuterung der Grundlagen optischer Strömungsmessverfahren, die hervorragend sowohl für eine makroskopische Visualisierung von Strömungsfeldern als auch zur Quantifizierung auftretender Geschwindigkeiten und konsequenterweise der daran geknüpften Volumenströme geeignet sind. In dem anschließenden Kapitel 5 wird ein detaillierter Überblick über den verwendeten Aufbau, die Durchführung der Experimente und den Auswertungsprozess, in dem die Ergebnisse erzeugt und analysiert werden, gegeben. Diese gesammelten Daten dienen der Validierung der CFD-Programme NAGARE und FLUENT, die in Kapitel 6 thematisiert wird.



Abbildung 4.1: Visualisierung einer auftriebsinduzierten Strömung

# 4.1 Allgemeine Ansätze und Methodik der Planar Laser Velocimetry (PLV)

Die optischen Strömungsmessverfahren, zu denen die Particle Image Velocimetry (PIV) und die Particle Tracking Velocimetry (PTV) zählen, haben in den letzten Jahren eine große Anwendungsbreite bei einer Vielzahl verschiedener Fragestellungen gefunden. Dank der immensen Entwicklungen in der Foto- und Videotechnik, bei den Auswertungsalgorithmen und ihrer programmtechnischen Umsetzungsmöglichkeiten sowie in der Datenverarbeitung können immer komplexere Strömungsfelder mit immer höheren räumlichen und zeitlichen Auflösungen erfasst und berechnet werden. So kann anstelle der Analogtechnik auf die digitale Bildaufzeichnung mit angeschlossenen leistungsstarken Rechnern zurückgegriffen werden, die in der Lage sind, in kürzester Zeit die für die Auswertung benötigten Algorithmen zu lösen. Weitere Fortschritte in der Lasertechnik und der Optik ergänzen dies vortrefflich.



Abbildung 4.2: Allgemeiner Aufbau eines PLV-Versuchsstands [32]

Beide oben angesprochenen Versuchsmethoden zählen zu den Planaren Teilchenspurverfahren (Planar Laser Velocimetry, PLV) und unterscheiden sich hauptsächlich in der Art der Bildauswertung, wobei diese wiederum die gesamte Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung beeinflusst. Die Berechnung der Geschwindigkeiten geschieht in beiden Varianten über eine Bestimmung der Positionsveränderungen von Partikeln, die sich in dem strömenden Medium mitbewegen und in einem definierten Zeitraum stattfinden. Deswegen bezeichnet man die PIV bzw. PTV auch als eine indirekte Messmethode. Der allgemeine Aufbau mit den wichtigsten Elementen einer PLV-Apparatur ist in Abbildung 4.2 ersichtlich. Bevor jedoch die spezifischen Unterschiede zwischen der PIV und der PTV, die vor allem in der Aufnahmemethodik und den Bildauswertungsverfahren liegen, erläutert werden, folgen einige allgemeingültige Bemerkungen, die bei der Durchführung einer PLV Messung beachtet werden sollten.

# 4.2 Bestandteile und Ablauf einer optischen Strömungsmessung

Die wesentlichen Bestandteile und der prinzipielle Ablauf der Experimente, die sich die PIV bzw. PTV zunutze machen, sind bei beiden Methoden vergleichbar. Beide Varianten sind für Strömungen prädestiniert, bei denen die Strömungsart oder das strömende Medium nur minimalste Eingriffe zulassen. Die in dieser Arbeit beschriebenen auftriebsinduzierten Luftströmungen mit ihren relativ geringen Geschwindigkeiten erfordern einen sehr sensiblen Einsatz der Messtechnik, um nicht durch ungewollte Einflüsse, z.B. durch den Einbau von Geräten zur Geschwindigkeitsaufzeichnung in frei durchströmbaren Gebieten, die Messungen unbrauchbar zu machen. Die generelle Aufgabenstellung einer optischen Strömungsmessung beinhaltet das Visualisieren und Darstellen der Geschwindigkeitsvektoren eines strömenden Mediums, um einen Überblick über laminare oder turbulente Bereiche zu erhalten. Verbunden sind damit quantitative Aussagen über Richtung und Betrag der auftretenden Geschwindigkeitsvektoren und den daran gekoppelten Volumenströmen. Aus diesem Grund werden dem zu vermessenden Fluid feinste Partikel zugesetzt, die sich in der Strömung möglichst homogen verteilen sollten und weitestgehend von der Strömung durch Reibung mitgeführt werden können. Unter Verwendung eines Lasers wird ein Lichtschnitt durch die Strömung gelegt, und die Partikel können durch das gestreute Licht sichtbar gemacht werden. Mittels Fotooder Videokamera können nun die Spuren der Partikel im Lichtschnitt aufgezeichnet werden, wobei die Art der Aufzeichnung wie in den Kapiteln 4.2.4.1 und 4.2.4.2 beschrieben wesentlich von den Algorithmen der Auswertungssoftware abhängig ist. Im Anschluss können die so gewonnenen Bilder über eine Schnittstelle in einen Computer eingelesen und dort weiterverarbeitet werden. Für die Bildanalyse sind eine Vielzahl an Algorithmen und Verfahren entwickelt worden, die als Ergebnis aus den aufgezeichneten Partikelspuren Geschwindigkeitsvektoren und Stromlinien berechnen können, und diese für eine weitergehende Auswertung bereitstellen. Diese Prinzipskizze eines Versuchsablaufs begründet einige verfahrensspezifische Überlegungen, die im Vorfeld jedes Experiments anzustellen sind, um qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erzielen, da

ein optimales Zusammenspiel der Beleuchtung, der eingebrachten Partikel, der Kameratechnik und der Computeralgorithmen erforderlich ist [32]. In den folgenden Kapiteln sind hierzu einige Hinweise zu finden.

### 4.2.1 Licht und Beleuchtung

Für das Ausleuchten des betrachteten Schnittes ist eine wenig streuende Lichtquelle zu wählen, die die eingebrachten Partikel in einer hinreichenden Stärke anstrahlt, so dass diese von der verwendeten Kamera aufgezeichnet werden können. Bewährt hat sich dabei die Lasertechnik, da sie nahezu monochromatisches Licht mit einer hohen Energiedichte liefert. Der Wellenlängenbereich des ausgesendeten Lichts ist sehr eng und es erscheint daher einfarbig. Durch Spiegelungen und Brechung kann dieser Laserstrahl mit hoher Präzision den Lichtschnitt an der gewünschten Stelle erzeugen.

#### 4.2.2 Bildaufzeichnung

Die Qualität der Bildaufnahmen ist ein entscheidender Faktor für gute Ergebnisse, da sie die Grundlage für die weitere Berechnung der Geschwindigkeitsvektoren bildet. Die in den Auswertungsvarianten verwendeten Algorithmen benötigen äußerst hochwertige Aufnahmen, die je nach Wahl der Versuchsmethode eine andere Erstellung bedingen. Die Partikel müssen in ausreichender Helligkeit und Schärfe auf dem Bildmaterial abgebildet sein, um den Algorithmen klare Unterscheidungsmöglichkeiten zwischen Tracer Material und umgebendem Fluid zu bieten. Die Aufnahmen selbst können mit analogen oder digitalen Videokameras, die kontinuierlich die strömenden Partikel im Lichtschnitt aufzeichnen, vorgenommen werden. Für die Auswertung muss allerdings gewährleistet sein, dass Einzelbildsequenzen definiert aus dem Film abgreifbar sind. Für höhere Qualitätsanforderungen kommen High-Speed Digitalkameras zum Einsatz, die sehr hohe Bildauflösungen und Aufzeichnungsgeschwindigkeiten besitzen. Je nach Strömungsart können auch Fotokameras verwendet werden, die den Vorteil einer hohen Auflösung besitzen, aber wegen ihrer geringen und oft nur ungenau zu justierenden Aufzeichnungsgeschwindigkeiten im Allgemeinen nur für Einzelbilder geeignet sind. Sie liefern allerdings bei doppelter Belichtung sehr gute Grundlagen für die PIV Methode und können bei einer Langzeitbelichtung auch einen hervorragenden Überblick über die Bahnlinien einzelner Partikel bieten.



Abbildung 4.3: Unterschiedliche Aufnahmetechniken für die Visualisierung der Strömung bzw. als Grundlage einer Geschwindigkeitsberechnung links: Einzelbild eines Videofilms rechts: Langzeitbelichtung mit einer Fotokamera

## 4.2.3 Tracer Partikel

40

Für eine perfekte Abstimmung aller Bausteine eines Experimentes, bei dem die PLV Methode zum Einsatz kommen soll, ist der optimalen Wahl der einzusetzenden Tracerart ebenfalls große Bedeutung beizumessen. Die breite Palette an Zusatzstoffen reicht von Feinststäuben, sehr kleinen Glashohlkugeln mit Durchmessern im Bereich von  $10 - 100 \mu m$  über Öle und Rauch bis hin zu Gasbläschen, deren geeigneter Einsatz je nach zu untersuchender Strömung und verwendetem Fluid variiert.



Abbildung 4.4: links: Glashohlkugeln als Tracer Partikel [1] mitte, rechts: durch Rauch visualisierte Strömungs-, Wirbelstruktur am Einlass bzw. Auslass des Fassadenmodells (d5)

In Vorversuchen sollten verschiedene Medien im Zusammenspiel mit Lichtschnittführung und Kameratechnik getestet werden, da von der Qualität der aufgezeichneten Partikelspuren das Ergebnis des gesamten Experiments abhängig ist. Die Tracerpartikel sollten sich homogen und störungsfrei in der Strömung verteilen.

### 4.2.4 Auswertung

#### 4.2.4.1 Particle Image Velocimetry (PIV)

Eine Grundvoraussetzung für eine Versuchsauswertung mittels der PIV oder PTV sind aussagekräftige Aufnahmen über Momentanzustände einer Strömung mit repräsentativem Charakter. Die Particle Image Velocimetry einerseits verwendet bei der computergestützten Berechnung des Geschwindigkeitsvektorfeldes auf Basis dieser Bilder regionenorientierte Korrelationsmethoden. Dabei werden die Aufnahmen in räumlich begrenzte Gebiete aufgeteilt und zeitlich nachfolgende Aufzeichnungen dazu in Beziehung gesetzt. In der Praxis existieren allerdings verschiedene Varianten und Umsetzungen dieses Verfahrens. So besteht die Möglichkeit, anhand eines einzigen doppelt belichteten Bildes mit einer sogenannten Autokorrelationsmethode die räumlichen Lageänderungen eines jeden Partikels zu bestimmen und anhand dieser Verschiebungen die Geschwindigkeiten über den zeitlichen Abstand der Belichtung zu berechnen.



Abbildung 4.5: Geschwindigkeitsfelder als Ergebnis einer PIV-Messung

Ein alternativer Ansatz sieht vor, auf Basis zweier oder mehrerer aufeinanderfolgender einfach belichteter Bilder die Partikelverschiebungen per Kreuzkorrelationsverfahren zu ermitteln. Aus den Zeitdifferenzen zwischen den einzelnen Bildern lassen sich die Momentangeschwindigkeiten folgern. Das zuletzt genannte Verfahren weist den enormen Vorteil auf, dass die Richtung der Vektoren im vorhinein eindeutig definiert ist, da diese aufgrund der zeitlichen Bildreihenfolge mit den zugehörigen Partikelpositionen vorgegeben ist. Für die Kreuzkorrelationsverfahren sind weitere Detaillösungen für den zugrundeliegenden Berechnungsalgorithmus entwickelt worden, die den Prozess der Identifizierung derselben Partikelstruktur auf mehreren Bildern optimieren. Dies können Methoden sein, bei denen skalierte Untersuchungszellen, die die Partikelverteilung des Basisbildes zum Zeitpunkt t<sub>0</sub> enthalten, auf dem Folgebild zum Zeitpunkt t<sub>1</sub> verschoben werden, um dadurch die maximale Korrelation zu finden. Fortgeschrittenere Methoden verwenden die zusätzliche Möglichkeit einer Verformung der Untersuchungszellen, die folglich nicht mehr quadratisch sein müssen, sondern der lokalen Strömung folgen und so die Partikelidentifizierung verbessern können [32], [42].

#### 4.2.4.2 Particle Tracking Velocimetry (PTV)

<u>42</u>

Im Unterschied zum Verfahren der Particle Image Velocimetry wird bei der Particle Tracking Velocimetry das Ausgangsmaterial nicht regional nach Ähnlichkeiten, sondern punktorientiert hinsichtlich der Zusammengehörigkeit einzelner Partikel untersucht. Bei diesen Auswertungsverfahren werden ebenfalls Korrelationsmethoden verwendet, die die Zugehörigkeit einzelner Partikel auf verschiedenen Aufnahmen anhand ihrer Größe, Form und Farbe identifizieren. Da die Betrachtung des einzelnen Partikels im Vordergrund steht, kann aus diesem Grund die Anzahl der Partikel im Fluid geringer gewählt werden als bei der PIV. Der klaren Abbildung eines Tracerpartikels kommt bei der Bildaufzeichnung dafür aber eine immense Bedeutung zu. Verwendet werden meist zwei oder mehrere aufeinanderfolgende Aufnahmen, auf denen die Bahnlinie des einzelnen Partikels verfolgt werden kann. Die lokale Geschwindigkeit der Strömung wird auch hier über den Quotient des Weges As, der von dem betrachteten Partikel in der Zeitdifferenz At zwischen zwei Aufnahmen zurückgelegt wurde, bestimmt. Sowohl bei der PIV als auch bei der PTV sind diese Zeitdifferenzen sinnvoll festzulegen und richten sich nach den zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeiten. Es muss einerseits gewährleistet sein, dass ein Partikel in der Zeit zwischen zwei Belichtungen den Lichtschnitt nicht verlassen, aber andererseits genügend Wegstrecke zurückgelegt hat, um eine korrekte Berechnung der Verschiebung zu ermöglichen. Aus physikalischer Sicht ist zu beachten, dass einem Teilchen keine zu große Beschleunigung zwischen den Zeitpunkten widerfährt, da ansonsten kein repräsentatives Geschwindigkeitsfeld erstellt

werden kann. Aus Gründen der Identifizierbarkeit einzelner Partikel sollte die Belichtung der Bilder so eingestellt sein, dass keine sogenannten Streaks, d.h. längliche Teilchenspuren, entstehen, sondern möglichst fein verteilte, punktförmige Lichtreflexe abgebildet werden.



Abbildung 4.6: Geschwindigkeitsvektoren als Ergebnis einer PTV-Messung

# Kapitel 5

# Experimentelle Untersuchung einer auftriebsinduzierten Strömung mittels der Particle Tracking Velocimetry (PTV)

Für eine Validierung der Computational Fluid Dynamics (CFD)-Programme NAGARE und FLUENT wurde im Rahmen dieses Projektes in dem Zwischenraum eines transparenten Doppelfassadenmodells eine Luftströmung erzeugt, deren Antrieb allein durch Temperaturgradienten verursacht wird. Anhand eines Vergleichs der im Versuch erzeugten Messdaten mit den Prognosen der numerischen Berechnungen sollen die gewählten Modellannahmen, die den beiden Softwareprogrammen zugrunde liegen, überprüft und auf eine derartige Strömung abgestimmt werden. Dieses Kapitel widmet sich dabei zunächst dem Aufbau und der Durchführung des Experiments. Einhergehend mit der Funktionalität der gesamten Messtechnik werden die verwendeten Materialien und ihre charakteristischen Merkmale erläutert. Die komplexen Auswertungsprozesse, basierend auf den Videofilm- und Fotoaufnahmen, werden an einigen ausgewählten Beispielen vorgestellt und die wichtigsten Ergebnisse für eine Validierung der CFD-Programme vorbereitet.

## 5.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Die gesamte Versuchsapparatur setzt sich aus mehreren Elementen zusammen, die in ihrem optimalen Zusammenwirken die optische Messung einer auftriebsinduzierten Strömung in einem Fassadenmodell ermöglichen. Hierzu zählen

- das Versuchsmodell, in dem die Strömung erzeugt und vermessen werden soll,
- der Laser samt zugehöriger Optik, die gemeinsam f
  ür den Lichtschnitt in ausreichender Gr
  ö
  ße und Intensit
  ät verantwortlich sind,

- die Temperaturerzeugung und -messeinrichtung, die den Motor f
  ür die Str
  ömung bilden und die Temperaturverteilung innerhalb des Modells kontrollieren,
- sowie die Bildaufzeichnungseinheiten, die die Partikelbilder als Grundlage für eine weitere computergestützte Geschwindigkeitsauswertung aufnehmen.

Eine Prinzipskizze des im Rahmen dieses Projektes verwendeten Aufbaus mit den wichtigsten Elementen findet sich in Abbildung 5.1. In den nun folgenden Unterkapiteln werden die verschiedenen Bausteine ausführlich erläutert.



Abbildung 5.1: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus einer PTV Messung

## 5.1.1 Der zentrale Baustein – das Versuchsmodell

Das Versuchsmodell bildet den zentralen Kern des Experimentes, um das sich die gesamte Versuchs- und Messtechnik gruppiert. Es kann in zwei wesentliche Komponenten unterschieden werden. Zum einen besteht es aus einem Fassadenmodell aus Acrylglas, in dem die zu analysierenden Luftströmungen ablaufen und an dem die gesamten Messungen stattfinden sollen, zum anderen aus einer Sicherungsbox aus Schaumglasplatten, die das Modell vor unerwünschten Einflüssen aus der Umgebung, z.B. unkontrollierbaren Impulsen aus Wind, Lichtreflektionen oder sich plötzlich ändernden Temperaturbedingungen, abschirmen soll. Das Fassadenmodell soll den Zwischenraum einer realen Glas-Doppelfassade in einem Maßstab von 1:5 abbilden. Die Abmessungen der vorgelagerten Sicherungsbox, die die unmittelbar an die Fassade anschließende Umwelt modellieren soll, folgen daraus entsprechend.





Das unveränderliche Fassadengrundmodell wird aus sechs Acrylglasscheiben, die alle eine Materialdicke von 6 mm aufweisen, gebildet. Boden- und Deckenplatte haben eine Größe von 700 x 400 mm, die zwei Seitenscheiben 700 x 200 mm bzw. 700 x 300 mm. Diese vier Scheiben bilden wie in Abbildung 5.2 auf der linken Seite dargestellt einen äußeren Rahmen, wobei die eine Seitenscheibe 100 mm über den vorderen Rahmenrand hinaus ragt, damit später bei den Foto- und Videoaufnahmen sowohl der Fassadenzwischenraum als auch der Ausschnitt vor der Außenscheibe durch dasselbe Medium aufgezeichnet werden können. Dadurch sollen bei der Bildaufnahme die Auswirkungen unterschiedlicher Modell- bzw. Materialparameter, z.B. materialbedingte optische Verzerrungen durch unterschiedliches Lichtbrechungsverhalten, vermieden werden. Ursprünglich war außerdem vorgesehen, eine zweite Scheibe an dieser Seitenscheibe mit Schrauben zu montieren, anhand dieser geprüft werden sollte, ob und wie sich im Hinblick auf eine mögliche Erweiterung des Modells die optische Aufzeichnung durch zwei Acrylglasscheiben verändern würde. Auf eine Montage der zweiten Scheibe wurde jedoch während der Experimente verzichtet, da in Vorversuchen festgestellt werden konnte, dass sich die Oualität der Aufnahmen durch diese Maßnahme drastisch verschlechtern würde.

Die Innenscheibe besteht aus einer 688 x 688 mm messenden quadratischen Scheibe, die durch ein Schwert mittig ausgesteift wird und innerhalb des Rahmens horizontal bewegt werden kann, um verschiedene Abmessungen des Fassadenzwischenraums einstellen zu können. Die Vorderseite des Modells besteht aus einer 688 x 548 mm großen Scheibe, die fest an dem Rahmen befestigt ist. Somit bleiben oben und unten zwei 688 x 70 mm breite Luftschlitze, durch die während eines Versuches ein Austausch der wärmeren Luft im Fassadenspalt und der kühleren in der Sicherungsbox stattfinden kann. Sämtliche Ecken des Modells sind geklebt; lediglich die Rückwand kann verschoben werden, um die Durchströmung in der Fassade bei Zwischenraumbreiten von 0 bis 194 mm beobachten zu können. Abbildung 5.3 zeigt das Fassadenmodell in Grundriss, Ansicht und Schnitt.



Abbildung 5.3: Bemaßung und Aufbau des Acrylglasmodells [mm]

Auf dem Boden des Modells besteht die Möglichkeit, vier Heizmatten mit den Abmessungen 680 x 50 mm einzulegen, die im Versuch für den erforderlichen Wärmeeintrag sorgen. Aus diesen geometrischen Bedingungen ergeben sich die gewünschten im Experiment realisierbaren Fassadenabstände von 50, 100, 150 und 200 mm, gemessen von der Modellvorderkante. Der Fassadenspalt, der von der Luft vertikal durchströmt werden kann, ist folglich jeweils 6 mm geringer. Damit die oben angesprochene Sicherungsbox bündig an die Seitenscheiben des Fassadenmodells angeschlossen werden konnte, wurden ihre Innenabmessungen dementsprechend zu 688 x 1200 x 1000 mm gewählt.



Abbildung 5.4: links: Montage des Versuchsmodells rechts: Detail Übergang Fassadenmodell – Sicherungsbox

Wie in Abbildung 5.4 dargestellt wird das Modell auf einer Höhe von 100 mm eingeschoben, da besondere Aufmerksamkeit dem möglichst ungestörten Ein- und Ausströmen der Luft in den bzw. aus dem Fassadenzwischenraum geschenkt wurde. Aus diesem Grund wurde auch der Abstand zwischen Oberkante Fassadenauslass und Decke der Sicherungsbox so groß wie möglich gewählt, da anhand einiger CFD-Simulationsberechnungen [34], die im Vorfeld der Versuche durchgeführt wurden, festgestellt werden konnte, dass die aus der Fassade ausströmende warme Luft unter Wirbelbildung außerhalb der Fassade aufsteigt. Eine passgenaue Box, die das Fassadenmodell an der Ober- und Unterseite bündig umschlossen hätte, würde dieses ungehinderte Ausströmen der Luft aus dem Fassadenzwischenraum verhindern und somit zu unerwünschten Staueffekten der Strömung innerhalb des Spaltes führen. Es würde sich ein verändertes Geschwindigkeitsfeld einstellen, das in hohem Widerspruch zu einer realen Ausführung stehen würde. Zusätzlich entstünden unerwünschte Reibungseffekte und eine große Verfälschung des Strömungsfeldes nicht nur außerhalb, sondern auch innerhalb des Fassadenzwischenraums wäre die Folge. Um diese Störeinflüsse durch die Sicherungsbox auf die Luftströmung am Auslassbereich zu minimieren, wurde ein 400 mm hoher Abstand zwischen Decke Fassadenmodell und Sicherungsbox in der Vorbereitungsphase eingeplant.



Abbildung 5.5: Bemaßung und Aufbau der Sicherungsbox [mm]

Die gesamte Sicherungsbox, die aus Styrodurplatten mit einer Materialstärke von 40 mm besteht, wurde zusätzlich innen komplett schwarz angestrichen, um einerseits interne Lichtreflektionen durch den Laserstrahl zu vermeiden und andererseits den Fassadenzwischenraum vor ungewollten äußeren Lichteinflüssen zu schützen. Diese Maßnahme trug erheblich zu einer besseren Bildqualität der Foto- und Videoaufzeichnungen bei, da sich die Kontraste und Leuchtkraft der Partikel auf den Aufnahmen enorm erhöht.

#### 5.1.2 Laser und Optik

Die folgende Abbildung 5.6 gibt einen Überblick über die verwendeten Komponenten, die für die Erzeugung des Lichtschnitts im zu vermessenden Fassadenzwischenraum verantwortlich sind. Im Einzelnen kommen dabei ein Laser, ein Rotor, eine Kombination aus Spiegeln und eine Glaszylinderlinse zur Anwendung, deren genauen Funktionen in diesem Unterkapitel erläutert werden sollen.



Abbildung 5.6: a) Laser und Rotor b) Spiegelkombination c) Glaszylinder

In Testversuchen galt es zunächst eine geeignete Lichtquelle und ein damit optimal harmonierendes Tracer Medium, das im Vorfeld eines Experiments in die Strömung eingebracht wird, zu finden. Zur Lichterzeugung wurde ein Laser gewählt, der aufgrund seiner Leistungsstärke und der immens wichtigen Eigenschaft, einen monochromatischen Lichtstrahl erzeugen zu können, hervorragend geeignet ist, die sich im Luftstrom mitbewegenden Tracer Partikel bei völliger Dunkelheit auszuleuchten. Aufgrund der oben genannten Merkmale kann ein Laserstrahl sehr gut an den Schnitt, der im Experiment vermessen werden soll, über Spiegelungen geleitet werden. Durch die Brechung innerhalb einer Glaszylinderlinse wird die Lichtebene aufgespannt. Für die bei Langzeitbelichtung erstellten digitalen Fotoaufnahmen braucht der Laserstrahl zeitlich gesehen nicht beeinflusst zu werden. Dabei übernimmt allein die manuell eingestellte Kamera die optimale Belichtungsdauer, die sich in den hier vorgestellten Versuchen zwischen 2 und 8 Sekunden bewegte. Für die PTV bzw. PIV Auswertung werden jedoch klar definierte Partikelspuren auf einer Bildsequenz benötigt. Daher ist es einerseits notwendig, den Zeitraum zwischen zwei Aufnahmen eindeutig zu kennen, und andererseits zu gewährleisten, dass auf den Bildern möglichst runde Partikelspuren und keine Streaks abgebildet sind. Je nach Art und Sensibilität der Auswertungssoftware erfordert dies einen sehr genauen Umgang mit der gesamten Technik, die viel Erfahrung mit den einzelnen Komponenten benötigt. Im Rahmen dieses Projektes konnten die besten Ergebnisse mit einem gepulsten Laser erreicht werden. Der Versuchsaufbau wurde aus diesem Grund mit der in Abbildung 5.7 abgebildeten rotierenden Scheibe ergänzt. Durch die fünf Schlitze kann das Laserlicht ungehindert den Lichtschnitt erzeugen, während zu den anderen Zeitpunkten Dunkelheit herrscht. Die Scheibe wurde mit einer Frequenz von 5 Hz auf die Videokamera, die mit 25 Hz und einer Belichtungsdauer von 1/50 s filmte, abgestimmt. Betrachtet man nun den Aufnahmevorgang eines einzelnen Bildes der Videokamera, so zeichnet die Kamera ohne Verwendung der Scheibe, also unter konstanter Laserbeleuchtung, während ihrer Belichtungszeit bei entsprechend hohen Geschwindigkeiten eine längliche Partikelspur, den Streak, auf. Bei gepulstem Laserlicht hingegen werden die Partikel während der Belichtungszeit der Kamera nur kurzzeitig angestrahlt und somit ergeben sich die gewünschten punktförmigen Reflektionen.



Abbildung 5.7: Großaufnahme der rotierenden Scheibe

### 5.1.3 Glass-Bubbles als Tracer Partikel

Der oben beschriebene Laser mit dem nachgeschalteten Rotor kann nur im Zusammenspiel mit einem geeigneten Tracer Medium gute Ergebnisse erzielen. Im Vorfeld der Versuchsreihe wurden deswegen unterschiedliche Medien unter Verwendung des Lasers und einer Videokamera bzw. Digitalkamera getestet. Unter einer Auswahl von Rauch, Feinststäuben und Glaskugeln kristallisierten sich Scotchlite<sup>™</sup> Mikro-Glashohlkugeln (Glass-Bubbles) des Typs K1 von 3M<sup>™</sup> als optimales Medium heraus. Die Materialdaten und die Verteilung der Teilchengößen finden sich in folgender Tabelle 5.1 und Abbildung 5.8:

|                    | Durchschnittliche<br>Teilchendichte  |   | Schüttdichte  | Druckfestigkeit  |                             | Aufschwimm-<br>rate                    |  |
|--------------------|--------------------------------------|---|---|------------------|-----------------------------|--|--|
| Produkt-<br>nummer | Nenn-<br>dichte<br>g/cm <sup>3</sup> | Toleranz-<br>bereich<br>g/cm <sup>3</sup> | Toleranzbereich<br>(errechnet)<br>g/cm <sup>3</sup> | Testdruck<br>MPa | Anteil u<br>Glass-B<br>Min. | unzerstörter<br>ubbles in %<br>Typisch | Typische Werte<br>in % des<br>Volumens |
| K1                 | 0,125                                | 0,1 - 0,14                                | 0,05 - 0,10   | 1,7              | 80                          | 90                                     | 96                                     |

 Tabelle 5.1: Physikalische Merkmale von Mikro-Glashohlkugeln [1]



Abbildung 5.8: Verteilung der Teilchengrößen über das Volumen

Diese Tracer Partikel haben den Vorteil, dass sie eine äußerst geringe Dichte besitzen, sich homogen in der Luftströmung verteilen und bei den in diesem Versuch auftretenden Geschwindigkeiten von ca. 0,05 bis 0,3 m/s ein sehr gutes Lichtreflektionsverhalten aufweisen. Es gilt allerdings zu beachten, dass bei einer Verwendung dieser Mikro-Glashohlkugeln die endgültige Luftgeschwindigkeit um den Betrag der Absetzgeschwindigkeit der Partikel zu korrigieren ist, weil die Strömungsgeschwindigkeit indirekt über die Partikelverschiebung in einem vorgegebenen Zeitintervall bestimmt wird und die Richtung im Fassadenzwischenraum der Schwerkraft entgegengesetzt ist. Da für diese Betrachtungen, die in Kapitel 5.2.4.2 genauer ausgeführt sind, die Teilchengrößen und deren -verteilung eine wesentliche Rolle spielen, wurden in einem ergänzenden Versuch die in der Luftströmung im Fassadenzwischenraum aufsteigenden Partikel eingefangen und mit einem Mikroskop vermessen. Als Ergebnis zeigte sich, dass nur die Teilchen mit den Durchmessern 10  $\mu$ m  $\leq$  d  $\leq$  50  $\mu$ m mit einer durchschnittlichen Wandstärke von 0,5  $\mu$ m berücksichtigt werden müssen. Die anderen Teilchengrößen beteiligen sich nicht an der Strömung, sondern werden über die Versuchsdauer heraus gefiltert und setzen sich am Boden ab. Dieser Zusammenhang spiegelt sich in den Gleichungen zur Berechnung der Absetzgeschwindigkeiten wieder, da dort nur die Dichten  $\rho$  der Teilchen mit den genannten Durchmessern d eingehen.



Abbildung 5.9: Mikroskopie der verwendeten Mikro-Glashohlkugeln

## 5.1.4 Foto- und Videoaufnahmen als Grundlage für die PTV Auswertung

Zur Vorbereitung der computergestützten Particle Tracking Velocimetry Auswertung wurden sowohl Foto- als auch Videoaufnahmen der Strömung erstellt. Die Fotos, die mit einer Olympus-Digitalkamera aufgenommen wurden, dienten als langzeitbelichtete Bilder für eine Strömungsübersicht. Auf diesen Bildern sind stationäre Strömungsfelder gut zu identifizieren, siehe auch die Abbildung 4.1 und Abbildung 4.3 rechts, und die wenig turbulenten können gut von den stark verwirbelten Bereichen unterschieden werden. Sie bieten weiterhin eine gute Vergleichsmöglichkeit zu den Geschwindigkeitsvektorenfeldern, die die PTV Analysen liefern, und den CFD-Simulationsergebnissen. Die Videoaufzeichnungen erfolgten mit einem Sony Hi8 CCD-Camcorder und bildeten die Basis für die PTV Berechnungen. Um die Filme für eine computergestützte Berechnung aufzubereiten, wurden diese über eine Schnittstellenkarte in das digitale mpg-Format konvertiert. So konnten sie mit dem QuickTime Player 6 von Apple [3] bearbeitet und die benötigten Einzelbilder bzw. Einzelbildsequenzen gewonnen werden. Für die endgültige Verwertung wurden die Einzelbilder einerseits in das jpg-Format und andererseits in 8-bit Bitmaps umgewandelt.

## 5.1.5 Computergestützte Berechnung der Geschwindigkeitsfelder anhand von PLV-Programmen

Zur Erstellung der Geschwindigkeitsfelder und -profile bzw. der Strömungsübersichten kamen drei verschieden Softwareprogramme zur Anwendung. Die Hauptarbeit wurde mit der Particle Tracking Velocimetry-Software PTVrev1403y Version 6.1 geleistet, die von Prof. Tomomasa Uemura am Department of Industrial Engineering der Kansai Universität in Osaka entwickelt wurde und im folgenden mit dem Begriff PTV-Software abgekürzt wird. Dieses Programm stellt die benötigten Algorithmen zur Verfügung, um aus einer Sequenz von Einzelbildern allen in der Strömung befindlichen Partikeln Verschiebungsvektoren zuzuordnen. Über die Zeitdifferenz zwischen zwei Aufnahmen, die bei den Videofilmen 1/25 Hz = 0.04 s beträgt, lässt sich die Geschwindigkeit der Vektoren in der Ebene ermitteln. Um klar definierte möglichst runde Einzelpartikel zu filmen, kam bei diesen Aufnahmen der Rotor zum Einsatz. Die Grundlage der Berechnungen bilden die 8-bit Bitmap Bilder. Weiterhin benötigt das Programm einige zusätzliche Voreinstellungen, um zuverlässige Aussagen über zusammengehörende Partikel treffen zu können. Dazu gehören z.B. Angaben über Partikelgrößen, Suchradien und Graustufen, um zwischen Hintergrundrauschen des Bildes und den gesuchten Partikeln unterscheiden zu können. Im Vorfeld der Versuchsauswertung wurden zahlreiche Parametervarianten ausgiebig studiert, um eine optimale Wahl dieser Einstellungen für eine zuverlässige Berechnung gewährleisten zu können [9]. Ein exemplarisches Ergebnis dieser Auswertungsmethode findet sich in Abbildung 4.6. Ergänzend wurden einige regionenorientierte Strömungsübersichten unter Anwendung einer PIV Software, die ebenfalls von Prof. Uemura entwickelt wurde, erstellt. Mit diesem Programm konnten aus mehreren Einzelbildsequenzen mittels Kreuzkorrelation Strömungsfelder erzeugt werden, deren beispielhafte Ergebnisse Abbildung 4.5 entnommen werden können.

Zusätzlich zu diesen beiden professionellen Programmen wurde im Rahmen dieser Versuche eine eigene Software in der objektorientierten Programmiersprache JAVA [39] entwickelt, mit der anhand eines Einzelbildes erste Abschätzungen über die Größe der auftretenden Geschwindigkeitsvektoren und deren Verläufe getroffen werden können. Das Programm mit dem Namen PIAP – Particle Image Analysis Project – benötigt für die Auswertung lediglich ein einzelnes Bild, das entweder aus den aufgenommenen Videofilmen oder einem Digitalfoto gewonnen werden kann. Im Gegensatz zu den anderen Programmen ist es allerdings wichtig, dass auf dem auszuwertenden Bild das Partikel eine eindeutige Spur, einen Streak hinterlassen hat, da die Auswertung visuell an dem aufgezeichneten Streak geschieht. Es konnte in zahlreichen Vergleichen zwischen PIAP und der PTV-Software gezeigt werden, dass PIAP sehr gute erste Näherungen der Strömungsgeschwindigkeiten und -felder liefern kann [8], [30], was in Kapitel 5.3 an einzelnen Beispielen verdeutlicht werden soll. Die Handhabung dieser Software ist weniger komplex, da der Benutzer über die Länge und Position der Partikelverschiebungen entscheidet und die implementierten Algorithmen die Erstellung der Geschwindigkeitsvektoren übernehmen. Die Zeitdifferenz für die Berechnung der Geschwindigkeit ist bei diesem Programm allerdings nicht der Abstand zwischen zwei Aufnahmen, sondern die Belichtungszeit des Bildes selbst. Bei den Videofilmen, die bei dieser Variante ohne Verwendung der rotierenden Scheibe aufgenommen wurden, beträgt diese 1/50 s = 0.02 s. Trotz des Vorteils, nur ein Bild für die Auswertung benutzen zu müssen, ist es dennoch wichtig, die unmittelbar anschließende Bildsequenz zu verfolgen. Es ist sicherzustellen, dass ein untersuchtes Partikel sowohl auf der vorherigen als auch auf der folgenden Aufzeichnung zu sehen ist, damit gewährleistet ist, dass sich das Partikel während des gesamten Zeitraums in der Laserebene befand und diese nicht nur durchkreuzte. Dreidimensionale Effekte können bei dieser Auswertungsmethode aufgrund des ebenen Lichtschnittes nicht erfasst werden.



