

Thermisch-hygrisches Verhalten von GlasDoppelFassaden unter solarer Einwirkung

Theorieevaluierung durch Vorort-Messung

P. Kautsch, J. Dreyer, H. Hengsberger et.al.

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

36/2002

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>
oder unter:

Projektfabrik Waldhör
Nedergasse 23, 1190 Wien
Fax 01 /36 76 151 - 11
Email: projektfabrik@nextra.at

Thermisch-hygrisches Verhalten von GlasDoppelFassaden unter solarer Einwirkung

Theorieevaluierung durch Vorort-Messung

Autoren:

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. DDr. Peter Kautsch
Bundesinstitut für Sozialpädagogik, BiSOP
O. Univ.Prof. Dipl.-Ing. DDr. Jürgen Dreyer
Dipl.-Ing. Herwig Hengsberger
Dr. Robert Kouba
Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Walter Meile
Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Wolfgang Streicher

Graz, Dezember 2002

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines beauftragten Projekts aus der zweiten Ausschreibung der Programmlinie *Haus der Zukunft* im Rahmen des Impulsprogramms *Nachhaltig Wirtschaften*, welches 1999 als mehrjähriges Forschungs- und Technologieprogramm vom Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie gestartet wurde.

Die Programmlinie Haus der Zukunft intendiert, konkrete Wege für innovatives Bauen zu entwickeln und einzuleiten. Aufbauend auf der solaren Niedrigenergiebauweise und dem Passivhaus-Konzept soll eine bessere Energieeffizienz, ein verstärkter Einsatz erneuerbarer Energieträger, nachwachsender und ökologischer Rohstoffe, sowie eine stärkere Berücksichtigung von Nutzungsaspekten und Nutzerakzeptanz bei vergleichbaren Kosten zu konventionellen Bauweisen erreicht werden. Damit werden für die Planung und Realisierung von Wohn- und Bürogebäuden richtungsweisende Schritte hinsichtlich ökoeffizientem Bauen und einer nachhaltigen Wirtschaftsweise in Österreich demonstriert.

Die Qualität der erarbeiteten Ergebnisse liegt dank des überdurchschnittlichen Engagements und der übergreifenden Kooperationen der Auftragnehmer, des aktiven Einsatzes des begleitenden Schirmmanagements durch die Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik und der guten Kooperation mit dem Forschungsförderungsfonds der gewerblichen Wirtschaft bei der Projektabwicklung über unseren Erwartungen und führt bereits jetzt zu konkreten Umsetzungsstrategien von modellhaften Pilotprojekten.

Das Impulsprogramm *Nachhaltig Wirtschaften* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie auch in der Schriftenreihe "Nachhaltig Wirtschaften konkret" publiziert, aber auch elektronisch über das Internet unter der Webadresse www.hausderzukunft.at dem Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Projektleiter:

Ao.Univ.-Prof. DI DDr. **Peter Kautsch**

Technische Universität Graz
Institut für Hochbau und Industriebau
A-8010 Graz, Lessingstraße 25/3
Tel: +43-(0)316 - 873 / 6245; Fax: / 6082
Email: kautsch@tugraz.ac.at
website: www.TUGraz.at

Koordination:

Dipl.-Ing. **Herwig Hengsberger**

Tel.: +43-(0)316 -873 / 6807; Fax: / 4999
Email: hengsberger@tugraz.at

Projektpartner:

O.Univ.-Prof. DI DDr. **Jürgen Dreyer**

Technische Universität Wien
Institut für Baustofflehre, Bauphysik und
Brandschutz, Abteilung Bauphysik
A-1040 Wien, Karlsplatz 13
Tel: +43-(0)1 - 58801 / 20650; Fax: / 20698
Email: juergen.dreyer@tuwien.ac.at
website: www.bph.tuwien.ac.at

Ass.-Prof. DI Dr. **Walter Meile**

Technische Universität Graz
Institut für Strömungslehre und Wärmeübertragung
A-8010 Graz, Inffeldgasse 25/F
Tel: +43-(0)316 - 873 / 7343; Fax: / 7356
Email: meile@fluidmech.tu-graz.ac.at
website: www.isw.TUGraz.at

Ao.Univ.-Prof. DI Dr. **Wolfgang Streicher**

Technische Universität Graz
Institut für Wärmetechnik
A-8010 Graz, Inffeldgasse 25/B
Tel: +43-(0)316 - 873 / 7306; Fax: / 7305
Email: streicher@iwt.tu-graz.ac.at
website: http://wt.tu-graz.ac.at

MSB Morocutti GMBH

Stahl-, Alu-, Fassadenbau
A-8055 Graz, Puchstraße 216
Tel: +43-(0)316 - 295833 / 0; Fax: / 20
Email: mc@msb.at
website: www.msb.at

**Bundesinstitut für Sozialpädagogik
(BiSoP)**

A-2500 Baden, Elisabethstraße 14 -16
Tel: +43-(0)2252 - 48282 / 0
Fax: +43-(0)2252 - 48812
Email: direktion@bisopbaden.ac.at
website: www.bisopbaden.ac.at

Graz, Dezember 2002

Abstract

In the course of the boom in „glass architecture“, double glass facades, as they are called, have been the subject of extremely controversial international discussion for more than ten years.

In addition to aesthetic aspects, the discussion also emphasises advantages in terms of energy and, particularly, noise and ventilation related benefits. The possible disadvantages, on the other hand, include increased investment and maintenance costs, potential problems in terms of building physics and, not least, considerable uncertainties regarding planning.

The aim of this research project was to evaluate transient thermal and fluid mechanical simulation models by means of on-site measurements in order to obtain information concerning the importance of the various extremely important base parameters of these very complex models of calculation. Extensive literature research revealed that, in recent years, there has been an increasing number of international research projects focussing on this subject - a fact that underlines the significance of the current research task. And yet completely documented measuring results on real, particularly small and medium-sized facades, are few and far between.

From October 2001 to September 2002, climate and flow conditions were measured on and in the glass facade of the new Federal Institute of Social Education building completed in 1998 in Baden near Vienna and analysed as to their correlation with the results of parallel numerical simulation calculations. The analysis focussed on two extreme cases of the space between two facade layers: free, solar and wind induced flow in the undisturbed gap between the primary and the mounted glass facade and the case of complex turbulent flow conditions in the double glass surface area and around the window boxes installed between the facade layers.

It was shown that the basic version of the TRNSYS software package lends itself well to describing the thermal situation in the space between the facade layers. The findings may be taken as a base for further development of the calculation model for more complex facade structures with partially transparent outside walls (double facades).

The CFD (Computational Fluid Dynamics) calculations performed with the aid of the FLUENT software package also correlated well, in part, with the measurements, although they are more suited for scientific applications than for construction practice due to the considerable hardware requirements and duration of computing.

Kurzfassung

Im Zuge des sprunghaften Anstiegs der „Glas-Architektur“ werden seit über 10 Jahren sogenannte **GlasDoppelFassaden** (GDF) international äußerst kontroversiell diskutiert.

Abgesehen von ästhetischen Aspekten werden in der Diskussion neben energetischen insbesondere schall- und lüftungstechnische Vorteile hervorgehoben. Diesen stehen mögliche Nachteile wie erhöhte Investitions- und Erhaltungskosten, mögliche bauphysikalische Probleme und nicht zuletzt nach wie vor erhebliche Planungsunsicherheiten gegenüber.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, instationäre thermische und fluidmechanische Simulationsmodelle durch Vorort-Messungen zu evaluieren, um Aufschlüsse über die Bedeutung der einzelnen äußerst wichtigen Ausgangsparameter dieser sehr komplexen Rechenmodelle zu erhalten. Die umfangreiche Literaturrecherche hat gezeigt, dass in den letzten Jahren international verstärkt Forschungsprojekte zu diesem Thema durchgeführt werden - was die Aktualität der gegenständlichen Forschungsaufgabe unterstreicht. Dennoch sind lückenlos dokumentierte Messergebnisse an realen, insbesondere kleineren und mittleren, Fassaden selten.

Von Oktober 2001 bis September 2002 wurden die Klima- und Strömungsverhältnisse an und in der Glasfassade des 1998 fertiggestellten Neubaus des Bundesinstituts für Sozialpädagogik in Baden bei Wien messtechnisch erfasst und auf ihre Korrelation mit den Ergebnissen der parallel durchgeführten numerischen Simulationsberechnungen untersucht. Dabei wurden zwei Extremfälle eines Fassadenzwischenraumes betrachtet: die freie, solar- und windinduzierte Strömung in dem ungestörten Spalt zwischen Primär- und vorgehängter Glasfassade und der Fall der komplex turbulenten Strömungsverhältnisse im Bereich der doppelten Glasflächen bzw. der im Fassadenzwischenraum eingebauten Fensterkästen.

Es konnte gezeigt werden, dass das Programmpaket TRYNSYS in seiner Basisversion gut geeignet ist, die thermische Situation im Fassadenzwischenraum zu beschreiben. Die gewonnenen Erkenntnisse können als Grundlage für die Weiterentwicklung des Rechenmodells für komplexere Fassadenkonstruktionen mit teiltransparenten Außenwänden (Doppelfassaden) herangezogen werden.

Die mit dem Programmpaket FLUENT durchgeführten CFD (Computational Fluid Dynamics) Berechnungen haben zum Teil ebenfalls gute Übereinstimmungen mit den Messergebnissen ergeben, empfehlen sich allerdings aufgrund des erheblichen Hardware- und Rechenzeitbedarfs eher für wissenschaftliche Anwendungen als für den baupraktischen Einsatz.

Teil A

Motivation

Da in Zukunft mit einem weiteren Anstieg der sogenannten „Glas-Architektur“ zu rechnen ist, nach wie vor Planungsunsicherheiten bei der Auslegung von GlasDoppelFassaden bestehen und messtechnische Untersuchungen selten sind, war es Motivation dieser Forschungsarbeit, auf diesem Gebiet einen österreichischen Beitrag zu der, hauptsächlich im europäischen Ausland geführten, Diskussion über GlasDoppelFassaden zu leisten.

Besondere Bedeutung kam dabei der interdisziplinären und interuniversitären Zusammenarbeit sowie der Kooperation mit dem ausführenden Gewerbe zu.

In Baden bei Wien wurde 1998 der von den Architekten Florian Riegler/Roger Riewe geplante Neubau des Bundesinstituts für Sozialpädagogik fertiggestellt. Das Gebäude ist mit einer allseitigen Glasfassade ausgestattet und bot die Möglichkeit, zwei Extremfälle eines Fassadenzwischenraumes zu untersuchen: die freie, solar- und windinduzierte Strömung in dem ungestörten Spalt zwischen Beton- und Glasfassade und den Fall der komplex turbulenten Strömungsverhältnisse im Bereich der doppelten Glasflächen bzw. der Fensterkästen. Zudem war das Objekt für die Projektbeteiligten relativ leicht erreichbar und zugänglich, da seitens des Gebäudenutzers großes Interesse an der Einbindung in das Projekt bestand.

Inhalt

- Teil 1** gibt anhand der internationalen Grundlagenrecherche einen Überblick über die verschiedenen Varianten von GlasDoppelFassaden und den derzeitigen Kenntnisstand.
- Teil 2** erläutert die Grundlagen und Ergebnisse der thermischen Simulationsberechnungen.
- Teil 3** stellt die Randbedingungen und die Ergebnisse der fluidmechanischen Simulationsberechnungen dar.
- Teil 4** beschreibt erste Sondierungsmessungen.
- Teil 5** erläutert die Messaufgabe und stellt die Ergebnisse dar.
- Teil 6** fasst die Ergebnisse der einzelnen Abschnitte zusammen und bietet einen Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

Zielsetzung

Unter dem Gesichtspunkt einer umfassenden Bewertung von GlasDoppelFassaden war es Ziel dieses Forschungsprojektes, thermische und strömungstechnische Simulationsberechnungen (**Computational Fluid Dynamics - CFD**) durch Langzeit-Messungen über den Zeitraum von vorerst einem Jahr an einem realisierten Gebäude zu evaluieren. Nur so können die überaus wichtigen Ausgangsparameter der oftmals sehr komplexen Berechnungsmodelle realistisch beurteilt und gewählt werden.

Schließlich sollten in einem Folgeprojekt die numerischen Simulationsmodelle soweit adaptiert werden, dass Planern und Ausführenden ein leicht anzuwendendes Werkzeug zur Abschätzung der komplexen Vorgänge in derartigen Fassaden in die Hand gegeben werden kann.

Weiters sollten die Ergebnisse dieses Forschungsprogrammes dazu beitragen, fundiertere Aussagen hinsichtlich der vielfach diskutierten möglichen Energieeinsparung durch GlasDoppelFassaden treffen zu können. GlasDoppelFassaden stellen ein äußerst komplexes und vielschichtiges Forschungsgebiet dar, welches genau genommen nur im Zusammenwirken mit dem dahinterliegenden Gebäude betrachtet werden kann. Um den finanziellen Rahmen des gegenständlichen Projektes nicht zu sprengen, wurde das Forschungsziel jedoch auf die Untersuchung der temperatur- und windbedingten Strömungsverhältnisse im Fassadenzwischenraum unter realen Außenklimabedingungen und deren Korrelation mit thermischen und strömungsmechanischen Simulationsberechnungen beschränkt.

Die ebenfalls sehr interessanten Forschungsgebiete Wärme-, Schall- und Brandschutz sowie Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von GlasDoppelFassaden mussten zukünftigen Forschungsprojekten vorbehalten bleiben.

Methodik

- Analyse der aerophysikalischen und thermodynamischen Phänomene im Fassadenzwischenraum anhand eines signifikanten Jahresklimadatensatzes mittels thermischen und fluidmechanischer Simulationsberechnungen.
- Auslegung der Sensorik und Entwicklung eines Programms zur Aufzeichnung, Verarbeitung und Fernabfrage der Messdaten.
- Vor-Ort-Langzeitmessung eines über die gesamte Fassadenhöhe ungestörten Luftspaltes (Messfall „Wand“) sowie eines Segmentes mit eingebauten Fensterkästen (Messfall „Fenster“). Dabei wurden jeweils die Temperaturverteilung als Höhen- und Tiefenprofil, die Solarstrahlung, die Strömungsgeschwindigkeiten, die relativen Luftfeuchtigkeit, die Bauteiloberflächentemperaturen im Fassadenzwischenraum über jeweils ca. drei Wochen im Winter, im Frühjahr und im Sommer ermittelt.
- Parallele thermische Simulationsberechnungen unter Verwendung des Programmpaketes TRNSYS auf Basis der vor Ort gemessenen Klimadaten.

- Parallele strömungsmechanische Simulationsberechnungen mittels des Programmpaketes FLUENT auf Basis der thermischen Simulationsberechnungen und der vor Ort gewonnenen Messdaten.
- Untersuchung der Korrelation zwischen Messungen und Simulationsberechnungen sowie Adaptierung der Rechenmodelle.
- Zusammenfassung und Interpretation der Endergebnisse. Feststellen des weiteren Forschungsbedarfs.
- Diskussion der Ergebnisse in Fachkreisen anlässlich eines Workshops mit Planern und Fassadenbauunternehmen sowie in der Fachliteratur.

Verwendete Daten

- Internationale Literaturrecherche
- Programmpaket TRNSYS
- Programmpaket FLUENT
- Online übertragene Messdaten aus dem Fassadenzwischenraum und von der Klimastation auf dem Dach des Gebäudes bzw. zur Vorsimulation Klimadatensatz Graz 1968

TEIL B

Ergebnisse

Die umfangreiche internationale Literaturrecherche hat unter anderem das Ergebnis gebracht: GlasDoppel Fassaden sind nicht neu!

Bereits 1903 wurde die Steiff-Fabrik in Giengen/Brenz als eines der ersten Gebäude mit einer doppelschaligen Glaspufferfassade ausgestattet.

Zum anderen wurden durch die Recherche - neben einer zum Teil unglaublichen Polarisierung zwischen Befürwortern und Gegnern - weit verbreitete Planungsunsicherheiten bei der Auslegung von GlasDoppel Fassaden festgestellt.

Dies hat dazu geführt, dass die geometrische Gestaltung von GDF bisher eher nach ästhetischem Empfinden und nicht nach akustischen, strömungsmechanischen oder energetischen Gesichtspunkten erfolgte, was wiederum häufiges Nichterfüllen der in die GDF gesetzten Erwartungen bzw. oftmals drastische Mehrkosten gegenüber einschaligen Fassaden zur Folge hatte.

Zugleich wurde aber auch deutlich, dass bei sorgfältiger Planung und individueller Abstimmung der GDF auf die örtlichen Gegebenheiten durchaus funktionierende und zudem wirtschaftliche Lösungen gefunden werden können. In manchen Fällen sind GlasDoppel Fassaden sogar die einzige Möglichkeit, Gebäude in bestimmten Lagen zu realisieren.

Um die tatsächlichen Verhältnisse in der Konstruktion festzustellen und eine Überprüfung der Simulationsberechnungen zu ermöglichen, wurden von Oktober 2001 bis September 2002 jeweils für den Messfall „Wand“ und „Fenster“ getrennt umfangreiche Messungen der Oberflächen- und der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Strömungsgeschwindigkeit im Fassadenzwischenraum, der auf die Fassade auftreffenden sowie der in den Fassadenzwischenraum durchgelassenen bzw. reflektierten Strahlung, des Wärmestroms vom Fassadenzwischenraum in das Gebäudeinnere, des Differenzdruckes zwischen Fassadenzwischen- und Außenbereich sowie des Außenklimas durchgeführt.

Es konnte gezeigt werden, dass die thermischen Simulationsberechnungen bereits bei Verwendung relativ einfacher Wärmetauschermodelle durchaus für baupraktische Anwendungsfälle ausreichend genaue Beschreibungen der energetischen Zustände im Fassadenzwischenraum liefern können und somit gut zur Abschätzung des energetischen Verhaltens von Glasfassaden geeignet sind. Die gewonnen Erkenntnisse können als Grundlage für die Weiterentwicklung der Rechenmodelle für komplexere Fassadenkonstruktionen mit teiltransparenten Außenwänden (Doppelfassaden) herangezogen werden.

Bei vergleichbaren konstruktiven und thermischen Voraussetzungen (unsegmentierte Vorhangfassade, geringer Luftaustausch zwischen Fassadenspalt und dahinterliegenden Räumlichkeit über Fensterlüftung, etc.) ist zu erwarten, dass ein entsprechend erweitertes Simulationsmodell eine ähnlich gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation liefern kann, wie sie in dieser Arbeit erzielt wurde.

Die fluidmechanischen Berechnungen (CFD) wurden mittels des Programmpaketes FLUENT, einem der modernsten Programme zur Simulation von Strömungs- und Wärmeübertragungsvorgängen in komplexen Geometrien, durchgeführt und zeigten sowohl mit den thermischen Simulationsberechnungen als auch mit den Vorort-Messungen hinsichtlich Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturen - bis auf wenige Ausnahmen - sehr gute Übereinstimmungen.

Weiters konnte bestätigt werden, dass insbesondere bei geöffneten Lüftungsklappen aber auch infolge der Undichtigkeiten im geschlossenen Zustand die Windbelastungen die Strömungssituation im Fassadenspalt gravierend beeinflussen. Dieser Umstand gewinnt mit zunehmender Gebäudehöhe bzw. bei Gebäuden in exponierten Lagen infolge der höheren Windgeschwindigkeiten noch an Bedeutung.

Im Hinblick auf praktische Berechnungen zur Auslegung von Doppelfassaden kann festgestellt werden, dass fluidmechanische Simulationen in der hier angewandten Form aufgrund des enormen Bedarfes an Ressourcen (Hardware, Rechenzeit) eher nicht geeignet erscheinen, zur wissenschaftlichen Aufarbeitung spezieller Fragestellungen aber mit guter Aussagekraft eingesetzt werden können.

Schlussfolgerungen - weitere Vorgangsweise

Die Realisierung von Glasdoppelfassaden ist bis dato noch mit beträchtlichen planerischen Unsicherheiten und großem Aufwand verbunden, was - insbesondere bei kleineren Gebäuden - oftmals die wirtschaftlich vertretbaren Grenzen übersteigt. Gerade kleinere und mittlere Gebäude sind aber, da viel häufiger als Großprojekte, besonders geeignet, GlasDoppelFassaden - und ihren Vorteilen - zu breiterer Akzeptanz zu verhelfen.

Für diese eher kleineren Bauvorhaben erscheint es sinnvoll, einfache, gegebenenfalls unsegmentierte DoppelFassaden - wie etwa jene in Baden bei Wien - vorzusehen, da deren energetisches Verhalten, wie die thermischen Berechnungen gezeigt haben, mit relativ einfachen und schnellen Rechenmodellen abschätzbar ist. Die Untersuchungen haben allerdings auch den wesentlichen Einfluss konstruktiver Details wie etwa der Ausbildung der Zu- und Abluftklappen oder der physikalischen Eigenschaften der Begrenzungsflächen (zB Glasdurchlässigkeit bzw. Absorbtionskoeffizient) des Fassadenzwischenraumes bestätigt.

Wenn nicht zu große Außenlärmbelastung der Grund für doppelschalige Konstruktionen ist, bieten „Fensterkästen“, durch die eine Raumbelüftung unter Überbrückung des Fassadenzwischenraumes erfolgen kann, eine gute Möglichkeit, die Nachteile klassischer unsegmentierter Doppelfassaden wie Kondensatbildung im oder Schall- und Brandrauchübertragung über den Fassadenzwischenraum zu vermeiden.

Fluidmechanische Berechnungsverfahren werden infolge ihres erheblichen Ressourcenbedarfs zumindest bei kleineren Bauvorhaben eher der Bearbeitung wissenschaftlicher Fragestellungen als der baupraktischen Anwendung vorbehalten bleiben.

Weiterer Forschungsbedarf besteht jedenfalls im Hinblick auf die Untersuchung der tatsächlichen Energiebilanzen sowie der Interaktion von GlasDoppelFassaden mit dem dahinterliegenden Gebäude unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens.

Ein lohnendes Forschungsgebiet würde auch die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Typen von GlasDoppelFassaden darstellen, wobei die monetäre Bewertung schwer quantifizierbarer Phänomene wie etwa eine mögliche höhere Arbeitsleistung der Nutzer von hohen Bürogebäuden infolge der Möglichkeit natürlicher Fensterlüftung spannende Ergebnisse bringen kann.