Abbildung 5.10: PIAP – Particle Image Analysis Project

#### 5.1.6 Temperaturerzeugung und Temperaturmessung

Die Temperaturgradienten innerhalb des Versuchsmodells bilden den antreibenden Motor für die vorliegende Auftriebsströmung. Dieser Prozess der Konvektionsströmung wurde durch eine oder mehrere Heizmatten, die am Boden des Acrylglasmodells eingesetzt wurden, realisiert. Diese Matten, deren Anzahl je nach untersuchtem Fassadenabstand zwischen eins und vier entsprechend einer Spaltbreite zwischen 5 und 20 cm gewählt wurde, wurden auf dem Boden des Fassadenmodells verklebt und mit einem Trennstelltrafo betrieben. Die Messung der Temperatur der Heizmatten erfolgte indirekt über die in das Fassadenmodell eingebauten Temperaturmessfühler. Durch Aufheizen der Matten wurde die auftriebsinduzierte Strömung in Gang gesetzt, und nach Erreichen stationärer Temperaturverhältnisse in dem Versuchsmodell konnte eine komplette Messung vorgenommen werden. Die Aufzeichnung der Temperaturen innerhalb des Fassadenmodells bzw. der Sicherungsbox erfolgte dabei anhand von acht Temperaturmessfühlern, deren Lage und Verteilung in Abbildung 5.12 dargestellt ist. Die gelieferten Messdaten konnten an einem Computer überwacht und protokolliert werden. Mit Hilfe eines externen Temperaturmessers der Firma Testo, Testo 925 mit Fühlertyp K, konnten ergänzende Kontrollmessungen durchgeführt werden.

Die einzelnen Temperaturmessfühler, die im Weiteren auch als Thermoelemente bezeichnet bzw. mit TF abgekürzt werden, setzen sich jeweils aus zwei ummantelten Drähten aus unterschiedlichen Materialien, z.B. Chromel und Alumel, zusammen. An dem Ende, an dem die Temperatur bestimmt werden soll, sind diese Drähte miteinander verschweisst und werden aufgrund der verwendeten Materialart als Typ K bezeichnet. Sie weisen große Vorteile auf, da sie äußerst robust sind, für eine hohe Temperaturbandbreite geeignet sind und an eine Vielzahl von Umweltbedingungen angepasst werden können. Treten nun Temperaturänderungen während des Versuchs auf, werden an dem Verbindungspunkt thermoelektrische Spannungen erzeugt, die wiederum über eine Schnittstelle in digitale Werte umgewandelt werden. Ein Computer kann die registrierten Spannungsänderungen der einzelnen Fühler aufzeichnen und diese in die vorliegenden Temperaturen umrechnen. Die Temperaturmessungen konnten mit Hilfe eines Zusatzprogramms, das eigens für diese Versuchsreihe in der Programmiersprache C implementiert wurde, in bestimmten zeitlichen Intervallen protokolliert werden und standen somit für eine weitere Auswertung zur Verfügung. Der Messbereich und die Fehlertoleranzen der Thermoelemente, der PC-Steckkarte und der Software sind in Tabelle 5.2 dargestellt.

| Temperaturfühler  | Typ K, Materialien: Chromel/Alumel                            |  |  |
|---|---|--|--|
| Temperaturbereich   | -200°C bis 1250°C   |  |  |
| Fehlertoleranzen der Messfühler                                 | 2,2°C oder 0,75% über 0°C<br>2,2°C oder 2,00% unter 0°C       |  |  |
| Fehlertoleranzen der Steckkarte<br>(bezogen auf Typ K Elemente) | 0,2°C über -100°C<br>0,5°C unter -100°C<br>2,0°C unter -200°C |  |  |
| Fehlertoleranzen der Software<br>(bezogen auf Typ K Elemente)   | 0,1°C über 200°C<br>0,5°C unter 200°C<br>3,0°C unter -200 °C  |  |  |

 Tabelle 5.2: Technische Daten der Temperaturmessfühler und der Software laut Herstellerangaben [20]

Für einen erfolgreichen Einsatz der Thermoelemente in den Experimenten ist eine geeignete Kalibrierung erforderlich, um sie den realen Lufttemperaturen anzupassen. Hierzu wurde Wasser in mehreren Messreihen auf unterschiedliche Temperaturlevel erhitzt und über einen Vergleich der Messwerte die Thermoelemente auf den oben angesprochenen externen Temperaturmesser abgestimmt. Die aufgezeichneten Temperaturen konnten somit abgeglichen und die Differenz der Thermoelemente zu der realen Wassertemperatur berechnet werden. Als Ergebnis erhält man beispielhaft das für den TF1 in Abbildung 5.11 dargestellte Diagramm. Es ist deutlich erkennbar, dass im Bereich von 20 °C und 80 °C ein linearer Zusammenhang zwischen den Temperaturen der Messfühler und denen des externen Messgerätes besteht.



Abbildung 5.11: Kalibrierung des Temperaturfühlers TF1
Da dieser Messbereich die für die Experimente prognostizierten Temperaturen abdeckt, lässt sich aus der Summe der einzelnen Messdaten ein Mittelwert bestimmen, mit dem die Temperaturdaten der TF während eines Experiments kalibriert werden. Die exakten Korrekturwerte eines jeden Fühlers sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

|                    | TF0   | TF1   | TF2   | TF3   | TF4   | TF5   | TF6   | TF7   |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Korrekturwert [°C] | -3,64 | -5,76 | -3,93 | -5,03 | -4,83 | -5,61 | -4,78 | -9,02 |

Tabelle 5.3: Korrekturwerte der Messfühler 0-7

Die Lage und Verteilung der Thermoelemente im Versuchsmodell ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Die Messspitze der Fühler 2 - 7 endet für jede Zwischenraumbreite d in der Mitte des Fassadenspalts d/2. Fühler 1 ist in allen Versuchen mittig auf der vorderen Heizmatte angebracht, um die aufgebrachte Temperatur durch die Heizmatten aufzuzeichnen und zu kontrollieren. Um einen Überblick über den Unterschied der Temperatur in der Sicherungsbox und im Versuchsmodell zu bekommen, wurde TF0 ca. 10 cm vor der unteren Einlassöffnung des Fassadenmodells in der Sicherungsbox montiert.



Abbildung 5.12: Lage und Verteilung der Temperaturfühler – Rückansicht und Schnitt

## Ergänzender Versuch mit einer Thermokamera

Eine weitere Kontrolle des TF1 hinsichtlich einer exakten Bestimmung der Heizmattentemperatur fand im Anschluss an die Versuchsreihe anhand eines Vergleichs der Messwerte mit den Ergebnisbildern einer Thermokamera statt. Schon im Vorfeld der Versuche traten Unsicherheiten auf, ob die Temperatur, die der TF1 an der Heizmatte registrieren würde, der realen Oberflächentemperatur der Heizmatte entsprechen würde. Die Problematik kann dadurch erklärt werden, dass das Thermoelement nur an der äußersten Spitze mit der Oberfläche der Heizmatte Kontakt hat und so zusätzlich der kühleren Luftströmung, die über die Matte streicht, ausgesetzt ist. Folglich wurden die realen Temperaturen von den aufgezeichneten Messdaten dieses Fühlers unterschätzt. Aus diesem Grund wurden die Oberflächen der Heizmatten in einem separaten Versuchsaufbau mit der Thermokamera AVIO TVS 600 Neo Thermo fotografiert und die erzielten Ergebnisse mit den Messungen des TF1 verglichen. Eine zweite wichtige Fragestellung, die mit Hilfe der Aufnahmen geklärt werden konnte, ist, in wie fern die Temperaturverteilung über der gesamten Matte variiert, d.h. ob die Matte über ihre Länge an Heizleistung verliert. Wie in Abbildung 5.13 erkennbar ist, zeigt die Aufnahme der Heizmatte, dass diese über die gesamte Fläche eine nahezu einheitliche Temperatur von ca. T = 83,5 °C aufweist. Der TF1 hatte zum gleichen Zeitpunkt eine Temperatur von T = 62.5 °C angezeigt. Daraus folgt, dass die in den Versuchen ermittelten Messdaten des TF1 in diesem Temperaturbereich um +21,0 °C nach oben korrigiert werden müssen. Bei niedrigeren Temperaturbereichen dürfte der Korrekturwert allerdings nicht ganz so hoch sein. Aus diesem Grund wurden die Zwischenwerte linear interpoliert und zu den Messdaten des TF1 addiert. Dies spielt bei den Vergleichen der Experimente mit den CFD-Simulationen eine wichtige Rolle und wird dort auch besonders berücksichtigt. Als ein weiteres bedeutendes Ergebnis der Aufnahmen mit der Thermokamera konnte festgestellt werden, dass die vier Heizmatten untereinander keinerlei Temperaturabweichungen aufwiesen, und somit die Messung der Temperatur der vorderen Heizmatte durch den TF1 als repräsentativ für den gesamten Wärmeeintrag angesehen werden kann.



Abbildung 5.13: Thermokameraaufnahme der Heizmatte und Ergebnisse der Temperaturprofile in den eingezeichneten Schnitten

# 5.2 Ablauf der optischen Strömungsmessungen

#### 5.2.1 Phase I: Zusammenbau der Elemente

Die gesamte Versuchsreihe besteht aus acht Einzelexperimenten, die sich durch die Breite des Fassadenzwischenraums und der durch die Heizmatten eingetragenen Temperaturen unterscheiden. Aufgrund der geometrischen Abmessungen der Heizmatten, die jeweils eine Breite von 50 mm haben, können vier Abstände der Rückwand gewählt werden. Es ergeben sich die Varianten d5, d10, d15 und d20, wobei die Zahlen die absolute Breite des Fassadenbodens an der unteren Einlassöffnung bezeichnen. Die reine Nettodurchflussbreite, die der im Spalt aufwärtsgerichteten Strömung zur Verfügung steht, ist, wie bereits in Kapitel 5.1.1 beschrieben wurde, aufgrund der Abmessungen der Frontscheibe 6 mm geringer. Pro Variante werden zwei Versuche mit unterschiedlichen Heizmattentemperaturen gefahren, um die Auswirkung des Wärmeeintrags auf das Strömungsverhalten zu beobachten.

Während der Versuchsvorbereitung wird zunächst das Fassadenmodell durch den Einbau der erforderlichen Zahl an Heizmatten und das Einsetzen der Rückwand auf die gewünschte Position komplett montiert. Im Anschluss kann das Modell in die Sicherungsbox eingesetzt werden, wobei sorgfältig darauf zu achten ist, dass keine Luftspalte mehr vorhanden sind, die einen Luftaustausch zwischen Versuchsmodell und Außenluft zulassen. An der Rückwand können nun die Positionen für ein Einbringen der Thermoelemente festgelegt, die Fühler in die exakte horizontale Lage gebracht und die Temperaturaufzeichnung vorbereitet werden. Mögliche spiegelnde und lichtreflektierende Acrylglasflächen werden mit schwarzer Pappe abgeklebt. In dem folgenden Schritt wird die für die Particle Tracking Velocimetry benötigte Messtechnik bereitgestellt. Dies beinhaltet die feinabgestimmte Positionierung des Laserschnitts und den Aufbau der Kameras. Für jeden Versuch soll an neun Positionen des Fassadenmodells sowohl eine Strömungsübersicht als auch ein Geschwindigkeitsprofil erstellt werden, um den Volumenstrom berechnen zu können. Die Positionen sind in Abbildung 5.14 mit a<sub>11</sub> bis a<sub>33</sub> gekennzeichnet. An jeder dieser Stellen wird ein Laserschnitt gelegt, und senkrecht dazu werden die Aufnahmen durch die Video- bzw. digitale Fotokamera erstellt. Dadurch können zum einen Aussagen zu den auftretenden Strömungsfeldern und Volumenströmen im Ein- und Auslassbereich sowie in Spaltmitte getroffen werden. Zum anderen

kann durch Messungen nahe der Symmetrieachse, im Viertels- und Achtelspunkt beobachtet werden, wie sich die Strömungsfelder über die Modelltiefe entwickeln.



Abbildung 5.14: links: Endzustand des in die Box eingeschobenen Acrylglasmodells rechts: Positionen a<sub>11</sub> ... a<sub>33</sub> für die Laserschnitte (Rückansicht)

Jedes der acht Einzelexperimente beginnt durch das Aufbringen einer konstanten Spannung an den Heizmatten, dass den Aufheizprozess in Gang setzt. Es wird für jeden Fassadenabstand ein niedrigerer und ein höherer Zieltemperaturbereich angesteuert. Materialbedingt sind für Acrylglas Temperaturen bis maximal 80 - 90 °C zulässig bevor plastische Verformungen auftreten. Dies definiert allerdings nicht nur die Randbedingungen für den Versuch, sondern auch die Übertragbarkeit auf ein reales Fassadenelement wie im folgenden Kapitel gezeigt werden soll.

### 5.2.1.1 Einfluss der Ähnlichkeitstheorie

Die kennzeichnende Größe für Konvektionsströmungen ist die Grashof bzw. Rayleigh-Zahl. Zieht man die in Kapitel 3.2.2 angegebene Gleichung für die folgenden Ähnlichkeitsbetrachtungen heran, so können mit den geometrischen Abmessungen und physikalischen Daten einige Überlegungen zur Rayleigh-Zahl vorgenommen werden. Als typische Länge  $l_M$ , wobei der Index M im weiteren Verlauf die Modellausführung und der Index R die reale Umsetzung kennzeichnen soll, wird dabei der vertikale Abstand zwischen der beheizten Bodenplatte und der unbeheizten Deckenplatte des Fassadenmodells angesetzt. Zur Berechnung der zugehörigen Rayleigh-Zahl Ra<sub>M</sub> kann die Temperaturdifferenz mit  $\Delta T_M = 60$  °C abgeschätzt werden.

$$Ra_{M} = \frac{g \cdot \beta \cdot l_{M}^{3} \cdot \Delta T_{M}}{\upsilon \cdot \kappa} = \frac{9,81 \frac{m}{s^{2}} \cdot \frac{1}{293 K} \cdot 0,688^{3} m^{3} \cdot 60 K}{15,11 \cdot 10^{-6} \frac{m^{2}}{s} \cdot 21,4 \cdot 10^{-6} \frac{m^{2}}{s}} = 2,023 \cdot 10^{9}$$
(5.1)

Wenn andererseits das Maßstabsverhältnis von  $l_M/l_R = 1/5$  berücksichtigt wird, ergibt sich die durch den Versuch abgebildete Temperaturdifferenz der realen Ausführung  $\Delta T_R$  zu:

$$Ra_{R} = \frac{g \cdot \beta \cdot l_{R}^{3} \cdot \Delta T_{R}}{\upsilon \cdot \kappa} = \frac{9.81 \frac{m}{s^{2}} \cdot \frac{1}{293 \text{ K}} \cdot 3.44^{3} \text{ m}^{3} \cdot \Delta T_{R}}{15.11 \cdot 10^{-6} \frac{m^{2}}{s} \cdot 21.4 \cdot 10^{-6} \frac{m^{2}}{s}} = 2.023 \cdot 10^{9}$$
(5.2)  
$$\Leftrightarrow \Delta T_{R} = 0.48 \text{ K}$$

Der somit nur sehr geringe im Modell abgebildete Temperaturunterschied von  $\Delta T_R = 0,48$  K verdeutlicht einerseits, dass bei auftriebsinduzierten Versuchen, bei denen das Fluid Luft eingesetzt wird, das Maßstabsverhältnis möglichst nahe zu 1 gewählt werden sollte, da ansonsten sehr hohe Temperaturgradienten erforderlich sind, um reale Situationen abzubilden. Andererseits belegt es die Notwendigkeit, CFD-Simulationsergebnisse sowie deren Modelle und Annahmen durch Experimente zu validieren, da in numerischen Berechnungen sowohl reale Maßstäbe als auch Temperaturbedingungen parametrisiert werden können. Aus experimenteller Sicht besteht die Alternative, auf ein anderes Fluid, z.B. Wasser auszuweichen. Da sich die Stoffwerte des Wassers von denen der Luft unterscheiden, ist es mit diesem Medium möglich, in kleinerem Maßstab Versuche durchzuführen, die zusätzlich zu den geometrischen auch die physikalischen Ähnlichkeiten berücksichtigen können. Als Beispiel würde sich unter Verwendung von Wasser bei einer realen typischen Länge  $I_R = 3,44$  m und einer abgeschätzten Temperaturdifferenz  $\Delta T_R = 5$  K für eine im Modell einstellbare Temperaturdifferenz von  $\Delta T_M = 60$  K folgende typische Länge im Modell  $I_M$  ergeben:

$$Ra_{R} = \frac{g \cdot \beta \cdot l_{R}^{3} \cdot \Delta T_{R}}{\upsilon \cdot \kappa} = \frac{9.81 \frac{m}{s^{2}} \cdot \frac{1}{293 \text{ K}} \cdot 3.44^{3} \text{ m}^{3} \cdot 5 \text{ K}}{15,11 \cdot 10^{-6} \frac{m^{2}}{s} \cdot 21.4 \cdot 10^{-6} \frac{m^{2}}{s}} = 2,108 \cdot 10^{10}$$

$$Ra_{M} = \frac{g \cdot \beta \cdot l_{M}^{3} \cdot \Delta T_{M}}{\upsilon \cdot \kappa} = \frac{9.81 \frac{m}{s^{2}} \cdot 2,067 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1}{K} \cdot l_{M}^{3} \cdot 60 \text{ K}}{1,004 \cdot 10^{-6} \frac{m^{2}}{s} \cdot 0.143 \cdot 10^{-6} \frac{m^{2}}{s}} = 2,108 \cdot 10^{10} \quad (5.3)$$

$$\Leftrightarrow l_{M} = 0.30 \text{ cm}$$

Vergleichsweise errechnet sich für das Fluid Luft die typische Länge l<sub>M</sub> zu 1,50 m und zieht konsequenterweise größere Abmessungen des gesamten Modellaufbaus nach sich. Es ist deutlich erkennbar, dass die Maßstäbe in Wasser hingegen wesentlich kleiner gewählt werden können. Zu bedenken ist auch, dass die Messtechnik ebenfalls auf die Modellgröße abgestimmt werden muss und die Erzeugung eines Laserschnittes bei größer werdenden Abmessungen schwieriger wird. Ergänzend kann an dieser Stelle weiterhin angeführt werden, dass die verwendeten Rayleigh-Zahlen mit über 109 bereits in einem sehr hohen Bereich liegen und des Weiteren von der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  nur linear beeinflusst werden. Für die an dieser Stelle beschriebenen Experimente kann daraus gefolgert werden, dass der höhere Temperaturzielwert nahe der 80 °C Grenze liegen sollte, um einerseits die oben erwähnten plastischen Verformungen zu vermeiden, andererseits aber größtmögliche Rayleigh-Zahlen im Sinne einer weitreichenden physikalischen Ähnlichkeit zu erzeugen. Im Rahmen dieses Projekts wurde außerdem der Schwerpunkt auf die Validierung der CFD-Simulationen unter Verwendung von Luft gelegt und aus diesem Grund dieses Medium auch im Versuch beibehalten. Die Maßstabseffekte verhalten sich zwar ungünstiger bzw. die physikalische Übertragung ist nur bedingt in die realen Gegebenheiten möglich, aber es können die Materialeigenschaften des realen Fluids auch im Versuch beibehalten und somit gleichartige Phänomene beobachtet werden. Dies ist ebenfalls vorteilhaft für eine sinnvolle Validierung von NAGARE und FLUENT. Sind die Annahmen und Modelle der numerischen Programme mit den experimentellen Ergebnissen abgestimmt, können die Vorteile der CFD im Rahmen der Ähnlichkeitsbetrachtungen ausgenutzt werden.

#### 5.2.2 Phase II: Aufheizen des Modells und Vorbereiten der Messungen

Während der Aufheizphase des Versuchskörpers setzt sich die Konvektionsströmung innerhalb der Fassade in Gang. Durch die untere Öffnung wird die kühlere Luft aus der großen Sicherungsbox eingesaugt und durch die Heizmatte erwärmt. Sie steigt innerhalb des Fassadenspalts auf und tritt durch die obere Auslassöffnung wieder aus. Die Temperaturen im Fassadenmodell werden über die Zeit beobachtet und erst wenn sich nur noch sehr geringe Veränderungen der einzelnen aufgezeichneten Temperaturen zeigen, können die Messungen beginnen. Ein typischer geglätteter Temperaturverlauf während eines kompletten Experiments ist in Abbildung 5.15 dargestellt. In dieser Abbildung findet sich zusätzlich ein charakteristischer Ausschnitt eines kurzen Zeitraums der Temperaturaufzeichnungen, der sehr gut die Schwankungsamplitude eines einzelnen Fühlers wiedergibt. Die endgültigen Verläufe gehen durch eine Glättung dieser Amplituden hervor, um den Einfluss lokaler Extremstellen in der weiteren Auswertung zu minimieren. Der Zeitpunkt, ab dem mit den optischen Strömungsmessungen begonnen werden kann, ist nach ca. 2,5 Stunden erreicht. Die Glashohlkugeln können nun der Strömung beigefügt werden, um eine gleichmäßige Vermischung mit der Luft vor Beginn der Aufnahmen zu gewährleisten.



Abbildung 5.15: Verlauf der Temperaturen während eines Experiments

#### 5.2.3 Phase III: Aufzeichnen des Bildmaterials

Während der gesamten optischen Strömungsmessung werden die einzelnen Messstellen a11 bis a33 in zwei Durchläufen nacheinander abgefahren und an jeder Stelle die folgenden Teilschritte durchgeführt. Zunächst sind der Laserschnitt und die Videokamera auf den Bereich des Fassadenmodells, der vermessen werden soll, auszurichten. Die Aufnahmen des ersten Versuchslaufs sollen für eine Auswertung mit der PTV-Software herangezogen werden. Aus diesem Grund ist für hochwertiges Basismaterial die Unterbrechung des Laserstrahls mit dem Videobild zu synchronisieren, um das Auftreten von Streaks auf den Einzelbildern zu vermeiden. Die Videosequenzen des zweiten Durchlaufs hingegen sollen in PIAP weiter verarbeitet werden. Deswegen findet bei diesen Aufnahmen keine Unterbrechung des Laserstrahls statt, da bei dieser Methode die Länge des Partikelstreaks auf einem Einzelbild vermessen werden soll. An jeder der neun Messpositionen entstanden somit pro Experiment zwei Filme. Diesen Filmen konnten nach Abschluss der Messungen aussagekräftige Bildsequenzen entnommen und mit der entsprechenden Computersoftware weiter bearbeitet werden. Die Vorgehensweise zur Erstellung der Geschwindigkeitsprofile und Strömungsübersichten ist Inhalt des anschließenden Kapitels.

#### 5.2.4 Phase IV: Auswertung der Versuchsergebnisse

Bei der Versuchsauswertung werden verschiedene Aspekte der Experimente genauer untersucht und anhand von Tabellen und Abbildungen zusammengestellt, so dass eine Verknüpfung der Teilergebnisse möglich ist. Hierbei ist besonders der gegenseitigen Wechselwirkung von Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten Beachtung zu schenken. Als wesentliche Ergebnisse wird in diesem Kapitel die Erstellung der Geschwindigkeitsprofile, die ausschnittsweise Darstellung der Strömungssituation innerhalb des Modells und die Verarbeitung der Temperaturdaten diskutiert. Die Geschwindigkeitsprofile, die aus den Film- und Fotoaufnahmen der Partikelspuren in den betrachteten Laserebenen gewonnen werden können, zählen zu den wichtigsten Ergebnissen dieser Versuchsreihe. Anhand ihrer ist nicht nur die Bestimmung der vorhandenen Volumenströme in Abhängigkeit der angelegten Temperaturgradienten möglich, sie können auch direkt zum Vergleich mit den Resultaten der CFD-Simulationsberechnungen herangezogen werden. Diese Validierung von NAGARE und FLUENT auf Basis der Versuchsergebnisse wird ausführlich in Kapitel 6 beschrieben.

# 5.2.4.1 Erstellung der Einzelbildsequenzen und softwarebasierte Berechnung der Partikelgeschwindigkeiten

Ausgangspunkt für den Auswertungsprozess sind die während der Versuche entstandenen Videofilmaufnahmen. Für jedes der acht Experimente konnten entsprechend der zur Anwendung kommenden Software PTVrev1403y Version 6.1 oder PIAP aussagekräftige Einzelbildsequenzen aus den Filmen gewonnen werden, die die vorherrschende Strömung in den neun Schnitten aik repräsentieren. Da das Strömungsverhalten vor allem bei den größeren Fassadenabständen d10, d15 und d20 als instationär angesehen werden muss, ist der sorgfältigen Auswahl der Bildsequenzen große Beachtung zu schenken, damit die erstellten Strömungs- und Geschwindigkeitsfelder repräsentativ sind. Diese Sequenzen können daraufhin computergestützt ausgewertet werden und liefern zum einen Ergebnisbilder, in denen die berechneten Verschiebungs- bzw. Geschwindigkeitsvektoren eingetragen sind, und zum anderen je eine ASCII-Datei, in denen die quantitativen Werte, u.a. Positionen und Größen erkannter Partikel, Weglängen sowie Maßstabsverhältnisse verzeichnet sind. Als Maßstabsverhältnis M wird der Faktor bezeichnet, der benötigt wird, um die auf den Bildern in Pixeln gemessenen Verschiebungen in die Originalgröße umrechnen zu können. Ein typisches Ergebnisbild zeigt Abbildung 5.16, das mit PIAP erzeugt wurde und beispielhaft die Geschwindigkeitsvektoren in Spaltmitte wiedergibt. Um die Ergebnisse eindeutig den Schnitten, den angelegten Temperaturgradienten und den Fassadenabständen zuordnen zu können, wird folgende Benennung definiert, die im weiteren Verlauf der Arbeit konsequent verwendet wird. Der Fassadenabstand wird wie oben beschrieben mit d5 bis d20 angegeben, der betrachtete Schnitt in der Matrixschreibweise  $a_{jk}$  mit j,k = 1..3,1..3 nach Abbildung 5.14 rechts und die Temperatur mit (i) bzw. (ii) für die niedrigere bzw. höhere angesteuerte Temperaturdifferenz. Die exakten Angaben zu den Temperaturdifferenzen sind tabellarisch geordnet bei jedem Geschwindigkeitsprofil aufgeführt. Für die Auswertung und Darstellung der Geschwindigkeitsprofile werden die ASCII-Dateien, die die kompletten Informationen über die Positionen der einzelnen Partikel und deren zugehörigen Geschwindigkeiten zu einem bestimmten Zeitpunkt enthalten, in die Tabellenkalkulation Excel von Microsoft eingelesen, so dass als Ergebnis dieses ersten Schrittes die gemessenen Rohdaten der Bildsequenzen einer weiteren Bearbeitung zur Verfügung stehen.



Abbildung 5.16: PIAP – Strömung in der Mitte des Fassadenspaltes d5-a<sub>21</sub>(ii)

# 5.2.4.2 Einfluss der Gravitation und Berechnung der gewichteten Absetzgeschwindigkeit eines Partikels

Aufgrund der indirekten Geschwindigkeitsmessung über die Strecken, die von den Partikeln in einer vorgegebenen Zeitdifferenz zurückgelegt werden, sind physikalische Effekte zu berücksichtigen, um auf das korrekte Strömungsfeld schließen zu können. Da es sich um eine auftriebsinduzierte Strömung handelt, ist dem Einfluss der Erdgravitation g auf die Glashohlkugeln, die eine höhere Dichte als die umgebende Luft besitzen, besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Es ist nur logisch, dass die Gravitation vor allem im senkrechten Fassadenspalt, in dem die erwärmte Luft vertikal aufsteigt, die schwereren Glashohlkugeln gegenüber der Luft abbremst. Dieser Geschwindigkeitsverlust ist von Stokes untersucht und beschrieben worden und kann über folgende Gleichungen für kugelförmige Partikel in Luft bei 20 °C korrigiert werden [19], [32]:

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{g} \cdot \boldsymbol{\rho}_{\mathrm{p}} \cdot \mathbf{d}_{\mathrm{p}}^{2} \cdot \mathbf{C}}{18 \cdot \boldsymbol{\eta}}$$
(5.4)

mit:

v Absetzgeschwindigkeit [m/s]
 ρ<sub>p</sub> Dichte des Partikels [kg/m<sup>3</sup>]

- d<sub>p</sub> Durchmesser des Partikels [m]
- C Schlupfkorrektur [-] entsprechend folgender Gleichung:

$$C = 1 + 1,246 \cdot \frac{2 \cdot \lambda}{d_{p} \cdot P} + 0,42 \cdot \frac{2 \cdot \lambda}{d_{p} \cdot P} \cdot e^{-0.87 \cdot \frac{2 \cdot \lambda}{d_{p} \cdot P}}$$
(5.5)  
mit:  $\lambda = 0,653 \cdot 10^{-7} \text{ m}$   
 $P$  Luftdruck 1 atm = 101325 kg/(m·s<sup>2</sup>)

Unter Beachtung der Volumenverteilung der Glashohlkugeln nach Abbildung 5.8 und den Ergebnissen aus dem Vorversuch nach Kapitel 5.1.3, in dem die auch nur tatsächlich an der Strömung beteiligten Partikeldurchmesser bestimmt wurden, lässt sich eine durchschnittliche Absetzgeschwindigkeit  $v_{gew}$  berechnen. Dabei werden die Gleichungen 5.4 und 5.5 in der folgenden Tabelle 5.4 ausgewertet. Die Dichte von Glas wird mit 2500 kg/m<sup>3</sup> und die von Luft mit 1,205 kg/m<sup>3</sup> berücksichtigt. Unter Annahme der gemessenen typischen Wandstärke einer Glashohlkugel von 0,5 µm, die für die Berechnung der Dichte eines Partikels  $\rho_p$  von Bedeutung ist, ergibt sich eine gewichtete Absetzgeschwindigkeit  $v_{gew} = 0,00643$  m/s = 6,43 mm/s, mit der die Partikelgeschwindigkeit veiten zu korrigieren sind.

| Durchmesser<br>d <sub>p</sub> | Dichte $\rho_p$      | Absetzgeschw. v        | Vol%  | Partikelzahl P<br>pro m <sup>3</sup> | $P \cdot v$             | Gewichtete<br>Absetzgeschw. |
|-------------------------------|----------------------|------------------------|-------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| [µm]                          | [kg/m <sup>3</sup> ] | [10 <sup>-2</sup> m/s] | [-]   | [10 <sup>12</sup> ]                  | $[10^{10} \text{ m/s}]$ | [10 <sup>-2</sup> m/s]      |
| 10-20                         | 357,6                | 0,432                  | 3,33  | 7,950                                | 3,433                   |                             |
| 20-30                         | 242,8                | 0,658                  | 3,33  | 2,355                                | 1,550                   |                             |
| 30-40                         | 184,0                | 0,885                  | 11,43 | 3,411                                | 3,019                   |                             |
| 40-50                         | 148,2                | 1,113                  | 11,43 | 1,746                                | 1,943                   |                             |
| Σ                             |                      |                        |       | 15,463                               | 9,945                   | 0,643                       |

Tabelle 5.4: Berechnung der gewichteten Absetzgeschwindigkeit vgew

Wie der Tabelle entnommen werden kann, beeinflussen mehrere Faktoren die Berechnung von vgew. Zum einen sinkt die Dichte pp eines einzelnen Partikels mit zunehmendem Durchmesser d<sub>p</sub> aufgrund des prozentual geringeren Glasvolumenanteils am Gesamtvolumen einer Glashohlkugel, zum anderen steigt aber die Absetzgeschwindigkeit mit zunehmendem Durchmesser quadratisch an. Des Weiteren gilt es zu beachten, dass die Partikel wie in Abbildung 5.8 dargestellt nicht homogen in 1 m3 der Gesamtmischung verteilt sind und somit auch auf den Bildsequenzen ungleichmäßig auftreten sollten. Aus diesem Grund wird die angenommene durchschnittliche Sinkgeschwindigkeit eines Partikels über die Teilchenanzahl je Durchmesser und ihrer zugehörigen Geschwindigkeit gewichtet, um einen guten Schätzwert für die in den Messdaten nicht enthaltene Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Partikeln und der Luftströmung zu erhalten. Für die drei Bereiche a<sub>1k</sub>, a<sub>2k</sub> und a<sub>3k</sub> bedeutet dies konkret, dass im senkrechten Fassadenspalt a2k die gesamte Sinkgeschwindigkeit vgew zu den gemessenen Partikelgeschwindigkeiten zu addieren ist. Im Auslassbereich a1k ist vgew noch mit den Winkelfunktionen auf die Ausströmrichtung, die aus den Strömungsbildern jedes Experiments einzeln ablesbar ist, umzurechnen und dementsprechend geringer anzusetzen.



Abbildung 5.17: Umrechnung von  $v_{gew}$  auf den Winkel  $\alpha$ , modifiziert nach [30]

Im Schnitt des Einlassbereichs  $a_{3k}$  kann aufgrund der hier vorliegenden horizontalen Vektoren davon ausgegangen werden, dass die gemessenen Geschwindigkeiten der Partikel sehr gut mit denen der Luftströmung übereinstimmen und keine weitere Erhöhung erforderlich ist. Aus diesem Grund sind die Volumenströme, die im Eingangsbereich ermittelt werden, auch die zuverlässigsten und bieten die präzisesten Angaben über die auftretenden Wertebereiche. Ergebnis dieser Überlegungen sind also nun die korrigierten Geschwindigkeitsvektoren eines jeden Partikels, deren Beträge den auftretenden Luftgeschwindigkeiten entsprechen.

# 5.2.4.3 Erzeugung der Geschwindigkeitsprofile mittels Regressionsanalyse und Splineapproximation

Für die Erstellung der Geschwindigkeitsprofile wird jedes der acht Experimente sowohl für die niedrigere als auch für die höhere Temperaturdifferenz einzeln betrachtet. Für jede der neun Kamerapositionen a<sub>11</sub> bis a<sub>33</sub> können die korrigierten Partikelgeschwindigkeiten in einem separaten Diagramm zusammengefasst werden. Da diese Punktmengen sämtliche Vektoren eines Bereichs enthalten, also auch solche, die für den betrachteten Schnitt ohne Bedeutung sind, werden die relevanten Geschwindigkeitsvektoren selektiert. Dies kann nur über ein genaues Beobachten der strömenden Glashohlkugeln in den Filmsequenzen geschehen. Partikel, die die Laserebene in der Normalenrichtung schneiden oder Partikel, die nicht eindeutig zugeordnet werden können, können auf diese Weise identifiziert werden und werden bei der Erstellung der Geschwindigkeitsprofile nicht berücksichtigt. Somit ergibt sich als Ergebnis eine zuverlässige Punkteschar, die die Geschwindigkeiten der einzelnen Partikel im Schnitt a<sub>jk</sub>, beschreibt. Über statistische Methoden und dem Verfahren der Splineapproximation können daraus die Profile gewonnen werden. In Abbildung 5.18 werden die wesentlichen Teilschritte dieser Vorgehensweise zur Erzeugung eines endgültigen Geschwindigkeitsprofils verdeutlicht.



**Abbildung 5.18:** Geschwindigkeitsprofil am Einlass d10-a<sub>31</sub>(i)

In einem ersten Schritt wird die Punkteschar in Excel einer Regressionsanalyse unterzogen, dessen Ergebnis sich grafisch als ein Regressionspolynom darstellen lässt. Der grafische Funktionsverlauf dieses Polynoms ist dabei exakt, Probleme tauchen aber auf, wenn diese Funktion von Excel formelmäßig erfasst werden soll. Da dies in diesem Programm nur mit einem Polynom maximal 6. Grades möglich ist und sich bei den untersuchten Fällen aufgrund hoher Abweichungen in den Randbereichen als unzureichend erwies, wurde eine zusätzliche Spline-Interpolation durchgeführt. Mit diesem Verfahren konnten auch die zwei wesentlichen Randbedingungen, die aus den Wandhaftbedingungen des Fluids resultieren und eine dortige Geschwindigkeit von null erfordern, sehr gut berücksichtigt werden. Die gewählte Vorgehensweise soll anhand des in Abbildung 5.18 dargestellten Beispiels erläutert werden.

Ausgehend von dem Funktionsansatz, den Excel automatisch vorgibt, wird zunächst untersucht, für welchen Bereich diese von Excel angegebene Funktion mit der grafisch dargestellten Kurve übereinstimmt. Dies trifft in diesem Beispiel für den Bereich II:  $0,8 \le x \le 3,2$  zu. Für Bereich I:  $x \le 0,8$  bzw. Bereich III:  $x \ge 3,2$  wird nun einerseits versucht, das Regressionspolynom durch eine Splineapproximation gut zu erfassen und andererseits die Wandhaftbedingungen v(0) = 0 und v(6,8) = 0 mit einzubeziehen. Zur Anwendung kommt das Verfahren der kubischen Spline-Interpolation mit natürlichen Randbedingungen für drei, vier oder fünf Stützstellen [43]. Die zugrundeliegenden Gleichungen und einige vertiefende Anmerkungen können Anhang A entnommen werden. An dieser Stelle soll kurz die allgemeine Form eines Splines 3. Ordnung angegeben werden:

$$S_{i}(x) = a_{i} + b_{i} \cdot (x - x_{i}) + \frac{c_{i}}{2} \cdot (x - x_{i})^{2} + \frac{d_{i}}{6} \cdot (x - x_{i})^{3}$$
(5.6)

 $\begin{array}{ll} \mbox{gültig im Intervall } [x_i, x_{i+1}] \mbox{ mit } i=0, 1, ..., n-1 \\ \mbox{mit:} & n & Anzahl \mbox{ der Stützstellen} \\ & a_i, b_i, c_i, d_i & Koeffizienten \mbox{ der Splinefunktion} \end{array}$ 

Für die Bereiche I und II wird zunächst untersucht, wie viele Stützstellen erforderlich sind, um die oben beschriebenen Bedingungen einzuhalten. Es gilt generell, dass pro Stützstelle ein zusätzlicher Wendepunkt im Funktionsverlauf möglich wird. Anhand einer Anpassung der Stützstellenanzahl und der Funktionswerte ergeben sich zugehörige Koeffizienten, deren Auswirkungen auf die Splinefunktion optisch kontrolliert werden können und eine Verbesserung der Eingangswerte nach sich zieht. Das Ergebnis für das Beispiel aus Abbildung 5.18 ergibt sich aus acht abschnittsweise definierten Funk-

tionen, d.h. in diesem Fall aus drei Splines für den Bereich I, einer Gleichung für das Regressionspolynom im Bereich II und vier weiteren Splines für Bereich III. Konkret lauten die einzelnen Funktionen:

$$\begin{split} & S_0 = 39,9 \cdot x - 86,7 \cdot x^3; 0 \le x \le 0,27 \\ & S_1 = 9 + 21,4 \cdot (x - 0,27) - 69,4 \cdot (x - 0,27)^2 + 75,0 \cdot (x - 0,27)^3; 0,27 \le x \le 0,53 \\ & S_2 = 11,2 + 0,4 \cdot (x - 0,53) - 9,3 \cdot (x - 0,53)^2 + 11,7 \cdot (x - 0,53)^3; 0,53 \le x \le 0,8 \\ & R = -0,0067 \cdot x^6 + 0,1502 \cdot x^5 - 1,2795 \cdot x^4 + 5,1341 \cdot x^3 \\ & -9,5691 \cdot x^2 + 6,2637 \cdot x + 9,8308; 0,8 \le x \le 3,2 \\ & S_0 = 9,2 + 0,7 \cdot (x - 3,2) - 0,19 \cdot (x - 3,2)^3; 3,2 \le x \le 4,1 \\ & S_1 = 9,4 - 0,09 \cdot (x - 4,1) - 0,51 \cdot (x - 4,1)^2 + 1,03 \cdot (x - 4,1)^3; 4,1 \le x \le 5 \\ & S_2 = 9,6 + 1,48 \cdot (x - 5) + 2,09 \cdot (x - 5)^2 - 4,38 \cdot (x - 5)^3; 5 \le x \le 5,9 \\ & S_3 = 9,6 - 4,99 \cdot (x - 5,9) - 9,45 \cdot (x - 5,9)^2 + 3,5 \cdot (x - 5,9)^3; 5,9 \le x \le 6,8 \end{split}$$

Somit ist das gesuchte Geschwindigkeitsprofil bekannt und über eine Integration der einzelnen Gleichungen kann der Flächeninhalt des Profils, der dem Volumenstrom  $Q_V$  entspricht, zu 60,5  $\cdot$  10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/(s·m) errechnet werden.

# 5.3 Beschreibung des vorliegenden Strömungsverhaltens und Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der optischen Strömungsmessungen in den Schnitten  $a_{jk}$  gesammelt und miteinander verglichen. Es werden die Geschwindigkeitsprofile dargestellt, die Volumenströme berechnet und die zugehörigen Temperaturverteilungen im Fassadenmodell angegeben. Einige Überlegungen in Bezug auf den Zusammenhang zwischen Volumenströmen und Temperaturdifferenzen innerhalb des Modells werden ansatzweise angesprochen, die in Kapitel 5.3.4 detaillierter ausgeführt werden. Die grundlegenden Auswertungen der Versuchsdaten mit dem PTV-Verfahren bzw. der PIAP-Analyse wurden im Rahmen dreier Studien [8], [9] und [30] vorgenommen, die ebenfalls weiterführende Einzelheiten zum Umgang mit den verwendeten Softwareprogrammen enthalten. Da sich die innerhalb des Fassadenspaltes ausbildenden Luftströmungen vorab prinzipiell in zwei unterschiedliche Varianten kategorisieren lassen, wird im Folgenden zunächst die Strömung für eine Spaltbreite von 5 cm und anschließend für Spaltbreiten zwischen 10 und 20 cm erläutert. Diese Unterschiedlung wird durchgeführt, da in dem ersten Fall das Verhältnis von Spaltbreite d<sub>f</sub> zu Öffnungshöhe h<sub>f</sub> des Ein- bzw. Auslasses 0,71 beträgt und somit kleiner 1 ist, wohingegen im

zweiten Fall dieses Verhältnis mit Werten zwischen 1,43 und 2,85 deutlich größer als 1 ist. Eine Zusammenstellung sämtlicher Geschwindigkeitsprofile kann Anhang B entnommen werden.

#### 5.3.1 Fassadenabstand $d_f = 5$ cm

Beginnend an der Einlassöffnung des Fassadenmodells werden in Abbildung 5.19 unterschiedliche Darstellungsweisen des Strömungsfeldes gezeigt, die in ihrer Gesamtheit eine Interpretation hinsichtlich einer Validierung von NAGARE und FLUENT zulassen. Es findet sich dort eine langzeitbelichtete Fotoaufnahme mit den aufgezeichneten Partikelspuren, ein Ergebnisbild der PTV-Berechnungen sowie eine schematische Darstellung der Stromlinien und Ablösungsgebiete. Während der Messungen dieses Fassadenabstands zeigte sich über die gesamte Versuchsdauer eine nahezu stationäre Strömung und somit Idealbedingungen für eine optische Strömungsmessung, die insbesondere an der Einlassöffnung sehr gute Ergebnisse versprechen sollten. Generell wurden in diesem Bereich wie erwähnt die aussagekräftigsten quantitativen Werte erzielt, da sowohl in halber Spalthöhe als auch am Auslass die gemessenen Geschwindigkeiten mit dem Absetzverhalten der Partikel korrigiert werden mussten. Durch die stetige Erwärmung des Fassadenbodens wird kühlere Luft trichterförmig aus der Sicherungsbox eingesaugt und steigt aufgrund des aufgeprägten Dichteunterschieds im Fassadenspalt auf. Kennzeichnend für das Strömungsverhalten bei sämtlichen Temperaturgradienten und Fassadenabständen sind die beiden Ablösungsgebiete direkt an der Vorderkante der Heizmatte und unmittelbar an bzw. hinter der Außenscheibe. Es kommt an diesen beiden Stellen zu den typischen Ablösungsvorgängen, da sich die Strömung um eine Kante bewegen muss, an deren Rändern jeweils die Wandhaftbedingung v = 0 gelten muss. Die Strömung kann den abrupten Richtungswechseln nicht folgen, weil dies an den Versprüngen unendlich hohe Beschleunigungen erfordern würde. Somit bilden sich turbulente Bereiche aus, die mit vielen Wirbeln durchsetzt sind. Weitere turbulente Gebiete sind ebenfalls in den beiden Ecken des Fassadenmodells zu finden. Da eine Luftströmung keine plötzlich auftretende 90°-Richtungsänderung vollziehen kann, bilden sich in diesen Bereichen zahlreiche Wirbel, die den Übergang aus einer horizontalen in eine vertikale Richtung ermöglichen. Aufgrund der unterschiedlichen geometrischen Situationen, die am Einlass und am Auslass vorliegen, sind allerdings wesentliche Unterschiede in der Größe des turbulenten Bereiches zu beobachten. Dies wird bei einem Vergleich der Schnitte  $a_{1k}$  und  $a_{3k}$  deutlich.



**Abbildung 5.19:** Strömungsübersicht am Einlass d5-a<sub>31</sub>(i) [9], [30]

Im Einlassbereich wird die Strömung durch die geometrischen Randbedingungen gezwungen, einen rechtwinkligen Richtungswechsel zu vollziehen. Kaum erkennbar allerdings ist das Wirbelgebiet, das sich in der Ecke gebildet haben dürfte, um diese Krümmung zu ermöglichen. Aber nicht nur die Konstruktion des Fassadenmodells beeinflusst die Ausbildung des Strömungsfeldes an diesem Schnitt, sondern auch die geometrischen Verhältnisse der Sicherungsbox vor dem Einlass sind ursächlich mitverantwortlich. Im Gegensatz zu dem hohen Überstand der Decke am Fassadenauslass befindet sich der Boden der Sicherungsbox vor dem Einlass nur 10 cm tiefer. Während die ausströmende Luft sich in einem wesentlich höheren Maß frei entfalten kann, gelangt die Luft am Einlass ähnlich einem Strahl in das Fassadenmodell, wird gegen die Innenseite der Fassade gedrückt und dort abrupt vertikal nach oben umgelenkt, ein Effekt, der sich bei größeren Fassadenabständen noch verstärken sollte. Dadurch kommt es zu sehr hohen Temperaturen in diesem Bereich, da die unmittelbar durch die Heizmatte erwärmte Luft den Eckbereich durchströmt und erst danach nach oben abzieht. Als Resultat entstehen an der Innenfassade sehr hohe Geschwindigkeiten, die sich bei den Aufnahmen des mittleren Schnittes a2k wiederfinden lassen. An den Schnitten a3k ergeben sich durch eine Auswertung der Partikelspuren die folgenden in Abbildung 5.20 dargestellten Geschwindigkeitsprofile für die geringere Temperaturdifferenz. Zusammenfassend wurden sowohl die Ergebnisse der PTV-Auswertung sämtlicher Schnitte im Einlassbereich a<sub>3k</sub> als auch das Resultat der PIAP-Analyse eingearbeitet.



Abbildung 5.20: Geschwindigkeitsprofile am Einlass d5-a<sub>3k</sub>(i)

Bei der Durchführung sämtlicher Analysen ist dem Einfluss der im System vorhandenen Temperaturgradienten besondere Beachtung zu schenken, da diese letztendlich den entscheidenden Antrieb für die Konvektionsströmung bilden. Ein Vergleich z.B. der Volumenströme kann nur dann zu sinnvollen Aussagen führen, wenn diese auf ihre Ursache, die Dichteunterschiede, bezogen werden. Aus diesem Grund werden zu jedem Geschwindigkeitsprofil die Temperaturen sämtlicher Messfühler in Tabellenform aufgeführt. Zur vollständigen Beschreibung des TF1 wird zusätzlich neben dem während der Experimente tatsächlich gemessenen Wert ein höherer interpolierter Wert, der sich aus den Betrachtungen mit der Thermokamera ergab, in Klammern beigefügt. Auf Basis dieser Daten kann anhand der in [45] angegebenen Gleichung

$$Q_{\rm V} = k_{\rm Qv} \cdot \sqrt{\Delta T} , \qquad (5.7)$$

die in Kapitel 2.2 bereits näher erläutert wurde, ein aussagekräftiger Vergleich gezogen werden. Mit Hilfe der in Abbildung 5.20 eingetragenen Geschwindigkeitsprofile können mehrere charakteristische Merkmale für das auftretende Strömungsfeld im Einlassbereich festgestellt werden. Die Unterschiede im bimodalen Verlauf zwischen allen Profilen sind äußerst gering. Alle Funktionen weisen zwei lokale Maxima im Randbereich auf und die Wertebereiche stimmen ebenfalls gut überein. Dies lässt den Schluss zu, dass sich das Strömungsverhalten über die Tiefe des Fassadenmodells nur wenig ändert und weitestgehend als eben bezeichnet werden kann. Die durch Integration errechneten Volumenströme  $Q_V$ , die zwischen 27,7  $\cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/(s·m) für das PTV-Verfahren sowie bei 29,9  $\cdot 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/(s·m) für die Auswertung mit PIAP liegen, lassen sich somit gut vergleichen und die Abweichungen

bewegen sich im Rahmen der Genauigkeit der zugrundeliegenden Videoaufnahmen. Werden die Geschwindigkeitsprofile für die höhere Temperaturdifferenz hinzugezogen, so kann beispielhaft an dieser Stelle gezeigt werden, dass aufgrund der guten Analogien im weiteren Verlauf der Arbeit auf eine getrennte Auswertung der beiden Temperaturlastfälle verzichtet werden kann. Zur Veranschaulichung sind nachfolgend die Geschwindigkeitsprofile am Schnitt  $a_{3k}$  für die höhere Temperaturdifferenz zusammengestellt.



|                      | Temperatur           |
|----------------------|----------------------|
| TF0                  | 27,0                 |
| TF1                  | 63,8 (85,2)          |
| TF2                  | 29,9                 |
| TF3                  | 28,2                 |
| TF4                  | 28,0                 |
| TF5                  | 28,0                 |
| TF6                  | 26,6                 |
| TF7                  | 26,2                 |
|                      |                      |
|                      | $Q_{\rm V}$          |
| a <sub>31.PTV</sub>  | $38,7 \cdot 10^{-4}$ |
| a <sub>32.PTV</sub>  | $42,9 \cdot 10^{-4}$ |
| a <sub>33.PTV</sub>  | $36,0.10^{-4}$       |
| a <sub>31.PIAP</sub> | $42,1 \cdot 10^{-4}$ |

**Abbildung 5.21:** Geschwindigkeitsprofile am Einlass d5-a<sub>3k</sub>(ii)

Ein Vergleich der Profile aus Abbildung 5.20 und 5.21 verdeutlicht, dass die Kurvenverläufe sämtlicher Funktionen sehr gut übereinstimmen. Es zeigen sich jeweils die typischen zwei lokalen Maxima mit den höchsten Geschwindigkeiten bei ca. x = 6 cm, also nahe der unteren Kante der Außenfassade. Infolge der aufgebrachten Temperaturdifferenzen und der daraus resultierenden Dichteunterschiede ergeben sich die erwartet schnelleren Partikelgeschwindigkeiten für den Lastfall mit einer höheren Heizmattentemperatur. Basierend auf Gleichung 5.7 können die Geschwindigkeiten und Volumenströme auf andere Gradienten umgerechnet werden. Dass diese Verfahrensweise auch für die im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Experimente ihre Gültigkeit besitzt, wird an den vorliegenden Profilen und Volumenströmen überprüft und gezeigt. Tabelle 5.5 beinhaltet sämtliche Daten, die für die Auswertung der Gleichung benötigt werden. Aufgrund der einzuplanenden Fehlertoleranzen der Thermoelemente erweist es sich als günstig, für einen Vergleich Fühler auszuwählen, deren Temperaturdifferenz zueinander genügend groß ist. So sollte in jedem Fall der TF1 bei einer Kombination berücksichtigt werden, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

| Bezeichnung               | TF0  | TF1  | $\Delta T$ | $Q_{\rm V}$            | $\mathbf{k} = (\mathbf{Q}_{\mathrm{V}} / \Delta \mathbf{T}^{0,5})$ | Abweichung |
|---------------------------|------|------|------------|------------------------|--|------------|
|                           | [°C] | [°C] | [°C]       | $[m^3/(s \cdot m)]$    | $[m^{3}/(s \cdot m \cdot K^{0,5})]$                                | [%]        |
| PTV-a <sub>31</sub> (i)   | 25,8 | 59,9 | 34,1       | 28,5 ·10 <sup>-4</sup> | 4,9 ·10 <sup>-4</sup>  | -3,9       |
| PTV-a <sub>32</sub> (i)   | 25,8 | 59,9 | 34,1       | 31,5 ·10 <sup>-4</sup> | 5,4 ·10 <sup>-4</sup>  | +5,9       |
| PTV-a <sub>33</sub> (i)   | 25,8 | 59,9 | 34,1       | 27,7 ·10 <sup>-4</sup> | $4,7 \cdot 10^{-4}$  | -7,8       |
| PIAP-a <sub>31</sub> (i)  | 25,8 | 59,9 | 34,1       | 29,9 ·10 <sup>-4</sup> | 5,1 ·10 <sup>-4</sup>  | ±0         |
| PTV-a <sub>31</sub> (ii)  | 27,0 | 85,2 | 58,2       | 38,7 ·10 <sup>-4</sup> | 5,1 ·10 <sup>-4</sup>  | ±0         |
| PTV-a <sub>32</sub> (ii)  | 27,0 | 85,2 | 58,2       | 42,9 ·10 <sup>-4</sup> | 5,6 ·10 <sup>-4</sup>  | +9,8       |
| PTV-a <sub>33</sub> (ii)  | 27,0 | 85,2 | 58,2       | 36,0 ·10 <sup>-4</sup> | $4,7 \cdot 10^{-4}$  | -7,8       |
| PIAP-a <sub>31</sub> (ii) | 27,0 | 85,2 | 58,2       | 42,1 .10-4             | $5,5 \cdot 10^{-4}$  | +7,8       |
|                           |      |      |            | Mittelwert:            | 5,1 ·10 <sup>-4</sup>  |            |

 Tabelle 5.5: Vergleich der Volumenströme bezogen auf unterschiedliche

 Temperaturdifferenzen

Die maximale Abweichung von +9,8 % kann als eine sehr gute Bestätigung der verwendeten Gleichung angesehen werden und belegt, dass die Profile untereinander stimmig sind. Da dieser gültige Zusammenhang auch für weitere Geschwindigkeitsprofile gezeigt und auch mittels CFD-Berechnungen verifiziert werden konnte, kann aus diesem Grund in der weiteren Analyse auf eine Unterscheidung in eine höhere und niedrigere Temperaturdifferenz verzichtet werden. Mit derselben Beziehung können selbstverständlich auch die Geschwindigkeiten ineinander umgerechnet werden, da sie unmittelbar mit den Volumenströmen verknüpft sind. Es gilt dabei aber zu bedenken, dass sich in dieser feineren Auflösung die lokalen Unterschiede vergrößern dürften.



Abbildung 5.22: Strömung in Spaltmitte d5-a<sub>21</sub>(i) links: Langzeitbelichtetes Foto, rechts: Videoaufnahme [30]

Abbildung 5.22 gibt einen Überblick über den charakteristischen Strömungsverlauf in halber Modellhöhe, einerseits als langzeitbelichtetes Foto, andererseits als Einzelbild einer Videofilmsequenz. Der Geschwindigkeitsunterschied in horizontaler Achse ist an den über den Zwischenraum verteilten Partikelspurlängen deutlich ablesbar. Besonders auf dem Videobild stechen die langen Streaks, die Bereiche hoher Strömungsgeschwindigkeiten andeuten, im linken Teil des Spaltes hervor. Im rechten Drittel des Spalts hingegen sind überwiegend kurze punktförmige Partikelverschiebungen aufgenommen worden. Da die Richtung aus dem Einzelbild selbst nicht ablesbar ist, kann im Gesamtzusammenhang des Filmes beobachtet werden, dass diese Partikel in Wandnähe aufgrund der dort herrschenden vergleichsweise niedrigeren Geschwindigkeiten auch entgegen der Hauptströmungsrichtung sinken können. Besonders im vertikalen Spalt ist es deshalb zwingend erforderlich, das Absetzverhalten bedingt durch das Eigengewicht der Teilchen mit zu berücksichtigen. Obwohl die durch die Gravitationskraft absinkenden Partikel eine Bewegung nach unten implizieren, kann sich durch die Korrektur dennoch eine aufwärts gerichtete Luftströmung ergeben.



**Abbildung 5.23:** Geschwindigkeitsprofile in Spaltmitte d5-a<sub>2k</sub>(ii)

Abbildung 5.23 belegt die großen vertikalen Strömungsgeschwindigkeiten der Hauptströmung im linken Drittel des Spaltes durch das signifikante globale Maximum, das in allen Profilen auftritt. Diesen Bereich kennzeichnen ebenfalls vergleichsweise höhere Temperaturen, die durch das Strömungsverhalten am Einlass bedingt sind. Die Volumenströme weichen maximal 14,2 % bzw. im Durchschnitt nur 5,1 % von denen am Schnitt  $a_{3k}$  ab. Bei ca. 80 % der Modellhöhe löst sich die Strömung von der Fassadeninnenseite und verlässt den Spalt durch die obere Auslassöffnung in die Umgebung. Das kennzeichnende Strömungsverhalten in diesem Bereich stellt Abbildung 5.24 dar.



Abbildung 5.24: Strömungsübersicht am Auslass d5-a<sub>11</sub>(i), Variante 1 [9], [30]

Die in dem Fassadenzwischenraum aufsteigende Luft wird wie im Bereich der unteren Einlassöffnung durch geometrische Randbedingungen veranlasst, einen Richtungswechsel vorzunehmen. Allerdings wird das Strömungsfeld diesmal wesentlich weniger von der Sicherungsbox geprägt als am Einlass, da sich die raumabschließende Decke 40 cm über Oberkante Auslassöffnung befindet. So ist die lokale Richtungsänderung nicht so deutlich wie am Einlass und der Ausströmwinkel kann wesentlich steiler sein. Der für die Ausrundung erforderliche wirbeldurchsetzte Bereich in der Ecke ist deutlich erkennbar. Analog zum Fassadeneinlass können auch an diesem Schnitt Ablösungen an den Modellkanten beobachtet werden. Dadurch sind bereits optisch die Bereiche höherer und niedrigerer Geschwindigkeiten erkennbar und können durch die Lage und Länge der Geschwindigkeitsvektoren belegt werden. Das Strömungsverhalten ist insgesamt als unruhiger und instationärer zu bezeichnen als am Einlass und in der Mitte des Spaltes, so dass zu einigen Zeitpunkten auch weitere Strömungsformen auftreten können. Neben dem repräsentativen Verlauf aus Abbildung 5.24 kann sich z.B. weiterhin die in Abbildung 5.25 dargestellte Variante ausbilden.



Abbildung 5.25: Strömungsübersicht am Auslass d5-a<sub>11</sub>(i), Variante 2 [9], [30]

Dieser Effekt entsteht in den instationären Phasen, wenn der Wirbel seine Position, Form und Größe nicht ruhig in der Ecke beibehält, sondern sich teilweise auflöst und die Hauptströmung zur Seite drückt. Der Ausströmwinkel wird dadurch geringfügig flacher. Dies ist über die gesamte Aufnahmedauer ein wechselnder Prozess, wobei allerdings der als Variante 1 gekennzeichnete Verlauf aus Abbildung 5.24 deutlich überwiegt. Weitere Aufmerksamkeit bei der Erstellung der Geschwindigkeitsprofile am Auslass  $a_{1k}$  ist der unmittelbaren Lage des Schnittes zu schenken. Dies ist ansatzweise in den Strömungsübersichten erkennbar, verdeutlicht sich aber in den Geschwindigkeitsprofilen. An der linken oberen Kante der Außenfassade bildet sich noch keine bzw. nur eine geringe Ablösung des Strömungsfeldes, wohingegen an der rechten Kante das verwirbelte Ablösungsgebiet sehr gut beobachtet werden kann. Die folgende Abbildung 5.26 beinhaltet für den Schnitt  $a_{11}$  die drei Geschwindigkeitsprofile, die dieses Verhalten bestätigen.



**Abbildung 5.26:** Geschwindigkeitsprofile am Auslass d5-a<sub>11</sub>(i) [30]

Verfolgt man die Veränderungen des Profils von links nach rechts über den 6 mm breiten Bereich der Außenfassadenkante, so nimmt das absolute Geschwindigkeitsmaximum zu und verschiebt sich in Richtung der oberen Begrenzung des Fassadenauslasses. Durch die Ablösung an der Kante entstehen Turbulenzen, deren Verwirbelung anhand der negativen Geschwindigkeitsbeträge im Bereich zwischen x = 6 und x = 7 cm abgelesen werden kann. Werden die einzelnen Funktionen integriert, um den Flächeninhalt respektive den Volumenstrom Q<sub>V</sub> zu bestimmen, so errechnen sich die Durchflüsse von links nach rechts zu 35,09 ·10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/(s·m), 33,41 ·10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/(s·m) bzw. 32,26 ·10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>/(s·m). Die Abweichung von ca. 8 % belegt, dass die Kontinuitätsgleichung im Rahmen des zugrundeliegenden Datenmaterials sehr gut erfüllt ist. Aufgrund des Ausschnittsbereichs, den die Kamera während der Experimente aufnehmen kann, ist stets zu bedenken, dass die 6 mm messende Fassadenaußenscheibe auf den Einzelbildern aufgrund des Maßstabverhältnisses M nur wenigen Pixeln entspricht. Für breitere Fassadenzwischenräume wird der Kameraausschnitt entsprechend größer gewählt, um die Strömung im gesamten Spalt aufzeichnen zu können und lässt bedingt durch den ungünstigeren Maßstabseffekt diese feinen Betrachtungen nicht mehr zu. Es wird aus diesem Grund bei sämtlichen Auswertungen in diesem Schnitt jeweils nur ein Profil erstellt, da gezeigt werden konnte, dass bei sorgfältiger Erstellung der Geschwindigkeitsprofile die Volumenströme gut übereinstimmen und die Profile unter Berücksichtigung lokaler Ablösungseffekte als aussagekräftig eingestuft werden können.

### 5.3.2 Fassadenabstand $d_f = 10$ cm, 15 cm bzw. 20 cm

Das allgemeine Strömungsverhalten wird mit zunehmendem Fassadenabstand immer instationärer. Dies wird besonders bei der Auswertung der Schnitte  $a_{2k}$  auf halber Fassadenhöhe deutlich, bei denen mehrere unterschiedliche Strömungsformen anzutreffen sind, deren Ursachen maßgeblich bei dem Motor des gesamten Strömungsablaufes, der Erwärmung des Fassadenbodens zu finden sind. Im Gegensatz zu einem wesentlich günstigeren steuerbaren System, bei dem z.B. anhand eines Ventilators ein konstanter Zuluftstrom erzeugt werden kann, treten in diesem Fall immer wieder Phasen auf, in denen zu bestimmten Zeitpunkten hohe Volumenströme aufgrund momentan höherer Temperaturgradienten den Fassadenzwischenraum durchspülen und dabei eine hohe Turbulenz besonders im mittleren Drittel der Spalthöhe induzieren. Dadurch gestaltet sich die Auswertung in diesem Bereich im Hinblick auf ein einziges repräsentatives Geschwindigkeitsprofil als äußerst schwierig, wohingegen im Einlass- und Auslassbereich gute und aussagekräftige Strömungsfelder und Profile gewonnen werden können. Abbildung 5.27 belegt dies anhand einer langzeitbelichteten Aufnahme und einer schematischen Darstellung der Stromlinien, die diesen Ausschnitt des Einlasses dominieren.



Abbildung 5.27: Strömungsübersicht am Einlass d10-a<sub>31</sub>(i) [30]

Das Strömungsverhalten dieser Fassadenabstände mit einem Verhältnis von Zwischenraumbreite zu Öffnungshöhe  $d_F/h_F > 1$  wird wesentlich von der Einlassöffnung  $h_F$  geprägt. Die Hauptströmung tritt ähnlich wie im Fall d5- $a_{31}$  strahlartig in den Fassadenspalt ein, dort erwärmt sich die Luft aufgrund der Wärmeabgabe durch die Heizmatten und steigt bedingt durch die geringere Dichte und die geometrischen Randbedingungen unmittelbar an der Innenscheibe auf. Direkt hinter der Außenfassade befindet sich ein großer, äußerst turbulenter Totraum, der sich mit zunehmender Fassadenbreite stetig erweitert.



Abbildung 5.28: Strömungsauswertung mit PTV am Einlass d10-a<sub>31</sub>(i) [9]

Das oben beschriebene Strömungsverhalten kann ebenfalls mit Hilfe der PTV-Auswertungen, die beispielhaft in Abbildung 5.28 dargestellt sind, sehr gut belegt werden. Eindeutig kennzeichnen die langgezogenen Vektoren den Bereich der Hauptströmung, während im überaus turbulenten Bereich unmittelbar hinter der Außenfassade nur sehr geringe Geschwindigkeitsvektoren, die in die unterschiedlichsten Richtungen weisen, vorzufinden sind. Wertet man die Geschwindigkeiten im Schnitt  $a_{3k}$  aus, so ergeben sich in der Konsequenz folgende in Abbildung 5.29 dargestellte Geschwindigkeitsprofile.



Abbildung 5.29: Geschwindigkeitsprofile am Einlass d10-a<sub>3k</sub>(i)

Im Vergleich zu den Profilen der Experimente d5 aus Abbildung 5.21 sind auch in diesem Fall lokal höhere Geschwindigkeiten an den beiden seitlichen Begrenzungen festzustellen. Allerdings sind die Unterschiede der maximalen Werte in den Randbereichen zu den minimalen Werten im mittleren Drittel der Öffnung mit rund 15 % wesentlich geringer. Dieses Verhalten ist ebenfalls bei den Versuchen d15 und d20 anzutreffen. Die Profile sind untereinander sehr ähnlich und lassen im Fassadeneinlassbereich nur ausgesprochen wenig dreidimensionale Effekte vermuten. Die Begründung hierfür sollte in der unmittelbaren räumlichen Nähe der die Konvektion antreibenden Heizmatten zu suchen sein, die das Strömungsverhalten in diesem Bereich deutlich stabilisieren.

Wie oben schon angedeutet wurde, zeigt die Strömung in halber Spalthöhe ein ausgesprochen instationäres Verhalten. Für alle Zwischenraumbreiten d10, d15 und d20 ist die Erstellung eines einzigen für sämtliche Strömungszeitpunkte gültigen Geschwindigkeitsprofils unmöglich. Die Hauptströmung schwankt im Fassadenspalt von links nach rechts und erzeugt die unterschiedlichsten Formen. Es können hierbei Momente auftreten, in denen der gesamte Spalt von der vertikal aufwärts strebenden Strömung ausgefüllt ist, während zu anderen Zeitpunkten hohe Geschwindigkeiten im linken Spaltdrittel vorzufinden sind und im restlichen Bereich hohe Turbulenzen herrschen, die aus Kontinuitätsgründen auch Rückströmungen beinhalten. Eine exakte Festlegung auf einen repräsentativen Volumenstrom ist aus den angeführten Gründen nicht möglich.



Abbildung 5.30: Strömungsübersicht in Spaltmitte d15-a<sub>21</sub>(i)

Im Auslassbereich lässt der instationäre Charakter wieder nach, und es können gute Daten aus der Auswertung gewonnen werden. Einen aussagekräftigen Überblick über die vorliegende Strömung an der Stelle a<sub>11</sub> für den Versuch d10 bietet Abbildung 5.31. Sehr gut ist der linksdrehende Wirbel in der Ecke zu erkennen, der allerdings – über die gesamte Aufnahmezeit betrachtet – nicht nur exakt in dieser Position und Größe verharrte, sondern lediglich in geringem Maße hin und her schwankte. Zu einigen Zeitpunkten konnte beobachtet werden, dass sich der komplette Wirbel kurzzeitig auflöste und mit der Hauptströmung vereinigte, um sich anschließend wieder neu zu formieren. Dies hat selbstverständlich Auswirkungen auf den Ausströmwinkel, der sich zu diesen Zeitpunkten der Horizontalen annäherte.



Abbildung 5.31: links: Strömungsübersicht am Auslass d10-a<sub>11</sub>(i) rechts: Strömungsauswertung mit PIAP am Auslass d10-a<sub>11</sub>(i) [30]

Sowohl mit PIAP als auch mit der PTV-Methode lassen sich in jedem Experiment eine hinreichende Anzahl an Partikelspuren finden, die vermessen werden können. Es ergeben sich gut vergleichbare Funktionsverläufe für die Geschwindigkeitsprofile, die sich in drei markante Regionen zusammenfassen lassen. Im ersten Drittel nahe der abschließenden Fassadendecke liegt das globale Maximum der Funktion, bedingt durch sehr flache Ausströmwinkel und hohe Geschwindigkeiten. Während nun im Bereich zwischen 1,5 cm  $\leq x \leq 5,0$  cm die absoluten Geschwindigkeiten zwar annähernd gleich bleiben, beschreiben die vorhandenen Vektoren jedoch eine wesentlich steilere Bahn und implizieren somit niedrigere x-Komponenten und einen fallenden Funktionsverlauf. Im letzten Drittel ergeben sich aufgrund des Abreißens der Strömung an der Fassadenaußenscheibe v = 0 betragen müssen.



**Abbildung 5.32:** Geschwindigkeitsprofile am Auslass d10-a<sub>1k</sub>(ii)

Berechnet man nun für jeden Fassadenabstand einen gemittelten Volumenstrom, so lassen sich die prozentualen Abweichungen der Einzelwerte in folgender Tabelle 5.6 ablesen. Dabei werden zum einen die maximale und zum anderen eine mittlere Abweichung ermittelt, da der Extremwert von einer Einzelmessung herrührt und u.U. nicht repräsentativ für den untersuchten Schnitt ist. Die mittleren Abweichungen  $\Delta Q_{mittel}$  belegen mit maximal 7,7 % die geringe Streuung der berechneten Volumenströme.

|          | Q <sub>V,mittel</sub>   | $\Delta Q_{max}$ | $\Delta Q_{mittel}$ |
|----------|-------------------------|------------------|---------------------|
|          | $[m^3/(s\cdot m)]$      | [%]              | [%]                 |
| d5 (i)   | 29,0 ·10 <sup>-4</sup>  | 19,2             | 7,7                 |
| d5 (ii)  | 38,7 ·10 <sup>-4</sup>  | 18,8             | 6,1                 |
| d10 (i)  | 65,2 ·10 <sup>-4</sup>  | 8,9              | 4,3                 |
| d10 (ii) | 75,5 ·10 <sup>-4</sup>  | 13,2             | 6,0                 |
| d15 (i)  | 82,8 ·10 <sup>-4</sup>  | 9,4              | 4,7                 |
| d15 (ii) | 105,2 ·10 <sup>-4</sup> | 6,6              | 3,4                 |
| d20 (i)  | 95,7 ·10 <sup>-4</sup>  | 6,5              | 3,2                 |
| d20 (ii) | 112,2 .10-4             | 6,5              | 2,2                 |

Tabelle 5.6: Vergleich der Volumenströme Q<sub>V,d10</sub>, Q<sub>V,d15</sub> und Q<sub>V,d20</sub>

#### 5.3.3 Vergleich der Versuchsergebnisse

Für das allgemeine Strömungsverhalten ist die erzeugende Temperatur an den Heizmatten im Rahmen des in den Experimenten gewählten Wertebereichs von untergeordneter Bedeutung. Die vier Versuche d5, d10, d15 sowie d20 weisen sowohl in den Übersichten als auch in den Geschwindigkeitsprofilen bei allen betrachteten Schnitten aik für beide Temperaturlastfälle große Ähnlichkeiten und Übereinstimmungen auf. Der Grund hierfür ist darin zu suchen, dass die hohen Rayleigh-Zahlen beider Lastfälle in der gleichen Größenordnung liegen, wie auch schon in Kapitel 5.2.1.1 erläutert wurde. Dreidimensionale Effekte scheinen bei diesem System ebenfalls keine große Rolle zu spielen. Während allerdings die Experimente mit einer Spaltbreite von 10, 15 bzw. 20 cm untereinander ein äußerst vergleichbares Verhalten aufweisen, das sich hauptsächlich nur durch den mit zunehmendem Fassadenabstand größeren turbulenten Bereich unmittelbar hinter der Außenfassade unterscheidet, differieren die Versuche mit einer Breite von 5 cm doch in höherem Ausmaß. Das wesentlich stationärere Verhalten mit einer fast vollständigen Querschnittsausnutzung der Luftströmung im vertikalen Spalt sei hier nur beispielhaft angeführt. Mit Hilfe der Volumenströme und der bekannten Differenzen zwischen der Heizmattentemperatur und derjenigen unmittelbar vor der Fassadeneinlassöffnung soll nun die Gleichung 5.7 ausgewertet werden. Durch Umformen wird für alle Versuche ein mittlerer Parameter k, der als Luftvolumenstrom des Systems bezogen auf eine Differenz von 1 K interpretiert werden kann, bestimmt.

$$k_{\rm Qv} = \frac{Q_{\rm V}}{\sqrt{T_{\rm Heizmatte} - T_{\rm TF0}}}$$
(5.8)

Mit diesem Wert kann eine mittlere Kennlinie für jede Spaltbreite angegeben werden, die ebenfalls in den folgenden Diagrammen eingetragen ist. In Abbildung 5.33 soll dabei der Zusammenhang zwischen den Kennlinien und den Versuchsergebnissen verdeutlicht werden, wohingegen der Schwerpunkt in Abbildung 5.34 auf dem Vergleich des Wertebereichs der einzelnen Kennlinien zueinander liegt.



Abbildung 5.33: Verhalten der auf die Temperaturdifferenz bezogenen Volumenströme



Abbildung 5.34: Zusammenstellung der Volumenströme d5, d10, d15 und d20

Es ist sehr gut erkennbar, dass die Wurzelfunktionen die Volumenströme in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz hervorragend beschreiben. Die maximalen Abweichungen der Messdaten liegen bei 20,0 % (d5), 11,3 % (d10), 9,3 % (d15) sowie 7,4 % (d20). Anhand dieser Kennlinien ist es nun möglich, für jede andere Temperaturdifferenz, die zwischen der Heizmatte und einer Position 10 cm vor der Einlassöffnung besteht, die entsprechenden Volumenströme auszurechnen. Weiterhin lässt sich über den Parameter k der Luftwechsel für jeden Fassadenspalt bezogen auf ein  $\Delta T = 1$  K ausrechnen und zueinander in Beziehung setzen. In der folgenden Tabelle 5.7 sind die hierfür benötigten Daten und Formeln angegeben.

| Spaltbreite | Luftvolumen<br>des Spalts V | Volumenstrom<br>$Q_{V, 1 K} = k$ | Fassadenbreite<br>b <sub>F</sub> | Luftwechsel<br>$n = Q_{V, 1 K} \cdot b_F \cdot 3600/V$ |
|-------------|-----------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|
| [cm]        | [m <sup>3</sup> ]           | $[m^3/(s \cdot m)]$              | [m]                              | [1/h]  |
| 5           | 0,0214                      | 5,01.10-4                        | 0,688                            | 57,98  |
| 10          | 0,0451                      | 9,96.10-4                        | 0,688                            | 54,70  |
| 15          | 0,0687                      | 12,42.10-4                       | 0,688                            | 44,78  |
| 20          | 0,0924                      | 14,42.10-4                       | 0,688                            | 38,65  |

Tabelle 5.7: Ermittlung des Luftwechsels der Fassade



**Abbildung 5.35:** Luftwechsel der Fassade bezogen auf eine Temperaturdifferenz Heizmatte – 10 cm vor Einlassöffnung von  $\Delta T = 1$  K

Anhand Abbildung 5.35 zeigt sich, dass sich für die Systeme mit größerem Abstand der Luftwechsel der Fassade mehr und mehr verschlechtert. Die zunehmende Turbulenz im Spalt selbst wirkt sich ungünstiger auf eine gute Durchlüftung aus, und die wärmere Luft kann nicht so schnell abgeführt werden. Bei den Verhältnissen von Zwischenraumbreite zu Öffnungshöhe  $d_F/h_F > 1$  ließe der Spalt zwar noch höhere Volumenströme zu, aber es kann nicht genügend Luft durch den Einlass nachströmen bzw. durch den Auslass das Modell verlassen. Am interessantesten scheint der Bereich zwischen 0 und 10 cm zu sein, da hier das globale Maximum vermutet werden darf. Eine genauere Untersuchung dieser Region findet sich im Anschluss an die Validierung von NAGARE und FLUENT.