1.	Ausgangssituation	21
1.1.	Einleitung	21
1.2.	Geschichte	24
1.3.	Aktuelle Diskussionsgrundlage	28
1.3.1.	Typologie	28
1.3.2.	Vor- und Nachteile von GlasDoppelFassaden	34
1.4.	Die Messfassade	38
2.	Thermische Simulation	43
2.1.	Aufgabenstellung	43
2.2.	Methode	43
2.3.	Randbedingungen	48
2.4.	Ergebnisse Phase 1 / Abschätzung	53
2.4.1.	Sommerfall, Klappen offen	54
2.4.2.	Winterfall, Klappen geschlossen	56
2.5.	Ergebnisse Phase 2 / Simulation	57
2.5.1.	Messfall 1	58
2.5.2.	Messfall 2	61
2.5.3.	Messfall 3	64
2.5.4.	Messfall 4	67
2.6.	Zusammenfassung und Ausblick	70
3.	Strömungssimulation	73
3.1.	Einleitung	73
3.2.	Durchführung	74
3.3.	Simulationsabschnitte	74
3.4.	Kurzbeschreibung des Simulationsprogramms	74
3.5.	Gittererstellung	75
3.5.1.	Abschnitt „Wand“	75
3.5.2.	Abschnitt „Fenster“	77
3.6.	Simulationsparameter; Rand- und Anfangsbedingungen	78
3.7.	Phase 1 / Abschätzung	79
3.7.1.	Sommerfall 1, Abschnitt „Wand“	80
3.7.2.	Sommerfall 2, Abschnitt „Wand“	84
3.7.3.	Winterfall 2, Abschnitt „Wand“	88
3.7.4.	Sommerfall 2, Abschnitt „Fenster“	92
3.8.	Phase 2 / Vorsimulation	93
3.8.1.	Ergebnisse 04.01.2002	95
3.8.2.	Ergebnisse 10.01.2002	96
3.8.3.	Vergleich der Ergebnisse	98
3.9.	Phase 3 / Simulation	100
3.9.1.	Messfall „Fenster - Winter 1“	101
3.9.2.	Messfall „Fenster - Winter 2“	104
3.9.3.	Messfall „Fenster - Frühjahr 1“	107
3.9.4.	Messfall „Fenster - Frühjahr 2“	110

3.9.5.	Messfall „Fenster - Frühjahr 3“	113
3.9.6.	Messfall „Fenster - Frühjahr 4“	116
3.9.7.	Messfall „Fenster - Sommer“	118
3.9.8.	Messfall „Wand - Sommer 1“	119
3.9.9.	Messfall „Wand - Sommer 2“	122
3.10.	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	125
4.	Sondierungsmessungen	127
5.	Vorort- Messungen	129
5.1.	Messbereiche	129
5.2.	Einbau der Sensoren	130
5.3.	Zeitplan und Klappenstellung	130
5.4.	Messpositionen	131
5.4.1.	Messung „ortsfest“	132
5.4.2.	Messung „Wand - Klappen geschlossen“	132
5.4.3.	Messung „Fenster - Klappen geschlossen“	136
5.4.4.	Messung „Fenster - Klappen offen“	136
5.4.5.	Messung „Wand - Klappen offen“	137
5.5.	Messergebnisse	138
5.5.1.	Messung „Wand - Klappen geschlossen“	138
5.5.2.	Messung „Wand - Klappen offen“	139
5.5.3.	Messung „Fenster - Klappen geschlossen“	140
5.5.4.	Messung „Fenster - Klappen offen“	141
5.6.	Interpretation der Messergebnisse	142
5.6.1.	Messfälle Wand	142
5.6.2.	Messfälle Fenster	142
6.	Zusammenfassung	143
7.	Abbildungsverzeichnis	151
8.	Verwendete und weiterführende Literatur	159

Anhang

1.	Glas	A1
2.	Aerophysik	A3
3.	Messanlage	A7
4.	Beschreibung des Messprogrammes	A22

Verwendete Bezeichnungen

a	[m ² /s]	Temperaturleitfähigkeit
α	[W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_{a,konv}$	[W/m ² K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient Glas-Aussenraum (Teil von R_1)
α_{2a}	[W/m ² K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient Glas-Fassadenspalt (zu R_2)
α_{2b}	[W/m ² K]	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient Wand-Fassadenspalt
B	[m]	Fassadenbreite
C_4	[kJ/m ³ K]	Wärmekapazität Betonwand (zu R_4)
D	[m]	Abstand Glasscheibe-Aussenwand
ε_w	[-]	Emissionskoeffizient Normalbeton
ε_g	[-]	Emissionskoeffizient Glasscheibe
g	[m/s ²]	Gravitationskonstante
G_{tot}	[W/m ²]	solare Einstrahlung (diffus + direkt)
G_{refl}	[W/m ²]	reflektierte Solarstrahlung
G_{abs}	[W/m ²]	an der Betonwand absorbierte Solarstrahlung
Gr	[-]	Grashofzahl
H	[m]	Fassadenhöhe
Nu	[-]	Nusseltzahl
λ	[W/(mK)]	Wärmeleitfähigkeit
ν	[kg/(ms)]	Viskosität
Pr	[-]	Prantlzahl
Re	[-]	Reynoldszahl
R_1	[m ² K/W]	Wärmedurchlasswiderstand (Glas) + Wärmeübergangswiderstand Glas-Aussenraum
R_2	[m ² K/W]	konvektiver Wärmeübergangswiderstand Fassadeninneraum
R_3	[m ² K/W]	Wärmeübergangswiderstand (Strahlung - langwellig) Betonwand-Glasscheibe
R_4	[m ² K/W]	Wärmedurchlasswiderstand Betonwand
R_5	[m ² K/W]	Wärmedurchlasswiderstand Dämmung + Wärmeübergangswiderstand Dämmung-Innenraum
R_{st}	[m ² K/W]	Hilfswiderstand zur Bestimmung des von der Fassadenluft transportierten Wärmestroms
σ	[W/m ² K ⁴]	Stefan-Boltzmann Konstante
T_a	[°C]	Aussenlufttemperatur
T_{atm}	[°C]	Himmelstemperatur
T_m	[°C]	mittlere Fassadenlufttemperatur
T_w	[°C]	Wandtemperatur (fassadenseitig)
T_g	[°C]	Glastemperatur
T_{aus}	[°C]	Austrittstemperatur der Fassadenluft
v	[m/s]	mittlere Auftriebsgeschwindigkeit

1. Ausgangssituation

1.1. Einleitung

Obwohl bereits Anfang des 20. Jahrhunderts einzelne Gebäude, seit den 60er Jahren etwas häufiger und ab den 80er Jahren verstärkt doppelschalige Glasfassaden errichtet wurden, beschäftigt sich die internationale Fachliteratur erst seit etwa 1990 intensiv mit diesen, nunmehr „GlasDoppelFassaden“ genannten, Konstruktionen.

Der Schwerpunkt der Veröffentlichungen liegt abgesehen von wenigen Ausnahmen zB [Hauser, 1989] bis Mitte der neunziger Jahre in gestalterischen und ästhetischen Belangen. Dabei werden - verbunden mit Bestrebungen zur Ökologisierung des Bauwesens - Begriffe wie „Synergie-, High-Tech- oder intelligente Fassade“, „Twin face“ und „Kristallhaut mit Firmament-Reflektor“ verwendet.

Ab 1996 häufen sich kritische Stimmen, welche bauphysikalische Nachteile, nicht vorhersehbare energetische Auswirkungen sowie erhöhte Investitions- und Betriebskosten betonen.

Ein wesentlicher Grund für die zum Teil nicht unberechtigte Kritik ist der Umstand, dass die geometrische Gestaltung der Fassaden meist nicht nach strömungsmechanischen, akustischen oder energetischen Gesichtspunkten vorgenommen wird, sondern oftmals primär vom ästhetischen Empfinden bestimmt ist.

In Deutschland werden nach [Zöllner] seit einigen Jahren rund die Hälfte aller großen Büro- und Verwaltungsgebäude ($H > 100$ m) sowie eine Vielzahl kleinerer Gebäude in doppelschaliger Bauweise ausgeführt. Durch die wachsende Verkehrslärmbelastung und die zunehmende Ausnutzung von Baulandrestflächen ist in Zukunft - parallel zum Ansteigen der „Glasarchitektur“ insgesamt - mit einem vermehrten Einsatz von GlasDoppelFassaden zu rechnen, welche diese extremen Lagen nicht nur erst bebaubar machen, sondern, wie [Oesterle et al., CCI 1997] anhand des Düsseldorfer Stadttoures gezeigt haben, sogar wirtschaftlich sein können.

Speziell hohe „Häuser der Zukunft“ werden also zum Teil Häuser mit GlasDoppelFassaden sein. Motivation des gegenständlichen Forschungsvorhabens war es daher, einen österreichischen Beitrag zu der hauptsächlich im europäischen Ausland - oftmals äußerst kontroversiell - geführten Diskussion über die Effizienz derartiger Konstruktionen zu leisten.

Die umfangreiche Literaturrecherche hat gezeigt, dass in jüngster Zeit ähnlich gelagerte Forschungsprojekte in München/Deutschland [Zöllner], Stoop/Österreich [Kockert], Stuttgart/Deutschland [Fux], Essen/Deutschland [Müller], Helsinki/Finnland [Tenhunen] und in Lausanne/Schweiz [Faist]/[Neubert] durchgeführt wurden bzw. werden, was einerseits die Aktualität des gegenständlichen Projektes unterstreicht, andererseits den aktuellen Forschungsbedarf, insbesondere in bezug auf Vorort-Messungen an kleinen bis mittleren Fassaden aufzeigt.

Den Schwerpunkt der gegenständlichen Forschungsarbeit bilden die messtechnische Erfassung der kombinierten Wärmetransportmechanismen im Fassadenzwischenraum und die Untersuchung der Korrelation zwischen den Messergebnissen und den thermischen und fluidmechanischen Simulationsberechnungen. Insbesondere die CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) können - durch Vorort-Messungen validiert - wertvolle Aufschlüsse über die komplexen strömungstechnischen Vorgänge im Fassadenzwischenraum liefern.

Dadurch kann ein Beitrag zur besseren Einschätzung der Auswirkungen bestimmter Fassadenkonstruktionen auf das energetische Verhalten der Gebäudehülle geleistet werden und Ansatzpunkte zur Weiterentwicklung zukünftiger Simulationsmodelle im Hinblick auf komplexere Fassadenstrukturen aufgezeigt werden.

Untersuchungen zur Gesamtenergiebilanz des Gebäudes mussten vorerst ebenso ausgeklammert werden wie die Klärung brand- und schallschutztechnischer Fragen. Diese bleiben einem eventuellen Nachfolgeprojekt vorbehalten.

Im Folgenden sollen die prinzipielle Funktionsweise von GlasDoppelFassaden und - nach einem Überblick über die vielfältigen Ausführungsvarianten - deren Vor- und Nachteile erläutert werden.

Zielsetzungen

Die Auswirkungen von Umwelteinflüssen auf die Situation im Gebäudeinneren können durch die Anordnung von Pufferzonen rings um ein Gebäude gedämpft werden. Tages- und jahreszeitlich wechselnde Klimaverhältnisse sollen die Behaglichkeit in den Räumen nur unwesentlich beeinflussen.

Ziel ist die Schaffung einer Gebäudehülle, die möglichst autonom auf geänderte Umgebungsbedingungen reagieren kann. Die gezielte Änderung bauphysikalischer Eigenschaften soll zu einer Senkung des Primärenergieverbrauchs beitragen. Doppelschalige Fassaden könnten ein Weg zu diesem Ziel sein. Eine intensive Interaktion zwischen Fassade und Gebäudetechnik ist die Voraussetzung dafür.

Grundlegender Aufbau

Doppelschalige Fassaden bestehen grundsätzlich aus der Innenfassade (Primärfassade), dem Fassadenzwischenraum und der Außenfassade (Sekundärfassade). Der bis dato meist unter Ausnutzung des thermischen Auftriebs entlüftete Fassadenzwischenraum kann sehr unterschiedlich gestaltet sein. Die Konstruktionstypen reichen vom wenige Zentimeter tiefen Luftspalt über begehbare Zwischenräume bis hin zu wintergartenähnlichen Aufenthaltsräumen. Der minimal erforderliche Platzbedarf für Wartungsarbeiten einerseits und wirtschaftliche Faktoren andererseits schränken diese Vielfalt jedoch meist auf Spalttiefen von 50 - 100 cm ein.

Bei GlasDoppelFassaden besteht die Primärfassade in der Regel aus einer Zweischeibenisolierverglasung und die Sekundärfassade aus Einscheibensicherheitsglas.

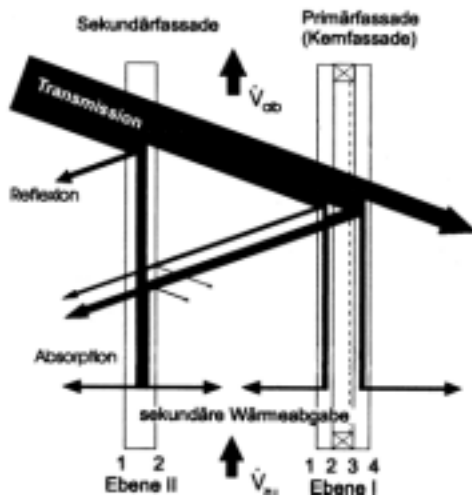


Abb. 1 Strahlungsbilanz einer zweischaligen Glasfassade [Zöllner]

Der Gesamtenergiedurchgang durch die Fassade (g-Wert) wird durch wiederholte Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsvorgänge an Außenfassade, Innenfassade und, falls aktiv, an Abschattungseinrichtungen beeinflusst.

Er setzt sich zusammen aus dem direkt durchgelassenen Strahlungsanteil (Transmissionsgrad bei senkrechtem Einfall τ_e) und der sekundären Wärmeabgabe q_i der Verglasung nach innen infolge Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion.

Der vom beweglichen Sonnenschutz und von den Glasscheiben der Innen- bzw. Primärfassade absorbierte Strahlungsanteil wird in Form langwelliger Wärmestrahlung an den Fassadenzwischenraum abgegeben - eine Erwärmung des Luftvolumens bzw. des Luftspaltes ist die Folge.

Die dynamisch veränderlichen Luftströme im Fassadenzwischenraum, welche eine Folge geänderter Wärmeströme und Temperaturunterschiede sind, können mit Simulationsprogrammen genauer beschrieben werden.

[Zöllner] hat gezeigt, dass das Rechenmodell der nicht zuletzt aufgrund des Windeinflusses hochgradig turbulenten Strömungszustände einerseits von der Tiefe des Fassadenzwischenraumes abhängt - andererseits auch von dem Umstand, ob die angrenzenden Räume gekühlt werden oder nicht.

Zusätzlich spielt der Abstand des Sonnenschutzes von der Glasfassade eine wesentliche Rolle.

Einsatzmöglichkeiten

Bei konventionellen Fassaden ist das Öffnen von Fenstern in Gebäuden größerer Höhe aufgrund der Witterungsverhältnisse oft nicht möglich. Hohe Windgeschwindigkeiten erzeugen Druckdifferenzen am Gebäude, die zu starken Zugscheinungen im Gebäude führen können. Eine zweite Außenschale kann den Einfluss der Windkräfte maßgeblich mindern, sodass über weite Teile des Jahres natürliche Fensterlüftung möglich wird [zB Nolte, Pasquay, Thiel].

Im Fassadenzwischenraum können Sonnenschutz- und Lichtlenkungseinrichtungen vor Witterungseinflüssen geschützt installiert werden - ein Umstand der insbesondere bei hohen Häusern von Bedeutung ist und kostengünstigere Konstruktionen sowie längere Wartungsintervalle ermöglicht.

In der kalten Jahreszeit sind durch die doppelschalige Bauweise prinzipiell Heizenergieeinsparungen möglich.

Bei Gebäuden, die hohen Außenlärmbelastungen ausgesetzt sind und bei denen auf eine Vollklimatisierung verzichtet werden soll, kann mit Hilfe doppelschaliger Fassadenkonstruktionen ein höherer Schallschutz bei gleichzeitiger Möglichkeit natürlicher Fensterlüftung erreicht werden, als dies mit konventionellen Lochfassaden möglich wäre. Allerdings sind im Sommer in der Regel nicht so komfortable Raumtemperaturen wie bei einer Vollklimatisierung erzielbar.

Für Bauwerke mit schützenswerten Fassaden, an denen keine außenseitige Wärmedämmung angebracht werden darf, ist der Einsatz einer transparenten, vorgesetzten Schale neben ihrer Funktion als Witterungsschutz eine Möglichkeit den Heizenergiebedarf zu senken. Die bestehenden, meist massiven Außenmauern und der begrenzte Fensterflächenanteil der Primärfassade schützen dabei vor Überhitzung. Derartige Sanierungsmaßnahmen können - im Gegensatz zu Innendämmmaßnahmen - ohne Beeinträchtigung des laufenden Betriebes des Gebäudes durchgeführt werden.

24

1.2. Geschichte [Compagno, 1999]

GlasDoppelFassaden nutzen das Prinzip der Mehrschaligkeit zur Verbesserung des thermischen Komforts der angrenzenden Räume ebenso wie ihr wohl ältester Vorläufer, das Kastenfenster, welches in Mitteleuropa etwa ab dem Beginn des 18. Jahrhunderts insbesondere in den Städten eine rasante Verbreitung erfuhr [Neubert, Teil 1]. Nach [Müller, R] schätzt man allein in Deutschland den Bestand auf 100 Millionen Fenster (Stand 1996). Durch die Anordnung einer zusätzlichen Glasscheibe vor die ursprüngliche Einfachverglasung erreichte man eine Verbesserung des U-Wertes von $U_g = 5 - 6 \text{ W/m}^2\text{K}$ auf $U_g \sim 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.



Abb. 2 Kastenfenster in der Grazer Altstadt. Die äußeren Scheiben können im Sommer durch Holzläden ersetzt werden. Zwischen den beiden Glasebenen können nachträglich Sonnenschutzeinrichtungen eingebaut werden [Foto: Hengsberger]

Ausgehend vom Gewächshausbau des 19. Jahrhunderts ergaben sich durch die Einführung des Skelettbau, bei dem die Außenwand keine tragende, sondern nur mehr begrenzende Hüllfunktion übernimmt, für die Architekten zu Beginn des 20. Jahrhunderts neue Möglichkeiten der Gestaltung. Einige der ersten „Auflösungen“ der bisher massiven Außenwandausbildungen sind nach [Oesterle et al., Callwey 1999]:

- Warenhaus Hermann Tietz („Hertie“) in Berlin; Sehring und Lachenmann, 1898
- AEG-Turbinenhalle in Berlin; Peter Behrens, 1908 - 1909
- Fagus-Werke in Alfeld, Leine; Gropius, Feyer, 1911 - 1916

Nach [Oesterle et al., Callwey 1999] gilt das Hallidie Building in San Francisco von W. I. Polk aus dem Jahre 1918 als erstes Gebäude mit einer Vorhang-Fassade, während nach [Neubert, Teil 1] bereits um 1903 (!) die Fassade der Steiff-Fabrik in Giengen an der Brenz bei Ulm/Deutschland als Glas-Pufferfassade ausgeführt wurde.

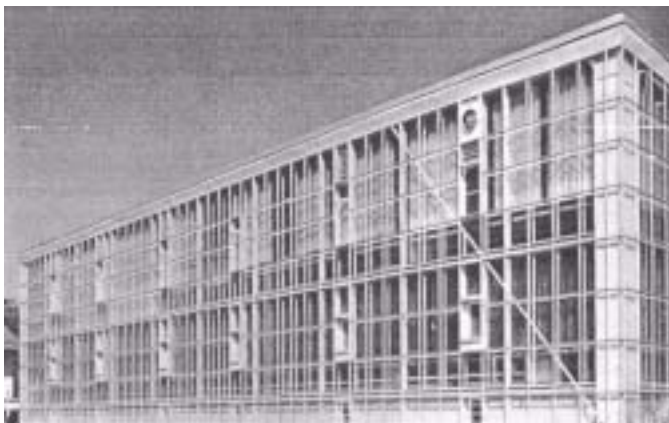


Abb. 3 Glaspufferfassade der Steiff Fabrik in Giengen an der Brenz, 1903 [Neubert]

Unterstützt wurde diese Entwicklung durch die Erfindung des Glas-Ziehverfahrens von Emile Fourcault (1904) und Irwin W. Colburn (1905), welches das aufwendige Gießverfahren ablöste und die industrielle Produktion großer Mengen Glas ermöglichte.

Die Idee der Wandauflösung und des Einbaues geschosshoher Glasscheiben wurde von Le Corbusier, Mies van der Rohe und Walter Gropius in den darauffolgenden Jahren fortgeführt. Das Konstruktionsprinzip der Vorhangfassade wurde dabei auch auf Hochhäuser angewandt. Ein Beispiel ist das Lever House in New York Skidmore von Owings and Merrill aus dem Jahre 1952.



Abb. 4 Lever House, New York, 1952 [Oesterle et. al., 1999]

26

Dieses formale Erscheinungsbild wird, unter Einsatz moderner Profilkonstruktionen und fortschrittlicher Verglasungstechniken, auch heute noch vielfach in der modernen Architektur bei ein- und doppelschaligen Fassadenkonstruktionen erzielt.

Bald traten jedoch die Nachteile dieser "Glasarchitektur" zutage: Überhitzung und Wärmeschutz. Zu deren Beseitigung schlug Le Corbusier bereits 1929 zwei Gegenmaßnahmen vor: "la respiration exacte" ("ein genau reguliertes mechanisches Be- und Entlüftungssystem") und "le mur neutralisant":

"... neutralisierende Mauern sind aus Glas, aus Stein oder beiden Materialien (gemischt) gebaut. Sie bestehen aus zwei Membranen, die einen Zwischenraum von einigen Zentimetern haben. Durch diesen Membranzwischenraum, der das Haus umgibt, leitet man in Moskau Heißluft, in Dakar Kaltluft. Ergebnis: Auf diese Weise erreicht man, dass die Innenwand (die Innenmembran) ständig eine Temperatur von 18 ° behält. Das Haus ist hermetisch abgedichtet! Kein Staub wird künftig mehr eindringen. Keine Fliegen, keine Schnaken werden hereinkommen. Und kein Lärm!" (aus: Le Corbusier: 1929. Feststellungen zu Architektur und Städtebau. Wiesbaden, 1964, S. 70 ff.)

Ende der 50er Jahre wurden auf der Basis des Kastenfensters sogenannte Verbundfenster entwickelt, welche - bei etwas schlechterem Wärmeschutz - die Mehrschaligkeit des Kastenfensters mit der einfachen Handhabung des Einfachfensters verbanden und zum Teil bereits Sonnenschutzeinrichtungen im Scheibenzwischenraum integriert hatten.

Ebenfalls Ende der 50er Jahre ermöglichte das von Alastair Pilkington entwickelte Floatverfahren die Produktion von noch mehr Glas zu noch niedrigerem Preis. Etwa zur selben Zeit wurde allerdings auch die Kritik an der Energieverschwendung durch vollflächige Glashüllen unüberhörbar und fand ihren Höhepunkt in der Energiekrise der Jahre 1973/74.

In den 60er Jahren wurden vereinzelt weitere „Zweite Haut“-Fassaden realisiert, wie die Bibliothek der Geisteswissenschaftlichen Fakultät der Universität Cambridge, England 1964 - 68 von James Sterling.

Schließlich wurden die Kasten- und Verbundfenster in den 70er Jahren von den neu entwickelten Isolierglasscheiben verdrängt. Der 1981 erschienene Artikel des englischen Architekten Mike Davis „Eine Wand für alle Jahreszeiten“, in dem er unter Verwendung selbstregelnder „High-Tech-Schichten“ eine Wand konstruierte, die sich selbständig unterschiedlichen Witterungseinflüssen anpasst, führte in weiterer Folge zum Begriff der „intelligenten“ Fassade, von dem man nach [Compagno] dann sprechen könnte, wenn es eine Interaktion zwischen Umwelt, Fassade und Gebäudetechnik gibt.

Ende der 70er, Anfang der 80er Jahre wurden die sogenannten Ablufffassaden entwickelt, die als direkte Vorläufer von GlasDoppelFassaden bezeichnet werden können - mit dem Unterschied, dass bei Ablufffassaden die Einfachscheibe die innere (primäre) und die Isolierglasscheibe die äußere (sekundäre) Fassade bildet. Im Luftzwischenraum befindet sich meist eine bewegliche Sonnenschutzvorrichtung. Durch Unterdruck wird ein Teil der Raumluft in den Zwischenraum gesaugt und führt nun die dort entstandene Wärme einer Abluftanlage, die mit einer Wärmerückgewinnungsanlage ausgestattet sein kann, zu.

Die innere Scheibe kann zu Reinigungszwecken geöffnet werden.