# 5.3.4 Der Temperaturgradient als antreibender Motor der Auftriebsströmung

Da die vorherrschenden Temperaturen innerhalb des Fassadenmodells und der Sicherungsbox ein wesentlicher Parameter für die Größe des Volumenstroms im Spalt darstellen und sich konsequenterweise für den Luftwechsel hauptverantwortlich zeigen, sollen ihnen und ihrer genaueren Erfassung dieses Kapitel gewidmet werden. Um einen quantitativen Vergleich der Experimente mit den CFD-Programmen zu ermöglichen, ist es von entscheidender Bedeutung, die Temperaturverteilung innerhalb des Modells möglichst exakt zu beschreiben. Aus diesem Grund wurde die im vorhergehenden Kapitel beschriebene Versuchsreihe um ein weiteres Experiment ergänzt, in dessen Rahmen die Temperaturen, die in der Sicherungsbox herrschen, genauer erfasst wurden und somit in Beziehung zu denen im Fassadenzwischenraum gesetzt werden konnten. Ausgangspunkt für diesen Versuch bildete der in Kapitel 5.2.1 beschriebene Fassadenaufbau für eine Spaltbreite von 10 cm.



Abbildung 5.36: Positionen für die Temperaturprofilerstellung

Die Temperatur der Heizmatte betrug nach Umrechnung mit den Erkenntnissen aus den Thermokameraaufnahmen etwa 81,7 °C, so dass die gewonnenen Temperaturprofile mit den Ergebnissen von d10- $a_{jk}$ (ii) gut kombiniert werden können. Nach Abschluss des Aufheizprozesses mit Erreichen eines konstanten Temperaturlevels wurden sowohl an den üblichen Positionen in dem Fassadenspalt selbst, aber auch zusätzlich innerhalb der Sicherungsbox Messungen vorgenommen. Sechs Thermoelemente wurden an einem vertikalen Stab in den Höhen von 10, 30, 50, 70, 90 und 110 cm, gemessen über Boden Sicherungsbox, verteilt. Dieser Stab wurde über neun Positionen in der Box bewegt und konnte an diesen Stellen Temperaturprofile aufzeichnen.

Aufgrund dieser Messungen konnte festgestellt werden, dass die Profile über die Tiefe des Raumes nur sehr geringe Abweichungen aufweisen und daher die Messungen in der mittleren Ebene repräsentativ für eine Abschätzung der Durchschnittstemperatur herangezogen werden können. Um eine Vorstellung davon zu bekommen, wie sich die Temperaturen in der Box und im Fassadenspalt im mittleren Schnitt verhalten, wurden die aufgezeichneten Daten mit der Tabellenkalkulation Excel weiter verarbeitet. Für eine grafische Aufbereitung wurden die Zwischenbereiche aus den Messwerten linear interpoliert. Als Ergebnis ergibt sich die in Abbildung 5.37 dargestellte Übersicht.



Abbildung 5.37: links: Temperaturverteilung in Fassadenmodell und Sicherungsbox im mittleren Schnitt, rechts: Lage der Messpunkte

Die gemessene Temperaturverteilung im Modell zeigt sehr gut, dass die höchsten Temperaturen, wie bei der Beschreibung des allgemeinen Strömungsverhaltens schon ansatzweise vermutet werden konnte, in der linken unteren Ecke des Fassadenmodells auftreten. Mit zunehmender Höhe im Modell nimmt die Lufttemperatur ab, bevor die Hauptströmung die Fassade durch die obere Öffnung wieder verlässt. Die Temperaturverteilung in der Sicherungsbox spiegelt ebenfalls gut die während der Versuche in diesem Raum beobachtete Luftströmung wieder. Nachdem die erwärmte Luft die Fassade am Auslass verlassen hat, wird sie überwiegend wie in einem Kreislauf bis zur rechten Wand strömen, bevor sie sich dort nach unten und anschließend nahezu horizontal wieder auf die Fassadeneinlassöffnung zu bewegt. In diesem Bereich teilt sich die Strömung, ein Teil tritt wieder in den Spalt ein, während der andere Teil vor der Fassade aufsteigt. Die dabei in den Zwischenraum gelangende wärmere Luft zeigt sich mitverantwortlich für die höheren Temperaturen an der Unterkante der Außenfassade, diese resultieren aber weiterhin auch aus dem direkten Einfluss der Wärmestrahlung der sich in unmittelbarer Nähe befindlichen Heizmatten.

Ziel ist es nun, aus den gewonnenen Daten gute Abschätzungen für eine Durchschnittstemperatur für den Fassadenzwischenraum sowie für den Außenraum zu berechnen. Auf die Differenz dieser beiden Werte kann daraufhin der Volumenstrom bezogen werden, damit weitere Vergleiche mit den CFD-Programmen möglich sind. Für den Außenraum soll dabei eine Lösung gefunden werden, bei der allein die Kenntnis der Daten des Temperaturfühlers TF0, der sich während allen Versuchen 10 cm vor dem Fassadeneinlass befand, ausreicht, um eine Durchschnittstemperatur für die Luft in der Sicherungsbox angeben zu können. Aus diesem Grund wurden die Werte in den Randstreifen, die aus geometrischen Gründen nicht vermessen werden konnten, in erster Näherung den äußersten gemessenen Temperaturen gleich gesetzt, siehe hierzu auch Abbildung 5.38. Im Anschluss konnten die gesamten Daten gemittelt werden und auf den Messwert, der im 10 cm Abstand vor der Fassade aufgenommen wurde, bezogen werden. Als Ergebnis beträgt die geschätzte Durchschnittstemperatur T<sub>Ext</sub> 99,64 % des TF0.



Abbildung 5.38: Erweiterte Temperaturübersicht zur Bestimmung eines Durchschnittswertes  $T_{Ext}$ 

In ähnlicher Weise ist nun eine Durchschnittstemperatur für den Fassadenzwischenraum zu bestimmen. Zunächst werden hierbei für die in Abbildung 5.37 angegebenen Messpunkte Einflussflächen ermittelt. Besondere Aufmerksamkeit ist allerdings dem unmittelbar an die Heizmatte angrenzenden Bereich zu schenken, in dem wesentlich höhere Temperaturen anzutreffen sind. Aus zahlreichen Erfahrungen mit CFD-Simulationsberechnungen wird näherungsweise aus diesem Grund über der Heizmatte ein 1 cm breiter Streifen berücksichtigt, in dem die durchschnittliche Temperatur 60 % der wirklichen Heizmattentemperatur beträgt. In der folgenden Tabelle 5.8 sind sämtliche Messwerte MW zusammengefasst und ihr Einflussbereich angegeben. Die Lagebeschreibungen "innen", "mitte" bzw. "außen" geben die horizontale Position des jeweiligen TF an. Es errechnet sich somit die gemittelte Temperatur T<sub>Int</sub> im Fassadenspalt zu 34,6 °C.

| TF                     | MW <sub>innen</sub> | MW <sub>mitte</sub> | MW <sub>außen</sub> | X <sub>innen</sub> | X <sub>mitte</sub> | X <sub>außen</sub> | h     | А                  | Т                     |
|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|-----------------------|
|                        | [°C]                | [°C]                | [°C]                | [cm]               | [cm]               | [cm]               | [cm]  | [cm <sup>2</sup> ] | [°C·cm <sup>2</sup> ] |
| 7                      | 32,48               | 33,88               | 33,88               | 2,35               | 4,7                | 2,35               | 12,88 | 121,07             | 4059,54               |
| 6                      | 32,92               | 34,32               | 33,86               | 2,35               | 4,7                | 2,35               | 10,76 | 101,14             | 3424,23               |
| 5                      | 33,29               | 33,99               | 33,69               | 2,35               | 4,7                | 2,35               | 10,76 | 101,14             | 3412,60               |
| 4                      | 35,27               | 34,27               | 33,77               | 2,35               | 4,7                | 2,35               | 10,76 | 101,14             | 3478,85               |
| 3                      | 35,77               | 34,07               | 35,17               | 2,35               | 4,7                | 2,35               | 10,76 | 101,14             | 3516,78               |
| 2                      | 38,37               | 35,2                | 35,5                | 2,35               | 4,7                | 2,35               | 11,88 | 111,67             | 4027,73               |
| 0,6·1 <sub>korr.</sub> |                     | 49,0                |                     |                    | 9,4                |                    | 1     | 9,4                | 460,79                |
| 1 <sub>korr.</sub>     |                     | 81,7                |                     |                    |                    | Σ                  | 68,8  | 646,7              | 22380,5               |
|                        |                     |                     |                     |                    |                    |                    |       | $=> T_{Int}$       | 34,6 °C               |

 Tabelle 5.8: Durchschnittstemperatur im Fassadenzwischenraum

Die auf diesem Wege durchgeführte Berechnung der Durchschnittstemperatur wird nun auf den allgemeinen 10 cm Fall übertragen, um die Temperaturen zu den Volumenströmen in Bezug setzen zu können. Dazu werden die Messdaten der TF aus den Experimenten d10 herangezogen und in die Spalte MW<sub>mitte</sub> der Tabelle 5.8 eingesetzt, da in dieser Versuchsreihe die Temperaturen in Fassadenmitte aufgezeichnet wurden. Die unbekannten Temperaturen für MW<sub>innen</sub> und MW<sub>außen</sub> werden daraufhin mit den Verhältnissen der in Tabelle 5.8 eingetragenen Werte MW<sub>innen</sub>/MW<sub>mitte</sub> bzw. MW<sub>außen</sub>/MW<sub>mitte</sub> abgeschätzt. Beispielhaft ergibt sich somit die Temperatur MW<sub>TF2,innen,d10</sub> zu:

 $MW_{TF2,mitte,d10} \cdot MW_{innen}/MW_{mitte} = 38,37/35,2 \cdot MW_{TF2,mitte,d10}$  $= 1,09 \cdot MW_{TF2,mitte,d10}$ 

| TF                     | MW <sub>innen</sub> | MW <sub>mitte</sub> | MW <sub>außen</sub> | X <sub>innen</sub> | X <sub>mitte</sub> | X <sub>außen</sub> | h     | А                  | Т                     |
|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|-----------------------|
|                        | [°C]                | [°C]                | [°C]                | [cm]               | [cm]               | [cm]               | [cm]  | [cm <sup>2</sup> ] | [°C·cm <sup>2</sup> ] |
| 7                      | 27,32               | 28,5                | 28,5                | 2,35               | 4,7                | 2,35               | 12,88 | 121,07             | 3414,91               |
| 6                      | 27,43               | 28,6                | 28,22               | 2,35               | 4,7                | 2,35               | 10,76 | 101,14             | 2853,53               |
| 5                      | 29,19               | 29,8                | 29,54               | 2,35               | 4,7                | 2,35               | 10,76 | 101,14             | 2991,92               |
| 4                      | 30,46               | 29,6                | 29,17               | 2,35               | 4,7                | 2,35               | 10,76 | 101,14             | 3004,78               |
| 3                      | 31,18               | 29,7                | 30,66               | 2,35               | 4,7                | 2,35               | 10,76 | 101,14             | 3065,70               |
| 2                      | 34,55               | 31,7                | 31,97               | 2,35               | 4,7                | 2,35               | 11,88 | 111,67             | 3627,25               |
| 0,6·1 <sub>korr.</sub> |                     | 44,2                |                     |                    | 9,4                |                    | 1     | 9,4                | 415,1                 |
| 1 <sub>korr.</sub>     |                     | 73,6                |                     |                    |                    | Σ                  | 68,8  | 646,7              | 19373,1               |
|                        |                     |                     |                     |                    |                    |                    |       | $=> T_{Int}$       | 29,96 °C              |

Tabelle 5.9: Durchschnittstemperatur im Fassadenzwischenraum für d10 (i)

Als Ergebnisse erhält man die beiden Durchschnittstemperaturen  $T_{Int,d10(i)} = 29,96$  °C und  $T_{Int,d10(ii)} = 34,55$  °C für den 10 cm Fassadenzwischenraum. Anhand der oben vorgeführten Abschätzung der externen Temperaturen errechnen sich diese zu  $T_{Ext,d10(i)} = 0,9964.28,8 = 28,7$  °C und  $T_{Ext,d10(ii)} = 32,7$  °C. Mit diesen Werten können nun die zugehörigen Volumenströme auf eine Differenz von 1 K zwischen Fassadenspalt und Umgebung bezogen und mit diesen Resultaten eine Validierung der CFD-Programme vorgenommen werden.





Abbildung 5.39: Volumenströme bezogen auf eine Temperaturdifferenz zwischen Fassadenspalt und Umgebung
Dieser in Abbildung 5.39 dargestellte Zusammenhang lässt sich ebenfalls wieder sehr gut durch eine Kennlinie wiedergeben und der allgemeine Volumenstrom kann durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$Q_{\rm V} = k_{\rm Qv} \cdot \sqrt{T_{\rm Int} - T_{\rm Ext}} = 0,005679 \cdot \sqrt{T_{\rm Int} - T_{\rm Ext}}$$
(5.9)

Abschließend kann für diese Kennlinie wiederum ein zugehöriger Luftwechsel n für eine Temperaturdifferenz von 1 K berechnet werden. Mit den in Tabelle 5.7 angegebenen Gleichungen erhält man:

n = 
$$\frac{0,005679 \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}} \cdot 0,688 \text{m} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}{0,0451 \text{m}^3} = 311 \frac{1}{\text{h}}$$
 (5.10)

# Kapitel 6

# Validierung der CFD-Programme NAGARE und FLUENT anhand experimenteller Untersuchungen von Konvektionsströmungen

Inhalt des ersten Teils dieses Kapitels ist ein Vergleich der im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Versuche mit den numerischen Strömungsberechnungen, die mit NAGARE und FLUENT durchgeführt wurden. Dabei kann einerseits qualitativ das allgemeine Strömungsverhalten anhand der Strömungsübersichten und Geschwindigkeitsprofile sowie andererseits quantitativ die Größe der auftretenden Volumenströme an den Schnitten a<sub>jk</sub> überprüft werden. Daran anschließend werden stellvertretend für zahlreiche ergänzende Studien die Ergebnisse zweier weiterer Experimente, die in der Literatur [14], [45] ausführlich beschrieben sind, für einen weiterführenden Vergleich der CFD-Software FLUENT herangezogen. Diese beiden Beispiele wurden ausgewählt, da sie sich entsprechend ihrem Aufbau ebenfalls dem Themenkomplex der Konvektionsströmungen widmen und darüber hinaus ihr Hauptaugenmerk auf die Erfassbarkeit und Abschätzung von auftriebsinduzierten Luftströmungen in Gebäuden legen. Im Vordergrund bei allen Betrachtungen steht eine Überprüfung der allgemeinen Modell- und Berechnungsparameter, die bei den Simulationsberechnungen angenommen werden, da ihre Praxistauglichkeit für aufbauende zuverlässige Prognosen gewährleistet sein muss.

# 6.1 Numerische Strömungsberechnung der Versuchsreihe

## 6.1.1 Grundlegende Ansätze in FLUENT

Die Berechnungen mit FLUENT fanden zu einem überwiegendem Teil im dreidimensionalen Raum statt. Die verwendeten Turbulenzmodelle und Diskretisierungsmöglichkeiten wurden in Kapitel 3.3 ausführlich beschrieben und erwiesen sich bei den Simulationen hinsichtlich einer optimalen Ausnutzung der Rechenleistung als die effizienteste Methode. Bei jeder Rechnung galt es, die Konvergenz des Verfahrens über die Gesamtheit der Iterationen zu überprüfen und gegebenenfalls durch eine Anpassung des Netzes und/oder eine Verringerung der Zeitschrittweite At zu verbessern. Eine Kontrolle des Gitters erfolgte weiterhin anhand der y<sup>+</sup>-Werte, um das verwendete Wandmodell optimal auf das verwendete Netz abzustimmen. Aufgrund der sehr geringen  $y^+$ -Werte, die in der Größenordnung zwischen 1 und 4 lagen, kam bei den Strömungsberechnungen fast ausnahmslos die verbesserte Wandbehandlung zum Einsatz. Das wichtige Kriterium der Netzunabhängigkeit einer Lösung wurde für alle gewählten Systeme durch Veränderungen und Verfeinerungen der Netzstruktur soweit möglich gesichert. Den Schwerpunkt der folgenden Vergleiche bilden die Simulationsergebnisse des Fassadenmodells mit einer Spaltbreite von 10 cm, da für diesen Fall die Temperaturverteilung im Experiment vollständig ermittelt wurde. Vertiefende Bemerkungen zu den anderen Fassadenabständen werden an geeigneter Stelle angefügt. Die Aussagen zu den allgemeinen Strömungsfeldern und Geschwindigkeitsprofilen können allerdings sehr gut auf die gesamte Versuchsreihe übertragen werden und besitzen auch für die Versuche d5, d15 und d20 ihre Gültigkeit. Eine komplette Zusammenstellung der Geschwindigkeitsprofile findet sich in Anhang B. Die folgende Abbildung 6.1 gibt beispielhaft einen Überblick über die verwendete Netzdiskretisierung sowie über die Lage der Schnittebenen, an denen die Massenströme, die bei einer Validierung eine wesentliche Rolle spielen, ausgewertet wurden.



Abbildung 6.1: Netzdiskretisierung und Wahl der Schnittebenen für die Auswertung

Bei den numerischen Berechnungen wurde aufgrund der geometrischen Form des gesamten Versuchsmodells ein strukturiertes Netz angesetzt, das im Bereich der Ein- und Auslassöffnungen der Fassade sowie an der Heizmatte zusätzlich verdichtet wurde. Diese Verfeinerung des Gitters ist für eine gute Modellierung erforderlich, da zum einen unmittelbar an den Heizmatten die größten Temperaturgradienten des gesamten Raumes vorliegen und zum anderen im Bereich der Fassadenöffnungen und der beiden -ecken das Strömungsverhalten maßgebend von den geometrischen Randbedingungen beeinflusst wird, die an diesen Stellen hohe Geschwindigkeitsgradienten bzw. Turbulenzgrade nach sich ziehen. Zudem sollen in diesen Schnitten die zum Abgleich benötigten Geschwindigkeitsprofile erstellt werden, deren Approximation an den realen Funktionsverlauf durch eine höhere Anzahl an Stützstellen erheblich verbessert wird.

Die Auswertung der Volumenströme fand an den drei gekennzeichneten Flächen innerhalb des Fassadenmodells statt, während die Strömungsübersichten und Temperaturverteilungen an den dazu senkrechten Ebenen im <sup>1</sup>/<sub>2</sub>-, <sup>1</sup>/<sub>4</sub>- und <sup>1</sup>/<sub>8</sub>-Punkt bereitgestellt wurden. Da sich allerdings bei den Berechnungen zeigte, dass über die Tiefe des Raumes nur in den äußersten Randbereichen geringe Veränderungen im Strömungsverhalten abzulesen waren, deren Einfluss vernachlässigt werden konnte, konzentrieren sich die weiteren Analysen auf die mittlere Ebene. Die in diesem Kapitel abgedruckten Abbildungen, die die typischen Eigenschaften der Luftströmung im mittleren Schnitt illustrieren, können auf die beiden anderen Schnitte übertragen werden, ohne an Aussagekraft zu verlieren. Aus diesem Grund wurden alle vier Fassadenabstände durch zweidimensionale Simulationen ergänzt, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu einer dreidimensionalen Berechnung aufdecken zu können.

### 6.1.2 Grundlegende Ansätze in NAGARE

Wie in Kapitel 3.3.2.1 beschrieben, wird die Strömungsberechnung in NAGARE mit einer Large Eddy Simulation (LES) auf einem strukturierten Gitter vorgenommen. Durch die Implementierung des "generalized coordinate system" in NAGARE II kann das Netz in Bereichen, die aufgrund hoher Temperatur- oder Geschwindigkeitsgradienten bzw. geometrischer Randbedingungen einer Verfeinerung bedürfen, verdichtet werden. Dies hat bei dem vorliegenden System immense Vorteile, da der sehr schmale Fassadenspalt feiner aufgelöst werden kann als der übrige Modellraum. Dies spart konsequenterweise Zellen und somit auch Rechenzeit ein. Abbildung 6.2 zeigt die räumliche Diskretisierung für den 10 cm Fall, wobei aus Gründen der Übersichtlichkeit nur jeder zweite Knotenpunkt dargestellt ist. Die Verdichtung im Bereich des Fassadenmodells ist sehr gut ablesbar, wobei bei der Netzgenerierung zu beachten ist, dass keine großen Abweichungen zwischen den Abmessungen benachbarter Zellen auftreten, siehe hierzu auch [22]. Dieser Aspekt kann bei der grafischen Systemerstellung in GeDeNA mittels der "Grid Equation Analysis"-Funktion kontrolliert werden, deren Auswertung für das verwendete Gitter ergänzend in Abbildung 6.2 angegeben ist. Bei einer ungünstigen Diskretisierung kann eine einfache Anpassung über eine Veränderung der Parameter innerhalb der Netzgleichung erfolgen, deren Auswirkungen direkt von GeDeNA eingearbeitet werden.



Abbildung 6.2: Netzdiskretisierung und Schnittführung für die Auswertung

Die Simulationen fanden im zweidimensionalen Raum statt, da die benötigte Rechenleistung für eine LES höher ist als bei einer vergleichbaren Berechnung, die auf den gemittelten Reynolds-Gleichungen basiert und sich Turbulenzmodelle zunutze macht. Dafür besitzt die LES eine größere physikalische Genauigkeit.

# 6.1.3 Vergleich der Versuchsergebnisse mit NAGARE und FLUENT

Analog zu der Vorgehensweise in Kapitel 5.3 werden nun beispielhaft Vergleiche der Strömungsübersichten und Geschwindigkeitsprofile herausgearbeitet, die einen repräsentativen Eindruck über die Möglichkeit einer Validierung und deren Erfolg geben. Zunächst können einige generelle Aussagen zu den mit NAGARE und FLUENT berechneten Simulationsergebnissen getroffen werden, die für sämtliche Spaltbreiten Gültigkeit besitzen. Eine wichtige Frage, die in diesem Zusammenhang zu klären ist, ist die Bestimmung des korrekten Zeitpunkts für den Abbruch einer instationären Berechnung. Dies geschieht in beiden Programmen anhand des Verlaufs der Volumenströme, die einen guten Hinweis über den Fortschritt der Simulationen geben. Bei FLUENT können die Resultate, die an den im Preprocessing definierten Schnittebenen auftreten, anhand von Statusmonitoren über den Gesamtverlauf einer Simulation beobachtet werden. Dies erlaubt zum einen eine gute Kontrolle der numerisch bedingten Parameter wie z.B. der Residuen, die einen Überblick über das aktuelle Konvergenzverhalten geben. Zum anderen kann der Berechnungsstand anhand der Volumenströme und der Temperaturverhältnisse im System gut verfolgt werden. Diese beiden charakteristischen Merkmale, deren typische Verläufe exemplarisch in Abbildung 6.3 dargestellt sind, eignen sich in besonderem Maße für eine Festlegung des Abbruchzeitpunkts einer Simulation.



Abbildung 6.3: Typischer Massenstrom- und Temperaturverlauf über die Zeit

Der Massenstrom  $Q_M$  innerhalb des Fassadenmodells steigt zunächst rapide an, bis er ein globales Maximum gebildet hat. Dies resultiert aus den zunächst großen Temperaturgradienten zwischen der Luft im Fassadenspalt und in der Umgebung, den der Massenstrom auszugleichen versucht. Durch den stetigen Wärmeeintrag der Heizmatten kann sich die Luft jedoch nicht auf ein konstantes Niveau im gesamten Modell einpendeln, sondern eine geringe Übertemperatur bleibt im Zwischenraum bestehen. In der folgenden Phase ist das System bestrebt, einen Gleichgewichtszustand zu finden, in dem der Volumenstrom genau so groß ist, dass er unter den gegebenen geometrischen Bedingungen den Temperaturgradienten aufrecht erhält, der benötigt wird, um eben diesen Volumenstrom zu erzeugen. Würde er niedriger sein, käme es zu einem Anstieg der Spalttemperatur und der Gradient zur Umgebungsluft würde sich vergrößern. Dies wiederum würde einen höheren Volumenstrom zur Folge haben, der die Luft im Fassadenzwischenraum wieder abkühlen würde. Im umgekehrten Fall eines zu hohen Volumenstroms entstehen die genau umgekehrten Prozesse. Nach einem Zeitraum, in dem dieser Einspielvorgang stattgefunden hat, bildet sich ein Gleichgewichtszustand aus, der an dem nahezu horizontal verlaufenden Ast des Massenstroms ablesbar ist. Gleichzeitig steigen die Temperaturen im Fassadenspalt und der Umgebung gleichmäßig an, wobei die Differenz zwischen beiden nahezu konstant bleibt. Hierbei unterscheidet sich allerdings die Numerik vom Experiment, da in FLUENT und NAGARE aus Vergleichbarkeitsgründen der beiden CFD-Programme untereinander mit adiabaten Randbedingungen gerechnet wurde, während diese Randbedingungen im realen Versuch für das Gesamtsystem nicht gelten. So tritt im Gegensatz zu den Simulationen im Experiment ein zusätzlicher Wärmestrom auf, der durch die Wände des Acrylglasmodells bzw. der Styrodurbox entweicht. Es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Wärmeeintrag durch die Heizmatten, Wärmeverlust durch die Systemberandung und den dazugehörigen Massenströmen ein, wohingegen in der Simulation sich aufgrund der konstanten Wärmezufuhr und der nicht vorhandenen Verluste das System immer weiter aufheizen kann. Mit zunehmender Zeitdauer wird der Temperaturgradient zwischen Fassadenmodell und Umgebung immer weiter abnehmen und sich folglich auch der Massenstrom reduzieren. Dieses Verhalten bestätigt sich sowohl bei der Ergebnisauswertung in NAGARE als auch in FLUENT.



Abbildung 6.4: Typischer Volumenstromverlauf in NAGARE

Wie im Folgenden aber anhand der Volumenströme ablesbar ist, spielen die adiabaten Randbedingungen bei den quantitativen Vergleichen nur eine untergeordnete Rolle. Entscheidender sind sie bei der Analyse des globalen Strömungsverhaltens. Die gesamte Strömung stellt sich vor allem in FLUENT wesentlich ruhiger dar, als es in den Experimenten beobachtet werden konnte. Insbesondere die eindeutig erkannten Instationaritäten an den Schnitten a<sub>2k</sub> für die Versuche d10, d15 und d20 sind nicht anzutreffen. NAGARE hingegen erfasst dieses schwankende Strömungsverhalten recht gut und lässt deutlich mehr Turbulenzen im Fassadenzwischenraum erkennen. Dies liegt vor allem daran, dass bei NAGARE immer wieder Ablösungen von deutlich wärmeren Temperaturblasen an den Heizmatten auftreten, die beim Aufsteigen im Spalt die dortige Strömung verwirbeln. Dennoch lassen sich sehr gute repräsentative Strömungsfelder gewinnen, die einen aussagekräftigen qualitativen Überblick über die Ergebnisse der CFD-Simulationen bieten. Die Beträge der Vektoren müssen allerdings für quantitative Vergleiche auf die zu diesem Zeitpunkt in dem System vorhandenen Temperaturdifferenzen bezogen werden. Dies hat den Vorteil, dass sie im Anschluss für eine Umrechnung auf andere mögliche Gradienten genutzt werden können, was für einen vollständigen Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Experimenten besonders wichtig ist.



Abbildung 6.5: Vergleich der Strömungsfelder FLUENT – NAGARE – Experiment

Eine Gegenüberstellung der Strömungsfelder in Abbildung 6.5 soll die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen FLUENT, NAGARE und den Experimenten herausstreichen. Die größten Übereinstimmungen zwischen den beiden CFD-Programmen und dem Experiment ergeben sich im Einlassbereich. Die Hauptströmung wird sehr gut ab-

gebildet und auch die turbulente Zone unmittelbar hinter der Außenfassade ist in gleicher Größe vorhanden. Dies ist vor allem auf das äußerst stabile Strömungsverhalten an der Einlassöffnung, das sich während der Experimente ausgebildet hatte, zurückzuführen. Die Heizmatten geben stetig Wärme an die angrenzende Luft ab, und die Effekte aus dem Wärmeverlust durch die Systemberandung spielen nur eine unwesentliche Rolle. In halber Spalthöhe ermittelt FLUENT, wie schon erwähnt wurde, ein stationäres Strömungsverhalten. Die ausgewählte Fotoaufnahme der Luftströmung aus der optischen Strömungsmessung bietet zwar eine hohe Ähnlichkeit und belegt, dass die berechneten Geschwindigkeitsvektoren durchaus Sinn machen und zu verschiedenen Zeitpunkten auch auftreten können. Dennoch sind sie mit Vorsicht zu betrachten, da sie lediglich einem absoluten Momentanzustand der Konvektionsströmung entsprechen und im Hinblick auf die Gesamtversuchsdauer nicht verallgemeinert werden können. NAGARE weist diesem Schnitt eine wesentlich höhere Instationarität zu und stimmt dadurch mit den Versuchsbeobachtungen besser überein. Es kann jedoch hinzugefügt werden, dass für die Experimente d5 in diesem Bereich die Übertragbarkeit von beiden CFD-Programmen vollständig gelingt, da hier wie in Kapitel 5.3.1 bereits erläutert, eine stationäre Strömung vorlag. Verfolgt man nun die aufsteigende Luft zum Auslass hin, so kann man feststellen, dass das Strömungsverhalten in diesem Bereich wiederum für alle Fassadenabstände gleichermaßen besser simuliert wird. Die Ausströmwinkel passen in guter Näherung zu denen, die über die Versuchsdauer vermessen werden konnten, wobei die geringen Abweichungen der Strömungsrichtung in FLUENT daraus resultieren, dass der turbulente Eckbereich von der Numerik unterschätzt wird. Aus diesem Grund bildet sich ein kleinerer Wirbel aus, der den Verlauf der Hauptströmung nur gering beeinflusst. Vor allem im Vergleich zu NAGARE wird dieser Unterschied deutlich, da dessen Berechnung einen wesentlich größeren Wirbel in der Ecke ergibt, der nahezu perfekt mit dem Versuchsergebnis übereinstimmt und sich auch dementsprechend auf die ausströmende Luft auswirkt.

Für einen vollständigen Vergleich der Massen- bzw. Volumenströme und der Geschwindigkeitsprofile, die in den Schnitten  $a_{jk}$  mit Hilfe von PIAP und der PTV-Software erstellt sowie mit FLUENT und NAGARE simuliert wurden, ist eine Umrechnung über die im System vorhandenen Temperaturdifferenzen durchzuführen. In den folgenden Tabellen 6.1 und 6.2 sind die von FLUENT für zwei- und dreidimensionale Systeme berechneten Ergebnisse eingetragen, die eine Übertragung auf andere Temperaturdifferenzen ermöglichen. Zusätzlich zu dem an der Auslassöffnung auftretenden Massenstrom  $Q_M$  werden die zugehörigen Durchschnittstemperaturen im Fassa-

denzwischenraum T<sub>Int</sub> und in der Sicherungsbox T<sub>Ext</sub> benötigt. Die Umrechnung auf ein  $\Delta T = 1$  K kann in gewohnter Weise nach Gleichung 5.7 erfolgen.

| Spaltbreite | Massenstrom           | $T_{\text{Ext}}$ | T <sub>Int</sub> | $\Delta T$ | $k_{\Delta T=1K}$     | $LW_{\Delta T=1K}$ |  |
|-------------|-----------------------|------------------|------------------|------------|-----------------------|--------------------|--|
|             | [kg/s]                | [K]              | [K]              | [K]        | [m <sup>3</sup> /s]   | [1/h]              |  |
| d5          | 38,1.10-4             | 28,5074          | 29,7787          | 1,2713     | 28,0.10-4             | 471                |  |
| d10         | 47,4·10 <sup>-4</sup> | 34,4464          | 35,4783          | 1,0319     | 38,7.10-4             | 308                |  |
| d15         | 54,1.10-4             | 29,3550          | 30,2319          | 0,8769     | 47,9·10 <sup>-4</sup> | 251                |  |
| d20         | 54,1.10-4             | 31,7399          | 32,5363          | 0,7964     | 50,3.10-4             | 196                |  |

Tabelle 6.1: Ergebnisse der dreidimensionalen CFD-Simulationen mit FLUENT

Tabelle 6.2: Ergebnisse der zweidimensionalen CFD-Simulationen mit FLUENT

| Spaltbreite | Massenstrom           | T <sub>Ext</sub> | T <sub>Int</sub> | $\Delta T$ | $k_{\Delta T=1K}$     | $LW_{\Delta T=1K}$ |  |
|-------------|-----------------------|------------------|------------------|------------|-----------------------|--------------------|--|
|             | [kg/(s·m)]            | [K]              | [K]              | [K]        | $[m^3/(s\cdot m)]$    | [1/h]              |  |
| d5          | 46,3.10-4             | 24,3266          | 25,3967          | 1,0701     | 37,1.10-4             | 430                |  |
| d10         | 62,3.10-4             | 26,6578          | 27,5213          | 0,8635     | 55,6.10-4             | 306                |  |
| d15         | 138,6.10-4            | 34,0001          | 36,5879          | 2,5878     | 71,5.10-4             | 258                |  |
| d20         | 69,8·10 <sup>-4</sup> | 35,6369          | 36,3532          | 0,7163     | 68,4·10 <sup>-4</sup> | 183                |  |

Da für eine Spaltbreite von 10 cm die Temperaturverhältnisse innerhalb des Versuchsmodells so bestimmt wurden, dass sich ein zuverlässiges Profil für den gesamten Modellraum erstellen ließ, soll für diesen Fall ein quantitativer Vergleich vorgenommen werden. Für einen Unterschied von 1 K ergab sich der in Tabelle 6.1 angegebene Volumenstrom  $k_{\Delta T=1K} = 38,7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$ /s. Der zugehörige Luftwechsel LW<sub> $\Delta T=1K$ </sub> lässt sich durch eine Division durch das Luftvolumen des Fassadenzwischenraums gewinnen. Für den Fall d10 stimmt der Luftwechselwert LW<sub>FLUENT</sub> = 308 1/h mit dem experimentell gemessenen LW<sub>Versuch d10</sub> = 311 1/h bei einer unwesentlichen Abweichung von nur 1 % sehr gut überein, d.h. dass sich mit der CFD-Simulation eine hervorragende Prognose für den Volumenstrom treffen lässt. Da sich dieses Verhalten in zahlreichen ergänzenden Vergleichsrechnungen auch für andere Systeme, siehe hierzu auch Kapitel 6.2 und 6.3 sowie [35], bestätigte, können die in Tabelle 6.1 aufgeführten Ergebnisse im weiteren Verlauf der Arbeit als Basis für aufbauende Analysen festgelegt werden. Bezieht man die Volumenströme, die sich mittels einer analogen Vorgehensweise in NAGARE berechnen lassen, auf die oben angegebenen FLUENT Resultate, so ist festzustellen, dass diese Werte von NAGARE zu 13,5 % (d5) bis 16,5 % (d10) unterschätzt werden. Dieses spiegelt sich konsequent in den Geschwindigkeitsprofilen wieder, die nun zueinander ins Verhältnis gesetzt werden sollen. Auszugsweise sind in den Abbildungen 6.6 und 6.7 für die Schnitte  $a_{31}$  und  $a_{11}$  die Profile, die sich mit FLUENT und NAGARE einerseits sowie PTV und PIAP andererseits ergeben haben, in einem Diagramm zusammengefasst worden. Alle Kurven wurden auf eine Temperaturdifferenz von 1 K umgerechnet, so dass sowohl die Profile aus d10- $a_{j1}(i)$  und d10- $a_{j1}(i)$  berücksichtigt werden können.



Abbildung 6.6: Vergleich der Geschwindigkeitsprofile am Einlass a<sub>31</sub> FLUENT – NAGARE – Experiment d10



**Abbildung 6.7:** Vergleich der Geschwindigkeitsprofile am Auslass a<sub>11</sub> FLUENT – NAGARE – Experiment d10

Es ergibt sich für die beiden exemplarisch dargestellten Schnitte ein äußerst stimmiger Gesamteindruck, der sich auch in den anderen Profilen, die in Anhang B zu finden sind, bestätigt. Am Einlass weisen sämtliche Funktionen einen ähnlichen Verlauf auf, wobei allerdings beide CFD-Programme jeweils nur ein ausgeprägtes Maximum errechnen, das bei FLUENT nahe der Unterkante der Außenfassade bei NAGARE hingegen nahe der Heizmatte auftritt. Wie die geringeren Volumenströme, die NAGARE errechnet, schon andeuten, sind die absoluten Geschwindigkeitsbeträge niedriger. Dies spiegelt sich am Auslass gleichermaßen wieder, an dem der allgemeine Eindruck, den beide Programme insgesamt hinterlassen, gut verdeutlicht werden kann. Während FLUENT im Vergleich des Volumenstroms, der sich als Integral der Geschwindigkeitsfunktion ergibt, besser abschneidet und eine sehr gute Näherung anbietet, weicht hingegen das berechnete Strömungsfeld und der Verlauf des Profils von den Beobachtungen und Auswertungen der Versuche ab. Das globale Maximum ist wesentlich höher als es in den Experimenten gemessen wurde, wohingegen die Geschwindigkeiten im mittleren Drittel unterschätzt werden. Wie bei der Gegenüberstellung in Abbildung 6.5 schon festgestellt werden konnte, hängt dies mit der ungenaueren Abbildung des Wirbels in der Ecke zusammen. Im Gegensatz zu den FLUENT Ergebnissen sind die von NAGARE erstellten Profilverläufe und Übersichten den Versuchsdaten erheblich ähnlicher. Neben den erwähnten Instationaritäten für größere Fassadenspaltbreiten, die sowohl in den Simulationsberechnungen als auch in den Experimenten auftreten, modelliert NAGARE den Wirbel in der oberen Fassadenecke mit all seinen Konsequenzen für die Hauptströmung und die Ablösung der Strömung an der Oberkante der Außenfassade wesentlich besser als FLUENT. Die absoluten Werte, wie z.B. die Volumenströme, werden allerdings um durchschnittlich 14,1 % unterschätzt.

Ebenfalls soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass weitere Unterschiede bei der Temperaturverteilung im gesamten Modellraum auftreten, für die sich die adiabaten Systemberandungen verantwortlich zeichnen. Während bei den Versuchen eine geringe Abnahme der Temperaturen im Fassadenzwischenraum mit zunehmender Höhe gemessen wurde, liefern die Berechnungen hingegen ein Ansteigen der Temperaturen, vgl. hierzu auch Abbildung 5.37 und Abbildung 6.8. In der angrenzenden Sicherungsbox, in der sich die wärmere Luft mit geringerer Dichte unterhalb der Decke sammelt und nach und nach den Raum füllt, ist ebenfalls ein Temperaturgefälle festzustellen, welches in dem Maße nicht bei den Versuchen festgestellt werden konnte. Eine Erwärmung der unteren Kante der Außenfassade, die an die Einlassöffnung angrenzt, tritt ebenfalls aufgrund der unberücksichtigten Materialdaten nicht auf.



Abbildung 6.8: Temperaturverteilung in der mittleren Ebene sowie der unteren Ecke des Fassadenmodells

Dieses unterschiedliche Verhalten kann eindeutig mit den Wärmeverlusten des Acrylglasmodells und der Styrodurbox begründet werden, die bei der Modellierung in den CFD-Programmen nicht erfasst wurden. Für eine erweiterte Zusammenstellung der mit FLUENT berechneten Luftwechsel wurden ergänzende Simulationen für einen Fassadenabstand von 3 cm und 7 cm durchgeführt, um die Lage des Maximums bestimmen zu können. Diese Ergebnisse finden sich in Tabelle 6.3 und sind gemeinsam mit den Berechnungen für die anderen Spaltbreiten abschließend in Abbildung 6.9 grafisch aufbereitet dargestellt.

| Spaltbreite | Massenstrom | T <sub>Ext</sub> | $\mathrm{T}_{\mathrm{Int}}$ | ΔΤ     | $k_{\Delta T=1K}$ | $LW_{\Delta T=1K}$ |  |
|-------------|-------------|------------------|-----------------------------|--------|-------------------|--------------------|--|
|             | [kg/s]      | [K]              | [K]                         | [K]    | $[m^3/s]$         | [1/h]              |  |
| d3          | 22,1.10-4   | 20,5596          | 22,2572                     | 1,6976 | 14,0.10-4         | 424                |  |
| d7          | 42,9.10-4   | 21,6992          | 22,6072                     | 0,9080 | 37,4.10-4         | 436                |  |

 Tabelle 6.3: Ergänzende Ergebnisse dreidimensionaler CFD-Simulationen

 mit FLUENT

Die höchsten Luftwechselraten für die vorgegebene geometrische Struktur lassen sich mit Fassadenabständen zwischen 3 und 7 cm erreichen. Für Zwischenraumbreiten in diesem Bereich ergeben sich zwar absolut gesehen nicht die größten Massenströme, aber bezogen auf das geringere Gesamtvolumen der effektivste Luftaustausch.



Abbildung 6.9: Luftwechsel des Fassadenmodells in Abhängigkeit von der Spaltbreite

# 6.2 Versuche Woods/Gladstone

Parallel zu den numerischen Simulationen der Versuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, wurde ein in der Literatur [14] beschriebenes Experiment mit FLUENT abgebildet, um auch anhand dieser Vergleichsrechnungen die Ansätze der gewählten Rechenmodelle zu überprüfen.

## 6.2.1 Versuchsaufbau und Grundlagen

Der prinzipielle Aufbau des Versuchs ist in Abbildung 6.10 dargestellt. Bei dem untersuchten Modell handelt es sich um eine 17,65 x 17,65 x 28,7 cm messende würfelförmige Box, die mit Wasser gefüllt und auch von Wasser umgeben ist. An einer Seite enthält sie drei Öffnungen, die je nach zu untersuchender Einstellung unabhängig voneinander geöffnet oder verschlossen werden können. Es konnten auf diese Weise drei Varianten betrachtet werden, bei denen jeweils zwei Öffnungen einen Austausch des Wassers ermöglichen, während die dritte verschlossen wird. Ziel der Autoren war es, anhand dieser Experimente eine formelmäßige Erfassung des Luftwechsels von Räumen aufgrund globaler Temperaturgradienten zu entwickeln.



Abbildung 6.10: Prinzipskizze des Versuchsmodells von Gladstone/Woods [14]

Über die beheizbare Bodenplatte wurde gleichmäßig Wärme in das System eingetragen. Wände und Decke wurden isoliert, um Energieverluste, die aufgrund der Stoffströme durch die Systemgrenzen auftreten können, zu minimieren. Die Erwärmung des Wassers über die Zeitspanne eines Versuches ist anhand der eingebrachten Thermoelemente aufgezeichnet worden. Im Ausgangszustand wurde Wasser in die verschlossene Box gefüllt, dessen Temperatur der Temperatur der Heizplatte entsprach und somit über der des Wassers im Außenraum lag. Zu Versuchsbeginn wurden die obere und untere Öffnung geöffnet und die Temperaturänderung des Wassers in der Box über die Zeit beobachtet.



Abbildung 6.11: a) Temperaturverlauf des Wassers innerhalb der Box über die Zeitb) Volumenstrom und Temperaturbezeichnungen [14]

Wie in Abbildung 6.11 erkennbar ist, findet zunächst in einer Übergangsphase ein starker Abfall der Wassertemperatur in der Box statt, der daraus resultiert, dass das wärmere Wasser durch die obere Öffnung ausströmt und kühleres aus dem Außenraum durch die untere Öffnung eintritt. Durch die am Boden befindliche Heizquelle erwärmt sich das einströmende Wasser und steigt aufgrund der Dichteunterschiede aufwärts. Nach einer gewissen Einspielzeit erreicht das System einen stationären Zustand, in dem bei konstantem Volumenstrom  $Q_V$  eine nahezu konstante Temperatur im Innenraum T<sub>Int</sub> erreicht wird. Dieser stationäre Zustand beruht unter Vernachlässigung der Verluste durch die Wände auf dem Gleichgewicht der in das System durch die Bodenplatte eingetragenen Wärmeenergie und dem Energieverlust durch das ausströmende Wasser. Aufgrund dieses Gleichgewichtszustand können Gleichungen für diesen Prozess formuliert werden. Für den Energieeintrag Q<sub>H1</sub> und den Verlust Q<sub>H2</sub> ergeben sich im Bereich 10<sup>7</sup> < Ra < 10<sup>9</sup> die folgenden Zusammenhänge [14]:

$$Q_{H1} = \lambda_G \cdot A_R \cdot \left(\frac{\beta \cdot g}{\kappa \cdot \upsilon}\right)^{1/3} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \kappa \cdot \left(T_{Heizung} - T_{Int}\right)^{4/3}$$
(6.1)

$$Q_{H2} = \rho \cdot c_{p} \cdot (T_{Int} - T_{Ext}) \cdot Q_{V}$$
(6.2)

mit:  $\lambda_G$  Parameter für den Wärmeübergang [-]

 $A_R$  Heizfläche der Bodenplatte  $[m^2]$ 

T<sub>Heizung</sub> Temperatur der Bodenheizung [K]

Q<sub>V</sub> Volumenstrom nach:

$$Q_{V} = v \cdot c \cdot A_{H} = \left(\frac{g \cdot (\rho_{ext} - \rho_{int})}{\rho_{int}} \cdot (H - h)\right)^{1/2} \cdot c \cdot A_{H}$$

$$= \left(\beta \cdot g \cdot (T_{Int} - T_{Ext}) \cdot H\right)^{1/2} \cdot c \cdot A_{H} \qquad (6.3)$$
mit : c Beiwert für die Art des Ein- bzw. Auslasses [-]  
A\_{H} Öffnungsfläche des Ein- bzw. Auslasses [m<sup>2</sup>]  
H vertikaler Abstand zwischen den Öffnungen [m]  
h im Allgemeinen: Schichtdicke der eintretenden  
kühleren Luft nach [18] [m]

Zu Gleichung 6.3 ist anzumerken, dass an dieser Stelle nicht wie in der Literaturquelle angegeben mit h = 1/2 [14], sondern mit h = 0 [17] gearbeitet wird, da es sich bei dem vorliegenden Versuch um einen Raum mit einer konstanten flächenhaften Bodenheizung sowie hoch- und tiefliegenden Öffnungen handelt. Äquivalent dazu wird, wie später dargelegt, der Beiwert c für die Art des Ein- und Auslasses mit  $1/2^{0,5}$  abgemindert, so dass die Ergebnisse der CFD-Simulationen mit der Literaturquelle vergleichbar bleiben. Gleichung 6.1 beschreibt im Prinzip die Größe des Wärmeübergangs bei einer gegebenen Temperaturdifferenz und basiert im vorliegenden Fall auf der allgemeinen Form der Nusselt-Zahl Nu =  $k \cdot Ra^n$ . Denton und Wood [7] haben zahlreiche Versuche, die sich mit der turbulenten Konvektion an einer bzw. zwischen zwei parallelen horizontalen Platten beschäftigen, zusammengestellt und geben als allgemeine Lösung die Beziehung Nu =  $c_q \cdot Ra^{1/3}$  an, wobei  $c_q$  als Wärmeübertragungskoeffizient bezeichnet wird. Dieser kann in der folgenden Abbildung 6.12 in Abhängigkeit der Rayleigh-Zahl für verschiedene Medien abgelesen werden.



**Abbildung 6.12:** Wärmeübertragungskoeffizient c<sub>q</sub> in Abhängigkeit von der Rayleigh-Zahl Ra [7]

Durch Umformen dieser Ausgangsgleichung kann Gleichung 6.1 gewonnen werden, wobei lediglich  $c_q$  durch den empirisch ermittelten Zusammenhang  $\lambda_G = 2^{4/3} \cdot c_q$  ersetzt werden muss [14]. Gleichung 6.2 folgt aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik und gibt die Leistung an, d.h. die Energiemenge pro Zeit, die an den Massenstrom gebunden das System verlässt. Sie resultiert aus dem Produkt des Massenstroms  $Q_M$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  und des Temperaturunterschieds  $\Delta T$ . Der Volumenstrom  $Q_V = Q_M / \rho$  errechnet sich nach Gleichung 6.3 und basiert auf einer analytischen Herleitung, die in einer Veröffentlichung von Linden et al. [18] zu finden ist. Für den oben beschriebenen Versuchsaufbau wurden anhand von Kalibrierungsexperimenten die Beiwerte  $c = 1/2^{0.5} \cdot (0.98 \pm 0.15) = 0.69 \pm 0.11$  und  $\lambda_G = 0.166 \pm 0.003$  ermittelt [14]. Der Wert  $c_q = \lambda_G / 2^{4/3} \approx 0.066$  stimmt gut mit dem in Abbildung 6.12 angegebenen Wärmeübertragungskoeffizienten im Bereich von Ra =  $10^8$  überein.

### 6.2.2 Vergleich der Versuchsergebnisse mit FLUENT

Für die computergestützte Simulation der Volumenströme und der Temperaturen wurde FLUENT gewählt, da bei dieser Software der Außenraum nicht modelliert werden braucht, sondern Ein- und Auslässe des Versuchsmodells über "pressure inlet" bzw. "pressure outlet" Randbedingungen erfasst werden können. D.h. es können gezielt Systemrandbedingungen für den Übergang Berechnungsvolumen zu umgebendem Raum definiert werden. Dies hat entweder eine enorme Rechenzeitersparnis zur Folge, da der Außenraum nicht durch Volumenelemente abgebildet werden muss oder die in Abbildung 6.10 dargestellte Box kann mit mehr Zellen versehen werden. Im Preprocessing wurde mit GAMBIT die Geometrie erzeugt, wobei zur Vereinfachung die Öffnungen der Box nicht rund, sondern flächengleich quadratisch abgebildet wurden. Die Auswirkungen wurden als eher gering eingeschätzt, da die Öffnungsflächen weniger als 1% der Wandfläche ausmachen. Als Medium wurde Wasser durch Luft ersetzt, um die Gleichungen 6.1 bis 6.3 verifizieren zu können, die anschließend ansatzweise auf die Experimente, die in dieser Arbeit im Vordergrund stehen, übertragen werden sollen. In Abbildung 6.13a) ist die verwendete Netzgeometrie und die Wahl der Randbedingungen dargestellt.



Abbildung 6.13: a) Netzgeometrie FLUENT b) Verlauf von T<sub>Int</sub> und Q<sub>M</sub> über die Zeit

Zunächst wurde geprüft, ob sich die Werte für  $\lambda_G$  anhand einer numerischen Simulation der Kalibrierungsversuche entsprechend einstellen. Es zeigte sich, dass die erzielten Berechnungsergebnisse gut mit den in Abbildung 6.12 angegebenen Wärmeübertragungskoeffizienten c<sub>q</sub> übereinstimmen, vgl. Anhang C. Anschließend wurden zwei Fälle mit FLUENT simuliert, um die Ergebnisse mit den Gleichungen 6.1 bis 6.3 vergleichen zu können. Die zugrundeliegenden Parameter wurden entsprechend Tabelle 6.4 gewählt, die zu den angegebenen Raumtemperaturen T<sub>Int</sub> und den Volumenströmen Q<sub>V</sub> führten:

| $T_{\rm Heizung}$ | $T_{\text{Ext}}$ | Ra       | $c_q$ | $\lambda_{G}$ | $T_{Glg.}$ | $Q_{V,Glg.}$          | T <sub>FLUENT</sub> | Q <sub>V,FLUENT</sub> |
|-------------------|------------------|----------|-------|---------------|------------|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| [K]               | [K]              | [-]      | [-]   | [-]           | [K]        | [m <sup>3</sup> /s]   | [K]                 | [m <sup>3</sup> /s]   |
| 318               | 291              | ~4,5.107 | 0,07  | 0,176         | 309,7      | 4,84·10 <sup>-5</sup> | 311,5               | 4,87·10 <sup>-5</sup> |
| 303               | 284              | ~3,6.107 | 0,071 | 0,179         | 297,4      | 4,15.10-5             | 298,4               | 4,08.10-5             |

Tabelle 6.4: Parameterwahl und Ergebnisse der Simulationsrechnungen

Beispielhaft soll der Rechengang im Einzelnen für Fall 1 kurz erläutert werden, da auch bei späteren Überlegungen auf diese Zusammenhänge zurückgegriffen werden soll. Zunächst liest man anhand der Rayleigh-Zahl Ra aus Abbildung 6.12 den Wärmeübertragungskoeffizienten  $c_q$  ab und berechnet damit  $\lambda_G$ :

$$Ra = \frac{1/291 \cdot 9,81 \cdot 27}{14,93 \cdot 10^{-6} \cdot 21,13 \cdot 10^{-6}} \cdot 0,25^{3} = 4,5 \cdot 10^{7}$$
  
$$\Rightarrow c_{q} \approx 0,07 \Rightarrow \lambda_{G} = 0,07 \cdot 2^{4/3} = 0,176$$
(6.4)

Mit diesen Werten können nun die Gleichungen 6.1 bis 6.3 gelöst werden:

$$\begin{aligned} Q_{\rm H1} &= 0,176 \cdot 0,1765^2 \cdot \left(\frac{1/318 \cdot 9,81}{24,6 \cdot 17,5 \cdot 10^{-12}}\right)^{1/3} \cdot 1,111 \cdot 1009 \cdot 24,6 \cdot 10^{-6} \cdot (318 - T_{\rm Int})^{4/3} \\ &= 0,0629 \cdot (318 - T_{\rm Int})^{4/3} \\ Q_{\rm H2} &= 1,21 \cdot 1009 \cdot (T_{\rm Int} - 291) \cdot (1/291 \cdot 9,81 \cdot (T_{\rm Int} - 291) \cdot 0,25)^{1/2} \cdot 0,69 \cdot (1,77 \cdot 10^{-4}) \\ &= 0,01373 \cdot (T_{\rm Int} - 291)^{3/2} \end{aligned}$$

Gleichsetzen führt dann zu  $T_{Int} \approx 309,5$  K mit einem zugehörigen Volumenstrom  $Q_V = 4,84 \cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup>/s. In Anbetracht der nicht genau angegebenen Werte z.B. für c kann das Ergebnis als gut angesehen werden. Der Volumenstrom wird nur zu 0,7 % unterbzw. zu 1,7 % von den Gleichungen überschätzt, lediglich die berechneten Raumtemperaturen weichen minimal um ca. 1,8 K ab.

# 6.2.3 Übertragbarkeit auf die Versuchsreihe aus Kapitel 5

Aufgrund der vorhandenen Ähnlichkeiten zwischen den Rahmenbedingungen der Versuche von Gladstone und Woods und der Versuchsreihe, die im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurde, wurde eine Studie mit FLUENT vorgenommen, bei der das hier untersuchte Fassadenmodell im Vordergrund stand. Um eine optimale Übertragbarkeit der Ergebnisse von Gladstone und Woods zu ermöglichen, wurde das Modell von der Sicherungsbox entkoppelt und wie in Abbildung 6.14 dargestellt als Grundlage der Simulationsrechnungen verwendet. Ziel dieser Studie ist die Beantwortung der Fragestellung, in wie fern sich die Gleichungen 6.1 bis 6.3 auf die Fassadenversuche übertragen lassen und welcher Parameter  $c_q$  sich einstellen würde.



Abbildung 6.14: links: Netzgeometrie des Fassadenmodells in FLUENT mitte: Geschwindigkeitsvektoren im mittleren Schnitt rechts: Temperaturverteilung im mittleren Schnitt

Durch einen Wärmeeintrag über die Heizmatten wurde die Konvektionsströmung in Gang gesetzt und der Zeitpunkt für die Auswertung herangezogen, an dem sich eine stationäre Strömung eingestellt hatte. Beispielhaft sind in Abbildung 6.14 die Geschwindigkeitsvektoren und die Temperaturverteilung für eine Spaltbreite  $d_f = 15$  cm eingetragen. Die Verläufe sind den Ergebnissen aus Kapitel 6.1.3 entsprechend ähnlich. In der folgenden Tabelle 6.5 sind die auftretenden Massenströme mit zugehörigen Temperaturen und weiteren Ausgangsparametern angegeben.

| Spaltbreite | $T_{\rm F}$ | T <sub>Ext</sub> | Q <sub>M</sub>        | $Q_{\rm V}$           | T <sub>Int</sub> | $\Delta T$ | $k_{\Delta T=1K}$   | $c_q$  |
|-------------|-------------|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------|------------|---------------------|--------|
|             | [°C]        | [°C]             | [kg/s]                | [m <sup>3</sup> /s]   | [°C]             | [K]        | [m <sup>3</sup> /s] | [-]    |
| d5          | 62,8        | 25,7             | 19,2.10-4             | 15,9.10-4             | 26,4709          | 0,7709     | 18,1.10-4           | 0,0675 |
| d10         | 54,0        | 27,8             | 62,3·10 <sup>-4</sup> | 51,7.10-4             | 29,4041          | 1,6041     | 40,8.10-4           | 0,0706 |
| d15         | 76,6        | 32,2             | 108,0.10-4            | 89,6·10 <sup>-4</sup> | 35,2330          | 3,0330     | 51,4.10-4           | 0,0778 |
| d20         | 68,5        | 35,0             | 107,9.10-4            | 89,5·10 <sup>-4</sup> | 37,7223          | 2,7223     | 54,2.10-4           | 0,0766 |

Tabelle 6.5: Parameterwahl und Ergebnisse der Simulationsrechnungen

Anhand der Gleichungen 6.1 und 6.2 kann anschließend der Wärmeübertragungskoeffizient  $c_q = \lambda_G/2^{4/3}$  bestimmt und mit denen des Diagramms aus Abbildung 6.12 verglichen werden. In Abhängigkeit der Rayleigh-Zahlen, die für die durchgeführten CFD-Simulationen in der Größenordnung von ~10<sup>9</sup> liegen, ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchen von Townsend und bestätigt erneut die gute Qualität der FLUENT Prognosen

# 6.3 Versuche Ziller

Eine weitere Vergleichsrechnung wurde anhand der in [45] beschriebenen Experimente vorgenommen. Um das Luftströmungsverhalten von Glas-Doppelfassaden zu beschreiben, wurden im Rahmen dieser Versuchsreihe eine Vielzahl von Modellstudien unter den verschiedensten Randbedingungen durchgeführt. So konnten am Modell selbst u.a. die Fensterausführungen, die Ausbildung der Öffnungsschlitze und die Position des Sonnenschutzes variiert werden. Die Bestimmung des Luftwechsels geschah mittels Tracer-Gasen, einer Messmethode, die globale Werte für den Luftaustausch eines Raumes mit der Umgebung liefern kann. Ein wichtiges Ergebnis dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens für die Lüftungsauslegung eines Doppelfassadensystems. Aufgrund dessen ist es möglich, in Abhängigkeit der geometrischen Randbedingungen die Lüftungswerte für eine Temperaturdifferenz  $\Delta T = 1$  K zwischen Innenraum und Umgebung zu bestimmen und auf andere Randbedingungen umzurechnen.

#### 6.3.1 Versuchsaufbau

Basis dieser Versuche ist ebenfalls ein Acrylglasmodell, das maßstäblich verkleinert einen Büroraum mit den in Abbildung 6.15 angegebenen Abmessungen wiedergibt. Dieser Büroraum ist 3,0 m breit, 5,0 m tief und 2,85 m hoch und besitzt zwei Fenster, die die Schnittstelle zu dem vorgelagerten Fassadenzwischenraum bilden. Wie in der Ansicht zu sehen ist, wird die Fassade durch ein vertikales Schott in zwei Hälften unterteilt, in denen insgesamt zwei versetzt angeordnete Ein- und Auslassöffnungen den Kontakt zur Umwelt herstellen und einen Luftaustausch ermöglichen. Die Versuchsdurchführung beinhaltet zwei Phasen. Zunächst wird in einer Füllphase bei komplett geschlossenem System ein Helium-Luft-Tracergas-Gemisch eingebracht. Nach abgeschlossenem Füllvorgang werden die Fenster geöffnet, und der Luftaustausch setzt ein. Die Luft geringerer Dichte kann durch die Außenfassade entweichen, während gleichzeitig Frischluft durch die Einlassöffnungen einströmt. Es wird die Zeit bis zu einem Spülgrad von 90 oder 95 % aufgezeichnet und daraus der Luftwechsel bestimmt [45].



Abbildung 6.15: Schematische Skizze des Raumes und der Fassade [45]

# 6.3.2 Vergleich der Versuchsergebnisse mit FLUENT

Nach einer grafischen Geometrieerstellung und Netzdiskretisierung mittels Finiter Volumenelemente in GAMBIT kann in FLUENT eine numerische Berechnung durchgeführt werden. Das zugrundeliegende Netz ist in Abbildung 6.16 als Explosionszeichnung zu finden, wobei fehlende Angaben, die der Literaturquelle nicht entnommen werden konnten, sinnvoll ergänzt wurden. So wurde z.B. der Versprung zwischen Fassadenoberkante und Decke nicht berücksichtigt und die Position des Fensters mittig angesetzt. Als Fenstertyp wurde ein vertikales Schiebeflügelfenster mit maximaler Öffnungsbreite b/2 = 50 cm gemäß Abbildung 6.17 gewählt.



Abbildung 6.16: Struktur des verwendeten Netzes als Explosionszeichnung



Abbildung 6.17: Fensterauswahl [45]

0,26

23,7244

In FLUENT wurden zwei Systemvarianten simuliert, um die Übereinstimmung zwischen den Berechnungsergebnissen und dem Auslegungsverfahren prüfen zu können. Dabei wurden als einzige Variation die Höhen der Ein- und Auslässe unterschiedlich gewählt. Im ersten Fall betrugen diese  $h_{Zu,Ab} = 13$  cm, im zweiten  $h_{Zu,Ab} = 26$  cm. Die Fussbodentemperatur des Raumes wurde mit  $T_{Heizung} = 50$ °C, die Außentemperatur mit  $T_{Ext} = 20$ °C festgelegt. Mittels einer Bestimmung der Massenströme, die die Ein- und Auslassöffnungen passieren, und der sich einstellenden Raum- und Außentemperaturen  $T_{Int}$  und  $T_{Ext}$  lassen sich die Lüftungswerte LU bestimmen, die anschließend mit den Berechnungsergebnissen des Auslegungsverfahrens von Ziller verglichen werden können. In Tabelle 6.6 sind die entsprechenden Überlegungen kompakt zusammengestellt.

Fall b LU<sub>FLUENT.1 K</sub> LU<sub>Ziller,1 K</sub> h<sub>Zu,Ab</sub>  $T_{\text{Int}}$  $T_{\text{Ext}}$  $\Delta T$ Q<sub>M</sub> [m]  $[m^2/m]$ [°C] [°C] [K] [kg/s]  $[m^{3}/(h \cdot m)]$  $[m^3/(h \cdot m)]$ 1 3,0 0,13 25,1505 20,0 5,1505 0,130 57 ~63

3,7244

0,187

96

~97

20,0

**Tabelle 6.6:** Vergleich FLUENT Berechnungen – Auslegungsverfahren Ziller

2

3,0

Die Auswertung des angegebenen Lüftungswerts  $LU_{FLUENT,1 K}$  geschieht in Anlehnung an Gleichung 5.7 und lässt sich folgendermaßen ermitteln:

$$LU_{FLUENT,1K} = \frac{Q_M}{\rho_{Luft}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta T}} \cdot \frac{3600}{b}$$

In [45] findet sich ein Diagramm mit einer Kennlinie für das betrachtete Fassadensystem, in dem in Abhängigkeit von den Zu- und Abluftöffnungshöhen die Lüftungswerte LU angegeben sind. Trägt man in dieses Diagramm die mit FLUENT errechneten Werte ein, so kann eine gute Prognose der Versuchsergebnisse festgestellt werden.



Abbildung 6.18: Lüftungswerte LU, modifiziert nach [45]

#### 6.3.3 Ergänzende Untersuchungen zur Fassadenspaltbreite

In Anlehnung an dieses Beispiel wurden weitere CFD-Simulationen durchgeführt, die zum einen dazu genutzt wurden, deren Ergebnisse mit denen des Auslegungsverfahren zu vergleichen und zum anderen den Einfluss der Zwischenraumbreite zu untersuchen. Dazu wurde ein Büroraum mit einer vorgelagerten Fassade erstellt und diskretisiert. Der Raum hat eine Breite von 3,0 m, eine Höhe von 2,8 m und eine Tiefe von 4,0 m. Einen Überblick über das definierte System gibt Abbildung 6.19, wobei allerdings aus Gründen der Übersichtlichkeit nur der halbe Raum dargestellt ist. Die Höhe der Ein- und Auslassöffnungen h<sub>f</sub> wurde ebenso wie die Breite des Fassadenspaltes d<sub>f</sub> in mehreren Schritten variiert. Neben einer Studie, bei der das dargestellte um 10° gekippte Fenster zum Einsatz kam, wurde zusätzlich eine weitere Reihe mit komplett geöffnetem Fenster durchgeführt. Die Konvektionsströmung wurde über eine Fußbodenheizung in Gang gesetzt und solange berechnet, bis sich ein nahezu stationärer Gleichgewichtszustand mit konstanten Massenströmen Q<sub>M</sub> eingestellt hatte.



Abbildung 6.19: links: Systemabmessungen und Netzdiskretisierung rechts: Vergleich der Massenströme Q<sub>M</sub>

Die hierfür betrachteten Schnittebenen waren einerseits die Fenster- und andererseits die Fassadenöffnungen. Anhand dieser Werte konnte verglichen werden, wieviel von der in die Fassade einströmenden Luft auch wirklich in den Büroraum eintritt. Ein beispielhaftes Ergebnis für eine Ein- und Auslassöffnungshöhe  $h_f = 30$  cm bei komplett geöffnetem Fenster findet sich in Abbildung 6.19. Diese veranschaulicht für dieses Beispiel den Prozess, der innerhalb der Fassade stattfinden kann, sehr gut. Bei kleinen Spaltbreiten bis ca. 30 bis 40 cm bildet der Zwischenraum den größten Strömungswiderstand und verhindert eine höhere Durchspülung des Büroraumes. Mit zunehmender Breite tritt nun die Fensteröffnung als entscheidender Widerstand in den Vordergrund. Ein immer größer werdender Anteil der Luft, die in die Fassade einströmt, ist nicht an einem Luftwechsel der Raumluft beteiligt, sondern verlässt die Fassade direkt durch den Auslass. Die optimale Spaltbreite wäre die Stelle, an dem sich die beiden Kurven trennen. Ergänzend ist in dieser Abbildung der Wert eingetragen, der sich anhand des Auslegungsverfahrens von Ziller ermitteln lässt. Dieser stimmt sehr gut mit den von FLUENT berechneten Werten überein und bestätigt erneut, welch hohe Qualität dieses Auslegungsverfahren besitzt. Eine sinnvolle Erweiterung dieses Verfahrens wäre noch eine Berücksichtigung der Spaltbreite, die wie oben gezeigt, ebenfalls einen Einfluss auf den Lüftungswert haben kann. Für kleine Breiten überschätzt das Auslegungsverfahren den auftretenden Massenstrom. Es muss allerdings hinzugefügt werden, dass diese Problematik nur in Fällen auftritt, bei denen die Fensteröffnung einen geringen Widerstand bildet. Bei den Simulationen mit 10° gekipptem Fenster ist z.B. der Einfluss der Fassadenspaltbreite erheblich niedriger, da die Schnittfläche zwischen Raum und Fassade nur einen Bruchteil der Fläche bei geöffnetem Fenster entspricht. Das Auslegungsverfahren beschreibt also sehr gut, welches Leistungsvermögen ein Doppelfassadensystem haben kann. Liegen allerdings die Ergebnisse der CFD-Simulationen unter denen des Auslegungsverfahrens, so kann eine Verbreiterung des Fassadenspaltes von Nutzen sein. Beispielhaft sind in das folgende Diagramm, das in [45] als Teil des Auslegungsverfahrens zu finden ist, einige FLUENT Simulationsergebnisse eingetragen. Die Abweichungen der CFD-Prognosen liegen zwischen +2,6 % und +13,8 % und können als gute Näherungen bezeichnet werden.



**Abbildung 6.20:** Lüftungswerte LU abhängig von der Öffnungsfläche in beiden Fassaden für  $\Delta T = 1$  K, modifiziert nach [45]

# 6.4 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Kapitel konnte gezeigt werden, dass sich auftriebsinduzierte Strömungen gut mit Hilfe von CFD-Programmen simulieren lassen. Selbstverständlich treten Unterschiede zwischen NAGARE und FLUENT auf, die sich somit je nach Fragestellung für eine Berechnung empfehlen. NAGARE glänzt durch seine zugrundeliegenden Berechnungsansätze. Die Genauigkeit der LES ist wesentlich höher, da es ohne Turbulenzmodelle auskommt. Dies zeigt sich vor allem, wenn man sich die Strömungsübersichten der optischen Strömungsmessung in Erinnerung ruft, die NAGARE sehr gut abbilden kann. Die im System vorhandene Instationarität wurde ebenfalls erfasst und machte sich in den Simulationsrechnungen bemerkbar. Bei strömungsmechanischen Fragestellungen, bei denen die wissenschaftliche Analyse im Vordergrund steht, ist NAGARE außerordentlich empfehlenswert. Besonders die vollständige Netzkontrolle in NAGARE II bietet einen guten Ansatzpunkt für eine weiterführende Softwareentwicklung, der im folgenden Kapitel eine immens wichtige Rolle zukommt. FLUENT macht besonders durch die flexiblere Netzgestaltung und die Möglichkeit, freie Ränder zur Umgebung definieren zu können, auf sich aufmerksam. Dies bedeutet eine große Flexibilität, einhergehend mit einer Rechenzeitersparnis bzw. einer feineren Netzauflösung in hochbeanspruchten Bereichen. Die Auflösung der kleinen Wirbel gelingt im Vergleich nicht so gut, scheint aber keine Auswirkungen auf die globalen Berechnungsergebnisse, wie z.B. die Massenströme zu haben, die in sämtlichen Vergleichen gut prognostiziert wurden. Die ständig zunehmende Steigerung der Rechenleistung von Prozessoren und der Größe der Speicherbausteine wird allerdings ihren Teil dazu beitragen, dass zukünftig immer komplexer werdende Systeme mit immer genaueren Modellen berechnet werden können.

# Kapitel 7

# Evolutionäre Algorithmen – Die Optimierung strömungsmechanischer Systeme mit dem Softwarepaket GeDeNA

Die Optimierung strömungsmechanischer Systeme, von denen die Verbesserung moderner luftdurchströmter Glas-Doppelfassaden nur ein Teilgebiet ist, kann unter einer komplexen Anwendung Evolutionärer Algorithmen effektiviert werden. Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von derartigen Algorithmen in der Strömungsmechanik sind die weitreichenden Entwicklungen im Bereich der Computational Fluid Dynamics (CFD)-Programme in den vergangenen Jahren, die mittlerweile in der Lage sind, in vielen Bereichen der Technik die auftretenden Strömungen mit ihren Eigenschaften sehr gut modellieren zu können. Rasante Fortschritte in der Computer- und Netzwerkhardware, aber auch im Bereich der Programmiertechniken ergänzen dies perfekt. So bieten Evolutionäre Algorithmen nicht nur den Vorteil, dass sich im Computer generierte Modelle selbständig weiter entwickeln, sondern dass auch neue Systemvarianten entstehen können, die dem Ingenieur neue Richtungen und Wege aufzeigen, ein gestelltes Problem aus einer anderen Sichtweise zu betrachten und seine Denkweise zu verändern.

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Softwarepaketes GeDeNA – Genetic Designing with NAGARE – dargestellt, das in Kombination mit dem CFD-Programm NAGARE strömungsmechanische Systeme unter Verwendung von Evolutionären Algorithmen eigenständig optimieren kann. Im Besonderen sollen dabei die verwendete Evolutionsstrategie und der Einsatz des Verteilten Rechnens (Parallel Computing), das sich bei einer solchen Problemstellung geradezu aufdrängt, erläutert werden. Einige abschließende Beispiele sollen die Arbeits- und Funktionsweise des Programmes illustrieren und weitere Entwicklungsmöglichkeiten aufzeigen.



Abbildung 7.1: GeDeNA – Genetic Designing with NAGARE

Bevor allerdings eingehend auf die Funktionsweise von GeDeNA sowie die konzeptionelle und programmiertechnische Umsetzung einer Evolutionsstrategie eingegangen wird, folgt zunächst ein allgemeiner Überblick über die verschiedenen Ansätze einer Optimierung mit Evolutionären Algorithmen und ihrer Ableitung aus der biologischen Evolution.