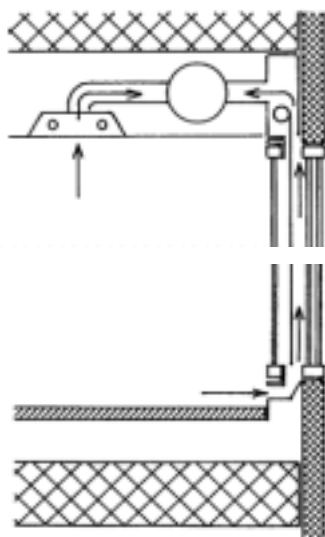


Abb. 5 Systemskizze Abluffassade [Compagno, 1999]

Beispiele für Ablufffassaden sind das Museum für Kunsthandwerk in Frankfurt/Main von Richard Meier, 1979 - 84 oder der Hauptsitz der Lloyd's Versicherungsgesellschaft in London von Richard Rogers Partnership, 1978 - 86.

Seit etwa 1990 werden von nahezu allen namhaften Architekten weltweit insbesondere Büro-, Verwaltungs- und Repräsentationsbauten mit einer der unten beschriebenen Varianten von GlasDoppelFassaden ausgestattet.

1.3. Aktuelle Diskussionsgrundlage

1.3.1. Typologie

Der vermehrte Einsatz von GlasDoppelFassaden hat in den letzten Jahren eine geradezu unüberschaubare Vielfalt an Ausführungsvarianten hervorgebracht. [Lang] und darauf aufbauend [Gertis, 1999] haben folgenden Versuch einer Klassifizierung unternommen:



Abb. 6 Schematisiertes Ordnungsschema für GlasDoppelFassaden [Gertis, 1999]

Anders als bei [Gertis] und [Lang], wo die potentiellen Möglichkeiten der Doppelschaligkeit aus architektonischer Sicht dargestellt werden, orientiert sich die Einteilung nach [Zöllner] an den in den letzten 10 Jahren tatsächlich errichteten GlasDoppelFassaden.

Als Kriterium für die Einteilung verwendet [Zöllner] die Art der Segmentierung des Fassadenzwischenraumes unabhängig von ihrer Lüftungstechnischen Funktion.

Demnach können fünf Typen von Doppelfassadensystemen unterschieden werden:

- Unsegmentierte Vorhangfassaden
- Umlufffassaden
- Korridorfassaden
- Kasten-Kasten-Fassaden
- Schacht-Kasten-Fassaden

Zusätzlich kann jede dieser Varianten mit der Sonderform der direkten Fensterlüftung unter Umgehung des Fassadenzwischenraumes kombiniert werden.

Unsegmentierte Vorhangfassaden

Bei unsegmentierten Vorhangfassaden handelt es sich um die einfachste Form der Doppelfassade. Der eigentlichen Kernfassade wird im Abstand von 0,3 - 2 m eine zweite Glasfront vorangestellt, die je nach Ausführungsform eine geschlossene Ebene bildet oder Öffnungen zB in Form von Fugen aufweist. Der Fassadenzwischenraum ist weder in horizontaler noch in vertikaler Richtung unterteilt. Derartige Fassaden werden vor allem aus Schallschutzgründen realisiert und sind in der Regel nach allen vier Seiten hin geöffnet.

Soll darüber hinaus ganz gezielt eine Verbesserung des winterlichen Wärmeschutzes erreicht werden, wird die Fassade an beiden Seiten durch vertikal verlaufende Lisenen geschlossen und am Fuß bzw. an der Oberkante des Gebäudes mit regelbaren Klappen versehen.

Als ausgeführtes Beispiel für diesen Fassadentyp sei hier stellvertretend das Verwaltungsgebäude des Deutschen Rings in Hamburg genannt.

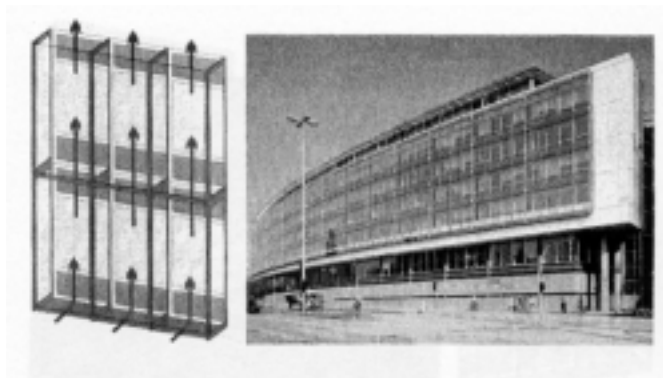


Abb. 7 Unsegmentierte Vorhangfassade: Funktionsschema und ausgeführtes Beispiel am Verwaltungsgebäude des Deutschen Ring in Hamburg (Architekten: von Bassewitz, Hupertz, Limbrock), [Zöllner]

Umlufffassaden

Eine zweite Bauform der Doppelfassade ist die sogenannte Umlufffassade, bei der eine erste Unterteilung des Fassadenzwischenraumes vorgenommen wird. Hierbei wird das gesamte Gebäude wie bei der unsegmentierten Vorhangfassade mit einer öffnungslosen Glasebene umhüllt. Nach zwei bis drei Geschossen erfolgt jedoch eine vertikale Unterteilung der Fassade mittels horizontal verlaufender Metall- oder Glaslisenen. Dadurch entsteht ein umlaufender Fassadenkorridor mit doppelter Geschosshöhe, der an der Unter- und Oberseite klappengesteuerte Öffnungen besitzt, die analog zur unsegmentierten Vorhangfassade bedient werden.

Darüber hinaus werden über den Gebäudeumfang verteilt mehrere vertikale Ventilatorschienen installiert, die die Luft im Fassadenzwischenraum in horizontaler Richtung umwälzen. Im Winter führt dieser Umluftbetrieb dazu, dass das Gebäude an allen Fassadenorientierungen mit einer weitgehend homogen temperierten Pufferschicht umgeben ist. Im Sommer gelangt die relativ kühle Luft der Fassadennordseite in die Südfassade des Gebäudes, wodurch sich im Fassadenzwischenraum eine Mischtemperatur einstellt, die unter dem Niveau einer Südfassade ohne Luftumwälzung liegt. In beiden Fällen ist dieser erzwungenen Umluftströmung eine vertikale, dh. freie Konvektionsströmung überlagert, die in der Sommerperiode bei geöffneten Ein- und Ausströmöffnungen stärker ausgeprägt ist als während der Wintermonate. Diese auch unter dem Namen „SolSkin“ [Rohde/Voss] bekannte Fassade wurde von der Firma Götz entwickelt und erstmals an ihrem zweigeschossigen Verwaltungsgebäude in Würzburg realisiert.

30

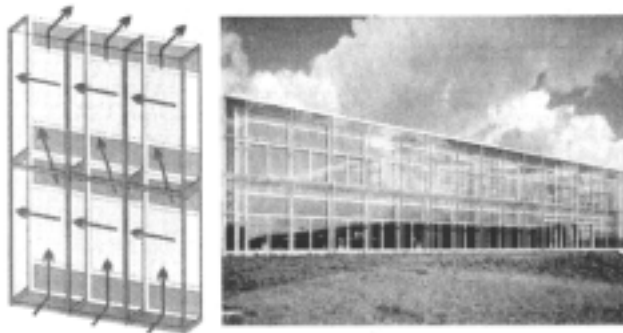


Abb. 8 Umlufffassade („SolSkin“): Schematisches Funktionsprinzip und ausgeführtes Beispiel am Verwaltungsgebäude der Götz GmbH, Würzburg (Architekten: Webler und Geissler), [Zöllner]

Korridorfassaden

Eine ähnliche Segmentierung wird bei sogenannten Korridorfassaden vorgenommen. Auch hier wird die Fassade in ihrer Vertikalen in separate Zonen unterteilt. Im Gegensatz zur Umlufffassade wird jedoch nach jedem Geschoss eine horizontale Trennebene eingezogen, sodass im Fassadenzwischenraum geschosshohe Korridore entstehen. Die Zu- und Abluftöffnungen dieser Zonen befinden sich dabei in der Regel in Boden- bzw. Deckenhöhe. Bei den ersten realisierten Doppelfassaden dieser Bauart wurden die Zu- und Abluftöffnungen direkt übereinander angeordnet (linker Teil des Funktionsschemas). Dadurch

gelangte die Raumabluft aus den unteren Geschossen unter bestimmten Außenbedingungen teilweise über die Zuluftöffnungen des nächsthöheren Geschosses als „Frischlufte“ in die darüberliegenden Geschossebenen (Kurzschlussstrom, Reinfiltration). Inzwischen werden die Öffnungen eines Korridors nicht mehr übereinander sondern nebeneinander angeordnet (rechter Teil des Funktionsschemas), sodass sich entlang der Geschossdecke die Zuluftöffnungen des oberen Korridors mit den Abluftöffnungen des darunter liegenden Geschosses abwechseln. Die Durchströmung wird dabei nur durch den Mechanismus der solarinduzierten freien Konvektion (Auftriebsströmung) sowie durch lokale Druckunterschiede an der Fassade angetrieben. Bei einem der größten doppelschaligen Projekte der vergangenen Jahre, dem Düsseldorfer Stadttor, wurde diese Art der Doppelfassade realisiert.

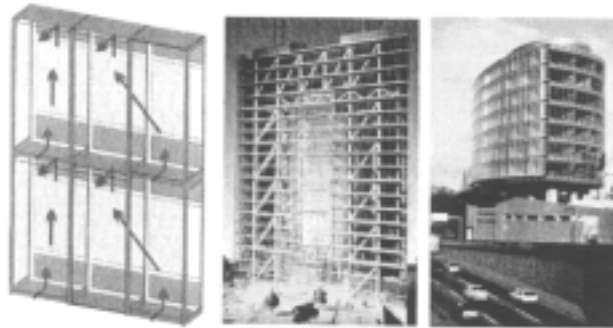


Abb. 9 Korridorfassade: Schematisches Funktionsprinzip und ausgeführtes Beispiel am Düsseldorfer Stadttor (Architekten: Petzinka und Partner) und am Bürogebäude am Halensee in Berlin (Architekten: Leon und Wohlhage), [Zöllner]

Ein bemerkenswerter Sonderfall einer Korridorfassade ist am Bürogebäude der Daimler Benz „debis“-Hauptverwaltung am Potsdamerplatz in Berlin ausgeführt (Architekten: Renzo Piano Building Workshop mit Christoph Kohlbecker):

Die Süd- und Westseite des 85 m hohen Gebäudes ist mit einer Außenfassade aus beweglichen, 70 cm breiten Verbundsicherheitsglas-Lamellen ausgestattet. Die Halterung erfolgt beidseitig durch Gußkonsolen. Über Schubstangen und Spindelantriebe können die horizontalen Lamellen bewegt werden. Eine zentrale Steuerung regelt die Stellung der Lamellen in Abhängigkeit von Temperatur und Windgeschwindigkeit. Die „Außenhaut“ kann im Sommer fast vollflächig geöffnet werden, wobei der maximale Öffnungswinkel 70° beträgt. Dadurch wird unter Tags die sommerliche Übertemperatur im Fassadenzwischenraum minimal gehalten sowie die Nachtauskühlung der Speichermassen erheblich erleichtert.

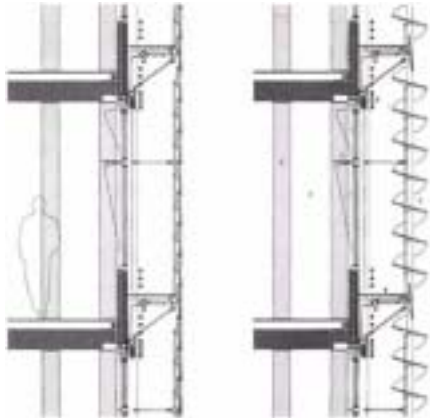


Abb. 10 Funktionsskizze der Korridorfassade der Daimler Benz „debis“-Hauptverwaltung am Potsdamerplatz in Berlin (Architekten: Renzo Piano Building Workshop mit Christoph Kohlbecker) [Compagno, 1999]

32

Im Winter kann durch Schließen der Klappen die Pufferwirkung des Zwischenraums genutzt werden. Die „zweite Haut“ passt sich nahezu selbständig den klimatischen Bedingungen an. Die bauphysikalischen und lüftungstechnischen Eigenschaften dieser Bauweise sind damit wesentlich besser als bei „starrten“ Doppelfassaden. Das Ziel war es, eine möglichst natürliche Be- und Entlüftung des Gebäudes zu erreichen und die Anlagen zur Raumkonditionierung auf ein sinnvolles Maß zu beschränken. Bei geöffneter Fassade wird allerdings der Immissionsschallschutz nicht gewährleistet. Überdies empfinden die Nutzer ggf. zu häufige Stellbewegungen als unangenehm. Bau und Wartung einer derartigen Anlage sind meist wesentlich teurer, als „herkömmliche“ doppelschalige Bauweisen.

Kasten-Kasten-Fassaden

Eine Stufe weiter geht die Segmentierung des Fassadenzwischenraumes bei sogenannten Kastenfenster-Fassaden. Der Aufbau und die Funktionsweise dieser Bauform unterscheidet sich von der Korridorfassade dahingehend, dass im Fassadenzwischenraum zusätzlich zur vertikalen, geschossweisen Unterteilung auch pro Achsabschnitt eine horizontale Segmentierung durch vertikal angebrachte Lisenen vorgenommen wird. Die so entstehenden Fensterkästen werden ebenfalls über Zu- und Abluftöffnungen durchlüftet. Zur Vermeidung von Kurzschlussströmungen bei der Belüftung dieser Segmente (linker Teil des Funktionsschemas) werden heute in der Regel zwei benachbarte Fensterkästen zusammengefasst. So kann am Fuß eines Achsabschnitts die Belüftung und am oberen Ende des daneben liegenden Abschnitts die Entlüftung dieser Zone erfolgen (rechter Teil des Funktionsschemas). In der Literatur und in Patentschriften hat diese Art der Luftströmungsführung unter dem Begriff der „Diagonallüftung“ Eingang gefunden. Dieses am weitesten verbreitete Doppelfassadensystem kam sowohl bei der Commerzbank-Zentrale in Frankfurt, als auch bei der Dienstleistungszentrale der RWE in Essen zum Einsatz.

Neben der Anordnung horizontal verlaufender Lüftungsöffnungen besteht jedoch auch die Möglichkeit, an beiden Seiten der Fensterkästen vertikale Zuströmöffnungen anzubringen und den Luftauslass über herkömmliche Abluftöffnungen zu realisieren. Beim Erweiterungsbau der Viktoriaversicherung in Düsseldorf wurde diese Art der Durchströmung verwirklicht und dabei in Modellversuchen eine Kurzschlussstromrate von ca. 25 % ermittelt, die damit niedriger liegt als bei der Diagonallüftung.

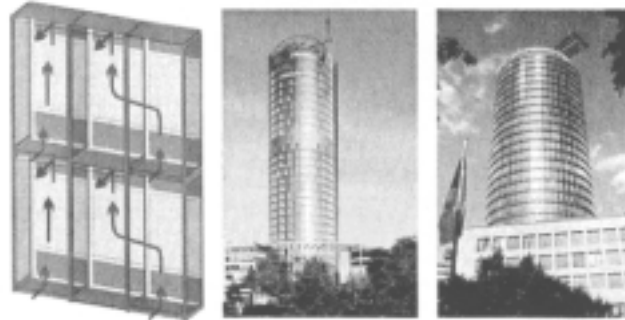


Abb. 11 Kasten-Kasten-Fassade: Schematisches Funktionsprinzip und ausgeführte Beispiele am RWE Gebäude in Essen (Architekten: IOP Ingenhoven, Overdiek und Partner) und dem Hauptsitz der Victoria-Versicherung in Düsseldorf (Architekten: HPP Henrich, Petschnigg und Partner), [Zöllner]

Schacht-Kasten-Fassaden

Ein alternativer Weg zur Entlüftung derartiger Fensterkästen wird bei sogenannten Schacht-Kasten-Fassaden beschrieben, die eine relativ komplexe Unterteilung des Fassadenzwischenraumes aufweisen. Ausgehend vom System der Kasten-Kasten-Fassaden werden hier alle übereinander liegenden Fensterkästen in jedem zweiten Achsabschnitt durch das Entfernen der horizontalen Trennelemente zu einer Art Thermischschacht zusammengefasst. Daraus ergibt sich eine alternierende Rasterung des Fassadenzwischenraumes in durchgehende Fassadenschächte und geschossweise unterteilte Fensterkästen. Diese stehen wiederum über sogenannte Überströmöffnungen mit den Schächten in Verbindung und sollen infolge der thermischen Auftriebsströmung im Schacht entlüftet werden. Die Frischluftversorgung der Fensterkästen erfolgt auch hier über spaltförmige Öffnungen am unteren Ende der Fensterkästen. Kurzschlussströme bei der Belüftung der Fensterkästen sind hier bei einer ausreichenden Strömungsgeschwindigkeit im Schacht nicht möglich. In den Wintermonaten lässt sich auch dieser Fassadentyp durch das Schließen der Schachtein- und -auslassöffnungen zur Minimierung des Heizenergiebedarfes in eine Art Pufferfassade umwandeln. Andererseits bietet sich in den Sommermonaten die Möglichkeit, durch eine Zwangsbelüftung der einzelnen Fassadenschächte eine zu starke Erwärmung der Luft im Zwischenraum zu verhindern. Neben einigen Gebäuden mit geringerer Geschossanzahl wurde dieses Fassadensystem am 35 m hohen Verwaltungsturm der Bausparkasse Schwäbisch Hall verwirklicht.

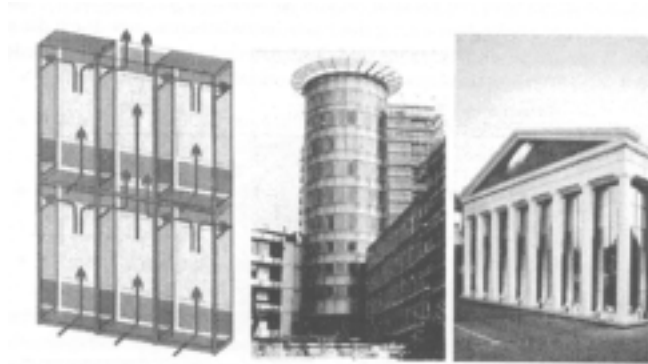


Abb. 12 Schacht-Kasten-Fassade: Schematisches Funktionsprinzip und ausgeführte Beispiele am Verwaltungsgebäude der Bausparkasse Schwäbisch Hall (Architekten: HENN Architekten Ingenieure) und dem „Tempel“ der Fa. Alco, [Zöllner]

1.3.2. Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von GlasDoppelFassaden

GlasDoppelFassaden werden seit etwa 10 Jahren überaus kontroversiell diskutiert. Stellvertretend für die vielen unterschiedlichen Sichtweisen soll im Folgenden die eher kritische Schau der Vor- und Nachteile von [Gertis] sowie die eher positive Sicht von [Neubert, Teil 1] dargestellt werden:

Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von Glasdoppelfassaden nach [Gertis, in Bauphysik 21, 1999]

Sachgegenstand	Argumente	
	pro GDF	contra GDF
Schall	GDF bieten einen verstärkten Schallschutz bei Außenlärm	GDF müssen zu Lüftungszwecken geöffnet werden. Dann sinkt die Schallschutzwirkung. Der Luftspalt steigert die Schallübertragung
Heizenergie, Winter	GDF sind energiesparend, weil sie Solarenergie wie ein Kollektor einfangen	Bei den in Frage stehenden Gebäuden mit hohen internen Wärmelasten ist Energieeinsparung kein Thema
Kühlenergie, Sommer	Sommerliche Hitze kann über die GDF-Luftspalt abgeführt werden	Im GDF-Luftspalt tritt eine starke sommerliche Erwärmung auf, welche den dahinterliegenden Raum zum Brutkasten macht

Sachgegenstand	Argumente	
	pro GDF	contra GDF
Raumklima, Lüftung	GDF verbessern das Raumklima bei natürlicher Lüftung	Bei GDF ist ein behagliches Raumklima nur mit (mechanischen) HVAC-Anlagen möglich. Im GDF-Luftspalt findet eine Geruchsübertragung statt
Sonnenschutz	GDF gestatten im Luftspalt eine sturmsichere Anbringung des Sonnenschutzes	Ein sicherer Sonnenschutz kann auch in eine Hochhaus-Lochfassade integriert werden
Fensteröffnungen	GDF gestatten das vom Nutzer gewünschte Fensteröffnen auch bei großen Gebäudehöhen	Mit arretierbaren Fensterbeschlägen ist Fensteröffnen auch bei normalen Hochhaus-Fassaden möglich
Innen-Anpressdrücke	GDF reduzieren bei Windanströmung in großen Gebäudehöhen die Staudrücke im Raum, die zu hohen Anpressdrücken bei Innentüren führen	Mit Prallscheiben vor den Fensteröffnungen können die Staudrücke auch bei normalen Lochfassaden reduziert werden
Licht	GDF ermöglichen den Einbau lichtlenkender Elemente	Lichtlenkung ist auch bei Lochfassade möglich. Die äußere Glashaut mindert den Tageslichteinfall erheblich
Brand	Mit Horizontal- und Vertikalschotten kann die Brandausbreitung im Luftspalt verhindert werden	Die äußere Glashaut verhindert den Rauchabzug. Der Luftspalt steigert den Feuerüberschlag
Tauwasser	Mit ausreichender Belüftung des GDF-Luftspaltes tritt kein Tauwasser auf	An der Innenoberfläche der Außenscheibe ist Tauwasser unvermeidbar. Deshalb häufige Reinigung
Kosten	GDF senken die Betriebskosten des Gebäudes (Energiekosten)	GDF sind von den Investitionskosten extrem teuer. Sie verursachen ferner hohe Betriebskosten (Reinigung von 4 Glasoberflächen)

Vergleich einschalige Fassade - Doppelfassade nach [Neubert, Teil 1]:

Ausgehend von der Frage, ob eine gute einschalige Fassade die gleichen Funktionen genauso gut oder besser erfüllt hätte wie eine Doppelfassade, werden die beiden Fassaden im Bezug auf folgende Gesichtspunkte gegenübergestellt.

Erscheinungsbild: Doppelfassaden ermöglichen durch die Entkoppelung der inneren und äußeren Schale einen noch größeren Freiraum bei der Fassadengestaltung als einschalige Fassaden. Die plastische Gestaltung und Gliederung der Fassade kann unabhängig vom Tragwerk geschehen und die geschützte Pufferzone ermöglicht ggf. die Verwendung von witterungsempfindlichen neuen Materialien.

Gebäudevolumen: Die Doppelfassade erhöht aufgrund der Pufferzone das umbaute Volumen, erfordert aber durch die Reduzierung der Klimatechnik weniger Platz für Versorgungsschächte und Technikräume.

Bezug zum Außenraum: Nur die einschalige Fassade ermöglicht durch ein Öffnen von Fenstern und Türen den direkten Bezug zum Außenraum.

36

Thermische Eigenschaften: Ausgehend von der gleichen Grundfassade ermöglicht die vorgesezte zweite Schale eine Verbesserung der thermischen Eigenschaften (U-Wert, Oberflächentemperatur). Bei gleichem Gesamt-U-Wert und g-Wert entsprechen die der einschalige Fassade denen der Doppelfassade.

Heizenergiebedarf: Der Heizenergiebedarf steht in direkter Abhängigkeit zum U-Wert. Deshalb weisen eine Doppelfassade und eine einschalige Fassade mit gleichen thermischen Eigenschaften die gleichen Transmissionswärmeverluste auf. Bei der Fensterlüftung hingegen reduziert die Doppelfassade, durch Ausnutzung der solaren Gewinne über die vorgewärmte Luft in der Pufferzone, den Heizenergiebedarf gegenüber einer einschaligen Fassade erheblich.