# 7.1 Bionik – Die Ausnutzung biologischer Prinzipien in der Technik

Der Wissenschaftszweig Bionik bildet die Gesamtheit der Überlegungen und Verfahren, biologische Prinzipien in technische Anwendungen einzubringen, und somit die Vorteile der natürlichen Evolution für eine Vielzahl an technischen Aufgabenstellungen auszunutzen. Grundlage hierfür ist eine genaue Studie und Kenntnis der biologischen Abläufe bei der Evolution. In jüngerer Vergangenheit konnten viele Ansätze für eine Übernahme derartiger Abläufe in technische Systeme erfolgreich umgesetzt werden. Die Bandbreite der Anwendungen reicht dabei von der Strukturoptimierung von Konstruktionen im Sinne einer günstigeren Ausnutzung der Spannungszustände und einer damit einhergehenden Materialersparnis bis hin zur Adaption von Oberflächeneigenschaften aus der Tier- und Pflanzenwelt auf künstlich hergestellte Werkstoffe. Im Rahmen dieser Arbeit liegt das Augenmerk auf der Spezialdisziplin der Evolutionären Algorithmen, die bei der Optimierung strömungsmechanischer Systeme eingesetzt werden sollen. Die Evolutionären Algorithmen bilden den Oberbegriff über die beiden Teilgebiete der Evolutionsstrategien (ES) und der Genetischen Algorithmen (GA) [2]. Unterschieden werden beide Varianten anhand des Einflussgrads der Mutation bzw. der Rekombination. Dies wird im Anschluss an die Begriffsdefinitionen ersichtlich. Da das im Rahmen dieses Projekts entwickelte Softwarepaket GeDeNA auf den Evolutionsstrategien basiert, steht diese Optimierungsmethode in den folgenden Kapiteln im Vordergrund der Erläuterungen.



Abbildung 7.2: Evolutionäre Algorithmen [2]

Das Grundprinzip bei einer Optimierung technischer Systeme unter Verwendung einer Evolutionsstrategie besteht darin, eine Gütefunktion  $F(\vec{x})$ , die in Abhängigkeit der zu untersuchenden spezifischen Fragestellung formuliert werden muss, zu minimieren. Der Vektor  $\vec{x}$  enthält die Parameter des zugrundeliegenden Systems, das dadurch eindeutig in seiner Geometrie und seinen Randbedingungen beschrieben wird. Für jedes System S, das im folgenden auch als Individuum bezeichnet wird, kann über die Gütefunktion ein sogenannter Fitnesswert  $f_k = F(\vec{x}_s)$  ermittelt werden, der als ein aussagekräftiges Qualitätsmerkmal einen Vergleich bzw. eine Staffelung der einzelnen Systeme untereinander zulässt. Das ebenfalls in der Praxis auftretende Streben nach Maximierung wird bei den allgemeinen Erläuterungen nicht gesondert betrachtet, da es sich jederzeit durch Negieren der Gütefunktion in ein Minimierungsproblem transformieren lässt. Bei diesem Prozess der Minimierung ist in besonderem Maße darauf zu achten, dass sich als Ergebnis möglichst das globale Minimum der Funktion  $F(\vec{x})$  ergibt. Dies kann vielfach schon durch eine geschickte Wahl der Startpunkte einer Optimierung beeinflusst werden. Aber nicht nur der Entwurf einer geeigneten Strategie, um dieses Extremum der Gütefunktion zu finden, kann mitunter problematisch sein, allein die korrekte Definition der Gütefunktion an sich kann bei vielen technischen Anwendungen schon eine der Hauptschwierigkeiten darstellen. Da zudem häufig mehrere Teilziele parallel erfolgreich verbessert werden sollen, für die jeweils eine eigene Funktion formuliert werden muss, ist eine sinnvolle Wichtung der einzelnen Funktionen notwendig [38]. Im Folgenden sollen einige wichtige Annahmen und Begriffe, die die verschiedenen Teilprozesse beim Umgang mit Evolutionären Algorithmen beschreiben, näher erläutert werden. Diese bilden die Grundlage für die weiteren Ausführungen [2], [33], [38], [41].

## 7.1.1 Begriffsdefinitionen

#### 7.1.1.1 Reproduktion

Mit der Reproduktion wird die Fähigkeit bezeichnet, dass sich ein Individuum vermehren kann. Bei technischen Systemen kann davon ausgegangen werden, dass die Individuen der aktuellen Generation in der Lage sind, sich vollständig in ihrer Umwelt zu reproduzieren, die Populationsstärke bleibt mindestens konstant. Der Begriff Umwelt beschreibt dabei im technischen Zusammenhang die Optimierungsaufgabe, die an die Individuen gestellt wird, und bestimmt die Gesamtsituation, unter der die Individuen miteinander konkurrieren.



Abbildung 7.3: Reproduktion eines Individuums p<sub>j,i</sub> in seiner zugehörigen Umwelt

#### 7.1.1.2 Mutation

Nach erfolgreicher Reproduktion der Individuen werden kleinere, zufällige Veränderungen an ihrem Erbgut vorgenommen. Im technischen Sinne ist dies gleichbedeutend mit einer Variation der Systemparameter  $\vec{x}$ , die den Gütewert und somit die Überlebensfähigkeit des Individuums in seiner Umwelt maßgeblich beeinflussen. Bei der in dieser Arbeit behandelten Fragestellung wird die Mutation durch kleine, zufällig bestimmte, aber definierten Regeln gehorchenden Änderungen an der geometrischen Struktur des strömungsmechanischen Systems realisiert.



Abbildung 7.4: Geringfügige Mutation der reproduzierten Individuen ck,i+1

### 7.1.1.3 Selektion

Im Allgemeinen bezeichnet die Selektion, dass diejenigen Individuen, die am besten an ihre Umwelt angepasst sind, am häufigsten und am längsten überleben. Die Selektion findet anhand der Gütewerte der Individuen einer betrachteten Generation statt und führt zu der Auswahl der Eltern, die die Grundlage für eine neue Generation bilden.



Abbildung 7.5: Aussetzen der Individuen in ihrer Umwelt und Ermittlung der einzelnen Gütewerte f<sub>k,i+1</sub> für die Selektion; das Individuum mit der kleinsten Fitness f<sub>min</sub> wird neues Elter p<sub>j,i+1</sub> für die folgende Generation

Unterschieden werden kann in eine Selektion mit (Komma-Strategie) oder ohne (Plus-Strategie) Aussterben der Eltern. Werden die Eltern bei der Selektion der bestangepassten Individuen berücksichtigt, garantiert dies, dass die Fitness f sich von Generation zu Generation nicht verschlechtern kann. Auf den ersten Blick stellt sich nun die Frage, warum nicht generell die Plus-Strategie gewählt wird, da diese einen Anstieg der Fitness von Generation zu Generation sicherstellt. Der Grund hierfür liegt darin, dass bei den meisten Evolutionsstrategien nicht nur die Individuen selbst, sondern auch deren zugehörige Mutationsschrittweiten bzw. -stärken  $\sigma$ , die das Maß für den Grad der Systemveränderung angeben, mutiert werden. In bestimmten Fällen kann dadurch ein Optimierungsprozess ins Stocken geraten, wenn die Mutationsstärke des gewählten Elters zu klein ist, um ein lokales Extremum zu überwinden.



Abbildung 7.6: Möglichkeit des Stillstands bei Verwendung der Plus-Strategie

#### 7.1.1.4 Rekombination

Die Rekombination bezeichnet den Prozess, bei dem Teile des Erbguts zweier oder mehrerer Individuen bei der Reproduktion untereinander vertauscht werden. Dieser Prozess kann auf verschiedene Weise realisiert werden. Bei der diskreten Rekombination wird für jeden Parameter ein  $x_i$  aus den Vektoren  $\vec{x}$  der an der Reproduktion beteiligten Individuen zufällig ausgewählt und als Eingangsparameter  $x_{i+1}$  im Vektor  $\vec{x}_{i+1}$  des neuen Individuums gesetzt. Die intermediäre Reproduktion hingegen geht streng nach der Methode vor, dass sämtliche Parameter  $x_i$  aus allen Vektoren  $\vec{x}$  der beteiligten Individuen bei der Erstellung des Vektors  $\vec{x}_{i+1}$  gemittelt werden.

Aufgrund dieser Begriffsdefinitionen kann der wesentliche Unterschied zwischen den Evolutionsstrategien und den Genetischen Algorithmen aufgezeigt werden. Während in

einer Evolutionsstrategie der Schwerpunkt der Systemmodifikation auf der Mutation liegt, wird der Ansatz der Genetischen Algorithmen durch die Rekombination als das dominierende Merkmal gekennzeichnet.

#### 7.1.2 Schematischer Ablauf einer evolutionären Optimierung

Der Ablauf einer evolutionären Optimierung ist in Abbildung 7.7 dargestellt und lässt sich in allgemeiner Form folgendermaßen beschreiben [2]. Zunächst werden aus m Eltern  $p_{j,i}$  der i. Generation, die jeweils durch ihre Systemparameter  $\vec{x}$  sowie eine zugehörige Mutationsschrittweite  $\sigma_{i,i}$  gekennzeichnet sind, n Nachkommen  $c_{k,i+1}$  der (i+1). Generation reproduziert. Dies kann entweder in einfacher Weise über eine Vervielfältigung eines Elters  $p_{i,i}$  geschehen, bei der von dem Vektor  $\vec{x}$  eine exakte Kopie erstellt wird, oder aber optional unter Anwendung der Rekombination. In dem folgenden Schritt wird das neu generierte Individuum  $c_{k,i+1}$  durch eine Mutation, die klar definierten, systemabhängigen Regeln gehorcht, verändert. Die dem Individuum ck,i+1 zugeordnete Mutationsstärke  $\sigma_{k,i+1}$ , die den Grad der Mutation eines Individuums maßgebend bestimmt, wird ebenfalls mutiert. Daraufhin werden die auf diese Weise erzeugten Nachkommen ihrer Umwelt ausgesetzt und die zugehörigen Gütewerte  $f_k$  für jedes Individuum  $c_{k,i+1}$ bestimmt. Über einen Vergleich der Gütewerte  $f_k$  können die neuen m Eltern  $p_{i,i+1}$  selektiert werden, die die Grundlage für die folgende Generation (i+2) bilden. Genügen diese Eltern p<sub>i,i+1</sub> einem vorher festgelegtem Abbruchkriterium kann die Optimierung an dieser Stelle beendet werden, ansonsten wiederholt sich der Zyklus mit einer weiteren Reproduktionsphase, und die einzelnen Teilschritte werden erneut durchlaufen.



Abbildung 7.7: Ablaufschema einer evolutionären Optimierung, modifiziert nach [2]

Eine weitere interessante Tatsache, die bei der Optimierung von technischen Systemen nicht aus den Augen verloren werden sollte, ist, dass sich in der Evolutionsgeschichte nicht nur Individuen selbst weiterentwickelt haben, sondern auch die Strategien, wie sich Individuen am effektivsten weiterentwickeln können, verändert haben. So kann es sich als vorteilhaft erweisen, wenn technische Systeme den Freiheitsgrad besitzen, jeweils für sich selbst die geeignete Strategie zu finden, d.h. ob in jedem Einzelfall eher eine Rekombination oder eine Mutation im Vordergrund der Evolution stehen sollte.

# 7.2 Voraussetzungen für die Softwareentwicklung

Die wesentliche Grundlage für die Entwicklung von GeDeNA bildet das in Kapitel 3.3 vorgestellte CFD-Programm NAGARE II in der Version mit Netzadaption, das für die Simulationsberechnungen zuständig ist. Aufbauend auf diesem Programm ist in der objektorientierten Programmiersprache JAVA eine Software implementiert worden, die eine automatische Optimierung strömungsmechanischer Systeme unter Verwendung Evolutionärer Algorithmen vornimmt. Eine weitere wesentliche Eigenschaft, die das Programmpaket GeDeNA auszeichnet, ist die Fähigkeit, das Verteilte Rechnen über eine Netzwerkstruktur umzusetzen, um den Vorteil der damit verbundenen Rechenzeitersparnis auszunutzen. Bevor allerdings eingehend auf die besonderen Charakteristika der entwickelten Software eingegangen wird, sollen kurz die wichtigsten Schnittstellenparameter beschrieben werden, die berücksichtigt werden mussten, um eine erfolgreiche Kommunikation der einzelnen Programme zu ermöglichen.



Abbildung 7.8: Schnittstellen des Softwarepakets GeDeNA

Wie in Kapitel 3.3 ausführlich dargelegt, verfügt NAGARE II über die zusätzliche Möglichkeit, das Berechnungsnetz gezielt in Bereichen, in denen eine genauere Auflösung von Geschwindigkeitsprofilen, Turbulenzbereichen usw. erforderlich ist, lokal zu verdichten und somit entweder Rechenzeit einsparen oder Detailpunkte des untersuchten Modells genauer abbilden zu können. Als Eingabedaten benötigt NAGARE II zwei Dateien im ASCII-Format. Zum einen eine inp-Datei, in der die Berechnungsparameter und -randbedingungen gespeichert sind, zum anderen eine fort11-Datei, die die genauen Koordinaten des Netzes und der Modellstruktur enthält. Nach Ausführung der CFD-Simulation mit NAGARE II ergeben sich als wesentliche Ausgabedateien eine fort10und eine fort20-Datei, die die berechneten Simulationsergebnisse enthalten. Mit diesen beiden Dateien ist eine grafische Darstellung z.B. der Geschwindigkeiten oder der Temperaturverteilung mit dem Visualisierungsprogramm CLEF2D möglich. An diesen Schnittstellen setzt das Softwarepaket GeDeNA mit den implementierten Unterprogrammen an.

# 7.3 Programmtechnische Umsetzung der Evolutionären Algorithmen im Softwarepaket GeDeNA

## 7.3.1 Bestandteile und Funktionalität des Softwarepakets GeDeNA

Das gesamte Paket besteht aus mehreren Programmteilen, deren Aufgabenbereiche und Funktionen in den folgenden Absätzen genauer beschrieben werden. Zunächst kann eine Kategorisierung aus Sicht der Netzwerkarchitektur vorgenommen werden. Es existiert eine Serverversion, genauer gesagt das eigentliche Hauptprogramm GeDeNA, das sich um die Vorbereitung der zu berechnenden Systeme, die Aus- und Bewertung der Simulationsergebnisse sowie zusätzlich um die gesamte Verwaltung eines ordnungsgemäßen Berechnungsablaufs kümmert. Es gewährleistet eine einwandfreie Kommunikation mit den angemeldeten Clients und sichert die komplexe Datenhaltung und den Datentransfer ab, so dass die Vorteile des Verteilten Rechnens vollständig zum Tragen kommen.

Zudem ist es erforderlich, auf den im Netzwerk angemeldeten Computern die Clientsoftware GeDeNAClient zu installieren, die für die Abarbeitung der vom Server vorbereiteten Systemfiles mit NAGARE II verantwortlich ist, Zwischen- und Endergebnisse kalkuliert und diese an den Server bzw. unter gewissen Randbedingungen, die in Kapitel 7.3.2 beschrieben werden, an andere Clients sendet.
Die Hauptfunktionen von GeDeNA sind im Einzelnen:

- (i) Grafische Erstellung des Basissystems, das optimiert werden soll
- (ii) Verwaltung der Randbedingungen für die CFD-Simulationen und die Optimierung des Systems unter Verwendung Evolutionärer Algorithmen
- (iii) Aufbau der Netzwerkstruktur und Kommunikation mit den Clients
- (iv) Erzeugung der Eingabedateien Dateiname.inp und fort11 f
  ür jeden Nachkommen einer neuen Generation
- (v) Kontrolle des gesamten Berechnungsablaufs und eine genaue
   Informationsverwaltung über den jeweiligen Status eines zu berechnenden
   Falls und den Status der Auslastung der einzelnen Clients
- (vi) Verwaltung der Ergebnisdateien, sowie Aus- und Bewertung der Berechnungsergebnisse

Die Hauptfunktionen von GeDeNAClient sind entsprechend:

- (i) Absichern des korrekten Empfangs eines Berechnungsfalls und Vorbereitung der CFD-Simulation
- (ii) Konsistentes Ausführen der Simulationsrechnung, Aufbereiten und Auswerten der Zwischen- und Endergebnisse, sowie Rückmelden dieser Resultate an den Server
- (iii) Kontrollieren des korrekten Datenflusses auf dem Clientrechner, vor allem im Hinblick auf einen konsistenten Datenversand der Endergebnisse an den Server, sowie den Versand und Empfang einer unvollständig berechneten CFD-Simulation zu einem anderen bzw. von einem anderen Client

# 7.3.2 Überblick über den Ablauf einer evolutionären Optimierung mit GeDeNA

Bevor ausführlich auf die der Software zugrundeliegende Evolutionsstrategie, die den eigentlichen Optimierungsprozess des Ausgangssystems vorantreibt, eingegangen werden soll, folgt zunächst ein genauer Überblick über den gesamten Berechnungsablauf, so dass in den weiteren Ausführungen dieser Prozess als Grundlage vorausgesetzt werden kann. In Abbildung 7.9 sind die einzelnen Stufen eines evolutionären Optimierungsprozesses mit GeDeNA dargestellt, die aus Sicht des Servers nacheinander abgearbeitet werden. Für das Verständnis der Darstellungs- und Handlungsweise der Clients A bzw. B...N ist es wichtig, dass Client A für eine vergleichbare Anzahl von Berech-

nungsschritten bei einer CFD-Simulation weniger CPU-Zeit benötigt als die Clients B...N.



Abbildung 7.9: Übersicht über den gesamten Ablauf einer Optimierung mit GeDeNA

Zunächst können mit der grafischen Eingabeoberfläche, die in GeDeNA enthalten ist, das Basissystem erstellt und die für die CFD-Simulation notwendigen Parameter festgelegt werden. Bevor nun die Optimierung mit den Evolutionären Algorithmen gestartet werden kann, sind noch einige wichtige Randbedingungen anzugeben. Als wesentliche Steuerungsparameter sind hierbei

- die genaue Abgrenzung des Raumes, in dem der genetische Code Veränderungen am System vornehmen kann,
- der Bereich, in dem der Gütewert des simulierten Systems bestimmt wird,
- die Anzahl m der Eltern pi, die den Ausgangspunkt für die neue Generation bilden,
- die Anzahl n der Nachkommen c<sub>k</sub>, die aufgrund einer Reproduktion und Mutation aus den jeweiligen Eltern p<sub>i</sub> einer Generation entstehen,
- die Anzahl an Mutationsmöglichkeiten  $\sigma$  und Wahrscheinlichkeiten  $\psi$  für eine Materialzu- bzw. -abnahme in einer Generation,
- die Wahl, ob bei der Reproduktion die Rekombination verwendet werden soll,
- zwei Faktoren  $\phi_{max}$  und  $\phi_{min}$ , die das Konvergenzverhalten beeinflussen,
- die Entscheidung über eine Berücksichtigung zweier entwickelter
   Zusatzalgorithmen, namentlich eine automatische Strukturoptimierung (auto structure optimization) bzw. automatische Strukturglättung (auto structure smoothing) bei der Erzeugung neuer Nachkommen,

zu nennen. Die Bedeutung der einzelnen Parameter werden ausführlich in Kapitel 7.4 beschrieben.



Abbildung 7.10: Einstellungsmöglichkeiten in GeDeNA

Wird nun eine Berechnung gestartet, stellt zunächst der Server fest, welche Clients bereit sind, an der Simulation und Auswertung der einzelnen Teilberechnungen mitzuwirken. Zu den angeschlossenen Clients wird über das TCP/IP-Protokoll eine Verbindung aufgebaut und für jeden Client ein Monitor angelegt, auf dem serverseitig jederzeit der Status jedes einzelnen Rechners erkennbar ist. Dabei kann sich der Client im Wartestatus, in dem er auf neu eintreffende Aufgaben wartet, im Datentransferstatus, in dem er Dateien empfängt oder versendet, oder im Rechenstatus, in dem er eine CFD-Simulation ausführt, befinden. Die Anzahl der Clients ist nicht begrenzt. Der bestmögliche Fall für die höchste Gesamtrechenauslastung des Netzwerks wäre pro Nachkommen einer Generation jeweils einen Rechner vorhalten zu können. Die wichtigsten Methoden bzw. Funktionen, die die Rechnerkommunikation serverseitig übernehmen, sind

- *buildCon* die verantwortlich f
  ür den Aufbau der Netzwerkverbindung zu den einzelnen Clients ist,
- WaitforMessage die den Nachrichteneingang an den einzelnen Ports der Netzwerkkarte überwacht,
- DataTransfer die den Datentransfer zu den Clients regelt,
- *DataReception* die den Dateneingang und die weitere Datenverwaltung überwacht.

Sind die Verbindungen zu den einzelnen Clients erfolgreich initialisiert, werden die Eingabedateien für eine CFD-Simulation des Basissystems erstellt und an den Rechner mit der höchsten Rechenleistung gesendet. Dieser startet nun seinerseits das Programm NAGARE II mit den Basissystemdateien *dateiname*.inp und fort11 als Ausgangsdaten, wobei stets der augenblickliche Status in bestimmten Zeitschrittintervallen als Zwischenergebnisse an den Server zurückgemeldet werden.

Diese Zwischenresultate, die von den einzelnen Clients kalkuliert werden, sind notwendig, um den Fortgang der Simulation überwachen und bei erreichten Abbruchkriterien beenden zu können. Im Wesentlichen ist es dafür erforderlich, die Geschwindigkeitsund Temperaturfelder, die in binärer Form in der NAGARE II-Ergebnisdatei fort20 vorliegen, am Ende eines jeden Zeitschrittintervalls in eine Tabellenform zu übertragen, die von der GeDeNAClient-Software weiter verarbeitet werden kann. Hierfür wurde ein zusätzliches Unterprogramm ASCIINSG in FORTRAN implementiert, dass sich seinerseits um diese korrekte Datenumwandlung kümmert. Es liest den kompletten Datensatz aus der fort20 Datei ein, filtert die aktuellen x- und y-Geschwindigkeiten sowie das Temperaturfeld heraus und legt diese in drei Files im ASCII-Format ab. Aufgrund dieser Aufbereitung ist es nun möglich, den Gütewert des simulierten Falls zu bestimmen. Die Art der Berechnung des Gütewertes ist absolut systemabhängig. Für die in dieser Arbeit betrachteten auftriebsinduzierten Systeme ist diese Ermittlung des Gütewertes oder der Fitness anders anzusetzen als z.B. bei windangeströmten Bauteilen. Deswegen wurde diese gesamte Berechnung in GeDeNAClient in einer Methode *calcFit* implementiert, die je nach Bedarf und Anspruch eines anders gearteten Systems problemlos umgeschrieben und erweitert werden kann, um eine Anpassung in möglichst eleganter Weise zu gewährleisten. Die gesamte Netzwerkprogrammierung ist davon ausgeschlossen und unabhängig.



Abbildung 7.11: Clientseitige Aufgabenverteilung

Neben dem Vorteil, dass der Server immer über den momentanen Stand einer Simulation informiert und von aufwendigen Rechenprozessen entlastet ist, bietet sich bei diesem Lösungsverfahren die interessante Möglichkeit, die einzelnen Dateien, die während einer Simulation erstellt werden, mobil zu halten, so dass Simulationsberechnungen, die noch nicht beendet sind, an andere Clients weitergegeben werden können, wenn sich dadurch eine günstigere Gesamtrechenauslastung des Netzwerks ergibt.

Ist die CFD-Simulation des Basissystems abgeschlossen, wird dieses wieder zurück an den Server gegeben. Dieser speichert die entsprechenden Gütewerte dieses Falls und beginnt nun mit dem eigentlichen Optimierungsprozess. Die Bezeichnung "Fall" wird in diesem Kapitel mit der CFD-Lösung eines erstellten Systems, also eines Nachkommens gleichgesetzt. Unter Verwendung der implementierten Algorithmen, die in Kapitel 7.4 näher beschrieben werden, werden n Nachkommen c<sub>k</sub> nach bestimmten Gesetzmäßigkeiten gebildet und an die einzelnen Clients A...N verschickt. Jeder Client startet nun die Simulation seines ihm übertragenen Falls und sorgt für ordnungsgemäße Statusmeldungen an den Server. Ist eine Berechnung abgeschlossen, wird dies umgehend an den Server gemeldet. Um die Ausnutzung der Rechenkapazität möglichst hoch zu halten

und eine längere Blockierung einzelner Clients auszuschließen, werden zuerst alle Nachkommen  $c_k$  an die Clients versandt, bevor die Ergebnisdaten sämtlicher CFD-Simulationen von den Clients zurück erwartet werden. Dies bedeutet konkret, dass der Server zunächst solange die generierten Systeme an die Clients abgibt, bis entweder jeder Client mit der Berechnung eines Falls beschäftigt ist oder alle Fälle  $c_k$  verschickt wurden. Sollten alle Clients mit einer Simulation ausgelastet sein, wartet der Server auf eine Meldung, dass ein Client, z.B. Client A, seinen Fall abgeschlossen hat. Sind noch weitere ungelöste Fälle vorhanden, wird daraufhin ein weiterer an den Client A verschickt.

Sollten jedoch alle n Fälle bereits versandt worden sein, beginnt Client A seine berechneten Ergebnisdateien an den Server zurückzuschicken. Ist dieser Prozess erfolgreich abgeschlossen, fragt Client A an, ob er einen leistungsschwächeren Rechner entlasten kann. Sollte diese Situation eintreten, wartet der Server auf eine Meldung des Clients B...N, der ausgewählt wurde, seinen Fall abzugeben. Bei der nächsten Rückmeldung bekommt Client A die IP-Nummer von Client B..N und umgekehrt. Dadurch sind beide Rechner in der Lage eine direkte TCP/IP-Verbindung aufzubauen und Client B...N kann den momentan berechneten Fall an Client A mit dem aktuellen Lösungsstand übertragen. Nach erfolgreicher Datenübermittlung wird die Verbindung geschlossen, Client A nimmt die Lösung des ihm übertragenen Falls wieder auf und Client B...N kann seinerseits seine Ergebnisdateien an den Server weiterleiten. Sind sämtliche abgeschlossenen Berechnungen übertragen, fragt nun wiederum Client B...N an, ob ein leistungsschwächerer Rechner entlastet werden kann, ansonsten geht er in den Warte-Status. Diese Prozedur wiederholt sich solange, bis alle Fälle gelöst sind. Somit wird eine hohe Auslastung der leistungsstarken Rechner und folglich eine minimale Gesamtrechenzeit garantiert.

Sind alle n Nachkommen  $c_k$  mit NAGARE II simuliert und die zugehörigen Gütewerte berechnet worden, ermittelt der Server, welche dieser Nachkommen die m Eltern  $p_j$  für die nächste Generation bilden. Außerdem wird überprüft, ob vorher festgelegte Abbruchkriterien erfüllt sind. Diese können je nach betrachtetem System z.B. eine bestimmte maximale Anzahl an Generationen oder eine maximale Differenz der Gütewerte zwischen den Eltern der letzten beiden Generationen sein. So könnte man definieren, dass entweder insgesamt maximal 20 Generationen erstellt werden sollen, oder dass eine gute Qualität des neu entwickelten Systems erreicht ist, wenn sich die maximalen Gütewerte der letzten beiden Generationen i und (i-1) weniger als 1% unterscheiden. Ist dieses Kriterium erfüllt, erfolgt ein Abbruch der Optimierung, im anderen Fall werden wiederum n neue Nachkommen  $c_{k,i+1}$  erzeugt und die Lösungsprozedur wiederholt. Während des ganzen Rechenablaufes wird eine Log-Datei produziert, anhand der sich der gesamte Nachrichtenverkehr und Lösungsablauf einer Berechnung zeitlich markiert nachvollziehen lässt.

## 7.4 Evolutionäre Algorithmen – Evolutionsstrategie

Im Gegensatz zu dem in Kapitel 7.3.2 beschriebenen Gesamtberechnungsablauf, der sich im Besonderen auf die Rechnerkommunikation und die allgemeine Vorgehensweise zur Lösung des Optimierungsproblems konzentriert, soll nun in diesem Kapitel konkret auf die implementierten Evolutionären Algorithmen eingegangen werden. Die eingesetzte Evolutionsstrategie ist, wie oben schon angedeutet wurde, abhängig vom gegebenen System, den vorhandenen Randbedingungen und der allgemeinen Aufgabenstellung. Allen Evolutionsstrategien ist aber gemein, dass bei ihren Anwendungen, die Mutation von Systemen im Vordergrund steht, wohingegen bei Genetischen Algorithmen die Rekombination die primäre Rolle spielt. Besonders zu beachten ist, dass bei der in dieser Arbeit verwendeten Optimierungsstrategie nicht nur die Systeme an sich mutiert werden, sondern auch die Mutationsschrittweite verändert wird. Dies bedeutet, dass jeder Elter und jeder Nachkomme zum einen durch seine Systemstruktur  $\vec{x}$  und zum anderen durch die zugehörige Mutationsschrittweite  $\sigma$  gekennzeichnet wird.

Zum Verständnis der gesamten Evolutionsstrategie ist die detaillierte Erläuterung der folgenden Abschnitte erforderlich:

- Kapitel 7.4.1 gibt zunächst einen Überblick über die Systeme, die sich mit GeDeNA und NAGARE II optimieren lassen.
- Kapitel 7.4.2 beschäftigt sich mit der Berechnung der Gütewerte, die die Qualität eines berechneten Systems angeben.
- Kapitel 7.4.3 beschreibt, nach welchen Kriterien die neuen Eltern p<sub>j</sub>, aus denen die neue Generation erzeugt wird, ausgewählt werden.
- Kapitel 7.4.4 zeigt, wie Erfahrungen der aktuellen Generation i in die zukünftige Generation i+1 eingebracht werden können.
- Kapitel 7.4.5 behandelt die in GeDeNA verwendete Vorgehensweise zur Erzeugung der n Nachkommen c<sub>k,i+1</sub> einer neuen Generation.

#### 7.4.1 Allgemeine Beschreibung der optimierbaren Systeme

Um die Berechnung der Gütewerte festlegen zu können, ist es notwendig zu verstehen, welche geometrischen und physikalischen Systeme mit NAGARE II optimiert werden können. Die Einschränkungen dabei werden durch NAGARE II vorgegeben. GeDeNA kann bei einer Erweiterung der CFD-Software jederzeit flexibel angepasst werden.

Die wichtigste geometrische Randbedingung von NAGARE II bezieht sich auf die Art des Systems. Es ist wichtig, bei der grafischen Strukturerstellung darauf zu achten, dass es sich um ein abgeschlossenes System handelt, d.h. es dürfen keine Öffnungen zu dem Umgebungsraum außerhalb des Untersuchungsnetzes auftreten, durch die ein Luftaustausch stattfinden könnte. Es ist zu bedenken, dass es sich physikalisch um eine auftriebsinduzierte Strömung handelt, d.h. die Luftströmung muss durch Temperaturdifferenzen angeregt werden. In der Ursprungsversion von NAGARE existieren diese Einschränkungen nicht, dafür besitzt aber NAGARE II den entscheidenden Vorteil, die Eingabedateien vollständig unter Benutzerkontrolle zu haben. Vor allem kann in der Datei fort11 in das Netz, die Struktur und die Temperaturen des zu simulierenden Systems gezielt eingegriffen und sämtliche Parameter manipuliert werden. Eine Eigenschaft, die für die Mutation von Systemen absolute Voraussetzung ist. In Abbildung 7.12 ist ein typisches lösbares System und der zugehörige Verlauf des Volumenstroms Q<sub>V</sub> durch den eingezeichneten Schnitt a-a dargestellt. Der Volumenstrom unterliegt aufgrund der auftriebsinduzierten Strömung lokalen Schwankungen. Meist tritt – wie bereits in Kapitel 6 beschrieben – zunächst ein globales Maximum des Volumenstroms auf, das auf das abrupte Einsetzen der Erwärmung an der Heizplatte zurückzuführen ist. Erst wenn dieser erste Temperaturschub das System verlassen hat, setzt der Temperaturverlauf ein, der typische quasistationäre Ergebnisse für das simulierte System liefert.



Abbildung 7.12: Verlauf des Volumenstroms in einer CFD-Simulation mit NAGARE

Bei GeDeNA kann voreingestellt werden, wie viele Maxima und Minima des Volumenstroms berechnet werden sollen, bis die Simulation abgebrochen werden soll. Für eine korrekte Optimierung ist es unbedingt erforderlich, zunächst das Verhalten des Basissystems vorab genau zu studieren, um eine möglichst gute Anzahl an Maxima abzuschätzen. Die Zahl sollte einerseits möglichst hoch sein, um zu gewährleisten, dass die Simulation sich in einem charakteristischen Bereich befindet, und andererseits möglichst niedrig, um die Rechenzeit pro Fall zu reduzieren.

#### 7.4.2 Der Luftwechsel als Qualitätsmerkmal eines Individuums

Die Algorithmen zur Berechnung der Gütewerte sind wie in Kapitel 7.3.2 beschrieben in GeDeNAClient implementiert. Zum einen hat dies den Vorteil, dass der Server von diesen Berechnungen entlastet wird, zum anderen ist dies aber auch erforderlich, da die Gütewerte ihrerseits ein Abbruchkriterium für die CFD-Simulationen bestimmen, vgl. Kapitel 7.4.1. Bei den Systemen, die in dieser Arbeit behandelt werden, wurde in einem ersten Schritt die mittlere Geschwindigkeit im Schnitt a-a als der maßgebende Gütewert herangezogen. Diese Geschwindigkeit lässt sich auf die in Abbildung 7.13 dargestellte Weise gewinnen. Zunächst wird der Volumenstrom im Schnitt a-a aus den Ergebnissen der CFD-Simulation per Integration der Geschwindigkeiten berechnet und anschließend auf den Temperaturunterschied der Luft zwischen dem Fassadenspalt und der Umgebung bezogenen. Wie in Kapitel 5.3 gezeigt wurde, kann der Volumenstrom mit Hilfe der Formel  $Q_V = k_{Qv} \cdot \sqrt{\Delta T}$  auf jeden beliebigen Temperaturunterschied umgerechnet werden.



Abbildung 7.13: Ermittlung des Fitnesswerts f

Zum besseren Vergleich empfiehlt es sich, eine Auswertung für ein  $\Delta T$  von 1 K vorzunehmen. Durch Division durch die betrachtete Schnittfläche A erhält man eine Durchschnittsgeschwindigkeit  $f = \overline{v} = Q_{V,1K}/A$ , die gleichzeitig den benötigten Fitnesswert und ein geeignetes Maß für die Qualität der hier betrachteten auftriebsinduzierten Systeme darstellt. Deswegen konnte dieser Wert als charakteristische Systemeigenschaft definiert und zunächst für einen Vergleich einzelner Systeme herangezogen werden.

Zur Verbesserung der Evolutionsstrategie wurde in einem Folgeschritt die mittlere Geschwindigkeit durch den Luftwechsel als maßgebender Gütewert ersetzt. Dieser Fitnesswert basiert ebenfalls auf dem Volumenstrom  $Q_{V,1K}$  in dem betrachteten Schnitt a-a, man benötigt aber weiterhin auch das genaue Volumen V<sub>f</sub> des Fassadenspalts für jedes Individuum. Dadurch steigt zwar der Rechenaufwand an, die Genauigkeit des Verfahrens wird aber immens verbessert. Der Fitnesswert f berechnet sich also nach der Gleichung:

$$f = Q_{V,1K} / V_f \tag{7.1}$$

Aufgrund der betrachteten Systeme schien die Implementierung von Gleichung 7.1 auf den ersten Blick eine nicht allzu große Veränderung mit sich zu bringen, da eine Steigerung der mittleren Geschwindigkeit bei gleichbleibendem Fassadenvolumen in jedem Fall auch einen Anstieg des Luftwechsels mit sich bringt. Da bei den berechneten Systemen, die als Beispiele in Kapitel 7.5 aufgeführt sind, meist die Ausrundung einer Ecke und somit eine Volumenabnahme stattfand, lag die Verwendung der mittleren Geschwindigkeit auf der sicheren Seite. Der entscheidende Vorteil, der sich aber durch die Implementierung von Gleichung 7.1 ergibt, ist nicht nur die höhere physikalische Genauigkeit, sondern zusätzlich auch die erhebliche Verbesserung der Systemstrukturen von Generation zu Generation.



Abbildung 7.14: Verbesserung der Systemstruktur durch Einbinden von Gleichung 7.1

In Abbildung 7.14 wird dies sehr gut deutlich. Da in beiden Systemen das Geschwindigkeitsprofil am Auslass das gleiche ist und sich somit ebenfalls die gleiche mittlere Geschwindigkeit in diesem Schnitt ergeben würde, würden im Falle der mittleren Geschwindigkeit  $\overline{v}$  als Fitness f beide Systeme gleich gut abschneiden. Bei Berücksichtigung des Luftwechsels jedoch würde sich eindeutig das rechte System durchsetzen, da in diesem Fall das Volumen des Fassadenspalts geringer und konsequenterweise der Luftwechsel höher ist. Für das linke System wird der Luftwechsel aufgrund der ungenauen Volumenbetrachtung unterschätzt.

Programmtechnisch betrachtet, unterliegt das umgesetzte Verfahren zur konkreten Bestimmung des Gütewertes fk dem folgenden Schema. Zunächst startet der Client mit den ihm übertragenen Eingabedateien, sowie den systemspezifischen und genetischen Randbedingungen, die er vom Server erhalten hat, die CFD-Simulation NAGARE II. Es wird eine in den systemspezifischen Randbedingungen definierte Anzahl an Zeitschritten abgearbeitet und anschließend der Gütewert fk bestimmt. Dafür werden mit Hilfe des Programms ASCIINSG die Temperatur- und die Geschwindigkeitsfelder in eine Tabelle ausgelesen, die als Ergebnis für jede Koordinate die aktuellen x- und y-Geschwindigkeiten sowie die Lufttemperaturen enthält. Es wird in dem Schnitt a-a, der in den genetischen Randbedingungen spezifiziert wurde, der Volumenstrom aus dem Geschwindigkeitsfeld per Integration bestimmt, und parallel werden die zugehörigen Durchschnittstemperaturen TExt im Außenbereich und TInt im Innenbereich berechnet. Aus diesen Daten lässt sich nach den oben angegebenen Gleichungen der Gütewert fk ermitteln. Im nächsten Schritt wird geprüft, ob die vom Benutzer gewählte Anzahl an Maxima und Minima des Volumenstroms erreicht ist und die Simulation abgebrochen werden kann. Ist dies nicht der Fall, wird die CFD-Simulation solange wieder aufgenommen und solange weitere Zeitschritte abgearbeitet, bis die gewünschte Anzahl erreicht ist. Nach Abschluss einer Simulation sind somit die NAGARE II-Ergebnisdateien fort10 und fort20 sowie der Verlauf der Gütewerte fk über die Zeit auf dem Client vorhanden. Für die beiden endgültigen Gütewerte fk,min und fk,max, die die Qualität eines simulierten Nachkommens ck beschreiben, werden das zuletzt berechnete lokale Maximum und Minimum herangezogen. Diese beiden Werte spielen bei der Auswahl der neuen Eltern die entscheidende Rolle.

## 7.4.3 Die Auswahl der Eltern als Ausgangspunkt einer neuen Generation

Die Wahl der m Eltern  $p_j$ , die die Grundlage für die n Nachkommen  $c_{k,i+1}$  einer neuen Generation bilden, findet statt, wenn alle Nachkommen der aktuellen Generation i simuliert wurden, ihre jeweiligen Gütewerte  $f_{k,max}$  und  $f_{k,min}$  bekannt sind und die Datensätze wieder auf dem Server eingetroffen sind. Wichtig für das weitere Verständnis ist ebenfalls, dass bei der in dieser Arbeit verwendeten Evolutionsstrategie kein Aussterben der Eltern stattfindet, d.h. die selektierten Eltern  $p_{j,i}$  werden bei der Ermittlung der neuen Eltern  $p_{j,i+1}$  für die kommende Generation (i+1) mit berücksichtigt. Dies hat zur Folge, dass sich die Gütewerte von Generation zu Generation nicht verschlechtern können. Zunächst wird nun aus den beiden Gütewerten  $f_{k,max}$  und  $f_{k,min}$  ein endgültiger Wert  $f_k$ sowohl für alle Nachkommen  $c_{k,i}$  als auch für alle Eltern  $p_{j,i-1}$  nach der folgenden Gleichung gebildet:

$$f_{k} = \phi_{max} \cdot f_{k,max} + \phi_{min} \cdot f_{k,min}$$
(7.2)  
mit:  $\phi_{max}, \phi_{min}$  Faktoren für den Einfluss des maximalen bzw.  
minimalen Gütewertes auf den endgültigen Gütewert  $f_{k}$ 

Die Faktoren  $\phi$  werden in den genetischen Einstellungen vom Benutzer definiert und geben den Einfluss des minimalen bzw. maximalen Gütewertes auf den Gesamtgütewert an. Dies kann je nach Ausgangssystem und je nach Wahl der Faktoren  $\phi$  den Optimierungsprozess beschleunigen. Eine Analyse eines Ausgangssystems, von dem zwei oder drei Generationen angerechnet wurden, kann hier erste Hinweise auf eine gute Wahl dieser Parameter geben. Das optimale System ist natürlich sowohl für maximale als auch für minimale Gütewerte gleichermaßen geeignet und somit unabhängig von der Wahl der Faktoren. Nachdem nun jedem Nachkommen  $c_{k,i}$  und jedem Elter  $p_{j,i-1}$  ein definierter Gütewert  $f_k$  zugeordnet wurde, werden alle Systeme anhand dieser Werte absteigend sortiert. Man erhält also eine Liste, die (m+n)-Elemente enthält. Aus dieser Liste, die beispielhaft in Abbildung 7.15 grafisch aufbereitet wurde, werden die besten m Elemente als neue Eltern  $p_{j,i}$  übernommen. Die anderen Elemente entfallen, spielen aber noch eine wichtige Rolle bei der Erzeugung der neuen Nachkommen  $c_{k,i+1}$ , da dabei die gewonnenen Erfahrungen über bessere bzw. schlechtere Mutationen anhand von relativen Erfolgswerten  $\rho_{k,i}$  berücksichtigt werden.



Abbildung 7.15: Selektion der besten Individuen über die Fitness und Transformation der Gütewerte in relative Erfolgswerte  $\rho_{k,i}$ 

#### 7.4.4 Lernen aus der Vergangenheit

Bevor der eigentliche Prozess der Erzeugung der neuen Generation stattfindet, werden zunächst noch die Erfahrungen aus den Simulationen der einzelnen Nachkommen  $c_{k,i}$  und Eltern  $p_{j,i-1}$  besonders berücksichtigt, um den Optimierungsprozess zu beschleunigen. Der Vorteil besteht darin, dass auf diese Weise Informationen über den Erfolg einer Mutation gewonnen werden können. Bei einer neuen Mutation, die sich dadurch kennzeichnet, dass an einer Stelle im Netz eine Wand eingebaut oder entfernt werden soll, können dann diese Erfahrungen genutzt werden.

Aus der vorhandenen Liste, in der alle Gütewerte der Nachkommen  $c_{k,i}$  und Eltern  $p_{j,i-1}$  sortiert abgelegt sind, werden der Maximal- und Minimalwert, also das erste und letzte Element der Liste, herausgelesen. Beide Werte bilden nun die neuen Grenzen 1 und 0, die die Grundlage für eine Transformation sämtlicher Fälle in eine neue Liste bilden, in der die relativen Erfolgswerte  $\rho_{k,i}$  abgespeichert werden. Dieser Prozess ist beispielhaft in Abbildung 7.15 dargestellt. Der relative Erfolgswert  $\rho_{k,i}$  gibt an, wieviel Prozent des Maximalwertes der Gütewert jedes einzelnen Systems ausmacht. Es wird also festgestellt, wie gut oder schlecht eine einzelne Entwicklung bzw. Mutation eines Individuums war. Dies ermöglicht es, zwei Matrizen mit relativen Erfolgswerten für jeden Netz-knotenpunkt festgestellt, ob dort eine Wand oder keine Wand vorlag. Entsprechend dieser Information kann dieser Netzkoordinate der relative Erfolgswert  $\rho_{k,i}$  zugewiesen werden. Insgesamt erhält man also  $2 \cdot (m+n)$  Matrizen, eine für jeden Nachkommen bzw.

weitere, in der Informationen über den Abbau einer Wand zu finden sind. Diese Matrizen können nun in der Weise zusammengefasst werden, dass an jedem Netzknotenpunkt ein gesamter relativer Erfolgswert  $\rho_i$  errechnet wird, in dem die relativen Erfolgswerte  $\rho_{k,i}$  für das Vorhandensein einer Wand bzw. keiner Wand arithmetisch gemittelt werden. Es ergeben sich somit als Ergebnis zwei Matrizen. In der ersten findet sich für jeden Netzknotenpunkt eine Information darüber, wie erfolgreich der Einbau einer Wand an dieser Position war und in der zweiten, wie erfolgreich der Verzicht auf eine Wand war. Positionen, für die es keine Informationen gibt, werden dadurch gekennzeichnet, dass sie keinen Wert enthalten.

Der dargelegte Prozess soll nun an einem Beispiel illustriert werden. Angenommen seien die Systeme  $c_{2,i}$ ,  $c_{5,i}$  und  $c_{7,i}$ , die durch die folgenden Ausschnitte einer Systemstruktur definiert werden, wobei ausgefüllte Quadranten den Bereich, in dem eine Wand vorhanden ist, bzw. nicht ausgefüllte Quadranten den Bereich, in dem keine Wand zu finden ist, beschreiben. Die relativen Erfolgswerte  $\rho_{k,i}$  der einzelnen Systeme können Abbildung 7.15 entnommen werden. Die anderen Individuen werden bei dieser beispielhaften Berechnung aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht berücksichtigt.



Abbildung 7.16: Beispiel für Systemstrukturen

Nachdem nun die relativen Erfolgswerte  $\rho_{2,i}$ ,  $\rho_{5,i}$  und  $\rho_{7,i}$  der einzelnen Individuen durch eine Transformation gemäß Abbildung 7.15 aus den Gütewerten berechnet wurden, können daraus die zwei Matrizen, die die endgültigen gesamten relativen Erfolgswerte  $\rho_i$  enthalten, per Mittelung erstellt werden. Ein relativer Erfolgswert  $\rho_{k,i} = -1$  bedeutet, dass für diese Netzposition keine Information vorliegt, und deswegen dieser Erfolgswert bei der Mittelung nicht berücksichtigt wird. Die Ausgangsmatrizen mit den relativen Erfolgswerten  $\rho_{k,i}$  für die drei Individuen lauten demnach wie folgt:

|            | c <sub>2,i</sub> |       | c <sub>5,i</sub> |    |    | c <sub>7,i</sub> |       |       |
|------------|------------------|-------|------------------|----|----|------------------|-------|-------|
| Wand       | 0,864            | -1    |                  | -1 | 0  |                  | 0,636 | 0,636 |
|            | -1               | 0,864 |                  | -1 | 0  |                  | -1    | -1    |
|            | -1               | -1    |                  | -1 | 0  |                  | 0,636 | -1    |
|            | -1               | 0,864 |                  | -1 | -1 |                  | -1    | -1    |
|            |                  |       |                  |    |    |                  |       |       |
| keine Wand | -1               | 0,864 |                  | 0  | -1 |                  | -1    | -1    |
|            | 0,864            | -1    |                  | 0  | -1 |                  | 0,636 | 0,636 |
|            | 0,864            | 0,864 |                  | 0  | -1 |                  | -1    | 0,636 |
|            | 0,864            | -1    |                  | 0  | 0  |                  | 0,636 | 0.636 |

Abbildung 7.17: Relative Erfolgswerte der Individuen  $\rho_{k,i}$ 

Daraus ergeben sich die zwei Matrizen mit den gesamten relativen Erfolgswerten pi:

Wand

| 0,75  | 0,318 |
|-------|-------|
| -1    | 0,432 |
| 0,636 | 0     |
| -1    | 0,864 |
|       |       |

keine Wand

| 0     | 0,864 |
|-------|-------|
| 0,5   | 0,636 |
| 0,432 | 0,75  |
| 0,5   | 0,318 |

Abbildung 7.18: Gesamte relative Erfolgswerte  $\rho_i$ 

In einer kompletten evolutionären Optimierung beschreiben diese beiden Matrizen gewonnene Informationen für sämtliche Individuen einer Generation an allen Positionen des Netzes. Es liegen also zwei reelle Matrizen vor, die hochwertige Erfahrungen aus der vergangenen Generation enthalten. Ein hoher relativer Erfolgswert bedeutet, dass eine Mutation an dieser Netzposition eher erfolgreich sein könnte und umgekehrt. Enthält die Matrix an einer Position den Wert -1, so konnten für diese Position keine Erfahrungen aus der letzten Generation ausgewertet werden.

Da strömungsmechanische Systeme allerdings nicht die Eigenschaft aufweisen, dass z.B. der Einbau einer Wand, der sich bei einer Berechnung als ungünstig erwies, generell negativ auswirken muss, werden sämtliche Positionen in einem nächsten Schritt noch einmal über einen in GeDeNA definierbaren Beiwert  $\rho_{corr}$  korrigiert. So erhalten Positionen, an denen der Einbau einer Wand erfolglos war, dennoch eine – wenn auch minimale – Chance, dass dort in einem Nachkommen  $c_{k,i+1}$  eine Wand eingebaut wird. Dieser Beiwert  $\rho_{corr}$  ist mit 5 % voreingestellt. Die Umrechnung erfolgt nach Gleichung 7.3:

$$\rho_{k,i,corr} = (1 - 2 \cdot \rho_{corr}) \cdot \rho_{k,i} + \rho_{corr}$$
(7.3)

Daraus ergeben sich für oben angeführtes Beispiel als endgültige Matrizen:

Wand

| 0,725 | 0,336 |
|-------|-------|
| -1    | 0,439 |
| 0,622 | 0,05  |
| -1    | 0,828 |

Keine Wand

| 0,05  | 0,828 |
|-------|-------|
| 0,5   | 0,622 |
| 0,439 | 0,725 |
| 0,5   | 0,336 |

Abbildung 7.19: Korrigierte gesamte relative Erfolgswerte  $\rho_i$ 

#### 7.4.5 Eine neue Generation entsteht

Nach Wahl der neuen Eltern  $p_{j,i}$  und der Erstellung der zwei Matrizen, in denen die korrigierten relativen Erfolgswerte  $\rho_i$  einer Mutation in der Generation i gespeichert sind, kann die Erzeugung einer neuen Generation (i+1) mit n Nachkommen  $c_{k,i+1}$  beginnen. Hierbei werden sowohl die Systeme als auch die Anzahl der Mutationen, die maximal möglich sind, mutiert.

GeDeNA verfügt über zwei mögliche Varianten Nachkommen zu generieren. Die erste Variante verzichtet auf den Einsatz der Rekombination bei der Reproduktion. Es wird bei der Erzeugung der neuen Generation als Nebenbedingung berücksichtigt, dass von jedem Elter  $p_{j,i}$  möglichst gleich viele Nachkommen in die neue Generation (i+1) eingebracht werden. D.h. auf eine Gesamtzahl von n Nachkommen  $c_{k,i+1}$  entfallen n/m einzelne Nachkommen eines der m Eltern  $p_{j,i}$ . Bei ungeraden Zahlen von n und m kann es hier in den seltenen Fällen, da die Gesamtzahl n an Nachkommen wesentlich größer als die Anzahl m der Eltern sein sollte, zu leichten aber unbedeutenden Verschiebungen kommen. Nachfolgend ist ein Beispiel für zwei Eltern mit je zwei Nachkommen dargestellt, wobei zu beachten ist, dass der Bereich, der einer evolutionären Optimierung unter realen Bedingungen zur Verfügung steht, wesentlich größer ist.



Abbildung 7.20: Reproduktion ohne Rekombination

Wird bei der Reproduktion die diskrete Rekombination verwendet, werden die n neuen Individuen in der folgenden Weise gebildet. Innerhalb der definierten Abmessungen des genetisch zu optimierenden Bereiches wird für jede Position des Gitters, gleichbedeutend mit einer Stützstelle des diskretisierten Netzes, zufällig ausgewählt, welches von den m Eltern  $p_{j,i}$  seine Eigenschaft an dieser Position an den Nachkommen  $c_{k,i+1}$  vererben darf.



Abbildung 7.21: Reproduktion mit diskreter Rekombination

Die Mutation eines Nachkommens  $c_{k,i+1}$  erfolgt nach dem folgenden Schema, wobei der Begriff Mutation in dieser Arbeit mit dem Einbau eines Wandelementes, falls sich dort bei dem zugrundeliegenden Elter kein Element befindet, bzw. mit dem Abbau eines Wandelementes, falls sich bei dem Elter ein Element befindet, gleichzusetzen ist. Zunächst wird in dem für eine evolutionäre Optimierung freigegebenen Bereich eine zufällige Position (x,y) bestimmt. Eine Überprüfung der Umgebung des ausgewählten Platzes zeigt, ob bei (x,y) eine Mutation vorgenommen werden könnte. Dies soll sicherstellen, dass das System sich nicht willkürlich entwickelt und kein völlig zufälliger Prozess in Gang gesetzt wird, sondern dass dieser Prozess vorgegebenen Gesetzen mit dem Ziel einer kürzeren Gesamtoptimierungsdauer gehorcht. So kann eine Mutation nur dann erfolgreich sein, wenn sich entweder unmittelbar neben einer neu zu setzenden Wand bereits eine Wand oder unmittelbar neben einem möglichen Abbau einer Wand keine Wand befindet.

Ist dieser Platz (x,y) zulässig, wird geprüft, ob es für diese Position bereits einen relativen Erfolgswert  $\rho_i$  aus der Generation i gibt. Falls dies nicht der Fall ist, findet die Mutation erfolgreich statt. Falls es einen Erfolgswert  $\rho_i$  gibt, wird eine linear verteilte Zufallszahl bestimmt und mit dem Wert  $\rho_i$  verglichen. Ist die Zufallszahl kleiner als  $\rho_i$  findet die Mutation erfolgreich statt. Im anderen Falle wird sie verworfen. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis die zu dem Elter  $p_{j,i}$  zugehörige Mutationsschrittweite  $\sigma_{j,i}$  erreicht ist. Für das in den Abbildungen 7.20 bis 7.22 dargestellte Beispiel ist zu beachten, dass dieses im Rahmen dieser schriftlichen Fassung nur exemplarisch die einzelnen Schritte während einer Evolution aufzeigen soll. Derartig verschiedene Systeme wie sie in Abbildung 7.22 letztendlich entstanden sind, werden in einer praxisnahen Aufgabenstellung aufgrund des wesentlich größeren genetischen Optimierungsbereichs nicht entstehen. Die in Kapitel 7.5 beschriebenen Beispiele verdeutlichen dies.



Abbildung 7.22: Mutation der Individuen

Im Anschluss wird weiterhin die Mutationsschrittweite  $\sigma_{j,i}$  auf den Nachkommen  $c_{k,i+1}$  vererbt und zusätzlich nach dem folgenden Schema mutiert. Es wird eine Zufallszahl bestimmt, der diesmal allerdings eine normierte Normalverteilung zugrunde liegt. Dies geschieht, um sicherzustellen, dass kleine Änderungen in der Mutationsschrittweite häufiger auftreten als große und eine Verkleinerung der Schrittweite genauso häufig wie eine Vergrößerung stattfindet [2].

Anhand der Schrittweite eines Individuums lässt sich sehr gut der Stand der Optimierung ablesen. Falls ein Individuum mit einer großen Schrittweite mutiert wurde, ist es wahrscheinlich, dass sich das Gesamtsystem noch in einer gröberen Optimierungsphase befindet, in der sich die einzelnen Individuen untereinander sehr unterscheiden. Ist die Schrittweite hingegen bereits klein, befindet sich das System in der Feinabstimmungsphase.

Wurden diese beiden Mutationsprozesse erfolgreich abgeschlossen, kann, falls vom Benutzer gewünscht, noch eine automatische Strukturoptimierung und eine automatische Strukturglättung vorgenommen werden. Diese beiden Programmteile erlauben es, dass einige generelle Erfahrungen aus vergangenen CFD-Kalkulationen und strömungsmechanischen Systemen im Allgemeinen berücksichtigt werden.



Abbildung 7.23: Automatische Strukturoptimierung

Bei der automatischen Strukturoptimierung wird der genetische Optimierungsbereich in einem ersten Schritt auf vorhandene Kanten überprüft. Bei einer erfolgreichen Suche werden diese abgerundet. In der zweiten Stufe wird der gesamte Bereich auf auftretende Ecken untersucht und diese automatisch ausgerundet, vgl. Abbildung 7.23. Die Anwendung beider Optimierungsalgorithmen hat eine Minimierung der Turbulenzen durch Wirbelbildungen und eine geringere Beeinträchtigung des Durchflusses durch geometrische Störungen zur Folge.



Abbildung 7.24: Automatische Strukturglättung zur Verringerung von Unebenheiten

Bei der automatischen Strukturglättung überprüfen zwei Algorithmen den Optimierungsbereich auf zu große Änderungen der geometrischen Struktur eines Nachkommens, die daraufhin in gewissem Maße korrigiert werden. So werden auftretende Einbuchtungen leicht verbessert und Entwicklungen, die voraussichtlich einen höheren Volumenstrom behindern werden, wieder zurück gebaut, vgl. Abbildung 7.24.

#### Sonderfall: Die erste Generation

Im Gegensatz zur Erzeugung der Nachkommen einer beliebigen Generation (i+1), wie sie oben beschrieben wurde, weicht der Prozess bei der Erstellung der Individuen der 1. Generation leicht ab. Eine Schwierigkeit bei der Optimierung von Systemen besteht generell darin, dass das globale und nicht nur ein lokales Minimum als Optimum gefunden werden muss. Deswegen ist es wichtig, dass bei der ersten Generierung der Nachkommen möglichst viele und sehr unterschiedliche Systeme überprüft werden. Durch die Vielfalt soll der ideale Ausgangspunkt für weitere Optimierungen gefunden werden. Bei GeDeNA wird dies dadurch realisiert, dass ein Teil der Nachkommen der 1. Generation völlig zufällig mutiert wird, also keine Rücksicht auf obige Beschränkung hinsichtlich der Überprüfung, ob die zufällig bestimmte Position (x,y) überhaupt für eine Mutation geeignet ist, genommen wird. Dies sichert eine großräumige Variation des Basissystems ab und reduziert die Wahrscheinlichkeit, dass der Gütewert des optimierten Systems ein lokales Minimum ist.

# 7.5 Beispiele für eine Optimierung des Luftströmungsverhaltens unter Anwendung Evolutionärer Algorithmen

## 7.5.1 Beispiel 1: Vorteile der automatischen Strukturoptimierung und -glättung

Das folgende Beispiel ist das Ergebnis einer Studie über die Auswirkungen der automatischen Strukturoptimierung und der automatischen Strukturglättung für variierende Parameter  $\phi_{max}$  und  $\phi_{min}$  sowie des ergänzenden Einsatzes einer diskreten Rekombination. Es wird hierfür das in Abbildung 7.25 dargestellte System betrachtet, bei dem der mittlere Bereich einer evolutionären Optimierung zur Verfügung steht. Diese geometrische Form wurde aus dem Grund gewählt, weil als Ergebnis eine Veränderung hin zu einer direkten Verbindung des unteren und oberen durchströmten Bereichs mit einer einhergehenden Reduktion des turbulenten Charakters der Strömung erwartet werden kann und dies von den Optimierungsroutinen bestätigt werden soll. Als zusätzliche Schwierigkeit ist von den Evolutionären Algorithmen außerdem das Problem eines möglichst effektiven, gleichzeitigen Ein- und Abbaus von Blöcken zu lösen.



Abbildung 7.25: Geometrische Systemstruktur und genetische Randbedingungen [23]

Nach der grafischen Erstellung der geometrischen Struktur und einer Verdichtung des Netzes im zu optimierenden Bereich mit GeDeNA sind die physikalischen Rahmenbedingungen zu definieren. Die Konvektionsströmung wird durch eine Heizmatte am Boden des Systems in Gang gesetzt, als Fluid wird wie in sämtlichen untersuchten Fällen Luft verwendet. Für die Auswertung des Fitnesswerts sind die genaue Schnittführung für eine Berechnung des Volumenstroms und die beiden Regionen, in denen T<sub>Ext</sub> und T<sub>Int</sub> bestimmt werden, über Gitterkoordinaten festzulegen. Der Volumenstrom Q<sub>V</sub> wird am Auslass ermittelt und die Durchschnittstemperaturen T<sub>Int</sub> bzw. T<sub>Ext</sub> beziehen sich wie gewohnt auf den Spalt einerseits und die Umgebung andererseits.



Abbildung 7.26: Einfluss der automatischen Optimierungsroutinen und der diskreten Rekombination, modifiziert nach [23]

In Abbildung 7.26 sind die Zunahmen der maximalen Gütewerte für die unterschiedlichen Parameter über die Generationen aufgetragen und einige zugehörige Systemvarianten dargestellt. Es wurden dabei je Generation zehn Individuen erstellt und jeweils die zwei mit den höchsten Fitnesswerten selektiert. Es ist zum einen deutlich erkennbar, dass bei beiden Variationen der Konvergenzparameter, die mit  $\phi_{max} = 0.9$  und  $\phi_{min} = 0.1$ bzw.  $\phi_{max} = 0,1$  und  $\phi_{min} = 0,9$  angesetzt wurden, durch das Berücksichtigen der optionalen automatischen Optimierungsalgorithmen eine höhere Fortschrittsgeschwindigkeit, d.h. eine größere Zunahme der Fitness über die gleiche Anzahl an Generationen, erreichbar ist. Gerade zu Beginn des Prozesses ist dies gut zu beobachten. Die Anwendung der diskreten Rekombination scheint auf den ersten Blick keine wesentliche Verbesserung der Fortschrittsgeschwindigkeit mit sich zu bringen. Dennoch bietet sie Vorteile, da der Funktionsverlauf gleichmäßiger ansteigt und ein konstanter Gradient einer sprunghaften Veränderung der Gütewerte vorzuziehen ist, da sich dadurch die Gefahr verringert, lediglich ein lokales Extremum zu finden. Anhand der abgebildeten Momentanzustände der Systemstruktur können ansatzweise die Mutationen erahnt werden, die für die Verbesserung der Geometrie notwendig sind. Die erwartete direkte diagonale Verbindung kristallisiert sich mehr und mehr heraus und auch die gleichzeitige Berücksichtigung eines Ein- und Abbaus von Blöcken verläuft erfolgreich. Wenn möglich sollte also bei dem in dieser Arbeit vorgeschlagenen Verfahren auf die automatische Strukturoptimierung und -glättung sowie auf die diskrete Rekombination zurückgegriffen werden.

## 7.5.2 Beispiel 2a: Verbesserung des Luftwechsels durch eine Optimierung im Auslassbereich des Fassadenmodells d10

Dieses Beispiel basiert auf der in Kapitel 5 vorgestellten Versuchsreihe. Als Ausgangssituation wird der dort beschriebene Modellaufbau für eine Spaltbreite von 10 cm verwendet. Aufgabe des Optimierungsprozesses ist es, den Auslassbereich geometrisch so zu verändern, dass sich ein höherer Luftwechsel im Fassadenspalt einstellt. Besonderes Augenmerk wird im Rahmen dieses Beispiels zum einen auf die Auswirkungen durch die Einführung der verbesserten Fitnesswertberechnung nach Kapitel 7.4.2 gelegt und zum anderen auf einen Vergleich des Resultats mit den Ergebnissen aus den Modellstudien. Es wurden folglich zwei unterschiedliche Fälle betrachtet. In Fall a) wurde die Optimierung mit der gemittelten Geschwindigkeit am Auslass als maßgebende Fitness f durchgeführt. Hierfür wurde zunächst in GeDeNA das Basissystem grafisch erstellt und mit den entsprechenden physikalischen und genetischen Randbedingungen versehen. Abbildung 7.27 zeigt die in GeDeNA definierte Ausgangssituation, sowie den für dieses System ermittelten Volumenstromverlauf an der Auslassöffnung. In der Abbildung ist ebenfalls der Fitnesswert für Fall b) angegeben, bei dem der Luftwechsel die Rolle des Gütewertes übernahm.



Abbildung 7.27: Geometrische Systemstruktur und zugehöriger Volumenstrom Qv

Für eine gute Konvergenz der Optimierung wurden die Parameter  $\phi_{max}$  bzw.  $\phi_{min}$  zu 0,0 bzw. 1,0 gewählt, so dass eine Steigerung des minimalen Volumenstroms bezogen auf die zugehörige Temperaturdifferenz zwischen Fassadenspalt und Umgebung im Fall a) die Qualitätsverbesserung anzeigen würde. Auf Basis dieser geometrischen Struktur konnte nun der Optimierungsprozess durchgeführt werden. Es wurden jeweils acht Individuen pro Generation erstellt und zwei von ihnen als neue Eltern für die folgende Generation selektiert. In Abbildung 7.28 ist der Verlauf der Optimierung über sechs Generationen dargestellt.



Abbildung 7.28: a) Fitness f – gemittelte Geschwindigkeit am Auslass

Zum direkten Vergleich finden sich in Abbildung 7.29 die Ergebnisse des zweiten Rechenlaufs, bei dem der Luftwechsel im Fassadenspalt als maßgebendes Qualitätsmerkmal angesetzt wurde.



Abbildung 7.29: b) Fitness f – Luftwechsel des Fassadenzwischenraums

Es kann sehr gut beobachtet werden, dass einerseits die mutierten Systemstrukturen bei Verwendung des Luftwechsels weniger lückenhaft sind, aber andererseits die Fortschrittsgeschwindigkeit mit insgesamt über elf Generationen langsamer ist. Der verantwortliche Grund ist darin zu sehen, dass in dem vorliegenden Beispiel schon die Wahl des Systems und der Randbedingungen eine Volumenreduzierung des Fassadenspalts automatisch impliziert. Als Konsequenz ergibt sich, dass in Fall a) die Optimierung schneller fortschreiten muss, da in jeder Generation nur Individuen selektiert werden, die eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit am Auslass aufweisen. Durch den Bezug der Geschwindigkeiten auf das Volumen können hingegen in Fall b) auch Individuen selektiert werden, die zwar eine geringere mittlere Geschwindigkeit am Auslass aufweisen, aber durch das zugehörige geringere Fassadenvolumen dennoch einen höheren Fitnesswert besitzen. Dadurch ergibt sich allerdings der positive Effekt, dass von Generation zu Generation die geometrischen Strukturen der Systeme weniger lückenhaft sind. Trotz kleinerer Fortschrittsgeschwindigkeit ist die Verwendung des Luftwechsels als Gütewert sehr zu empfehlen, besonders wenn die zugrundeliegenden Ausgangssysteme eine Vergrößerung des Innenraums zulassen.



Abbildung 7.30: Optimiertes System mit zugehörigem Volumenstrom Qv

Um die Qualität der gefundenen Lösung beurteilen zu können, ist eine Vergleichssimulation mit FLUENT durchgeführt worden. Die geometrische Struktur wurde in GAMBIT erstellt und mit den erforderlichen physikalischen Randbedingungen vervollständigt. Nun konnte eine dreidimensionale numerische Berechnung erfolgen, und anschließend der im quasistationären Zustand innerhalb des Fassadenmodells auftretende Luftwechsel mit den Überlegungen aus Kapitel 6.1 verglichen werden. Um einen weiteren Anhaltspunkt über die Qualität der evolutionären Optimierung zu erhalten, wurde ergänzend ein zweites System berechnet, bei dem die obere Ecke in erster Näherung ausgerundet wurde. Abbildung 7.31 zeigt sowohl die erzeugten Systemgeometrien als auch die sich ergebenden Geschwindigkeitsvektoren am Auslass. Hinzuzufügen ist, dass aus Übersichtsgründen die vorgelagerte Sicherungsbox nicht mit abgebildet, diese aber in üblicher Weise eingegeben wurde.



Abbildung 7.31: Vergleichsberechnungen mit FLUENT

Analog zur Auswertungsprozedur, die in Kapitel 6 beschrieben wurde, können die Massenströme  $Q_M$  am Auslass der Fassade bestimmt und auf die Temperaturdifferenzen zwischen Fassadenspalt und Modellraum bezogen werden. Über eine Division durch das Volumen des Fassadenzwischenraums kann daraufhin der Luftwechsel berechnet werden. Die Volumina d $10_{rund}$  bzw. d $10_{GeDeNA}$  fließen dabei mit 0,0441 m<sup>3</sup> bzw. 0,0420 m<sup>3</sup> in Tabelle 7.1 ein. Aufgrund der Ausrundung der Ecke erhöht sich der Luftwechsel um 10,1 %. Die mit GeDeNA optimierte Ecke erzielt einen Zuwachs von 13,6 %. Dies verdeutlicht sehr gut, dass für diese geometrischen und physikalischen Bedingungen schon allein die Maßnahme eine Ausrundung vorzusehen, eine höhere Durchspülung des Fassadenspalts nach sich zieht. Die Optimierung mit den Evolutionären Algorithmen kann diesen Effekt sogar noch steigern.

| Spaltbreite           | Massenstrom | $T_{\text{Ext}}$ | T <sub>Int</sub> | $\Delta T$ | $k_{\Delta T=1K}$   | $LW_{\Delta T=1K}$ |
|-----------------------|-------------|------------------|------------------|------------|---------------------|--------------------|
|                       | [kg/s]      | [K]              | [K]              | [K]        | [m <sup>3</sup> /s] | [1/h]              |
| d10                   | 47,4.10-4   | 34,4464          | 35,4783          | 1,0319     | 38,7.10-4           | 308                |
| d10 <sub>rund</sub>   | 42,7.10-4   | 21,3902          | 22,1200          | 0,7798     | 41,5.10-4           | 339                |
| d10 <sub>GeDeNA</sub> | 44,4.10-4   | 22,0416          | 22,8548          | 0,8132     | 40,8.10-4           | 350                |

Tabelle 7.1: Berechnung des Luftwechsels aus den FLUENT Simulationsergebnissen

# 7.5.3 Beispiel 2b: Verbesserung des Luftwechsels durch eine Optimierung im Auslassbereich des Fassadenmodells d20

Analog zu dem vorangegangenen Beispiel aus Kapitel 7.5.2 wurde eine weitere Optimierung auf Basis des in dieser Arbeit vorgestellten Fassadenmodells vorgenommen. Die Erstellung des Systems mit einer Spaltbreite von 20 cm erfolgte in üblicher Form mittels der grafischen Eingabeoberfläche in GeDeNA. Die geometrische Struktur und der Bereich, der einer evolutionären Optimierung zur Verfügung steht, kann aus Abbildung 7.32 entnommen werden. Der Volumenstrom wurde am Auslass des Fassadenmodells ausgewertet und die daraus an dieser Stelle durch Mittelung errechenbare Geschwindigkeit gibt die Fitness des Systems an.



Abbildung 7.32: Geometrische Systemstruktur und zugehöriger Volumenstrom Qv

Nach einem Rechenlauf mit GeDeNA über 15 Generation mit je acht Individuen ergab sich die in Abbildung 7.33 dargestellte Geometrie. Im Anschluss wurde wiederum eine Vergleichsrechnung mit FLUENT durchgeführt.



Abbildung 7.33: Optimiertes System mit zugehörigem Volumenstrom Qv



Abbildung 7.34: Vergleichsberechnung mit FLUENT

Abbildung 7.34 gibt einen Überblick über die mit GAMBIT erstellte Systemstruktur und die verwendete Netzdiskretisierung. Nach einer hinreichend konvergierten Berechnung und dem Erreichen des quasistationären Zustands konnte der Massenstrom  $Q_M$  am Auslass ermittelt und mit Hilfe der Temperaturdifferenzen und des Fassadenzwischenraumvolumens  $V_f = 0,08477 \text{ m}^3$  der Luftwechsel bestimmt werden. Nach Tabelle 7.2 ergibt sich ein LW<sub> $\Delta T = 1 \text{ K}$ </sub> von 231. Somit erhöht sich der Luftwechsel gegenüber der Ausgangsvariante um 17,8 %.

| Spaltbreite           | Massenstrom | T <sub>Ext</sub> | T <sub>Int</sub> | $\Delta T$ | $k_{\Delta T=1K}$     | $LW_{\Delta T=1K}$ |
|-----------------------|-------------|------------------|------------------|------------|-----------------------|--------------------|
|                       | [kg/s]      | [K]              | [K]              | [K]        | $[m^3/s]$             | [1/h]              |
| d20                   | 54,1.10-4   | 31,7399          | 32,5363          | 0,7964     | 50,3.10-4             | 196                |
| d20 <sub>GeDeNA</sub> | 56,9.10-4   | 23,2046          | 23,9579          | 0,7533     | 54,4·10 <sup>-4</sup> | 231                |

Tabelle 7.2: Berechnung des Luftwechsels aus den FLUENT Simulationsergebnissen

# 7.5.4 Beispiel 3: Verbesserung des Luftwechsels durch eine Optimierung des gesamten Zwischenraums des Fassadenmodells d10

Grundlage dieser Optimierung bildete wie in Beispiel 2a das Fassadenmodell d10 mit einer Spaltbreite von 10 cm. Diesmal wurden allerdings nicht nur im Auslassbereich, sondern innerhalb des gesamten Fassadenzwischenraums Mutationen zugelassen. Die geometrische Ausgangssituation mit zugehörigem Volumenstrom  $Q_V$  und Gütewert f kann Abbildung 7.35 entnommen werden.



Abbildung 7.35: Geometrische Systemstruktur mit zugehörigem Volumenstrom Q<sub>V</sub>

Aufgrund des sehr großen Bereichs mit insgesamt 440 möglichen Positionen, an denen eine Mutation stattfinden kann, sind 70 Generationen mit je acht Individuen und zwei Eltern berechnet worden. Für die Beschreibung der Qualität der Systeme wurde bei diesem Prozess die mittlere Geschwindigkeit  $\overline{v}$  an der Auslassöffnung der Fassade angesetzt. Einen Überblick über die Entwicklung der Momentanzustände der geometrischen Struktur bietet Abbildung 7.36, wobei die angegebene Nummer die Generation des dargestellten selektierten Individuums bezeichnet.



Abbildung 7.36: Verlauf der Optimierung



Abbildung 7.37: Optimiertes System mit zugehörigem Volumenstrom Qv

Für einen Vergleich des Luftwechsels wurde anschließend eine dreidimensionale Simulation des optimierten Systems mit FLUENT durchgeführt und der Massenstrom  $Q_M$ an der Auslassöffnung ermittelt. Das Volumen des Fassadenzwischenraums V<sub>f</sub> berechnete FLUENT zu 0,036462 m<sup>3</sup>. Aus den Daten aus Tabelle 7.3 lässt sich für eine Temperaturdifferenz von 1 K ein LW<sub> $\Delta T = 1 K$ </sub> = 393 1/h folgern. Es kann somit eine Steigerung des Luftwechsels um 27,6 % gegenüber dem Ausgangssystems erzielt werden.