Natürliche Lüftung: Bei einer reinen Fensterlüftung wirkt sich die in der Pufferzone erwärmte Luft im Winter positiv und im Sommer negativ aus. Bei einem richtig bemessenen Gesamtlüftungskonzept ermöglicht eine Doppelfassaden mit Abluftprinzip eine gute natürliche Querlüftung, bei der die aufsteigende Luft in der Pufferzone als Motor dient. Während der Nachtauskühlung bietet die zweite Haut einen konstruktiven Witterungs- und Einbruchschutz und erzielt so, durch größere Öffnungsflächen als bei einer einschaligen Fassade, höhere Luftwechselraten und dadurch eine effektivere Auskühlung.

Sonnenschutz - Kühlenergie: Die Doppelfassade schützt den in der Pufferzone liegenden Sonnenschutz vor Wind und Verschmutzung und ermöglicht in exponierter Lage bei hohen Windgeschwindigkeiten und Böen seinen bedarfsorientierten Einsatz. Dadurch leistet sie einen Beitrag zur Reduzierung der Kühllasten und zum thermischen sowie optischen Komfort der Nutzer.

Natürliche Belichtung: Die einschalige Fassade weist aufgrund der geringeren Anzahl von Fassadenschichten eine bessere Autonomie und einen höheren Tageslichtquotienten auf. Dadurch reduziert sie den Bedarf an Beleuchtungsenergie.

Akustische Eigenschaften: Bei entsprechender Ausführung der äußeren Schale sowie der Pufferzone ermöglicht die Doppelfassade einen zusätzlichen Schallschutz gegenüber außen. Die Unterteilungen der segmentierten Pufferzone dämpfen Lärm aus Nachbarbüros, die unsegmentierte Pufferzone hingegen verstärkt ihn durch den „Telefonieeffekt“.

Ökobilanz: Die Doppelfassade weist auf Grund der äußeren Schale und der Pufferzone einen erhöhten Erstmaterialeinsatz auf. Doch kann sie durch die erhöhte Lebensdauer der geschützten Bauteile eine bessere Ökobilanz und ein geringeres Müllaufkommen als eine einschalige Fassade aufweisen. Die Umweltbelastung hängt in jedem Fall sehr stark von den verwendeten Materialien ab.

Gesamtenergiebilanz: Die richtige Fassadenwahl ist in Abhängigkeit vom Standort und dem dort vorherrschenden Klima zu treffen. Durch die warme Luft in der Pufferzone wird im Winter der Heizenergiebedarf verringert, im Sommer der Kühlenergiebedarf ggf. erhöht. Ein bedarfsorientierter Sonnenschutz reduziert die Kühllasten.

Die Ökobilanz, der verhältnismäßig hohe Energiebedarf des Maschinenparks sowie die Auswirkungen auf die Anlagentechnik dürfen bei der Gesamtenergiebilanz nicht vernachlässigt werden.

Kosten: Die Konstruktionskosten einer Doppelfassade liegen immer deutlich über denen einer einschaligen Fassade und amortisieren sich nicht durch Einsparungen bei den Energiekosten im Laufe eines Lebenszyklus.

Doch unter Einbeziehung der positiven Auswirkungen des Komforts am Arbeitsplatz und einer reduzierten Anlagentechnik (Investition und Wartung) kann die Doppelfassade eine kostengünstigere Lösung als eine einschalige Fassade darstellen. Bei einer anderen Wichtung der Kosten (höhere Energiekosten und niedrigere Arbeitskosten) würde sich eine positive Gesamtenergiebilanz der Doppelfassade direkt in den Kosten niederschlagen.

Renovierung: Neben den oben aufgeführten Vorteilen ermöglicht das Vorsetzen einer zweiten Haut eine Gebäudenutzung während der Renovierung, da die Intervention sich ausschließlich auf die Fassade begrenzt.

Doppelfassade - ein Beitrag zur Nachhaltigkeit: Die Doppelfassade kann in vielen Bereichen einen Beitrag zur Ressourcenschonung und Komfortverbesserung leisten:

- durch die Nutzung solarer Gewinne,
- durch die Reduzierung des Heizenergiebedarfs,
- durch eine bedarfsorientierte Anwendung des Sonnenschutzes und der damit verbundenen Reduzierung der Kühllasten,
- durch verbesserten Schallschutz,
- durch eine effektive Nachtauskühlung,
- durch Langlebigkeit geschützter Bauteile,
- durch die Übernahme von Gebäudetechnikfunktionen,
- durch eine Verbesserung des Nutzerkomforts aufgrund von natürlicher Lüftung
- sowie ein thermisch und visuell angenehmes Innenklima.

Um diese Vielzahl von komplexen Aufgaben erfüllen zu können, ist die Integration der Doppelfassade in das Gesamtgebäudekonzept unabdingbar und kann nur durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Architekten, Tragwerksingenieuren, Umweltplanern und Bauherren geleistet werden. Nachhaltigkeit erfordert, auf lokale Gegebenheiten einzugehen, das heißt, klimabezogen und nutzerbezogen zu bauen. Deshalb muss für jedes Projekt entsprechend seinem Standort, seiner Orientierung und Form sowie den zu erfüllenden Anforderungen an das Gebäude die individuelle Lösung gefunden werden. Dann leistet die Doppelfassade bei richtiger Anwendung und Ausführung einen Beitrag zur Nachhaltigkeit.

1.4. Die Messfassade

Für die Durchführung des Forschungsprojektes wurde der von den Grazer Architekten Florian Riegler und Roger Riewe geplante und 1998 fertiggestellte Neubau des Bundesinstituts für Sozialpädagogik (BiSoP) in Baden bei Wien ausgewählt.

Dies deshalb, weil zum einen die Größe des Objektes einen im Rahmen des Projektvolumens vertretbaren messtechnischen Aufwand ermöglicht. Zum anderen war das Gebäude für die Projektbeteiligten relativ leicht zu erreichen und zugänglich, was bei der Installation und vor allem Wartung der Messeinrichtungen von großer Bedeutung war. Weiters bestand seitens des Gebäudenutzers großes Interesse, die wissenschaftliche Untersuchung dieses für österreichische Verhältnisse recht unkonventionellen Schulbaues in den Unterricht einzubinden.



Abb. 13 Bundesinstitut für Sozialpädagogik in Baden bei Wien (Architekten Riegler und Riewe), Lageplan

Das 53,7 m lange, 14 m breite und 17 m hohe, Ost-West orientierte, fünfgeschossige Gebäude ist mit einer allseitigen Glasfassade ausgestattet. Die Ost- und Westfassade sind mit nur zwei bzw. vier Fenstern versehen und als „konventionelle“ hinterlüftete Glasfassade ausgeführt (17 cm Stahlbetonwand, 8 cm außenliegende Mineralfaserdämmung, 5 cm Hinterlüftung und vorgehängte 10 mm dicke Einscheibensicherheitsverglasung (ESG)).

39



Abb. 14 Grundriss 2.OG mit Messfeldern

Die Glasfassade kann, der Typologie nach [Zöllner] folgend, als sogenannte unsegmentierte Vorhangfassaden bezeichnet werden. Das heißt, es gibt abgesehen von einzelnen „Fensterkästen“, welche gegen den Fassadenzwischenraum durch gedämmte Metallpaneele abgeschottet sind, weder horizontale noch vertikale Unterteilungen des Fassadenzwischenraumes.



Abb. 15 Südfassade Ansicht mit eingetragem Messfeld „Fenster“

Am unteren bzw. oberen Abschluss der Fassaden befinden sich regelbare Be- und Endlüftungsklappen. Diese werden im Frühjahr geöffnet und im Herbst geschlossen, sodass im Sommer die warme Spaltluft abgeführt und im Winter die Pufferwirkung der vorgesetzten Fassade genutzt werden kann.

40

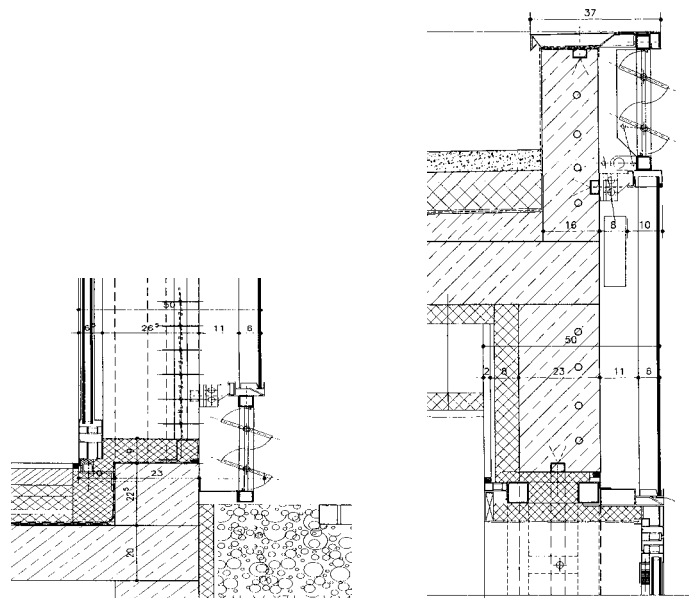


Abb. 16 Systemschnitt der Fußpunkt- und Attikaausbildung mit „Fensterkasten“

Die Fensterkästen ermöglichen eine direkte Lüftung der dahinterliegenden Räume unter Umgehung des 14 cm tiefen Fassadenzwischenraumes. Dadurch wird im Sommer ein Hereinlüften von warmer Spaltluft in das Gebäude vermieden. Zudem verhindert diese Konstruktion weitgehend eine Schall- und Brandrauchübertragung über den Fassadenzwischenraum.



Abb. 17 Südfassade Ansicht gegen Westen und von innen. Die Glasflächen über und unter den Fensterkästen sind mit drehbaren Sonnenschutzlamellen versehen.

Durch die geschossweise zum Teil horizontal versetzten „Fensterkästen“ mit den darüber bzw. darunter liegenden transluzenten Ober- bzw. Unterlichtern und die dazwischenliegenden opaken Stahlbetonflächen bietet die Fassade zwei strömungstechnische Extremfälle: unmittelbar nebeneinander können sowohl die solar induzierten Strömungsverhältnisse in einem 17 m hohen und 14 cm tiefen ungestörten Luftspalt, als auch die komplexen Vorgänge rund um die in Fassadenzwischenraum eingebauten „Fensterkästen“ mess- und simulationstechnisch untersucht werden.



Abb. 18 Ansicht Südfassade mit Messfeld „Fenster“ (links) und Messfeld „Wand“ (rechts)

Um die Ausgangssituation für die Simulationsberechnungen möglichst genau nachbilden zu können, wurden zur Begrenzung der einzelnen Messfelder dünne Polyamid-Schläuche von der Attika in den Fassadenzwischenraum hinuntergelassen und anschließend aufgeblasen (wir danken der Fa. KUDA, Kunststarm GmbH, für die freundliche Unterstützung). Damit wurde eine Abschottung der Messfelder von der übrigen Fassade erreicht und konnten Verfälschungen der Messergebnisse durch Querströmungen vermieden werden.

Eine weitere Besonderheit liegt in der transluzenten (und nicht wie allgemein üblichen transparenten) Ausführung der Sekundärfassade aus satiniertem „normal grünem“ Einscheibensicherheitsglas.



Abb. 19 Südfassade: Fassadenzwischenraum im Bereich Stahlbetonwand (links) und im Bereich Fensterelement mit geschlossenen und geöffneten Sonnenschutzlamellen (rechts)

2. Thermische Simulation

Dr. Robert Kouba, Ao.Univ.Prof. DI Dr.techn. Wolfgang Streicher

2.1. Aufgabenstellung

Im vorliegenden Abschnitt werden Simulationsberechnungen vorgestellt, die sowohl thermische als auch strömungstechnische Aspekte des Segmentes „Wand“ der südorientierten Fassade (innen gedämmte Betonwand ohne Kastenfenster) mit vorgehängter Glasscheibe quantitativ erfassen. Im Zuge des Projektablaufs wurden in diesem Zusammenhang folgende zwei Aufgabenstellungen untersucht:

- Als Vorbereitung für die experimentellen Untersuchungen wurden in der ersten Projektphase Simulationsberechnungen mit Standardkomponenten aus dem Programmpaket TRNSYS [TRNSYS 2000] durchgeführt, die Aufschluss über die zu erwartenden Bauteiltemperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten gaben. Als Basis wurde ein repräsentativer Klimadatensatz herangezogen. Die entsprechenden Ergebnisse wurden als unterstützende Informationen bei der Auswahl geeigneter Geschwindigkeits- und Temperatursensoren herangezogen.
- Nach Durchführung der experimentellen Untersuchungen an der Fassade wurden die Simulationsberechnungen auf Basis der in den Messperioden mitprotokollierten Klimadatensätze (Aussentemperatur und Globalstrahlung) wiederholt. Dabei wurden sowohl Messperioden betrachtet, in denen die Fassadenklappen am oberen und unteren Ende geschlossen waren als auch Zeiträume mit geöffneten Klappen. Im Zuge dieser Berechnungen wurde eine Modellverbesserung zur Beschreibung der thermischen Verhältnisse an der Glasscheibe vorgenommen und die resultierenden Korrelationen zwischen theoretischen und experimentellen Ergebnissen bewertet. Ziel dieser Arbeit war es, die Einsatzmöglichkeit und Grenzen des verwendeten Simulationsmodells als unterstützendes Planungswerkzeug darzustellen.

2.2. Methode

Das zu modellierende System umfasst im wesentlichen fünf Komponenten:

- 1) Außenraum (Außenklima)
- 2) Vorgehängte Glasfassade/Glasscheibe
- 3) Fassadenzwischenraum
- 4) Primärfassade des Gebäudes
- 5) Innenraum des Gebäudes

Werden diese Komponenten zueinander in Beziehung gesetzt, ist prinzipiell zwischen Szenarien mit geschlossenen und jenen mit offenen Fassadenklappen zu unterscheiden. Erstere beziehen sich auf die Wintermonate und die Übergangszeiten, in denen die wärmedämmende Funktion des Luftpolsters im Fassadenzwischenraum ausgenutzt wird (möglichst geringer Luftaustausch zwischen Fassadenzwischenraum und Außenklima). Hingegen sind letztere für die Sommermonate charakteristisch, wo angestrebt wird, durch Auftriebsströmungen im Fassadenkanal (Kamineffekt) einen möglichst großen Teil der darin anfallenden thermischen Energie wegzulüften.

Freie Konvektion

Im Falle geschlossener Lüftungsklappen erfolgt der Wärmeaustausch zwischen der Luft im Fassadenzwischenraum (kurz: Fassadenluft) und jener der Umgebung primär über die Wärmeleitung durch die Glasscheibe. Das Strömungsverhalten der Fassadenluft entspricht dabei jenem eines Fluids in einem geschlossenen vertikalen Spalt, dessen vertikalen Begrenzungsflächen (im betrachteten Fall Glasscheibe und Betonwand) unterschiedliche Temperaturen aufweisen. An der wärmeren Fläche steigt die Luft auf, während sie an der kälteren Fläche absinkt, wodurch im Idealfall eine Konvektionswalze entsteht. Dieses Strömungsverhalten wird als *freie Konvektionsströmung* bezeichnet, wobei die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten wesentlich durch die Temperaturdifferenz zwischen Luft und Begrenzungsflächen beeinflusst werden. Je nach Strahlungsangebot, Außenlufttemperatur und Absorptionsverhalten der Bauteile kann die Luft sowohl an der Betonwand (Nachtstunden, Glasscheibe weist ein niedrigeres Temperaturniveau als die Betonwand auf) als auch an der Glasfassade (Tagstunden, hohes Solarstrahlungsangebot, signifikante Strahlungsabsorption in der Glasfassade, Temperaturniveau der Glasscheibe liegt über jenem der Betonwand) nach oben steigen und an der jeweilig anderen Fläche nach unten sinken. Voraussetzung für das Auftreten dieser physikalischen Abläufe ist unter anderem die Abgeschlossenheit des Fassadenzwischenraums und hierbei insbesondere die Dichtigkeit der Lüftungsklappen am oberen und unteren Ende der Fassade. Dadurch wird verhindert, dass sich Auftriebsströmungen der freien Konvektion überlagern (siehe Beschreibung im nächsten Absatz).

Erzwungene Konvektion

Im Falle geöffneter Ein- und Auslassklappen sind die Strömungsverhältnisse bei ausreichender Windstille primär durch den Dichteunterschied zwischen Fassaden- und Außenluft beeinflusst. Dabei gelangt Außenluft durch die bodennahen Einlassklappen in den Fassadenzwischenraum und wird dort durch die auf höheren Temperaturniveaus befindlichen Begrenzungsflächen (Gebäudeaußenwand, Glasscheibe) erwärmt. Die sich dadurch einstellende Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Fassadenluft bedingt den Effekt des thermischen Auftriebs (Kamineffekt), der durch eine charakteristische, aufwärts gerichtete, mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Fassadenluft quantifiziert werden kann und umso stärker ausfällt je höher die Fassade ist. Strömungsmechanisch handelt es sich dabei um eine *erzwungene Konvektionsströmung*. Letztendlich verlässt die

erwärmte Luft den Fassadenzwischenraum über die am oberen Ende der Fassade befindlichen Auslassklappen, wodurch der Wärmeaustausch zwischen Außen- und Fassadenluft bei geöffneten Klappen sowohl über Wärmeleitung an der Glasscheibe als auch über die zu- und abströmende Fassadenluft wirksam wird.

Mischkonvektion

Die Überlagerung der durch den Kamineffekt bedingten Auftriebsströmung mit dem Effekt der freien Konvektionsströmung führt in der Regel zur Ausbildung einer *Mischkonvektionsströmung* [Zöllner 2001], was insbesondere bei der Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten zu berücksichtigen ist.

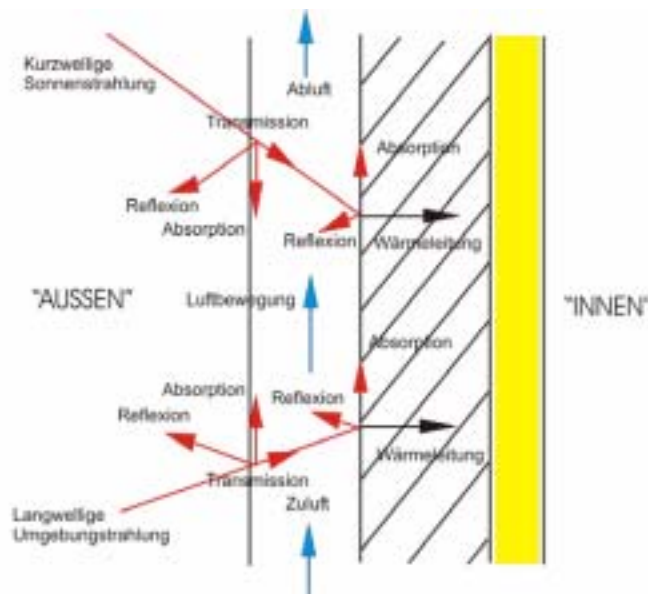


Abb. 20 Prinzipskizze der auftretenden Energieströme [aus Kapitel 5]

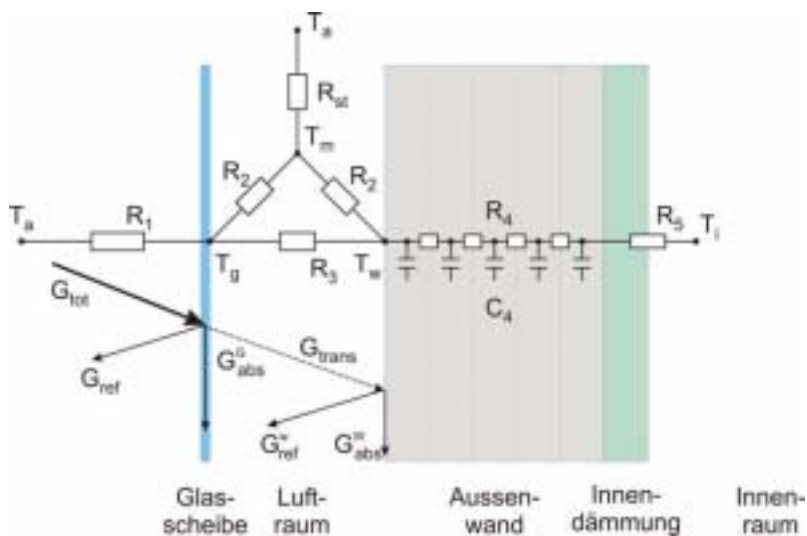


Abb. 21 Thermisches Ersatzschaltbild des betrachteten Fassadenelements

Die experimentellen Untersuchungen an der Fassade haben gezeigt, dass auch im Falle geschlossener Klappen die Ein- und Auslassöffnungen nicht so dicht sind, um die erzwungene Auftriebsströmung aufgrund des Kamineffekts (und eines möglichen Windeinflusses) zu unterbinden. Somit treten auch hier Mischkonvektionsströmungen auf, die im Simulationsmodell ähnlich behandelt werden können, wie die Strömungen im Falle geöffneter Klappen.

Zur simulationstechnischen Abbildung des Wärmeverhaltens der Fassade bzw. des Strömungsverhaltens der Fassadenluft wird das Konzept des thermischen Netzwerkes herangezogen [Duffie 1991] (Abb. 21). Dieses ist in seinen Grundzügen im Programmpaket TRNSYS als eigenes Programmmodul (Type36) [TRNSYS 2000] implementiert, wobei davon ausgegangen wird, dass die Strahlungsabsorption in der vorgehängten Glasfassade als physikalischer Effekt vernachlässigbar ist. Im Zuge der experimentellen Arbeiten hat sich erwiesen, dass diese Vereinfachung für die hier untersuchte Fassade nicht zulässig ist, da aufgrund der Satinierung der Glasscheibe die Absorption für Solarstrahlung gegenüber einer reinen Einfachverglasung signifikant erhöht ist. Das Modell wurde daher um diesen Effekt erweitert.

Folgende physikalische Prozesse werden in dem Modell berücksichtigt:

- a) Die Transmission von Solarstrahlung durch die Glasscheibe.
- b) Die Absorption von Solarstrahlung in der Glasscheibe.
- c) Die Absorption von Solarstrahlung an der Betonwand. Bei beiden Absorptionsprozessen (Punkt b) und c)) werden Mehrfachreflexionen zwischen der Betonwand und der Glasscheibe berücksichtigt.
- d) Der konvektive Wärmeübergang zwischen Glasscheibe und Außenraum (R_1). Für dessen Berechnung werden gemessene Zeitprofile der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung herangezogen.
- e) Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen Glasscheibe und Außenraum (R_1).
- f) Die Wärmeleitung durch die Glasscheibe (R_1).
- g) Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen Glasscheibe und Betonwand (R_3).
- h) Die konvektiven Wärmeübergänge zwischen Glasscheibe und Fassadenluft bzw. Betonwand und Fassadenluft (R_2). Dabei wird zwischen laminaren und turbulenten Strömungsprofilen unterschieden. Außerdem wird eine empirische Formel herangezogen, um den kombinierten Einfluss von freier und erzwungener Konvektion zu berücksichtigen.
- i) Die eindimensionale instationäre Wärmeleitung in der Außenwand des Gebäudes (R_4 und C_4).
- j) Der kombinierte Wärmeübergang (konvektiv + radiativ) zwischen Außenwand und Innenraum des Gebäudes (R_5).

Als primäre dynamische Eingangsgrößen werden die Globalstrahlung (G_{tot}), die Aussentemperatur (T_a), die Windgeschwindigkeit (v_{wind}), die Windrichtung sowie die Innenraumtemperatur (T_i) vorgegeben.