Abbildung 7.38: Vergleichsberechnung mit FLUENT

| Spaltbreite           | Massenstrom           | T <sub>Ext</sub> | T <sub>Int</sub> | $\Delta T$ | $k_{\Delta T=1K}$     | $LW_{\Delta T=1K}$ |
|-----------------------|-----------------------|------------------|------------------|------------|-----------------------|--------------------|
|                       | [kg/s]                | [K]              | [K]              | [K]        | $[m^3/s]$             | [1/h]              |
| d10                   | 47,4·10 <sup>-4</sup> | 34,4464          | 35,4783          | 1,0319     | 38,7.10-4             | 308                |
| d10 <sub>GeDeNA</sub> | 33,9.10-4             | 20,7798          | 21,2792          | 0,4994     | 39,8·10 <sup>-4</sup> | 393                |

Tabelle 7.3: Berechnung des Luftwechsels aus den FLUENT Simulationsergebnissen

# **Kapitel 8**

# Zusammenfassung und Ausblick

## 8.1 Zusammenfassung

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich in drei Abschnitte gliedern. Anhand einer Versuchsreihe an einem Glas-Doppelfassadenmodell konnte zunächst gezeigt werden, dass die optische Strömungsmessmethode hervorragend geeignet ist, um sensible auftriebsinduzierte Luftströmungen im Labor visualisieren und quantifizieren zu können. Bei sorgsamer Anwendung und einer guten Abstimmung der beteiligten Komponenten lassen sich hochwertige Übersichten und Geschwindigkeitsvektoren gewinnen, die aussagekräftige Beschreibungen des Strömungsfelds zulassen. Die eingesetzte Software, insbesondere die PTV-Software und die Eigenentwicklung PIAP erwiesen sich als geeignete Hilfsmittel für die Erfassung der Geschwindigkeitsbeträge und der Volumenströme.

Auf der Grundlage dieser Messergebnisse konnte weiterhin anhand einer Validierung der CFD-Programme NAGARE und FLUENT verdeutlicht werden, dass sich auftriebsinduzierte Strömungen sehr gut numerisch berechnen und simulieren lassen. Voraussetzung ist selbstverständlich eine sinnvolle Wahl der Turbulenzmodelle und eine geeignete Netzdiskretisierung, zu denen in dieser Arbeit einige Hinweise zu finden sind. Es zeigte sich rückblickend, dass sowohl die LES als auch die Berechnungen unter Verwendung des k-ɛ-Modells Vor- und Nachteile besitzen, die in Kapitel 6 herausgearbeitet wurden. Ein wesentliches Kriterium für die Entscheidung, in welcher Weise die Turbulenzmodellierung stattfinden soll, ist in hohem Maße abhängig von der zur Verfügung stehenden Rechenkapazität. Die Zukunft dürfte dabei der LES gehören, da aufgrund der immer weiter wachsenden Leistungsfähigkeit der Prozessoren und Speichermodule in Verknüpfung mit verbesserten Programmiertechniken, diese numerisch komplexeren Gleichungssysteme in immer kürzerer Zeit gelöst werden können.

Dieses gilt natürlich gleichermaßen für die Verwendung bionischer Prinzipen. Wie in Kapitel 7 aufgezeigt wurde, kann diese Form der Optimierung große Vorteile bieten, gerade in dem weiten Gebiet der Strömungsmechanik. Anhand der Beispiele konnte die durch die berechneten geometrischen Veränderungen auftretende Steigerung des Luftwechsels nachgewiesen und somit die Effektivität der Algorithmen belegt werden. Die Individualität eines Bauwerks und insbesondere von Fassaden impliziert die Suche nach individuellen Lösungen. Dies ist eine ideale Voraussetzung für einen erfolgversprechenden Einsatz der Evolutionären Algorithmen. Um so mehr ist dieser Ansatz in Kombination mit der Computational Fluid Dynamics abhängig von leistungsfähigen Routinen und Systemkomponenten, da parallel mehrere geometrische Varianten ausgewertet werden müssen. Der allgemeine Ansatz dieser Methode, welcher in der im Rahmen dieses Projekts entwickelten Softwareapplikation GeDeNA implementiert und zusätzlich um das Verteilte Rechnen ergänzt wurde, zeigt vielversprechende Ergebnisse.

## 8.2 Ausblick

Vor allem der Einsatz der Bionik in dem Gebiet der effizienten Fassadengestaltung eröffnet und erfordert zahlreiche weiterführende Studien und Projekte. Da die mathematischen Forschungen und Entwicklungen in der Numerischen Strömungsmechanik an anderer Stelle vorangetrieben werden, konzentriert sich dieser Ausblick auf das in dieser Arbeit thematisierte Anwendungsfeld der auftriebsinduzierten Luftströmungen in Fassaden. Die wesentlichen Forschungsansätze können den zwei Gebieten zugeordnet werden, die sich das Programmpaket GeDeNA zunutze macht. Dies ist zum einen die Optimierungsmethode an sich und zum anderen das Auswertungsverfahren mit Hilfe von CFD-Software. In dem zuletzt genannten Feld sind weitere grundlegende Studien notwendig, um die Allgemeingültigkeit der numerisch berechenbaren Strömungen auf andere Bereiche auszudehnen. Dazu zählt z.B. eine Validierung der CFD-Programme im Hinblick auf den Windeinfluss, dessen Berücksichtigung das nächste Hauptziel sein sollte. Der in dieser Arbeit allgemein betrachtete Temperaturunterschied zwischen Fassadenspalt und umgebender Luft, sollte ebenfalls über den Einfluss der solaren Immissionen genauer erfasst und in eine geeignete Beziehung gesetzt werden. Für die Betrachtungen, die im Rahmen der evolutionären Algorithmen in dieser Arbeit angestellt wurden, war dies von geringerer Bedeutung, da eine geometrische Verbesserung für abweichende Temperaturunterschiede aufgrund des wurzelförmigen Zusammenhangs die gleichen Steigerungsraten des Luftwechsels mit sich bringt, sollte aber im Hinblick auf absolute Angaben in zukünftigen Arbeiten erforscht werden.

Für die Weiterentwicklung im Bereich der Optimierungsmethode insbesondere im Zusammenhang mit der in dieser Arbeit erstellten Anwendung GeDeNA sollen die folgenden Ausführungen lohnenswerte Forschungsansätze aufzeigen, die sich sowohl auf die Netzwerkkommunikation als auch auf die implementierten Algorithmen beziehen. Aus Sicht des Optimierungsprozesses wäre die Erweiterung auf dreidimensionale Strukturen äußerst wünschenswert. Dieses sollte gleichzeitig mit einer Ausdehnung der physikalischen Randbedingungen auf Systeme, die einen Fluidaustausch über die Systemgrenzen hinaus ermöglichen, einhergehen, da dies eine enorme Rechenzeitersparnis bedeuten würde. Für diese beiden Erweiterungen ist eine Veränderung des Programmcodes der dreidimensionalen Version von NAGARE erforderlich, die aber möglich sein sollte. Die Entwicklung von GeDeNA sollte in den nächsten Schritten auf die Erweiterung der Evolutionsstrategie abzielen. Sehr interessant wäre es, wenn sich für jedes betrachtete System nicht nur die geometrische Struktur, sondern auch die Optimierungsmethode selbst - ähnlich dem natürlichen Vorbild - eigenständig entwickeln und optimieren würde. So könnte die Entscheidung, ob der Schwerpunkt der Optimierung anhand einer Mutation oder einer Rekombination stattfinden soll, dem System selbst überlassen sein.

Eine weitere wichtige Entwicklung wäre die Erweiterung des Lernprozesses aus bereits berechneten Systemen. So könnten Strukturen, die sich bei verschiedenen Modellen als besonders erfolgreich erwiesen haben, z.B. bestimmte Leitblechformen, automatisch bevorzugt eingesetzt bzw. Strukturen, die sich eher nachteilig gezeigt haben, verworfen werden. Hierfür wäre eine Informationsfilterung und Ablage in einer Datenbank notwendig, die dann bei der Optimierung von Systemen genutzt werden könnte, um Geometrien effizienter zu entwickeln. Die Möglichkeit einer flexiblen Reaktion des Diskretisierungsnetzes, in dessen Stützstellen die strömungsmechanischen Gleichungen ausgewertet werden, auf die jeweilige Aufgabenstellung könnte sich ebenfalls als äußerst nützlich erweisen. Zur Zeit wird noch ein predefiniertes Netz verwendet, welches am Anfang einer Optimierung festgelegt wird und sich im Laufe der gesamten Berechnung nicht verändern kann. Die Option, dass sich das Netz in Bereichen selbständig adaptiert, in denen eine feinere Strukturauflösung aufgrund von erkannten hohen Gradienten oder aus geometrischen Gründen erforderlich ist, würde eine komplexe Evolution abrunden. Aus Sicht des Verteilten Rechnens wäre es wünschenswert, dass sich die einzelnen Clients während eines Optimierungsprozesses sowohl an- als auch abmelden könnten. Durch ein solches offenes Netzwerk könnten sich im Laufe einer Berechnung zusätzliche Computer beim Server je nach individueller Auslastung und ohne Datenverlust anbzw. abmelden. Dies würde die Flexibilität der Netzwerkstruktur erheblich steigern und die Möglichkeit schaffen, dass sich über das Internet Nutzer aus aller Welt mit ihren Computern an der Lösung einer Optimierung beteiligen. Mit dieser Maßnahme sollte die Realisierung weiterer Sicherheitsstufen einhergehen, um im Sinne einer stabilen Berechnung technische Probleme abfangen zu können. So sollte das Netzwerk flexibel reagieren, falls ein Ausfall des Server auftreten sollte. Einige Konzepte sind hierzu bereits für ringförmige Netzwerke entwickelt worden, die vorsehen, dass im Falle eines Ausfalls des zentralen Servers, die verbleibenden Rechner von sich aus einen neuen Server auswählen und die gesamte Berechnung auf diesen Server abstimmen.

Das Ziel sämtlicher angesprochener Entwicklungen sollte es sein, allgemeingültige Konzepte zu entwickeln, die in Form eines Programmoduls umgesetzt werden, das den planenden Ingenieur bei dem Entwurf einer ressourcenschonenden Fassade unterstützt. Doppelfassaden mit geringeren Breiten, die nicht nur weniger Platzbedarf am Gesamtgebäude aufweisen und somit den Anteil der nutzbaren Geschossfläche erhöhen, sondern zusätzlich aufgrund ihrer evolutionär optimierten geometrischen Gestaltung eine gleiche bzw. höhere Effizienz besitzen, sind lediglich eine Variante möglicher Konsequenzen. Die entstehenden Optimierungsalgorithmen können weiterhin geometrische Strukturen unter definierten Voraussetzungen und Randbedingungen selbständig und zuverlässig ihrer Umwelt anpassen und sich auch bei der Entwicklung von intelligenten adaptiven Systemen als vorteilhaft erweisen. So könnte ein Modell unter verschiedenen Randbedingungen, die sich z.B. aus unterschiedlichen Windrichtungen und -stärken oder thermischen Einflüssen ergeben, genetisch optimiert werden. Eine Analyse der verschiedenen Ergebnisse ließe die Entwicklung eines Bauteils zu, das auf die unterschiedlichen Randbedingungen flexibel, dynamisch und immer optimal reagiert. Weitere Bereiche des Bauwesens, bei denen ebenfalls Strömungsvorgänge eine bedeutende Rolle spielen, könnten im gleichen Maße von den Forschungsaktivitäten in diesem Spektrum profitieren. Letztendlich dient dieses gesamte Konzept einer idealen Ausnutzung von geometrischen Formen und Materialien, die somit in effizienter Weise eingesetzt werden können und wertvolle Ressourcen einsparen helfen.

# Anhang A

# **Kubische Splineinterpolation**



Abbildung A.1: Beispiel für eine kubische Spline-Interpolation

Für eine Auswertung der Geschwindigkeitsprofile (s. Kapitel 5.2.4.3) kam das Verfahren der Kubischen Spline-Interpolation zur Anwendung, um die einzelnen Profile genauer durch abschnittsweise Funktionen abbilden und die Wandhaftbedingungen mit einbeziehen zu können. In Abbildung A.1 ist ein aus drei einzelnen Splines bestehendes Beispiel mit n = 4 gegebenen Stützstellen und den jeweiligen Rand- und Übergangsbedingungen dargestellt. Der Funktionsansatz eines solchen Splines kann wie folgt beschrieben werden [43]:

$$S_{i}(x) = a_{i} + b_{i} \cdot (x - x_{i}) + \frac{c_{i}}{2} \cdot (x - x_{i})^{2} + \frac{d_{i}}{6} \cdot (x - x_{i})^{3}$$
gültig im Intervall [x<sub>i</sub>, x<sub>i+1</sub>] mit i = 0, 1, ..., n-1  
mit: n Anzahl der Stützstellen  
x<sub>0</sub> < x<sub>1</sub> < ... < x<sub>n-1</sub> < x<sub>n</sub>
(A.1)
Die Lösung des Problems besteht darin, die vier Koeffizienten a<sub>i</sub>, b<sub>i</sub>, c<sub>i</sub> und d<sub>i</sub> eindeutig zu bestimmen. Die Rand- bzw. Übergangsbedingungen der einzelnen Splines werden dadurch definiert, dass Funktionswert, Steigung und Krümmung am Endpunkt des i-ten Splines mit denen des Anfangspunktes des i+1-ten Splines übereinstimmen müssen:

$$S_{i}(x_{i+1}) = S_{i+1}(x_{i+1})$$

$$S_{i}'(x_{i+1}) = S_{i+1}'(x_{i+1})$$

$$S_{i}''(x_{i+1}) = S_{i+1}''(x_{i+1}), i = 0, 1, ..., n - 2$$
(A.2)

Zusätzlich werden die Annahmen getroffen, dass in dem zur Anwendung kommenden Fall die Abstände zwischen den Stützstellen äquidistant sind, d.h.  $h = x_{i+1} - x_i$ , und natürliche Randbedingungen vorliegen, die sich wie folgt darstellen lassen:

$$S_0''(x_0) = 0$$
 und  $S_{n-1}''(x_n) = 0$  (A.3)

Für das oben gezeigte Beispiel ergeben sich somit insgesamt 12 Gleichungen für 12 unbekannte Koeffizienten. Durch Ableiten und Einsetzen der verschiedenen Bedingungen lässt sich eine Lösungsmatrix für die Koeffizienten  $c_i$  aufstellen, durch die wiederum die anderen Koeffizienten  $a_i$ ,  $b_i$  und  $d_i$  bestimmt werden können. Mit  $f_i = S_i(x_i)$  ergibt sich diese Matrix zu:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{c}_{0} \\ \mathbf{c}_{1} \\ \mathbf{c}_{2} \\ \dots \\ \mathbf{c}_{n-1} \\ \mathbf{c}_{n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 6 \cdot (\mathbf{f}_{0} - 2 \cdot \mathbf{f}_{1} + \mathbf{f}_{2})/h^{2} \\ 6 \cdot (\mathbf{f}_{1} - 2 \cdot \mathbf{f}_{2} + \mathbf{f}_{3})/h^{2} \\ \dots \\ 6 \cdot (\mathbf{f}_{n-2} - 2 \cdot \mathbf{f}_{n-1} + \mathbf{f}_{n})/h^{2} \\ 0 \end{pmatrix}$$
(A.4)

In einem letzten Schritt lassen sich die weiteren Koeffizienten berechnen, und die einzelnen Splines können angegeben und weiter verarbeitet werden.

$$a_{i} = f_{i}$$
  

$$b_{i} = (f_{i+1} - f_{i})/h - h \cdot (c_{i+1} + 2 \cdot c_{i})/6$$
  

$$d_{i} = (c_{i+1} - c_{i})/h$$
(A.5)

### Anhang B

# Geschwindigkeitsprofile in der Übersicht



|                     | Temperatur           |
|---------------------|----------------------|
| TF0                 | 25,8                 |
| TF1                 | 44,8 (59,9)          |
| TF2                 | 28,4                 |
| TF3                 | 26,6                 |
| TF4                 | 26,4                 |
| TF5                 | 26,5                 |
| TF6                 | 25,2                 |
| TF7                 | 24,8                 |
|                     |                      |
|                     | $Q_{\rm V}$          |
| a <sub>31.PTV</sub> | $28,5 \cdot 10^{-4}$ |
| a <sub>32.PTV</sub> | $31,5 \cdot 10^{-4}$ |
| a <sub>33.PTV</sub> | $27,7 \cdot 10^{-4}$ |
| 0                   | $20.0.10^{-4}$       |

Abbildung B.1: Geschwindigkeitsprofile am Einlass d5-a<sub>3k</sub>(i)



Temperatur TF0 27,0 TF1 63,8 (85,2) TF2 29,9 TF3 28,2 TF4 28,0 TF5 28,0 TF6 26,6 TF7 26,2 Q<sub>V</sub> 38,7 .10-2 a<sub>31.PTV</sub> a<sub>32.PTV</sub>  $42,9 \cdot 10^{-4}$  $36,0.10^{-4}$ a<sub>33.PTV</sub>  $42,1\cdot 10^{-4}$ a<sub>31.PIAP</sub>

Abbildung B.2: Geschwindigkeitsprofile am Einlass d5-a<sub>3k</sub>(ii)



Abbildung B.3: Geschwindigkeitsprofile in halber Spalthöhe d5-a<sub>2k</sub>(ii)



Abbildung B.4: Geschwindigkeitsprofile in halber Spalthöhe d5-a<sub>2k</sub>(ii)



|                      | Temperatur           |
|----------------------|----------------------|
| TF0                  | 25,8                 |
| TF1                  | 44,8 (59,9)          |
| TF2                  | 28,4                 |
| TF3                  | 26,6                 |
| TF4                  | 26,4                 |
| TF5                  | 26,5                 |
| TF6                  | 25,2                 |
| TF7                  | 24,8                 |
|                      |                      |
|                      | $Q_V$                |
| $a_{11,PTV}$         | $32,8 \cdot 10^{-4}$ |
| a <sub>12.PTV</sub>  | $23,4 \cdot 10^{-4}$ |
| a <sub>13.PTV</sub>  | $27,9 \cdot 10^{-4}$ |
| a <sub>11.PIAP</sub> | 33,4 .10-4           |

Abbildung B.5: Geschwindigkeitsprofile am Auslass d5-a<sub>1k</sub>(i)



Abbildung B.6: Geschwindigkeitsprofile am Auslass d5-a<sub>1k</sub>(ii)



|                      | Temperatur           |
|----------------------|----------------------|
| TF0                  | 28,8                 |
| TF1                  | 55,1 (73,6)          |
| TF2                  | 31,7                 |
| TF3                  | 29,7                 |
| TF4                  | 29,6                 |
| TF5                  | 29,8                 |
| TF6                  | 28,6                 |
| TF7                  | 28,5                 |
|                      |                      |
|                      | $Q_V$                |
| a <sub>31.PTV</sub>  | $60,5 \cdot 10^{-4}$ |
| a <sub>32.PTV</sub>  | $61,5 \cdot 10^{-4}$ |
| a <sub>33.PTV</sub>  | $64,6.10^{-4}$       |
| a <sub>31 PIAP</sub> | $65.9 \cdot 10^{-4}$ |

Abbildung B.7: Geschwindigkeitsprofile am Einlass d10-a<sub>3k</sub>(i)



Abbildung B.8: Geschwindigkeitsprofile am Einlass d10-a<sub>3k</sub>(ii)



Abbildung B.9: Geschwindigkeitsprofile am Auslass d10-a<sub>1k</sub>(i)



Abbildung B.10: Geschwindigkeitsprofile am Auslass d10-a<sub>1k</sub>(ii)



|                     | Temperatur             |
|---------------------|------------------------|
| TF0                 | 28,4                   |
| TF1                 | 54,4 (72,7)            |
| TF2                 | 32,4                   |
| TF3                 | 30,4                   |
| TF4                 | 30,3                   |
| TF5                 | 30,7                   |
| TF6                 | 29,6                   |
| TF7                 | 29,4                   |
|                     |                        |
|                     | $Q_{\rm V}$            |
| a <sub>31.PTV</sub> | 85,4 ·10 <sup>-4</sup> |
| a <sub>32.PTV</sub> | 84,7 ·10 <sup>-4</sup> |
| a <sub>33.PTV</sub> | 81,6 ·10 <sup>-4</sup> |
| <b>a</b> 31 piap    | $85.4 \cdot 10^{-4}$   |

Abbildung B.11: Geschwindigkeitsprofile am Einlass d15-a<sub>3k</sub>(i)



Abbildung B.12: Geschwindigkeitsprofile am Einlass d15-a<sub>3k</sub>(ii)



Abbildung B.13: Geschwindigkeitsprofile am Auslass d15-a<sub>1k</sub>(i)



Abbildung B.14: Geschwindigkeitsprofile am Auslass d15-a<sub>1k</sub>(ii)



|  | Temperatur             |
|--|------------------------|
| TF0  | 27,4                   |
| TF1  | 54,4 (72,3)            |
| TF2  | 32,1                   |
| TF3  | 31,0                   |
| TF4  | 30,8                   |
| TF5  | 31,6                   |
| TF6  | 31,1                   |
| TF7  | 31,4                   |
|  |                        |
|  | $Q_{\rm V}$            |
| a <sub>31.PTV</sub>  | 97,1 $\cdot 10^{-4}$   |
| a <sub>32.PTV</sub>  | _                      |
| a <sub>33.PTV</sub>  | 93,3 ·10 <sup>-4</sup> |
| <b>a</b> <sub>31</sub> <b>p</b> <sub>1</sub> <b>p</b> <sub>1</sub> | 93.4 ·10 <sup>-4</sup> |

Abbildung B.15: Geschwindigkeitsprofile am Einlass d20-a<sub>3k</sub>(i)



Abbildung B.16: Geschwindigkeitsprofile am Einlass d20-a<sub>3k</sub>(ii)



Abbildung B.17: Geschwindigkeitsprofile am Auslass d20-a<sub>1k</sub>(i)



Abbildung B.18: Geschwindigkeitsprofile am Auslass d20-a<sub>1k</sub>(ii)



Abbildung B.19: Geschwindigkeitsprofile am Einlass aus FLUENT



Abbildung B.20: Geschwindigkeitsprofile am Einlass aus NAGARE



Abbildung B.21: Geschwindigkeitsprofile in halber Spalthöhe aus FLUENT



Abbildung B.22: Geschwindigkeitsprofile in halber Spalthöhe aus NAGARE



Abbildung B.23: Geschwindigkeitsprofile am Auslass aus FLUENT



Abbildung B.24: Geschwindigkeitsprofile am Auslass aus NAGARE

#### Anhang C

## Versuche Woods/Gladstone: Berechnung von λ<sub>G</sub>

Im Folgenden werden die FLUENT Simulationen und deren Ergebnisse beschrieben, die zur Berechnung von  $\lambda_G$  aus Gleichung 4.1 genutzt wurden. Als Grundlage der Auswertungen der Simulationen dienten die in [14] angegebenen Formeln, die hier mit C.1 bis C.3 gekennzeichnet sind, und die Berechnungsmodelle, die in Kapitel 6.2 beschrieben wurden.

$$\frac{\mathrm{dT}}{\mathrm{dt}} = \lambda_{\mathrm{G}} \cdot \mathbf{J}_{\mathrm{T}} \cdot (\mathbf{T}_{\mathrm{Heizung}} - \mathbf{T})^{4/3} \tag{C.1}$$

mit: 
$$J_{T} = \left(\frac{\beta \cdot \kappa^{2} \cdot g}{\nu}\right)^{1/3} \cdot \frac{1}{H} \quad \left[\frac{1}{K^{1/3} \cdot s}\right]$$
 (C.2)

Integrieren der Gleichung C.1 führt zu:

$$F = \frac{1}{J_{T}} \cdot 3 \cdot (T_{\text{Heizung}} - T)^{-1/3} \begin{vmatrix} T_{\text{Int}} \\ T_{\text{Ext}} \end{vmatrix} = \lambda_{G} \cdot t \begin{vmatrix} t \\ t_{0} \end{vmatrix}$$
(C.3)

Eine Einheitenkontrolle zeigt, dass sowohl F als auch  $\lambda_G \cdot t$  in Sekunden angegeben wird, d.h.  $\lambda_G$  ist wie gefordert dimensionslos. Simuliert wurden zwei Fälle, bei denen, vergleichbar mit den Kalibrierungsversuchen in [14], die Box komplett geschlossen und mit Luft der Ausgangstemperatur T<sub>Ext</sub> gefüllt ist. Zu Versuchsbeginn bzw. Simulationsbeginn wird die Luft mit einer Bodenheizung der Temperatur T<sub>Heizung</sub> erwärmt, und der Anstieg der Raumlufttemperatur T<sub>Int</sub> über die Zeit t mitverfolgt. Die Eingangsdaten der beiden Simulationen sind in der folgenden Tabelle C.4 angegeben. Gleichung C.2 wird für die jeweilige Temperatur T<sub>Heizung</sub> ausgewertet, d.h.  $\beta$ ,  $\kappa$  und  $\nu$  sind entsprechend T<sub>Heizung</sub> zu ermitteln.

| Fall | Bodenheizung T <sub>Heizung</sub> [K] | Starttemperatur T <sub>Ext</sub> [K] | Parameter $J_T [1/(K^{1/3}s)]$ |
|------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| a    | 328                                   | 284                                  | 0,04154                        |
| b    | 308                                   | 288                                  | 0,04082                        |

Tabelle C.1: Eingangsparameter für die Simulationen mit FLUENT

Nach Beginn der Simulation heizt sich die Innenraumtemperatur  $T_{Int}$  immer weiter auf und nähert sich mit zunehmender Simulationsdauer der Temperatur der Bodenheizung  $T_{Heizung}$  an. In Abbildung C.5 ist das Ergebnis der Gleichung C.3 eingetragen.



Abbildung C.5: Analyse der Wärmeabgabe der Heizfläche an den Innenraum

Die Steigung der Geraden ergibt den gesuchten Parameter  $\lambda_G$ . Für Fall a liegt der Wert bei ca. 0,165 - 0,175 bzw. für Fall b bei 0,189. Die daraus ermittelbaren Wärmeübertragungskoeffizienten  $c_q = \lambda_G / 2^{4/3}$  liegen bei 0,065 - 0,069 für eine zugehörige Rayleigh-Zahl Ra = 4 · 10<sup>7</sup> bzw. bei 0,075 für Ra = 2 · 10<sup>7</sup>. Somit liegen beide Werte zwischen den ermittelten Kurven von Fitzjarrald und Goldstein & Chu (s. Abbildung 6.12). D.h. im Umkehrschluss, dass für dieses System Heizflächen- und Außentemperaturen frei gewählt werden können und mittels der Rayleigh-Zahl Ra der Wärmeübertragungskoeffizient c<sub>q</sub> bestimmt werden kann, der wiederum für die Berechnung von  $\lambda_G$  benötigt wird. Dies ermöglicht unter Verwendung der Gleichungen aus Kapitel 6.2.1 eine Prognose der Volumenströme und der zu erwartenden stationären Temperatur im Innenraum.

### Literaturverzeichnis

| [1]  | 3M <sup>™</sup> Scotchlite <sup>™</sup> Glass Bubbles, Mikro-Glashohlkugeln, |
|------|--|
|      | Produktinformation und Spezifikation, Stand 01/06/00                         |
| [2]  | Adamy, J.: Fuzzy Logik, Neuronale Netze und Evolutionäre Algorithmen,        |
|      | Institut für Automatisierungstechnik, FG Regelungstechnik,                   |
|      | TU Darmstadt   |
| [3]  | Apple Computer, QuickTime: Internetquelle: www.apple.com                     |
| [4]  | Baumann, W.W., Schatz, M., Thiele, F: Finite-Volumen-Methode in der          |
|      | Numerischen Thermofluiddynamik, Manuskript zur Vorlesung im                  |
|      | Fachgebiet Numerische Methoden der Thermofluiddynamik,                       |
|      | Fachbereich 10, 3. korrigierte Auflage, TU Berlin, 1999                      |
| [5]  | Blum, HJ., Compagno, A., Fitzner, K., Heusler, W., Hortmanns M.,             |
|      | Hosser, D., Müller, H., Nolte, C., Schwarzkopf, D., Sedlacek, G.,            |
|      | Thiel, D., Ziller, C.: Doppelfassaden, Ernst & Sohn Verlag für               |
|      | Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin, 2001                 |
| [6]  | Chung, T. J.: Computational Fluid Dynamics,                                  |
|      | Cambridge University Press, 2002   |
| [7]  | Denton, R.A., Wood, I.R.: Turbulent convection between two horizontal        |
|      | plates, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 22, pp. 1339-1346,                  |
|      | Pergamon Press Ltd., 1979  |
| [8]  | Dönigus, T.: Particle Image Velocimetry (PIV) – Auswertung eines             |
|      | Strömungsversuches, Diplomarbeit, Institut für Massivbau,                    |
|      | TU Darmstadt, 2003   |
| [9]  | Dönigus, T.: Particle Image Velocimetry (PIV) – Auswertung eines             |
|      | Strömungsversuches, Vertieferarbeit, Institut für Massivbau,                 |
|      | TU Darmstadt, 2003   |
| [10] | Elsner, N.; Dittmann, A.: Grundlagen der Technischen Thermodynamik.          |
|      | Band 1: Energielehre und Stoffverhalten, 8. Aufl.,                           |
|      | Akademie Verlag GmbH, Berlin, 1993   |

| [11] | Elsner, N., Fischer, S., Huhn, J.: Grundlagen der Technischen           |
|------|---|
|      | Thermodynamik, Band 2: Wärmeübertragung,                                |
|      | Akademie Verlag GmbH, Berlin, 1993                                      |
| [12] | Fluent Deutschland, Benutzerhandbuch zu FLUENT 6.0                      |
| [13] | Gertis, K.: Sind neuere Fassadenentwicklungen bauphysikalisch           |
|      | sinnvoll? Teil 2: Glas-Doppelfassaden (GDF),                            |
|      | Bauphysik 21, Heft 2, Ernst & Sohn, 1999                                |
| [14] | Gladstone, C., Woods, A.: On buoyancy-driven natural ventilation of a   |
|      | room with a heated floor, J. Fluid Mech., vol. 441, pp. 293-314,        |
|      | Cambridge University Press, 2001  |
| [15] | Haupt, W.: Zur Simulation von auftriebsinduzierten                      |
|      | Innenraumströmungen, Dissertation,                                      |
|      | Universität Gesamthochschule Kassel, 2001                               |
| [16] | Howell, S. A., Potts, I.: On the natural displacement ventilation flow  |
|      | through a full scale enclosure driven by a source of buoyancy at floor  |
|      | level, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, 2001     |
| [17] | Linden, P. F.: The fluid mechanics of natural ventilation,              |
|      | Ann. Rev. Fluid Mech., vol. 31, pp. 201-238, 1999                       |
| [18] | Linden, P. F., Lane-Serff, G. F., Smeed, D. A.: Emptying filling boxes: |
|      | the fluid mechanics of natural ventilation, J. Fluid Mech.,             |
|      | vol. 212, pp. 309-335, Cambridge University Press, 1990                 |
| [19] | Marple, V. A.: Aerosol Properties Calculator,                           |
|      | TSI Deutschland Incorporated, Aachen                                    |
| [20] | Meilhaus Electronic: High Performance Analog I/O Boards for             |
|      | IBM PC,PC/XT, PC/AT, PS/2 Model 25 and 30 and compatible                |
|      | Computer Systems, User Manual, Meilhaus Electronic GmbH,                |
|      | Fischerstr. 2, 82178 Puchheim   |
| [21] | Menzel, S.: Einsatz von CFD-Software zur Visualisierung von             |
|      | Luftströmungen innerhalb von Glas-Doppelfassaden,                       |
|      | 39. DafStb-Forschungskolloquium, TU Darmstadt, 2000                     |
| [22] | Menzel, S.: Development of a Software Tool considering a new            |
|      | coordinate system for the CFD-Software NAGARE,                          |
|      | Darmstadt Concrete, Vol.16, 2001  |

\_\_\_\_\_

| [23] | Menzel, S.: Adaptive Wachstumsprozesse und Evolutionäre Algorithmen     |
|------|---|
|      | zur Optimierung von Konstruktionen, Teil II: Zur Optimierung            |
|      | strömungsmechanischer Systeme unter Verwendung Evolutionärer            |
|      | Algorithmen, IuK-Technologie im Konstruktiven Ingenieurbau,             |
|      | Darmstädter Massivbau Seminar, Band 24, Darmstadt, 2003                 |
| [24] | Müller, H., Nolte, C., Pasquay, T.: Klimagerechte Fassadentechnologie   |
|      | II. Monitoring von Gebäuden mit Doppelfassaden                          |
|      | VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 4, Nr. 190, VDI Verlag,                 |
|      | Düsseldorf, 2003  |
| [25] | Nolte, C.: Zum Lüftungsverhalten von Doppelfassaden,                    |
|      | VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 4 Nr. 158, VDI Verlag, Düsseldorf, 1999 |
| [26] | Oertel jr., H., Laurien, E.: Numerische Strömungsmechanik,              |
|      | Springer-Verlag, Berlin, 1995   |
| [27] | Oesterle, E., Lieb, RD., Lutz, M., Heusler, W.:                         |
|      | Doppelschalige Fassaden,  |
|      | Verlag Georg D.W. Callwey GmbH & Co., München, 1999                     |
| [28] | Pasquay, R.: Energetisches Verhalten von Doppelfassaden – Auswertung    |
|      | von drei gemessenen Beispielen, Dissertation,                           |
|      | Universität Dortmund, 2002  |
| [29] | Pflug, C.: Zur Anwendung der CFD-Software FLUENT bei                    |
|      | Konvektionsströmungen in Glas-Doppelfassaden,                           |
|      | Vertieferarbeit, Institut für Massivbau, TU Darmstadt, 2002             |
| [30] | Pflug, C.: Particle Image Analysis Project – Auswertung eines           |
|      | Strömungsversuches, Diplomarbeit, Institut für Massivbau,               |
|      | TU Darmstadt, 2003  |
| [31] | Prandtl, L.: Strömungslehre, Friedr. Vieweg & Sohn,                     |
|      | Braunschweig, 1965  |
| [32] | Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J.: Particle Image Velocimetry -   |
|      | A Practical Guide, Springer-Verlag, Berlin, 1998                        |
| [33] | Rechenberg, I.: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der     |
|      | biologischen Evolution, Dissertation, TU Berlin, 1970                   |
| [34] | Reinisch, D.: Luftströmungssituation im Luftspalt einer doppelschaligen |
|      | Fassade, Diplomarbeit, Institut für Massivbau, TU Darmstadt, 2000       |
| [35] | Ruf, W.: Die Glas-Doppelfassade in der Baupraxis – Eine Analyse         |
|      | realisierter Projekte, Diplomarbeit, Institut für Massivbau,            |
|      | TU Darmstadt, 2003  |

| [36] | Rung, T., Xue, L., Yan, J., Schatz, M., Thiele, F.: Numerische Methoden         |
|------|---|
|      | der Thermo- und Fluiddynamik, Hermann-Föttinger-Institut für                    |
|      | Strömungsmechanik, TU Berlin, dritte überarbeitete Auflage, 2001                |
| [37] | Schlichting, H.; Gersten, K.: Grenzschicht-Theorie,                             |
|      | Springer-Verlag, 1997   |
| [38] | Schwefel, HP.: Numerische Optimierung von Computer-Modellen                     |
|      | mittels der Evolutionsstrategie, Birkhäuser Verlag,                             |
|      | Basel und Stuttgart, 1977   |
| [39] | Sun Microsystems, Inc., Internetquelle: http://java.sun.com                     |
| [40] | Tritton, D. J.: Physical Fluid Dynamics, Clarendon Press, Oxford, 1988          |
| [41] | Utecht, U.: Design neuronaler Netze mit der Evolutionsstrategie,                |
|      | Dissertation, TU Berlin, 1997   |
| [42] | Weng, W., Liao, G., Fan, W.: An improved cross-correlation method for           |
|      | (digital) particle image velocimetry, 10 <sup>th</sup> International Symposium: |
|      | Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lissabon, 2000              |
| [43] | Weber, S.; Nichelmann, N.: Kubische Spline-Interpolation                        |
|      | Internetquelle: http://www.gym-cantor.bildung-lsa.de/Facharbeiten/              |
|      | Facharbeiten2000/Weber_Nichelmann/spline2.html (Stand 04/03)                    |
| [44] | Zhengdong Chen, Yuguo Li: Flow Bifurcations of buoyancy natural                 |
|      | ventilation in a single-zone building, 8th International Conference: Air        |
|      | Distribution in Rooms, ROOMVENT 2002, Kopenhagen,                               |
|      | Dänemark, 2002  |
| [45] | Ziller, C.: Modellversuche und Berechnungen zur Optimierung der                 |
|      | natürlichen Lüftung durch Doppelfassaden, (Schriftenreihe Stahlbau,             |
|      | RWTH Aachen, Heft 44), Shaker Verlag, Aachen, 1999                              |
| [46] | Zöllner, A.: Experimentelle und theoretische Untersuchung des                   |
|      | kombinierten Wärmetransports in Doppelfassaden, Dissertation,                   |
|      | Lehrstuhl C für Thermodynamik (Kältetechnik), Fakultät für                      |
|      | Maschinenwesen, Technische Universität München, 2001                            |