Die mittlere Auftriebsgeschwindigkeit der Fassadenluft wird über die Bernoulligleichung ermittelt, wobei sich die Auftriebswirkung aus der Druckdifferenz zwischen Außenraum und Fassadenzwischenraum ergibt (linearisierte barometrische Höhenformel):

$$v = \sqrt{\frac{2gH(T_m - T_a)}{C T_m}} \quad (1)$$

Neben dem Dichteunterschied der Außen- und Fassadenluft wird die Auftriebsströmung wesentlich durch die Lamellenstellung der Einlass- und Auslassklappen als auch durch die sich am oberen und unteren Ende des Kanals befindlichen Insektenschutzgitter beeinflusst. Weiters verändert auch die Wandreibung und mögliche lokale Windeffekte an den Ein- und Auslassklappen das Strömungsverhalten im Fassadenraum. All diese Effekte werden mathematisch über Druckverlustbeiwerte in der Konstanten C der Formel (1) zusammengefasst. Aufgrund der Komplexität dieser Effekte und den damit verbundenen Unsicherheiten in ihren simulationstechnischen Modellierungen wurde diese Konstante aus den Geschwindigkeits- und Temperaturmessungen an der Fassade abgeleitet und als dynamische Eingangsgröße der Simulation vorgegeben. Die für die Umsetzung der Auftriebsformel (1) notwendige mittlere Fassadenlufttemperatur T_m berechnet sich aus der Theorie der Wärmeübertragung luftdurchströmter planparalleler Platten:

$$T_m = \bar{T} + \frac{T_{\text{aus}} - T_a}{1n((\bar{T} - T_{\text{aus}})/(\bar{T} - T_a))} \quad \text{mit} \quad \bar{T} = \frac{T_g + T_w}{2} \quad (2)$$

Als Vereinfachung wird eine mögliche Höhenabhängigkeit der Scheiben- bzw. Außenwandtemperatur vernachlässigt. Es ist zu beachten, dass die Strömungsgeschwindigkeit der aufsteigenden Luftsäule ihrerseits den Temperaturhub der Fassadenluft direkt beeinflusst. Im thermischen Netzwerk wird dies über den Widerstand R_{st} berücksichtigt, der unter anderem eine Funktion des Volumenstroms der Fassadenluft ist (die vollständige Formel für R_{st} findet sich im Referenzhandbuch von [TRNSYS 2000]). Die rekursive Verknüpfung zwischen T_m und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit bedingt, dass je Simulationszeitschritt beide Größen iterativ bis zur Erreichung der Selbstkonsistenz berechnet werden müssen, wobei auch die Temperaturabhängigkeit der Widerstände R_1 , R_2 und R_3 Berücksichtigung finden. Der Fall ideal geschlossener Klappen wäre in diesem Zusammenhang dadurch gekennzeichnet, dass $R_{\text{st}} \rightarrow \infty$ und somit $T_m = (T_w + T_g)/2$.

2.3. Randbedingungen

Simulationszeiträume und Messdatenvergleich

Es wurden exemplarisch zwei Messfälle mit geschlossenen und zwei Messfälle mit geöffneten Klappenstellungen berechnet. Die entsprechenden Messperioden sind in Tab. 1 zusammengefasst. Die Spalte „Messfall“ gibt dabei an, in welchem Bereich der Fassade innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls der Fokus der messtechnischen Untersuchung lag. Für den Vergleich zwischen Messung und Simulation wurde im Messfall „Wand“ die mittlere Geschwindigkeit der Fassadenströmung aus dem Mittelwert der drei Sensoren H4, H5 und H6 (siehe Kapitel 5 „Vorort-Messungen“) berechnet. Im Messfall „Fenster“ konnte hingegen nur der Wert des in der Fassadenmitte angeordneten Sensors H5 berücksichtigt werden, da H4 und H6 im Fensterbereich zum Einsatz kamen. In beiden Fällen wurden weiters die Werte des Temperatursensors im 3. OG des Wandabschnitts 10 für die Austrittstemperatur der Fassadenluft und der Sensoren im 2. OG des Wandabschnittes 6 für die Glas- bzw. Betonoberflächentemperaturen als experimentelle Referenzwerte herangezogen.

	Messfall	Klappenstellung	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt	Jahreszeit
1	Fenster	geschlossen	19/04 (00:00)	28/04 (23:50)	Übergangszeit
2	Fenster	geschlossen	03/05 (06:50)	07/05 (06:40)	Übergangszeit
3	Fenster	offen	08/08 (16:00)	12/08 (16:00)	Sommer
4	Wand	offen	01/09 (00:00)	08/09 (23:50)	Sommer

Tab. 1 Simulationszeiträume

Simulationstechnische Eingabeparameter und Verfahren

Die Eingabe- und Referenzdaten aus den experimentellen Untersuchungen lagen als Mittelwerte über 10-Minuten-Intervalle vor. Der gewählte *Simulationszeitschritt* wurde entsprechend mit 5 Minuten festgelegt.

Zur Lösung der instationären *Wärmeleitungsgleichung* im Wandsegment wurde ein *explizites Lösungsverfahren* eingesetzt, wobei die mittlere Fassadenlufttemperatur des letzten Zeitschrittes als fassadenseitige Randbedingung wirkte.

Das thermische Netzwerk im Bereich des Fassadenspalts, der Glasscheibe und des Außenraums wurde in jedem Zeitschritt solange iteriert bis die mittlere Fassadentemperatur T_m eine *Selbstkonsistenz* von $\pm 0,1^\circ\text{C}$ erreichte.

Konstruktionsaufbauten und Stoffdaten

Das untersuchte Fassadenelement ist 17 m hoch und 5,86 m breit. Der Schichtaufbau des Elements gestaltet sich folgendermaßen (von innen nach außen) bzw. wurden zur Berechnung folgende grundlegende Stoffeigenschaften der Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spezifischen Wärmekapazität verwendet:

Bauteilschicht innen -> aussen	Dicke [cm]	Wärmeleitfähigk. [W/(mK)]	Dichte [kg/m³]	spez. Wärmekap. [kJ/(kgK)]
zementgebundene Faserplatte	2	0,58	2000	1,05
Schaumglas	8	0,04	120	0,84
Stahlbeton	23	2,1	2400	1
Hinterlüftung	14	gem. Formel (5)	gem. (3)	1
Glas	1	1	2500	0,72

Tab. 2 Baustoffkennwerte des Fassadenaufbaues

Für die charakteristischen temperaturabhängigen Stoffeigenschaften der Luft ($[T] = [^{\circ}\text{C}]$) wurden folgende Bestimmungsgleichungen verwendet:

$$\text{Dichte } \rho \text{ [kg/m}^3\text{]} \quad \rho(T) = 348 / (T + 273,15) \quad (3)$$

$$\text{Viskosität } \nu \text{ [kg/(ms)]} \quad \nu(T) = 1,73 \cdot 10^{-5} + 4,69 \cdot 10^{-8} \cdot T \quad (4)$$

$$\text{Wärmeleitfähigkeit } \lambda \text{ [W/(mK)]} \quad \lambda(T) = 2,36 \cdot 10^{-2} + 7,44 \cdot 10^{-5} \cdot T \quad (5)$$

Die Emissionskoeffizienten für die Stahlbetonwand und das Fassadenglas werden mit

$$\varepsilon_w = 0,9 \text{ bzw. } \varepsilon_g = 0,87 \text{ [-]}$$

festgelegt.

Für die Ermittlung der absorbierten Solarstrahlung in der Glasscheibe bzw. an der Betonwand wurden die gemessenen Strahlungsintensitäten G [W/m^2] der vier Pyranometer S1, S2, S5 und S6 (siehe Kapitel 5 „Vorort-Messungen“) nach folgenden Gleichungen ausgewertet.

$$\alpha_{\text{Beton}} = 1 - G_{S6} / G_{S5} \quad (6)$$

$$\tau_{\text{Glas}} = G_{S5} / G_{S1} \quad (7)$$

$$\alpha_{\text{Glas}} = 1 - (G_{S2} + \alpha_{\text{Beton}} G_{S5}) / G_{S1} \quad (8)$$

Die Koeffizienten (7) und (8) stellen Rechengrößen dar, die auch die Energieeinträge aufgrund von Mehrfachreflexionen zwischen Betonoberfläche und Glasscheibe berücksichtigen. Die Auswertung von (6) bis (8) ergibt für die entsprechenden Mittelwerte:

$$\bar{\alpha}_{\text{Beton}} = 0,54 \quad \bar{\alpha}_{\text{Glas}} = 0,52 \quad \bar{\tau}_{\text{Glas}} = 0,30 \text{ [-]}$$

Wärmeübergangskoeffizienten und Strahlungsaustauschkoeffizient

Für die Beschreibung des Wärmetransportes zwischen Außenwand und Innenraum des Gebäudes (Beitrag zum Widerstand R_5) wird ein konstanter Wärmeübergangskoeffizient von $7,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ gewählt.

Der Wärmetransport von der Glasfassade an den Außenraum (Widerstand R_1) beinhaltet eine konvektive und eine radiative Komponente, die beide dynamisch zu berechnen sind. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{a,\text{konv}}$ lässt sich als Funktion der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung berechnen [Troeltsch, 1986]. Dabei unterscheidet man zwischen luv- und leeseitiger Anströmung, wobei eine luvseitige Anströmung bedeutet, dass der Winkel zwischen Fassadennormalen und Windrichtung weniger als 100° beträgt [Ito 1972]:

$$\text{Luv: } \alpha_{a,\text{konv}} = 5,8 + 3,9 \cdot w \quad w \leq 5 \text{ m/s} \quad (9)$$

$$\alpha_{a,\text{konv}} = 7,14 \cdot w^{0,78} \quad w \geq 5 \text{ m/s} \quad (10)$$

$$\text{Lee: } \alpha_{a,\text{konv}} = 5,8 + 1,2 \cdot w \quad w \leq 5 \text{ m/s} \quad (11)$$

$$\alpha_{a,\text{konv}} = 4,1 \cdot w^{0,78} \quad w \geq 5 \text{ m/s} \quad (12)$$

Der radiative Anteil berücksichtigt den Strahlungsaustausch zwischen Glasoberfläche und Außenraum, wobei für die Himmelstemperatur T_{atm} nach [Zürcher 1982] die um 15 K reduzierte Außenlufttemperatur angesetzt wird. Der entsprechende Wärmestrom $q_{a,\text{rad}}$ berechnet sich somit zu:

$$q_{a,\text{rad}} = \sigma \cdot (T_{\text{atm}}^4 - \varepsilon_{\text{Glas}} \cdot T_g^4) \quad (13)$$

Der Energieaustausch zwischen Glasscheibe und dem Innenbereich der Fassade umfasst ebenfalls einen radiativen Anteil (Widerstand R_3) und einen konvektiven Anteil (Widerstand R_2). Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen Scheibe und Betonwand berechnet sich nach folgender Formel [Duffie 1991]:

$$\frac{1}{R_3} = \frac{\sigma \cdot (T_w^2 + T_g^2) \cdot (T_w + T_g)}{1/\varepsilon_w + 1/\varepsilon_g - 1} \quad (14)$$

Die Gültigkeit von (14) beruht auf der Tatsache, dass die Ausdehnung der beiden Strahlungsflächen groß im Vergleich zu deren Abstand ist.

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient zwischen der Innenoberfläche der Glasscheibe und der Fassadenluft α_{2a} wird in dem hier verwendeten Modell mit dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Betonwandoberfläche und Fassadenluft α_{2b} kombiniert und zu einem mittleren Wärmeübergangswiderstand R_2 zusammengefasst. Die Wärmeübergangskoeffizienten α_{2a} und α_{2b} werden dabei je nach Temperatur- und Strömungsverhältnissen im Fassadenspalt dem Bereich der freien Konvektion, der erzwungenen Konvektion oder einer Kombination von beiden (Mischkonvektion) zugeordnet [Zöllner 2001]. Ihre Berechnung erfordert die Kenntnis der Nußeltzahl Nu , die als dimensionsloser Wärmeübergangskoeffizient aufzufassen ist:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (15)$$

wobei L eine charakteristische Länge für das betrachtete Objekt darstellt, die in dem hier untersuchten Fall mit dem hydrodynamischen Durchmesser

$$L = D_h = \frac{2 \cdot B \cdot D}{(B + D)} \quad (16)$$

belegt wird. B ist dabei die Wandsegmentbreite ($B = 5,86$ m) und D die Spalttiefe ($D = 0,14$ m). Für die unterschiedlichen Strömungsbereiche werden verschiedene Modellgesetze zur Berechnung der Nußeltzahl angewendet, die wie folgt zusammengefasst werden können:

Erzwungene Konvektion (laminar, $Re < 2300$) [Mercer 1967]:

$$Nu_{erzw} = 4,9 + \frac{0,0606 \cdot x^{-1,2}}{1 + 0,0856 \cdot x^{-0,7}}, \quad x = \frac{H}{Re \cdot Pr \cdot D_h} \quad (17)$$

wobei

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_H}{\nu}$$

die Reynoldszahl und

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha \rho}$$

die Prantlzahl bezeichnen.

Erzwungene Konvektion (turbulent, $Re > 2300$) [Gnielinski 1976]:

$$Nu_{erzw} = \frac{(f/8) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot (f/8)^{1/2} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} \quad (18)$$

wobei für den Reibungsfaktor f der Ansatz von Petukhov [Petukhov 1970] gewählt wurde:

$$f = (0,790 \cdot \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (19)$$

Freie Konvektion (turbulent + laminar) [Churchill 1975]:

$$Nu_{frei} = \left[0,285 + \frac{0,387 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/6}}{(1 + (0,492/Pr)^{9/16})^{8/27}} \right]^2 \quad (20)$$

wobei die Kenngröße für den thermischen Auftrieb die Grashof-Zahl

$$Gr = \frac{\rho^2 g (T_{obf} - T_m) D_H^3}{\nu^2 T_m}$$

ist. Die Oberflächentemperatur T_{obf} bezieht sich auf die Wand- bzw. Glasscheibentemperatur.

Mischkonvektion

Die Kenngröße zur Ermittlung der maßgebenden Strömungsart ist die Archimedeszahl

$$Ar = \frac{Gr}{Re^2}$$

wobei nach Petrova (siehe [Wilde 1978]) folgende Einteilung getroffen wird:

$Ar \leq 0,225$	erzwungene Konvektion
$0,225 < Ar \leq 10$	Mischkonvektion
$Ar \geq 10$	freie Konvektion

Für die untersuchte Fassade ergibt sich bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von $v \approx 0,45$ m/s der Übergang von der Misch- zur Zwangskonvektion. Im Bereich der Mischkonvektion wurde folgender empirischer Ansatz für die Berechnung der Nußeltzahl [Incropera 2002] getroffen:

$$Nu_{misch} = \sqrt[3]{|Nu_{erzw}^3 \pm Nu_{frei}^3|} \quad (21)$$

Das negative Vorzeichen gilt für den Fall $T_m > T_{obf}$, das positive für den Fall $T_m < T_{obf}$.

2.4. Ergebnisse Phase 1 / Abschätzung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Phase 1/Abschätzung zusammengestellt. Das dafür verwendete Modell entspricht einer Standardkomponente (Type36) des TRNSYS - Programmpaketes [TRNSYS 2000]. Bezüglich der Randbedingungen und Modellannahmen bestanden zu den bisher vorgestellten Simulationsergebnissen folgende Unterschiede:

- Die vorgehängte Glasscheibe wurde in der Simulation mit den Kennwerten einer Einfachverglasung belegt (keine Satinierung).
- Die Absorption der Solarstrahlung in der Glasscheibe wurde vernachlässigt.
- Die Konstante C wurde mit einem Wert aus der Literatur [Duffie 1991] belegt ($C = 10$) und zeitlich konstant gehalten.
- Für den Fall „geschlossene Fassadenklappen“ wurde für die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs im Fassadenespalt eine Formel [Randall 1979, TRNSYS 2000] verwendet, die sich aus Messungen für freie Konvektionsströmungen im geschlossenen Spalt ergibt.
- Für die Auftriebsströmung im Fall „offene Klappen“ wurde der Wärmeübergangskoeffizient ausschließlich aus Ansätzen für erzwungene Strömungen [Kays 1966, Mercer 1967] berechnet.
- Der kombinierte (radiative + konvektive) Wärmeübergangskoeffizient an der Außenscheibe wurde mit $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ festgesetzt.
- Der verwendete Klimadatensatz entstammte den im Jahre 1968 am Standort Graz durchgeführten Temperatur- und Strahlungsmessungen [Graz 68/ Halozan].
- Für den Innenraum des Gebäudes wurde eine konstante Lufttemperatur von 22 °C angenommen.

2.4.1. Sommerfall, Klappen offen

Der zeitliche Verlauf der Außenwandtemperatur (T_w), der Außentemperatur (T_a), der Austrittstemperatur der Fassadenluft (T_{aus}) und der an der Betonwand absorbierten Solarstrahlung (G_{abs}) ist für eine „eingeschwungene“ 3-Tagesperiode (72 Stunden: 08.07./00:00 - 10.07./24:00 Uhr in Graz) in Abb. 23 dargestellt. Die entsprechenden Wertverläufe für den Hub der Lufttemperatur beim Durchströmen des Fassadenzwischenraums und die mittlere Strömungsgeschwindigkeit sind in Abb. 24 zusammengestellt. Der betrachtete Zeitraum repräsentiert drei einstrahlungsintensive Sommertage.

Es zeigte sich, dass die Temperaturzunahme der Fassadenluft zwischen 1 und 4 K und die entsprechenden Auftriebsgeschwindigkeiten zwischen 0,3 und 0,5 m/s betragen. Beachtenswert ist die Tatsache, dass die größeren Temperaturhübe (und somit die höheren Strömungsgeschwindigkeiten) während der Nachtstunden auftreten. Bedingt durch die hohe Wärmeeindringzahl und die hohe volumetrische Speicherkapazität von Normalbeton ist die tageszeitliche Schwankungsbreite der Außenwandtemperatur (~ 10 K) an der Grenze zum Fassadenzwischenraum geringer, als jene der Außenlufttemperatur (~ 15 K). Insbesondere fällt während der Nachtstunden die Außenlufttemperatur signifikant stärker ab als die Betonwandtemperatur. Da die Differenz dieser beiden Größen der entscheidende Faktor für die von der Wand an die Fassadenluft übertragene Wärmemenge und somit für den resultierenden Temperaturhub ist, erhöhen sich während der Nachtstunden die Strömungsgeschwindigkeiten. Es sei erwähnt, dass die Effektivität der dynamischen Aufnahme und (zeitversetzten) Abgabe der Solarenergie durch die Betonwand erst durch das Fehlen einer fassadenseitigen Wärmedämmung ermöglicht wird. Die einzelnen Beiträge zur einer stundenbezogenen Energiebilanz sind in Abb. 22 dargestellt. Exemplarisch werden die Werte für eine Mittagsstunde (hohe solare Einstrahlung) und eine Nachtstunde angeführt. Dabei bedeutet dQ_{Wand} die Änderung der gespeicherten Energie in der Betonwand, $Q_{Wand-Innenraum}$ die an den Innenraum abgegebene Wärme (Widerstand R_5 , Abb. 22), $Q_{Glas-Aussenraum}$ die über die vorgehängte Glasscheibe an den Außenraum abgegebene Wärmemenge (Widerstand R_1), $Q_{Strömung}$ jene über die freie Konvektion abgeführte Wärme und $Q_{Strahlung}$ den Netto-Betrag der zwischen Betonwand und der Glasscheibe ausgetauschten Strahlungsenergie.

Die Bilanzgleichung lautet:

$$G_{abs} = dQ_{Wand} + Q_{Wand - Innenraum} + Q_{Stromung} + Q_{Glas - Aussenraum}$$

Stunde des Tages	G_{abs}	dQ_{Wand}	$Q_{Wand-Innenraum}$	$Q_{Strömung}$	$Q_{Glas-Aussenraum}$	$Q_{Strahlung}$
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]
12 (Mittag)	159,32	102,82	3,38	15,23	37,89	38,06
24 (Mitternacht)	0,00	-76,21	4,65	23,15	48,41	48,62

Abb. 22 Energiebilanz für zwei repräsentative Stunden der drei aufeinanderfolgenden Sommertage

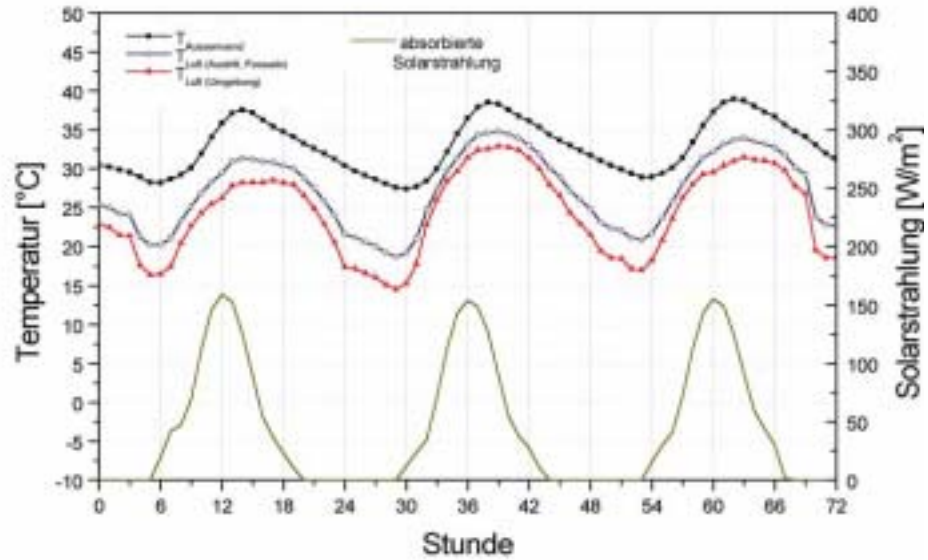


Abb. 23 Temperaturverläufe verschiedener Fassadenkomponenten an drei aufeinander folgenden sonnigen Sommertagen. Die gewählte Referenzstunde 0 entspricht der Stunde 4512 (08.07./00:00 Uhr) in der Gesamtjahresbetrachtung

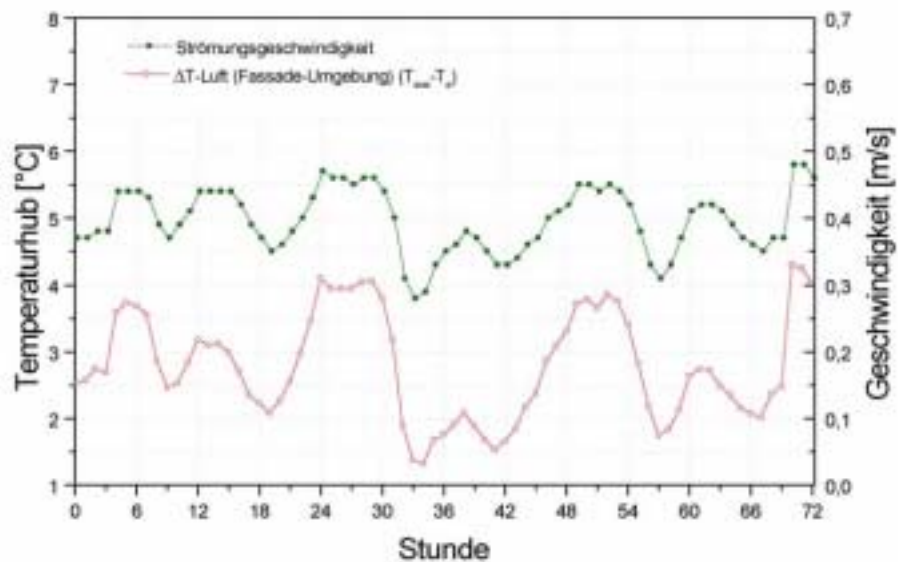


Abb. 24 Zeitlicher Verlauf des Temperaturhubes der Luftsäule im Fassadenzwischenraum und der resultierenden Auftriebsgeschwindigkeit an drei sonnigen Sommertagen. Die gewählte Referenzstunde 0 entspricht der Stunde 4512 (08.07./00:00 Uhr) in der Gesamtjahresbetrachtung

2.4.2. Winterfall, Klappen geschlossen

Der zeitliche Verlauf der Außenwandtemperatur (T_w), der Außentemperatur (T_a), der mittleren Temperatur der Fassadenluft (T_{aus}) und der an der Betonwand absorbierten Solarstrahlung (G_{abs}) ist für eine „eingeschwungene“ 3-Tagesperiode (72 Stunden: 18.01./00:00 - 20.01./24:00 Uhr) in Abb. 25 dargestellt. Der betrachtete Zeitraum repräsentiert zwei sonnenintensive und einen bedeckten Wintertag. Die im Vergleich zu den Sommermonaten wesentlich höhere Intensität der absorbierten Solarstrahlung (südorientierte Gebäudewand) bedingt einen signifikant höheren Temperaturhub der Oberfläche der Betonwand (bis zu 20 K). Gleichzeitig sind die solaren Einstrahlzeiten wesentlich kürzer als an einem Sonnentag in den Sommermonaten, was dazu führt, dass das Speichervermögen der Betonwand in Bezug auf die Dämpfung der Wandtemperaturen weniger stark wirksam ist. Konsequenterweise ergibt sich daraus ein stärkerer Temperaturabfall während der Nachtstunden. Die Energiebilanzen für eine Mittags- und eine Mitternachtsstunde sind in Abb. 26 dargestellt.

56

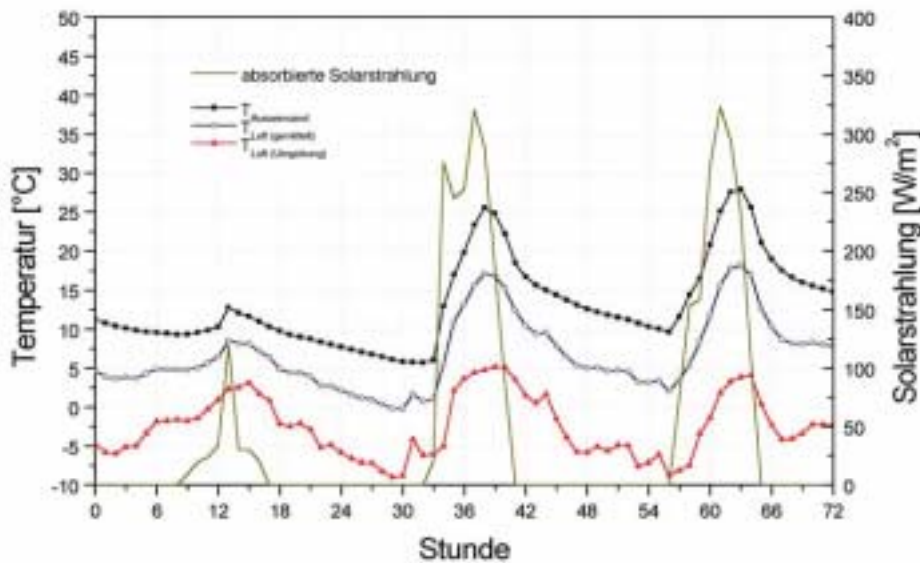


Abb. 25 Temperaturverläufe verschiedener Fassadenkomponenten an drei aufeinanderfolgenden Wintertagen. Die gewählte Referenzstunde 0 entspricht der Stunde 408 (18.01./00:00 Uhr) in der Gesamtjahresbetrachtung

Stunde	G_{abs}	dQ_{Wand}	$Q_{Wand-Innenraum}$	$Q_{Glass-Aussenraum}$	$Q_{Strahlung}$
	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]	[Wh/m ²]
36 (Mittag)	252,59	197,62	-5,56	60,53	53,41
48 (Mitternacht)	0,00	-62,77	-2,49	65,27	56,65

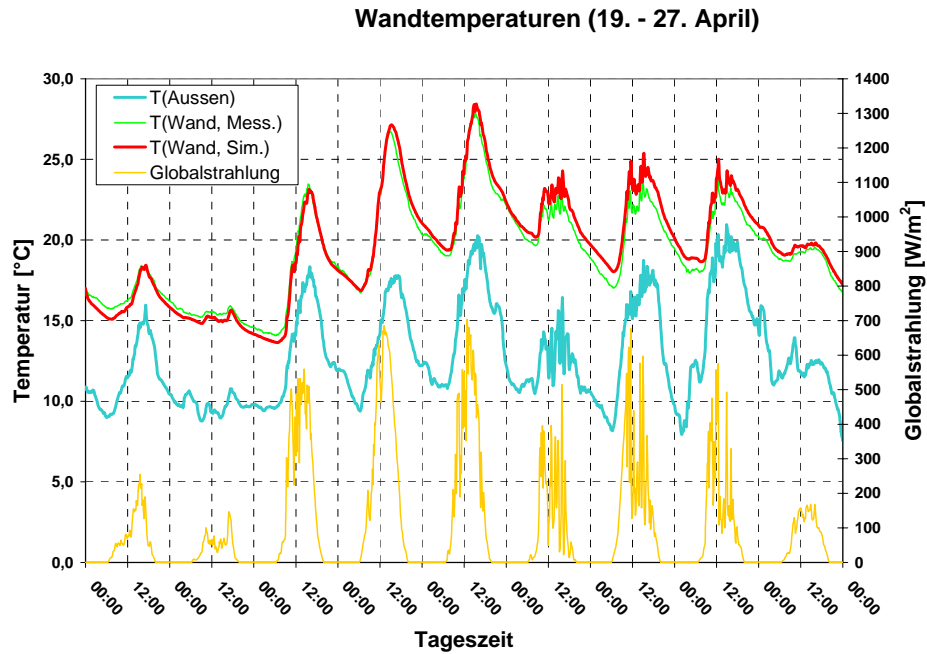
Abb. 26 Energiebilanz für zwei repräsentative Stunden der drei aufeinanderfolgenden Wintertage

2.5. Ergebnisse Phase 2 / Simulation

Als physikalische Vergleichsgrößen zwischen berechneten und experimentell ermittelten Daten wurden die Oberflächentemperaturen der Innenseite der Glasscheibe (T_g) und der Betonaußenwand (T_w) sowie die in der Spaltmitte des dritten Obergeschosses knapp unterhalb der Auslassklappen gemessene Fassadenlufttemperatur (T_l) gewählt. Die Zulufttemperatur an der unteren Fassadenklappe entspricht der gemessenen Außenlufttemperatur (T_a) und wird ebenso wie die über den Sensor S1 (siehe Kapitel 5 „Vorort-Messung“) gemessene Globalstrahlung der Simulation als zeitabhängige Randbedingung vorgegeben. Beide Größen werden in den Temperaturdiagrammen ergänzend angeführt. Die Erwärmung der Fassadenluft zwischen Eintritt und Austritt wird durch den Temperaturhub $dT = T_l - T_a$ quantifiziert und gemeinsam mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit in einem vierten Diagramm pro Messperiode dargestellt.

2.5.1. Messfall 1

Fenster - Klappen geschlossen, Übergangszeit (April 2002)



58

Abb. 27 gemessene und berechnete Wandtemperaturen im Vergleich

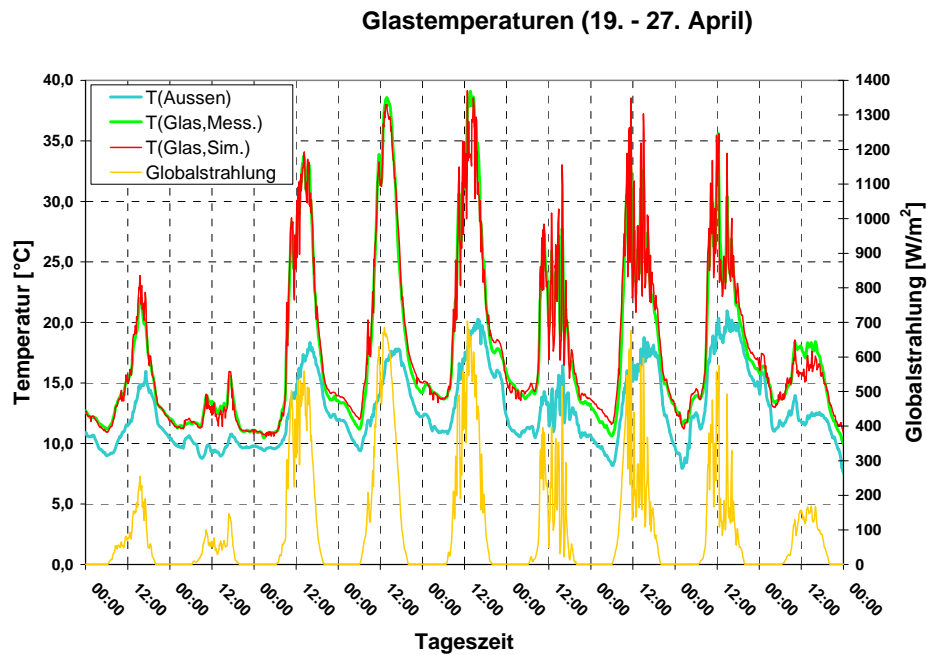


Abb. 28 gemessene und berechnete Glastemperaturen im Vergleich

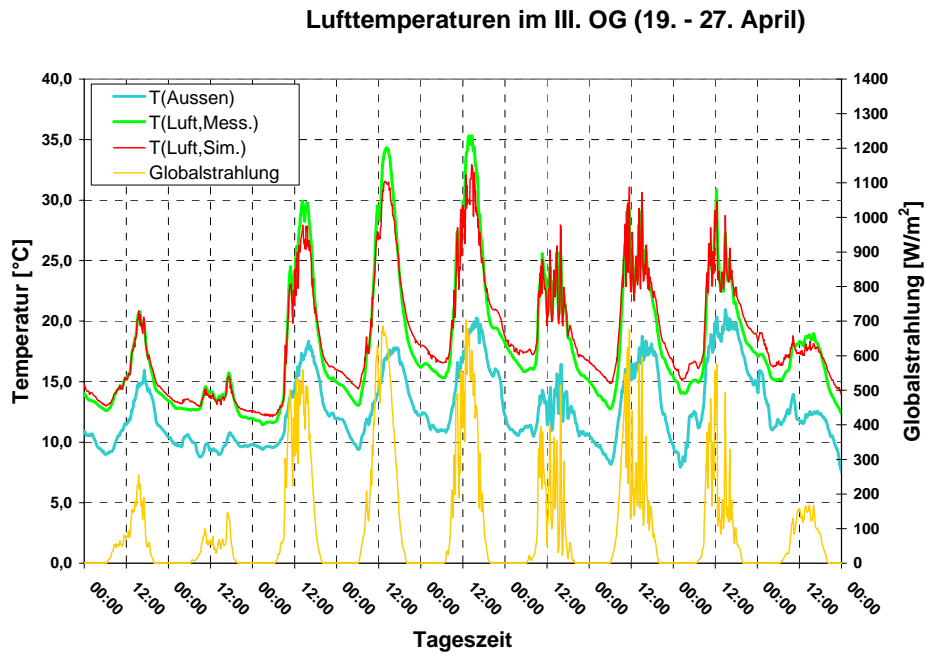


Abb. 29 gemessene und berechnete Fassadenlufttemperaturen im Vergleich

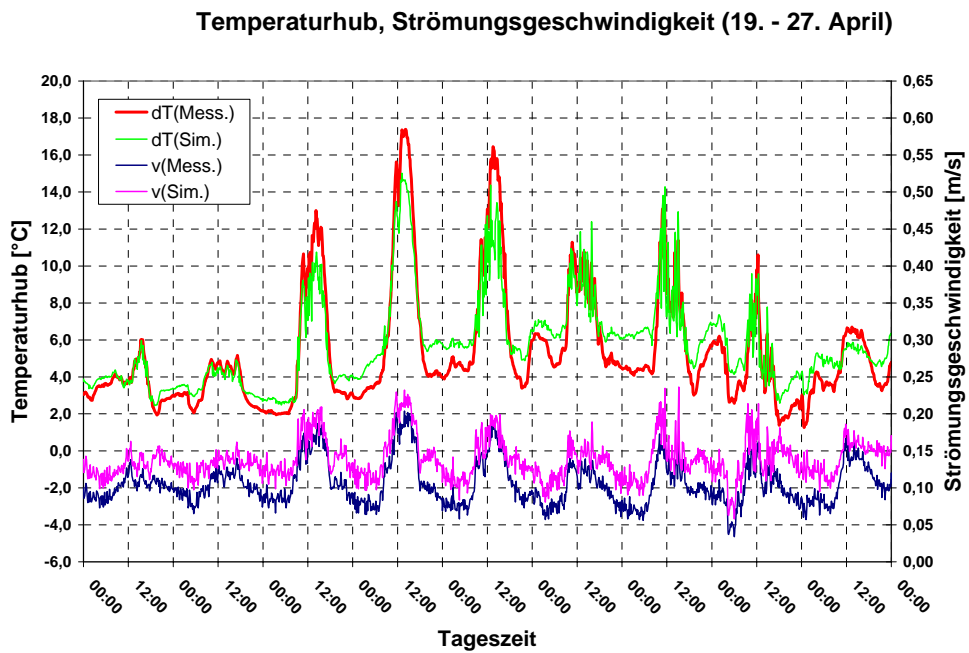


Abb. 30 gemessene und berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturhübe im Vergleich

Diskussion

Die experimentellen Untersuchungen und die Vorortanalyse der Klappenbeschaffenheit haben ergeben, dass auch bei geschlossenen Fassadenklappen, die Undichtigkeiten am Ein- und Austritt der Fassade ausreichend sind um eine Auftriebsströmung über den Kamineffekt ähnlich wie im Falle der geöffneten Klappen zu erzeugen. Eine Konvektionswalze über die Fassadenhöhe wurde nicht beobachtet und dementsprechend ist die Richtung der Strömungsgeschwindigkeiten in Abb. 30 vertikal nach oben. Die Strömungsgeschwindigkeiten erreichen allerdings aufgrund des hohen Strömungswiderstandes kaum mehr als 0,15 m/s, wodurch eine substantielle Erwärmung der aufsteigenden Luft bei ausreichendem Strahlungsangebot möglich ist.

Sowohl die Wandtemperaturen (T_w) als auch die Glastemperaturen (T_g) werden in ihrem dynamischen Verhalten von der Simulation gut wiedergegeben (maximale Abweichungen: $\pm 1,5$ K). Dies gilt sowohl für strahlungsarme als auch für strahlungsreiche Tage (zB 20. bzw. 22. April). Die maximalen Glastemperaturen liegen an strahlungsintensiven Tagen knapp unter 40 °C und damit nahezu 20 °C über der Außenlufttemperatur. Die jeweiligen Wandtemperaturen betragen etwa 25 - 28 °C. Die Erwärmung der Fassadenluft kann in dieser Situation aufgrund der langsamen Auftriebsströmung zu einem Temperaturhub von bis zu 17 °C führen (22. April).

Im Vergleich zu den Oberflächentemperaturen weisen die berechneten Lufttemperaturen und die entsprechenden Temperaturhübe im Falle eines großen Temperaturunterschiedes zwischen der Glas- und Wandoberfläche (strahlungsintensive Mittagszeit oder Nachtstunden) eine etwas größere Abweichungen (-2 K bis +3 K) zu den experimentellen Werten auf, wobei vor allem die geringere Schwankungsbreite zwischen maximaler und minimaler Lufttemperatur im Tagesgang bemerkbar ist (siehe Abb. 29: 21. - 23. April). Dies ist zumindest im Falle der Maximaltemperaturen darauf zurückzuführen, dass das im Kapitel 2.2 „Methode“ beschriebene Modell für den Energieaustausch zwischen Fassadenbegrenzung und Fassadenluft mit einer mittleren Oberflächentemperatur rechnet, welche gleichzeitig die obere Temperaturgrenze für die Erwärmung der Fassadenluft darstellt. An einigen besonders strahlungsintensiven Tagen liegt die gemessene Fassadenlufttemperatur allerdings knapp oberhalb dieser modellbedingten Grenze. Eine getrennte Modellierung der Wärmeeinträge von der Glas- als auch von der Wandseite könnte hier unter Umständen Verbesserungen bringen.

Die berechneten Strömungsgeschwindigkeiten liegen tendenziell etwas oberhalb der experimentellen Werte. Es ist allerdings zu bemerken, dass der gerätespezifisch gültige Messbereich (Hitzdrahtanemometer, siehe Kapitel 5 „Vorort-Messung“) sich oberhalb von 0,125 m/s befindet. Für die gemessenen Werte oberhalb dieser Grenze liegen ein Grossteil der berechneten Werte im Bereich der experimentellen Messgenauigkeit ($\pm 0,05$ m/s). Weiters stammt der gemessene Wert von einer einzelnen (spaltmittig angeordneten) Fühlerposition und ist daher streng genommen kein querschnittsgemittelter sondern ein lokaler Wert. Im Falle hoher Oberflächentemperaturen wird die Strömungsgeschwindigkeit nahe der Oberflächen höher sein als in der Spaltmitte, wodurch auch die mittlere Auftriebsströmung angehoben würde.

2.5.2. Messfall 2

Fenster - Klappen geschlossen, Übergangszeit (Mai 2002)

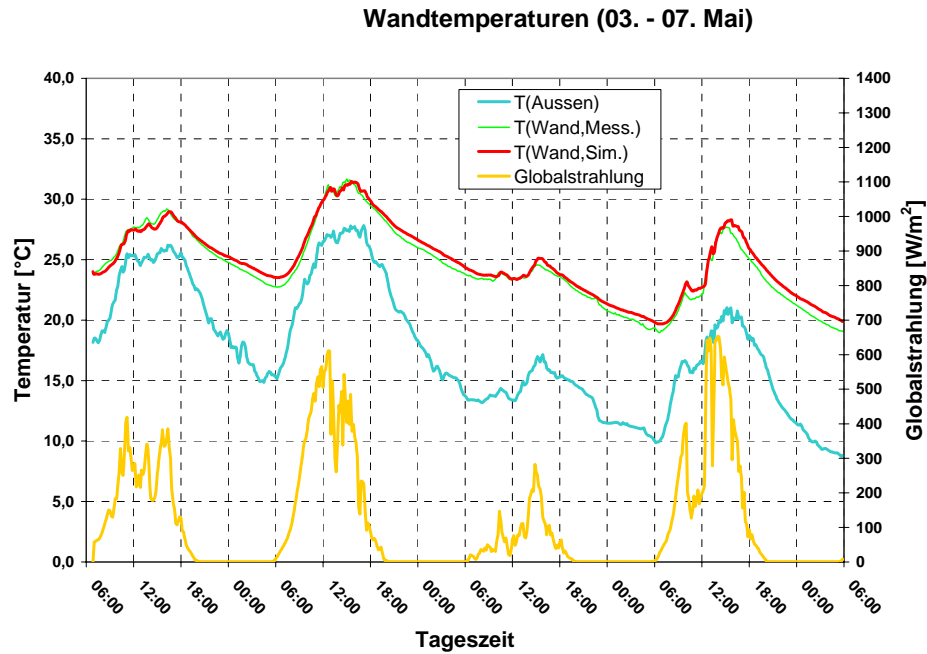


Abb. 31 gemessene und berechnete Wandtemperaturen im Vergleich

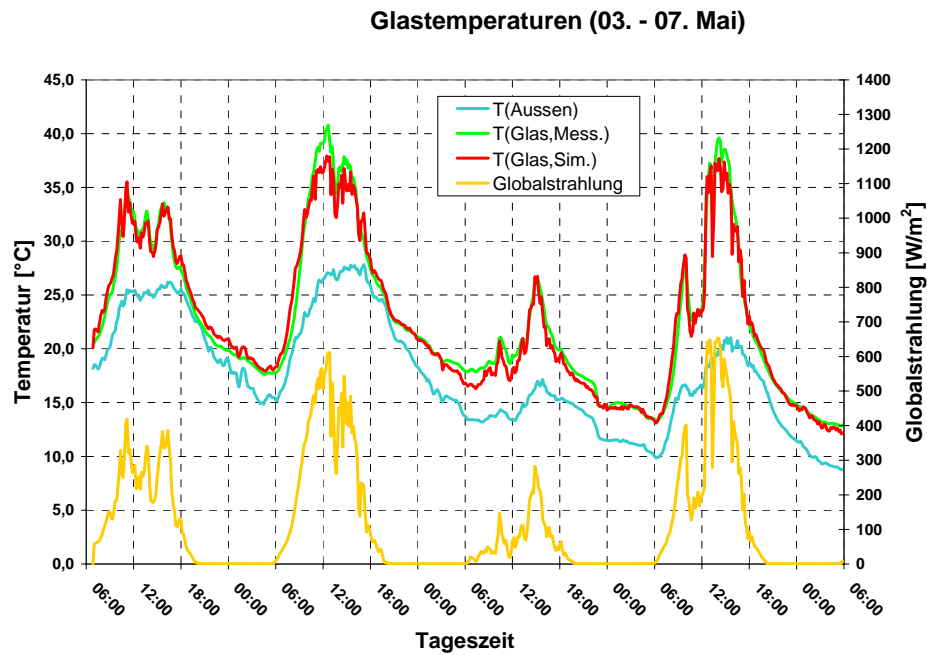
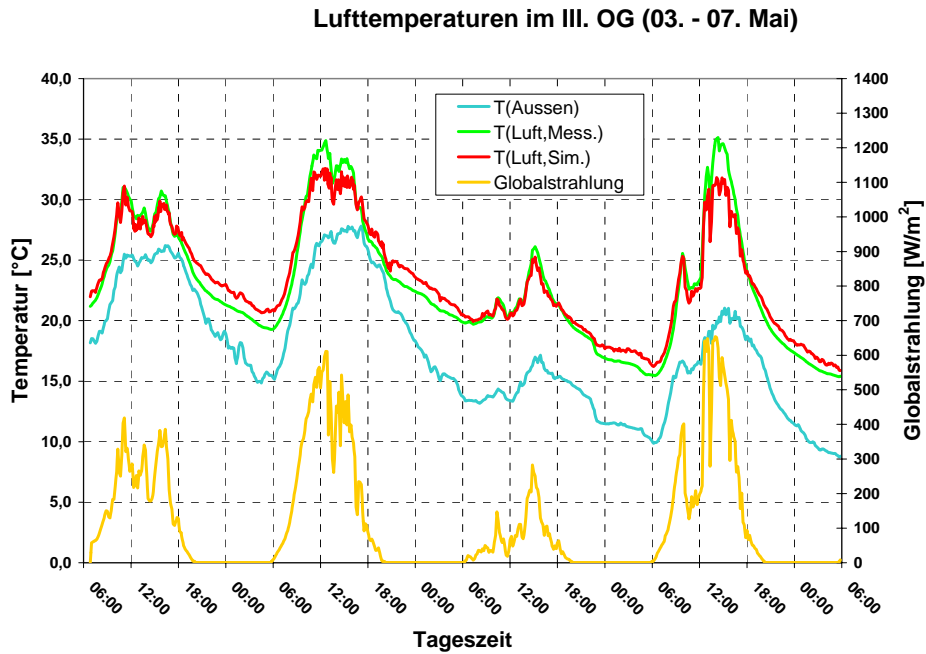


Abb. 32 gemessene und berechnete Glastemperaturen im Vergleich



62

Abb. 33 abgemessene und berechnete Fassadenlufttemperaturen im Vergleich

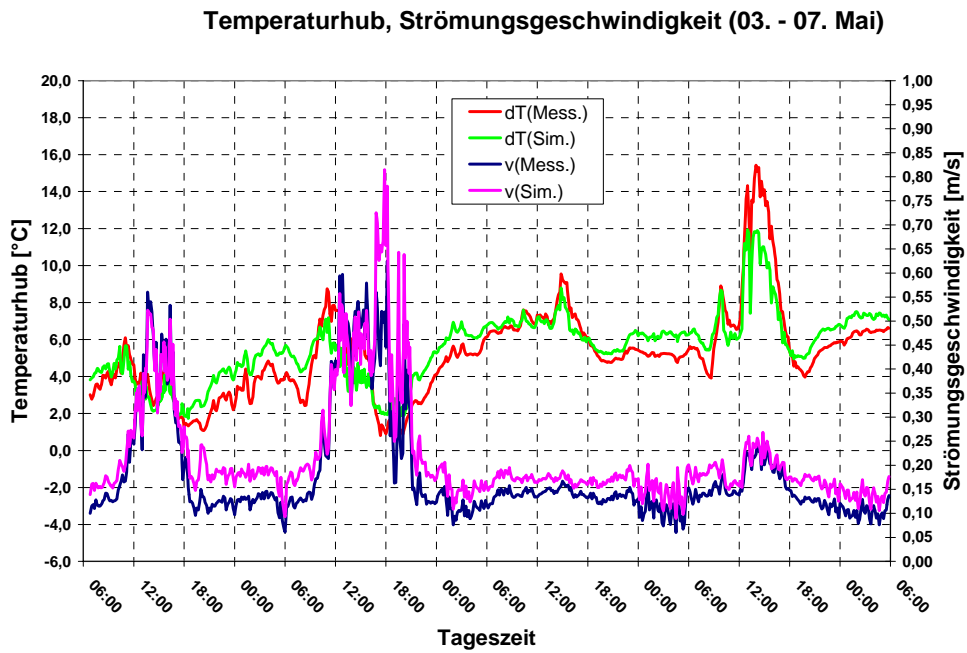


Abb. 34 abgemessene und berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturhübe im Vergleich

Diskussion

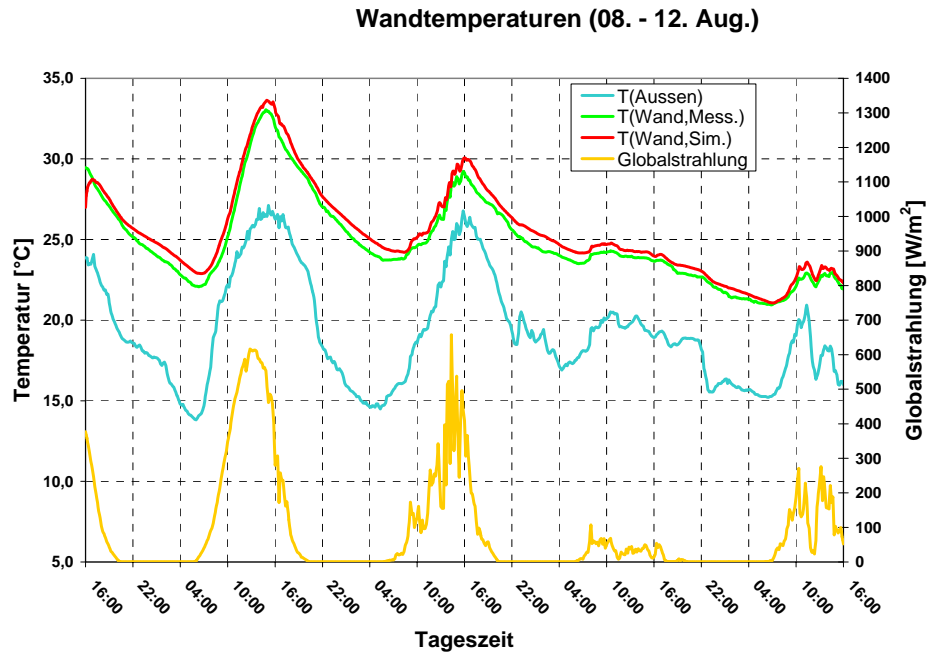
Die thermischen Verhältnisse in der Fassade sind ähnlich wie im Messfall 1/ Fenster - April, wobei allerdings die Außentemperaturen am 3. und 4. Mai deutlich höher liegen als an den wärmsten Tagen der ersten Messperiode (23. und 26. April). Dies führt dazu, dass trotz signifikantem solarem Energieeintrag die Temperaturhübe weniger als 10 K betragen. Außerdem lässt der geringe Wert der Druckverlustkonstanten C in den Nachmittagsstunden der beiden Tage die Strömungsgeschwindigkeiten bis zu 0,6 m/s anwachsen, was den Temperaturhub weiter verringert. Die Analyse zeigt, dass diese erhöhten Geschwindigkeiten mit dem Auftreten signifikant erhöhter Windgeschwindigkeiten (bis zu 5 m/s) korrelieren, was die Bedeutung des Windeinflusses auf die Strömungsverhältnisse in der Fassade auch bei geschlossenen Klappen dokumentiert.

Die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Oberflächentemperaturen ist wiederum als gut zu bewerten, wobei die maximalen Abweichungen ($dT = -2,5 \text{ °C}$) in den Mittagsstunden an der Glasoberfläche zu verzeichnen sind. Die Abweichungen für die erwärmte Fassadenlufttemperatur liegen im Bereich von -2 bis +3 °C.

Im Bereich der Strömungsgeschwindigkeiten zeigt sich die Tendenz, dass die berechneten Werte etwas größer sind als die gemessenen, wobei diese Abweichung verringert ist, sobald die Werte deutlich oberhalb der unteren Messbereichsgrenze von 0,125 m/s liegen. Für mögliche Erklärungsansätze dieser Abweichung siehe Messfall 1.

2.5.3. Messfall 3

Fenster - Klappen offen, Sommer (August 2002)



64

Abb. 35 gemessene und berechnete Wandtemperaturen im Vergleich

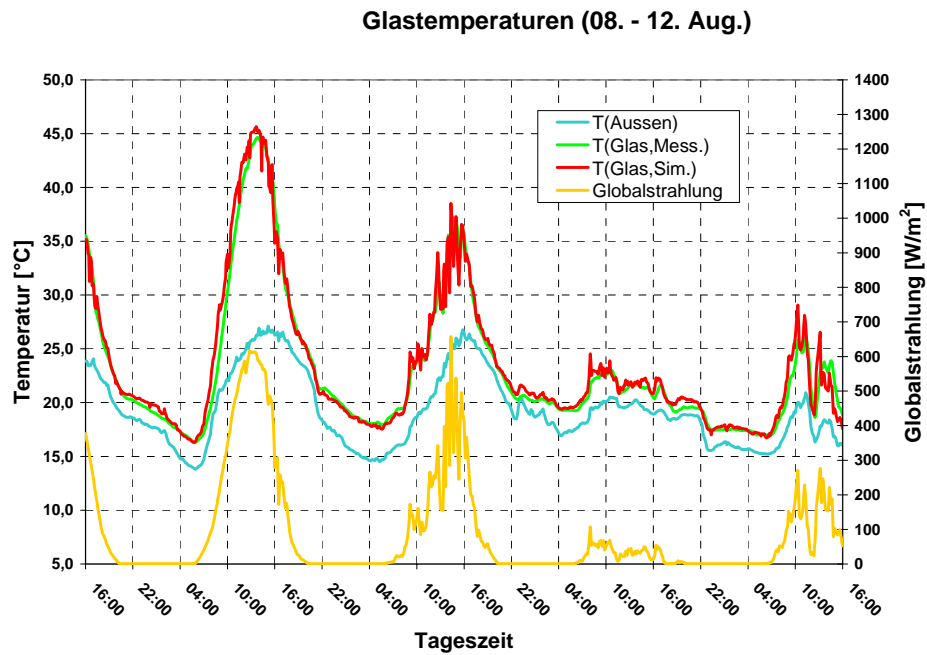


Abb. 36 gemessene und berechnete Glastemperaturen im Vergleich

Lufttemperaturen im III. OG (08. - 12. Aug.)

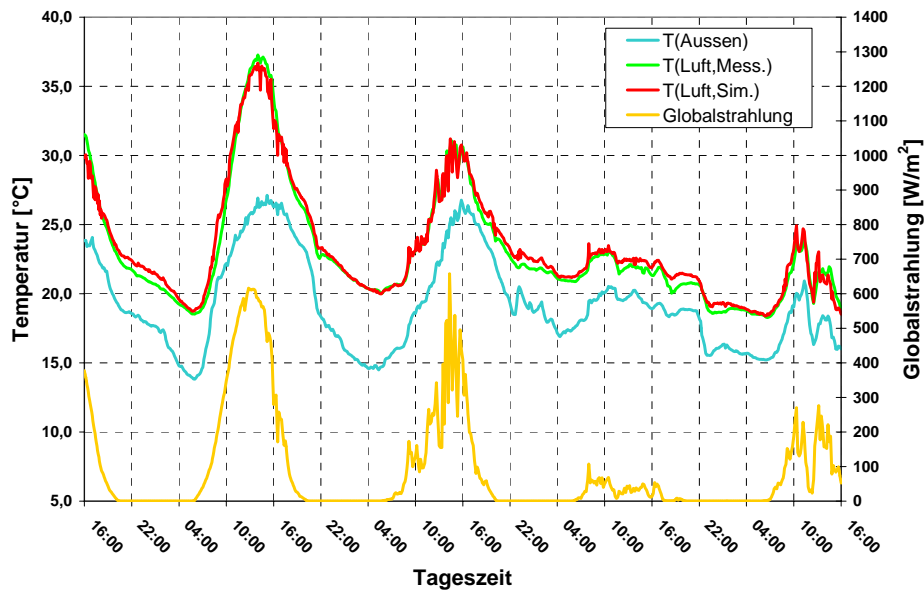


Abb. 37 gemessene und berechnete Fassadenlufttemperaturen im Vergleich

Temperaturhub, Strömungsgeschwindigkeit (08. - 12. Aug.)

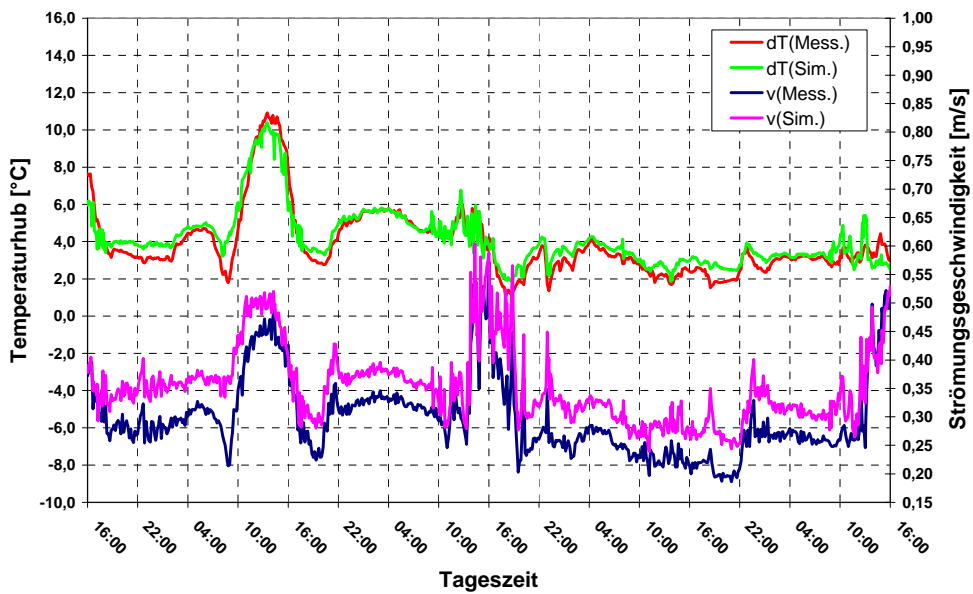


Abb. 38 gemessene und berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturhübe im Vergleich

Diskussion

Die geöffneten Fassadenklappen führen zu einer signifikanten Verminderung der Druckverluste im Fassadenspalt und somit zur Möglichkeit einer thermisch getriebenen Auftriebsströmung (Kamineffekt). Ein hohes solares Strahlungsangebot ($G = 600 \text{ W/m}^2$) kann die Glasscheibe bei Außentemperaturen von 26 °C bis auf 45 °C erwärmen (9. August) und dieses Temperaturniveau zur effektiven Erwärmung der Fassadenluft nutzen. Der resultierende Temperaturhub ergibt sich bei einer Auftriebsgeschwindigkeit von etwa $0,5 \text{ m/s}$ zu $dT = 10 \text{ °C}$ wodurch die Austrittstemperatur der Fassadenluft und die mittleren Oberflächentemperatur \bar{T} ähnliche Werte annehmen ($T_1 = 37 \text{ °C}$).

Aufgrund der fehlenden Außendämmung an der Betonwand wird ein Teil der tagsüber gespeicherte Solarenergie in den Nachtstunden an die Fassadenluft abgegeben. Aufgrund der thermischen Trägheit der Betonwand kühlt sich diese in den Nachtstunden wesentlich schwächer ab als die Außenluft, wodurch ein signifikanter Temperaturgradient und ein entsprechender konvektiver Wärmestrom entsteht. Dies führt schlussendlich auch während der Nachtstunden zu Temperaturhuben von bis zu 6 °C und der Ausbildung einer Auftriebsströmung von ca. $0,35 \text{ m/s}$.

Die berechneten Temperaturen stimmen sowohl für die Oberflächen als auch für die Fassadenlufttemperatur gut mit den gemessenen Daten überein. Einzig die Wandtemperaturen liegen in der Simulation tendenziell etwas über den experimentellen Werten (etwa 1 °C). Die Unsicherheit in den Modellansätzen für den konvektiven Wärmeübergang (Rauhigkeit der Oberfläche, Modellformel für Mischkonvektion, etc.) könnte hier einen Erklärungsansatz bieten.

Beim Vergleich der Strömungsgeschwindigkeiten ergibt sich ein ähnliches Bild wie im Fall der geschlossenen Fassade, wobei auch hier die experimentelle Messwertgenauigkeit, die $\pm 0,05 \text{ m/s}$ beträgt und mit steigender Fassadenlufttemperatur zunimmt, zu beachten ist (siehe Kapitel 5 „Vorort-Messungen“). Weiters beruht die Berechnung der Druckverlustkonstanten C über die Formel (1) auf einer linear gemittelten Fassadentemperatur, während die reale Erwärmung im unteren Fassadenabschnitt stärker ausfallen wird, als im oberen. Eine entsprechende logarithmische Temperaturmittelung würde zu einer geringfügigen Erniedrigung der berechneten Strömungsgeschwindigkeiten führen, hätte allerdings den Nachteil, dass sowohl die experimentell ermittelte Glas- als auch Wandtemperatur zur Bestimmung der Konstanten C herangezogen werden müsste.

2.5.4. Messfall 4

Wand - Klappen offen, Sommer (September 2002)

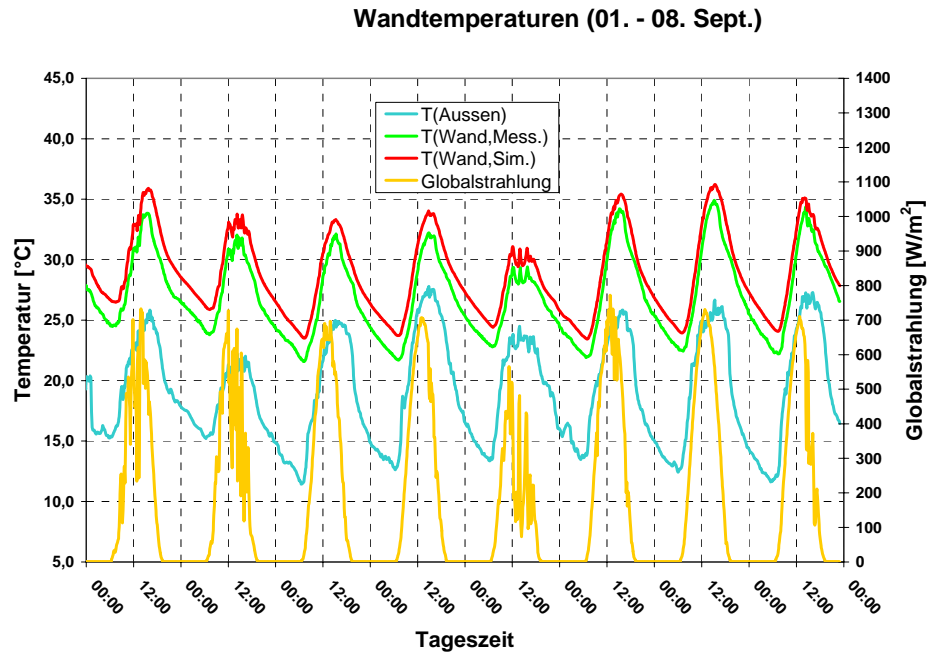


Abb. 39 gemessene und berechnete Wandtemperaturen im Vergleich

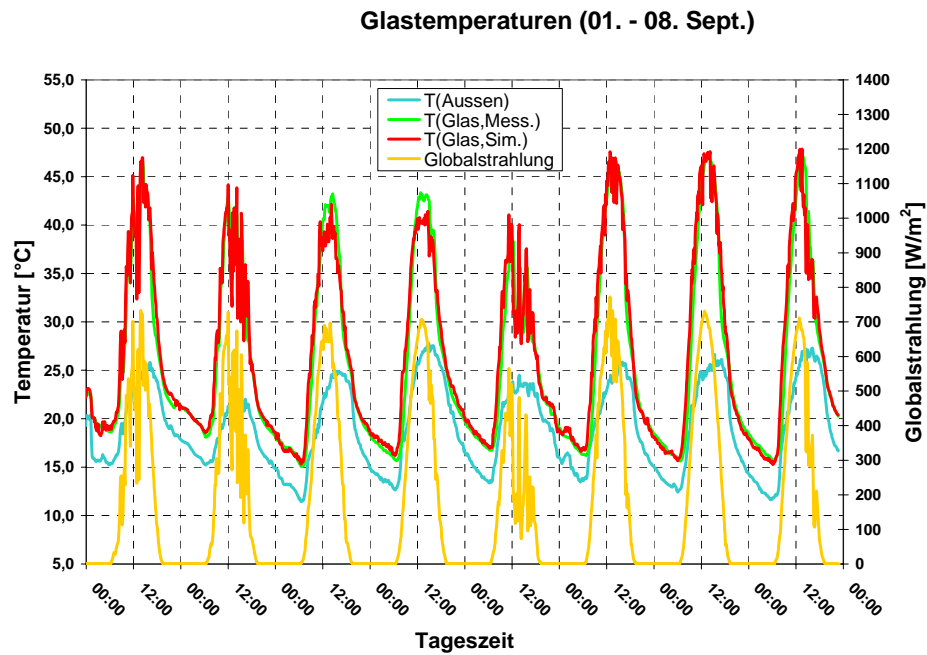
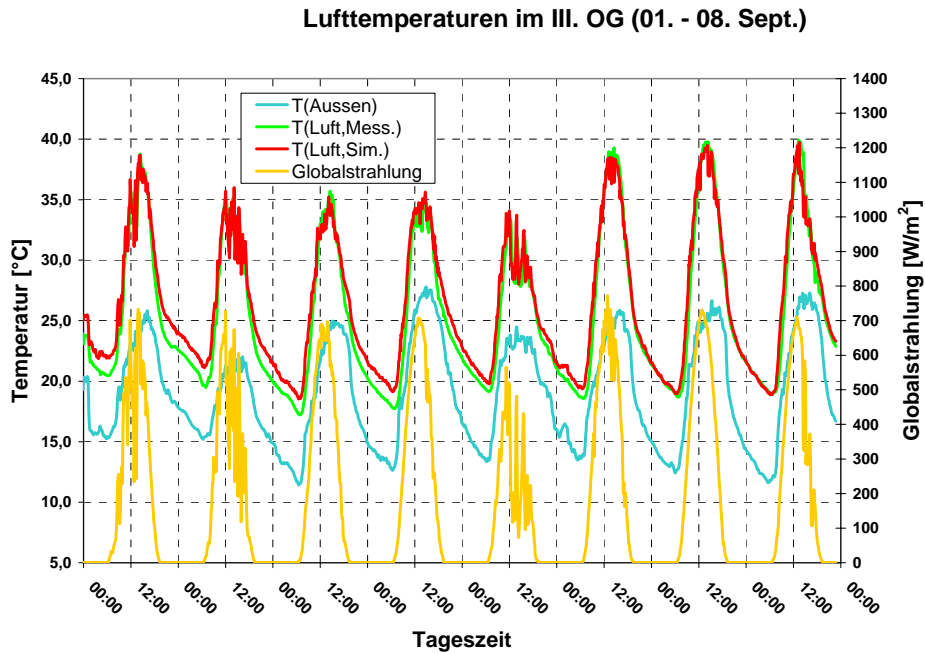


Abb. 40 gemessene und berechnete Glastemperaturen im Vergleich



68

Abb. 41 gemessene und berechnete Fassadenlufttemperaturen im Vergleich

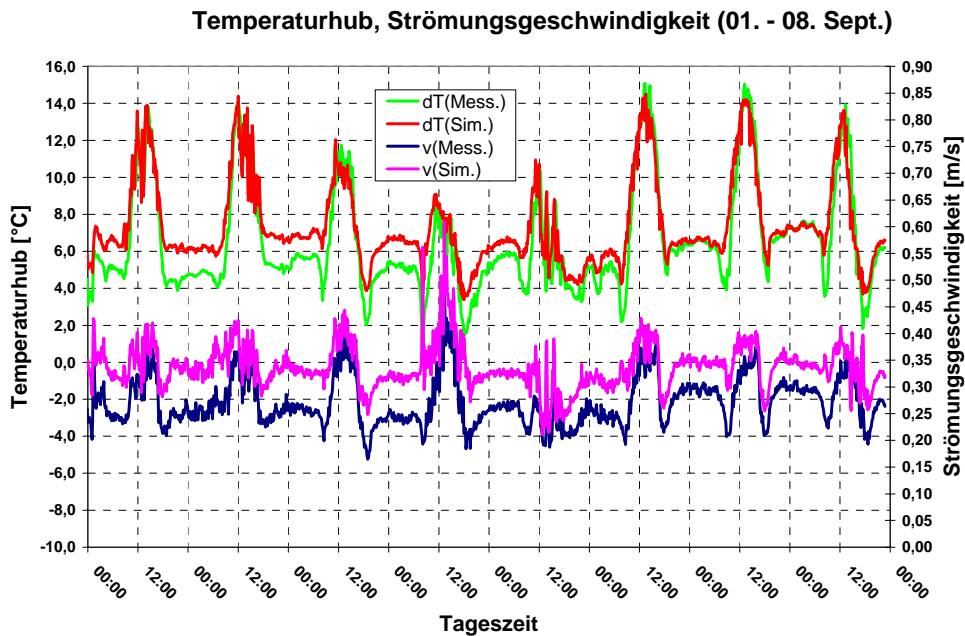


Abb. 42 gemessene und berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturhübe im Vergleich

Diskussion

Hierbei handelt es sich um eine neuntägige Schönwetterperiode, in der die Austrittstemperatur der Fassadenluft zwischen maximal 40 °C (Mittagszeit, starke Einstrahlung) und minimal 20 °C (Nacht- und Morgenstunden) schwankt. Die berechneten Wandtemperaturen liegen wie im Messfall 3/Fenster - August 1 - 2 °C über den experimentellen Werten (für eine mögliche Erklärung siehe Messfall 3). Bei den Lufttemperaturen gibt es Abweichungen ähnlicher Größenordnung während der Nachtstunden. Die Glastemperaturen werden für den gesamten Zeitraum gut wiedergegeben. Bei den berechneten Strömungsgeschwindigkeiten sind die Resultate und Interpretationen ebenfalls ähnlich jenen aus Messfall 3. Das über die Simulation ermittelte, etwas schwächere Auskühlverhalten der Fassadenluft während der Nacht- und Morgenstunden führt insbesondere beim Anstieg der Außenlufttemperatur nach Sonnenaufgang zu schwächer ausgeprägten Geschwindigkeitsabnahmen.

2.6. Zusammenfassung und Ausblick

Das hier verwendete Modell basiert auf dem Konzept eines eindimensionalen thermischen Netzwerkes und wurde in seinem Detaillierungsgrad so konzipiert, dass Simulationszeiträume von etlichen Wochen mit einem für die Praxis vertretbaren rechentechnischen Aufwand durchgeführt werden können. Der Vergleich mit den experimentellen bzw. gemessenen Daten aus insgesamt vier Messperioden im Fassadenbereich „Wand“ (zwei Messperioden sind dem Szenario „geschlossene Fassadenklappen“ und zwei Messperioden dem Szenario „offenen Fassadenklappen“ zuzuordnen) zeigt folgende Ergebnisse:

Die Übereinstimmung zwischen berechneten und experimentell ermittelten Temperaturwerten an der vorgehängten Glasscheibe, der Betonwandoberfläche und der Luft an der Austrittsöffnung des Fassadenspalttes ist für die untersuchten Messreihen als gut zu bewerten, wobei Abweichungen von maximal $\pm 3 \text{ °C}$ auftreten. Die Messreihen umfassen dabei sowohl Tag- als auch Nachtstunden und beinhalten unterschiedlichste klimatische Bedingungen im Bezug auf solare Einstrahlung, Außenlufttemperaturen und Windverhältnisse.

Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten (v_m) sind ebenfalls reproduzierbar, wobei allerdings für kleine Strömungsgeschwindigkeiten ($< 0,3 \text{ m/s}$) die berechneten Werte tendenziell größer sind als die gemessenen. Die Abweichungen liegen im Bereich von $0,05 - 0,1 \text{ m/s}$. Die untere Grenze für die von den eingesetzten Hitzdrahtanemometern erfassbaren Messwerte ist $0,125 \text{ m/s}$. Die Messwertungenauigkeit liegt im Bereich von $\pm 0,05 \text{ m/s}$.

Die wesentliche Voraussetzung für die Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment/Messung ist die genaue Kenntnis einer Vielzahl von konstruktiven und (bau)physikalischen Randbedingungen sowie die Berücksichtigung aller wesentlichen Energietransportmechanismen. Dies betrifft im besonderen Maße

- (1) die Kennwerte der Strahlungstransmission, Absorption und Reflexion der vorgehängten Glasfassade. In dem hier untersuchten Fall wurden aufgrund der Satinierung des Glases etwa 50 % der Solarstrahlung absorbiert, was bei ausreichender Einstrahlungsintensität zu experimentellen bzw. errechneten Glastemperaturen von bis zu 45 °C führte. Aufgrund der dabei auftretenden hohen Temperaturunterschiede zwischen Glasscheibe und Betonwand bzw. Glasscheibe und Außenraum ist eine volldynamische Berücksichtigung des langwelligen Strahlungsaustausches nach innen und außen notwendig.
- (2) die Kennwerte für die Strahlungsabsorption an der Primärfassade des Gebäudes (Betonwand bzw. innere Glasebene). Diese Größe in Kombination mit der Wärmeeindringzahl ist maßgeblich für die Speicherung und zeitversetzte Abgabe der Solarenergie verantwortlich. Ihre genaue Kenntnis ist vor allem für Berechnungen des solaren Energieeintrages in das Gebäude notwendig.

- (3) die Kennwerte für die konvektiven Wärmeübergänge an der Glasscheibe und der Betonwand. Im Fassadenspalt wurde je nach Strömungsart (freie, erzwungene oder gemischte Konvektionsströmung) der Wärmeübergang mit Modellgesetzen für die mittlere Nußeltzahl beschrieben. Windgeschwindigkeitsdaten dienten als Grundlage für die Berechnung des konvektiven Wärmetransportes an der Außenseite der Glasscheibe. In Kombination mit den Aussagen über den langwelligen Strahlungsaustausch unter Punkt (1) ergibt sich, dass die Berechnung des dynamischen Energietransportes zwischen Scheibe und Außenraum mit Normwerten für den kombinierten Wärmeübergang (zB $\alpha = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ nach [DIN 4701]) zu substantiellen Abweichungen zwischen Experiment und Simulation führen.
- (4) Einfluss von Luftströmungen außerhalb der Fassade (Windkraft) auf die Strömungsverhältnisse innerhalb des Fassadenspalt. Je nach Dichtigkeit der Fassadenelemente kann dieser Einfluss auch bei geschlossenen Ein- bzw. Auslassklappen substantiell sein (siehe Messfall 2/Fenster - Klappen geschlossen, Übergangszeit). Für windstarke Regionen (oder bei der Untersuchung von hohen Fassaden) ist dieser Effekt in der Simulation auf jeden Fall zu berücksichtigen.

Das bisher Dargestellte zeigt die Komplexität und Vielfältigkeit der bei dieser Art der Fassadenkonstruktionen auftretenden physikalischen Effekte und den damit verbundenen Anforderungen an die Simulation. Der experimentell erfasste und simulationstechnisch untersuchte Fassadenabschnitt Betonaußenwand - Luftspalt - Glasfassade stellt in diesem Zusammenhang eine relativ einfache Konstruktionsvariante dar. Die hierbei gewonnen Erkenntnisse können als Grundlage bei der Weiterentwicklung dieser Modelle für komplexere Fassadenkonstruktionen mit teiltransparenten Außenwänden (Doppelfassaden) herangezogen werden.

Bei vergleichbaren konstruktiven und thermischen Voraussetzungen (unsegmentierte Vorhangfassade, geringer Luftaustausch zwischen Fassadenspalt und dahinterliegenden Räumlichkeit über Fensterlüftung, etc.) ist zu erwarten, dass ein entsprechend erweitertes Simulationsmodell eine ähnlich gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation liefert, wie sie in dieser Arbeit erzielt wurde.

3. Strömungssimulation

Ass.-Prof. DI Dr. Walter Meile, DI Ewald Reisenberger,
DI Dr. Gerhard Ranegger

3.1. Einleitung

Im vorliegenden Abschnitt wird die numerische Simulation der Strömungsverhältnisse im Luftspalt der doppelschaligen Fassade präsentiert, die dem direkten Vergleich der Vorort-Messungen und Gebäudesimulationen sowie der gegenseitigen Evaluierung dient. Die fluidmechanischen Simulationen wurden in drei Phasen durchgeführt, und zwar eine erste Abschätzung, eine detaillierte Berechnung anhand erster Messdaten für einen Messfall einschließlich detaillierter Vergleiche, sowie die Simulation der verbleibenden Messfälle nach vollständigem Vorliegen und Evaluierung der Messdaten.

Phase 1 / Abschätzung

Im ersten Schritt wurden die fluidmechanischen Berechnungen ohne Berücksichtigung der Strahlung bzw. des Wärmeüberganges über die Glasfassade sowie die Betonwand vorgenommen. Daraus sollten die notwendigen Anhaltspunkte zur Positionierung der Fühler zur messtechnischen Erfassung von Geschwindigkeiten und Temperaturen abgeleitet werden, und zwar für beide zu betrachtenden Abschnitte getrennt. Den Ausgangspunkt bildeten dabei vorerst die wärmetechnischen Berechnungen (Kapitel 2), die sich auf einen vorhandenen Klimadatensatz stützten. Dazu wurden anhand der verfügbaren Datensätze mehrere thermische Simulationsberechnungen für einen Sommerfall bzw. einen Winterfall durchgeführt. Die berechneten Temperaturen der Betonwand bzw. der vorgesetzten Glasscheibe wurden als Randbedingungen für die fluidmechanischen Berechnungen verwendet, was die Berücksichtigung von Strahlung und Wärmeübergang über diese Berandungen nicht notwendig machte. Softwarebedingt war dabei von über die Gebäudehöhe konstanten Wandtemperaturen auszugehen. Die Ergebnisse werden für zwei „Sommerfälle“ und einen „Winterfall“ im Abschnitt „Wand“ dargestellt sowie einen Sommerfall im Abschnitt „Fenster“. Die Lufttemperatur am Austritt des Spaltes sowie die mittlere Geschwindigkeit liegen als Messergebnisse zum Vergleich mit der fluidmechanischen Simulation vor. Die erreichte Übereinstimmung kann als sehr gut bezeichnet werden.

Phase 2 / Vorsimulation

In der zweiten Phase wurden die fluidmechanischen Simulationen für den bis zum Durchführungszeitpunkt messtechnisch erfassten Messfall „Wand - Winter“ durchgeführt. Die zur Simulation erforderlichen Randbedingungen wurden einerseits aus den gemessenen Wetterdaten sowie Messdaten für die Oberflächentemperaturen bestimmt, und andererseits aus jenen Oberflächentemperaturen, die im Rahmen der thermischen Gebäudesimulation ermittelt wurden. Detaillierte Vergleiche wurden durchgeführt für Geschwindigkeiten und Temperaturen in den Messpunkten, um den Einfluss der Oberflächentemperaturen auf die Strömung im Luftspalt abschätzen zu können.

Phase 3 / Simulation

In der dritten Phase wurden alle verbleibenden Messfälle nach vollständigem Vorliegen der Messergebnisse bzw. nach deren Evaluierung berechnet. Aus Gründen des enormen Simulationsaufwandes wurden für die erforderlichen Randbedingungen ausschließlich Messdaten verwendet und auf den Vergleich mit Werten aus der Gebäudesimulation verzichtet.

3.2. Durchführung

Aus Gründen des erforderlichen Aufwandes (Gittererstellung und insbesondere Rechenzeit) wurden zwei charakteristische Abschnitte (von unten nach oben durchlaufend im Bereich des Treppenhauses und den direkt angrenzenden Abschnitt mit Fenstern) der Südfassade nachgebildet. Für beide Abschnitte ist wegen des numerischen Aufwandes eine getrennte Modellierung notwendig.

Zur Stellung korrekter Bedingungen an den seitlichen Abschnittsbegrenzungen wurden an diesen Grenzen „feste Wände“ in Form von flexiblen Schläuchen montiert, um den Luftaustausch zwischen den Abschnitten bzw. mit dem Rest der Fassade zu verhindern. Die rechte Begrenzung des Abschnittes „Wand“ wurde vorerst als Symmetrieebene festgelegt, was in den Simulationen zu Phase 1 berücksichtigt wurde. Bei der Montage der Messgeräte und Fühler wurde auch am rechten Rand des Abschnittes „Wand“ ein Dichtschlauch montiert. Dabei wurde der Abschnitt „Wand“ um eine Rasterweite gegenüber der ursprünglichen Festlegung erweitert. Beide Änderungen wurden in den weiteren Simulationen berücksichtigt.

74

3.3. Simulationsabschnitte

Abb. 115, Seite 133, zeigt die beiden Abschnitte sowie die montierten Trennwände, die exakte Randbedingungen in der Simulation gewährleisten sollten, und damit weiter einen korrekten Vergleich zwischen Simulation und Messung. Der Abschnitt „Fenster“ umfasste sieben Rastereinheiten mit einer Gesamtbreite von 6,58 m. Der Abschnitt „Wand“ im Bereich des Treppenhauses umfasste fünf Rastereinheiten mit einer Gesamtbreite von 4,7 m. Diese geringere Breite konnte gewählt werden, da der rechte Rand mit Sicherheit Strömungsbedingungen aufwies, die durch eine sogenannte Symmetriebedingung in der Simulation korrekt beschrieben werden konnten. Wie schon erwähnt, wurde dieser Abschnitt später um eine Rasterweite (0,94 m) verbreitert, womit sich eine Gesamtbreite von 5,64 m ergab. Auch wurde ein Dichtschlauch als „feste Wand“ montiert.

3.4. Kurzbeschreibung des Simulationsprogramms

Die Berechnungen wurden mit dem Programmpaket FLUENT [FLUENT 5] durchgeführt. FLUENT ist eines der modernsten Programmpakete zur Simulation von Strömungs- und Wärmeübertragungsvorgängen in komplexen Geometrien. Die Modellierung kann 2- und 3-dimensional erfolgen, wobei sowohl strukturierte als auch unstrukturierte lösungsangepasste Gitter verschiedenster geometrischer Formen auch gemischt zur Anwendung kommen können. Die Möglichkeiten zur Simulation umfassen inkompressible und kompressible Strömungen, stationäre und

instationäre Vorgänge, reibungsfreie, laminare und turbulente Strömungen, Wärmeübergang bei freier und erzwungener Konvektion, Kopplung von Wärmeleitung und Konvektion sowie Wärmestrahlung. Diese Aufstellung ist keinesfalls vollständig, sondern zeigt die für die vorliegende Problemstellung wichtigsten Kapazitäten.

Die vielfältigen Möglichkeiten zur numerischen „Lösung“ von Gleichungssystemen sind allerdings nicht für alle Problemstellungen gleichermaßen gut geeignet, was bedeutet, dass oft problemspezifisch angepasste Kombinationen von Schemata und Algorithmen verwendet werden müssen. FLUENT bietet die Möglichkeit zur Auswahl unterschiedlichster Kombinationen zur Lösung aller beschreibenden Gleichungen und gewährleistet dadurch weitgehende Flexibilität.

3.5. Gittererstellung

Die Gitter zur Diskretisierung der Abschnitte „Wand“ bzw. „Fenster“ sind in den Abb. 44 und Abb. 46 skizziert.

3.5.1. Abschnitt „Wand“

Das Gitter im Abschnitt „Wand“ konnte in Höhe und Breite relativ gleichmäßig gewählt werden. In den Übergangsbereichen zu festen Wänden (Beton-, Glaswand, Fensterlaibungen) wurden engere Gitterabstände vorgesehen.

Die drehbaren Klappen in den Bereichen von Lufteintritt bzw. -austritt wurden in der Simulation nicht nachgebildet. Zur Verdeutlichung sind diese Klappen in Abb. 43 dargestellt. In Phase 1 wurden die entsprechenden Öffnungen in der Simulation als Rechteckquerschnitte mit entweder freiem Eintritt bzw. Austritt (Klappen offen) oder vollständig versperrt (Klappen geschlossen) nachgebildet.

Die Insektenschutzgitter (Abb. 114, Kapitel 5.1.), die nahe der Luftaustauschöffnungen angebracht sind, wurden als Druckverlust einbezogen. Aufgrund der geringen offenen Fläche von 22 % bedingen die Schutzgitter einen Druckverlust, der im Vergleich zu jenem der geöffneten Klappen wesentlich größer ist. Dadurch kann die Vernachlässigung der Nachbildung der geöffneten Klappen, oder zumindest deren Auswirkung auf den Druckverlust und damit den Massenstrom, begründet werden.

Geringe Abweichungen von der Realität sind dadurch zu erwarten, dass die Umlenkung von ein- bzw. austretendem Luftstrom nicht berücksichtigt wird. Wegen der Schlankheit des Kanals zwischen Fassade und Wand und der geringen Geschwindigkeiten erscheint dies aber unerheblich.

Der Fall „Klappen geschlossen“ musste später korrigiert werden, da Beobachtungen vor Ort gezeigt haben, dass selbst das vollständige Schließen der Klappen dennoch nicht vernachlässigbare Luftdurchsätze zur Folge hatte. Die entsprechende Berücksichtigung in der Simulation wird in der Beschreibung zu Phase 2 erläutert.



Abb. 43 Lüftungsklappen am Eintritt, maximale Öffnung (links) und am Austritt, geschlossen (rechts)

76

Das Gitter für die Simulation des 17,2 x 5,64 x 0,14 m großen Fassadenraumes im Abschnitt vor dem Treppenhaus (Messfall „Wand“) enthält 134 400 (60 x 140 x 16) Zellen bzw. umfasst 146 200 Knotenpunkte. Die Teilung in Querrichtung umfasst 60 Zellen und in der Höhe 140 Zellen. Eine Darstellung des Bereiches nahe dem Luftaustritt im Dachbereich zeigt Abb. 43. Wie daraus ersichtlich, sind die Gitterabstände im Bereich des Luftaustrittes in der Höhe enger gewählt, als im Bereich unterhalb des Insektenschutzgitters. Der Bereich des Lufteintrittes ist völlig gleich aufgebaut und daher hier nicht dargestellt. Zwischen den Insektenschutzgittern ist die Gitterteilung in der Höhe gleichmäßig. Die engeren Gitterabstände nahe der seitlichen Begrenzung (fest) sind genauso wie die gröbere Teilung nahe der Symmetrieebene erkennbar. In der Tiefe wurden 16 Zellen (17 Knoten) gewählt, die wie schon beschrieben, im Bereich von Betonwand und Glas ebenfalls eine engere Teilung aufweisen. Die oben genannten Zahlen gelten für die Phase 1, wo dieser Abschnitt mit geringerer Breite geplant war. Zur Erweiterung um eine Rasterweite entsprechend der vorgenommenen Änderungen wurde das Gitter in analoger Weise ergänzt.

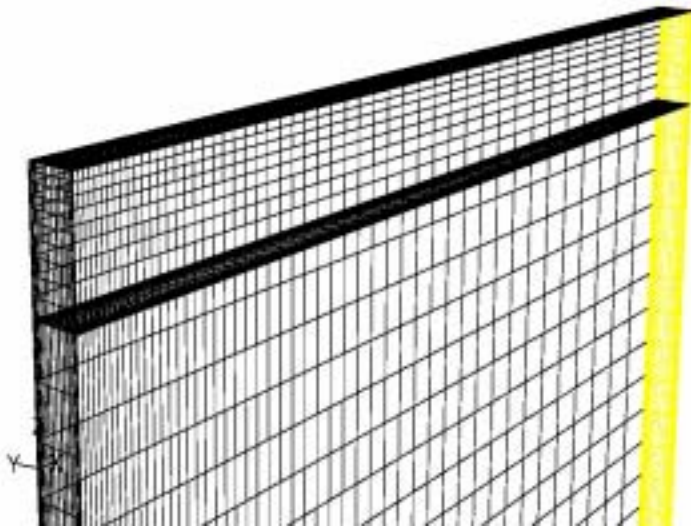


Abb. 44 Rechengitter im Bereich des Treppenhauses, Abschnitt „Wand“, Symmetrieebene gelb dargestellt

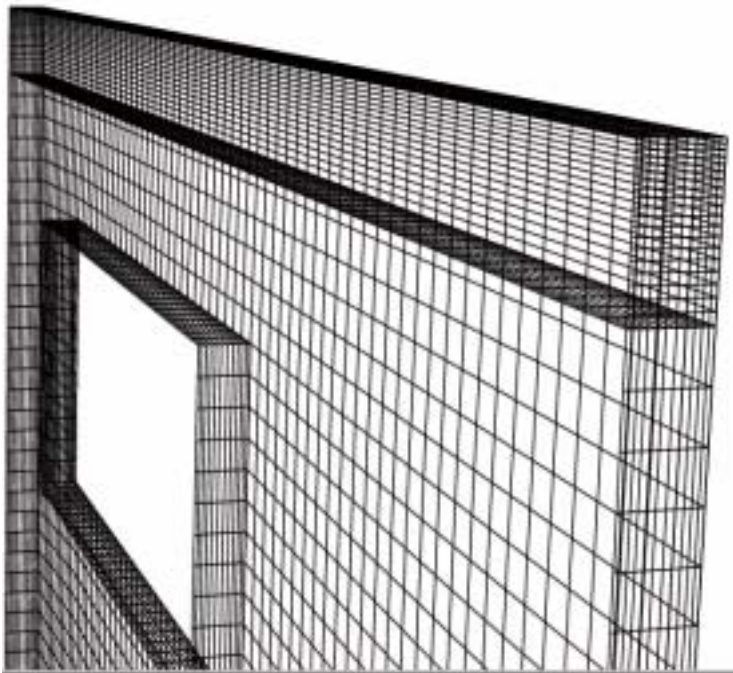
3.5.2. Abschnitt „Fenster“

Die Diskretisierung des Fensterabschnittes erfordert naturgemäß einen wesentlich größeren Aufwand. Die Nachbildung der Fensterlaibungen erfordert in diesen Bereichen ebenfalls wesentlich engere Gitterabstände. Erwähnt muss auch werden, dass die Sonnenschutzlamellen (Abb. 45) oberhalb und unterhalb der Fenster der Einfachheit halber, aber unseres Erachtens ohne negative Auswirkungen auf das Ergebnis, durch eine durchgehende „feste Wand“ ersetzt wurden. Der Einfluss von Schrägstellungen der Lamellen sowie ein Luftaustausch durch Zwischenräume und Lochung sowie der im Vergleich zur Betonwand geänderte Wärmeübergang konnten aus Gründen des Rechenaufwandes nicht berücksichtigt werden.



Abb. 45 Ansicht Fensterbereich von innen mit Sonnenschutzlamellen ober- und unterhalb des „Fensterkastens“

Die Bereiche von Lufteintritt bzw. Luftaustritt sowie die Insektenschutzgitter sind gleich nachgebildet wie im Abschnitt „Wand“. Details der Gittereinteilung im oberen Fassadenteil und in der Umgebung eines Fensters zeigt Abb. 46. Dabei ist nur das Grobgitter gezeigt, das im Wesentlichen mit dem Gitter für den Abschnitt „Wand“ übereinstimmt. Die Verfeinerung des Gitters, insbesondere in der Nähe der festen Wände und dabei der Fensterlaibungen, erfolgt im Laufe der Simulation durch entsprechende Anpassungsroutinen. Dadurch wird der zur Stellung korrekter Randbedingungen notwendige Wandabstand laufend kontrolliert und ggf. der erste wandnahe Gitterpunkt angepasst.



78

Abb. 46 Rechengitter im Bereich der Fenster (Verringerung der Gitterabstände im Bereich der Fensterlaibung nicht dargestellt)

3.6. Simulationsparameter; Rand- und Anfangsbedingungen

Das Insektenschutzgitter (bzw. dessen Auswirkung) wird über Vorgabe eines Druckverlustes in der üblichen Form berücksichtigt:

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} v^2$$

wobei Δp den Druckverlust, ζ den Druckverlustbeiwert, ρ die Luftdichte und v die örtliche Strömungsgeschwindigkeit bedeuten. Für das ausgeführte Schutzgitter mit einem Verhältnis von offener Fläche zu Gesamtfläche von etwa 22 % ergibt sich ein Druckverlustbeiwert von $\zeta = 8$ (siehe [FLUENT 5]).

An den Öffnungen für Lufteintritt bzw. -austritt wird ein konstanter Druck (atmosphärischer Luftdruck) als Randbedingung vorgeschrieben. An festen Wänden gilt, dass dort die Strömungsgeschwindigkeit gleich null sein muss, während an der Symmetrieebene die Symmetriebedingungen zur Anwendung kommen (nur Phase 1). Die anderen Parameter entsprachen den gemessenen Daten bzw. den Daten des für die thermischen Simulationsberechnungen verwendeten Klimadatensatzes sowie den damit numerisch ermittelten Temperaturen von Betonwand und Glasfassade. In den vorliegenden Simulationen wurden diese Temperaturen, sowie die Lufttemperatur am Eintritt (Messwerte/Klimadatensatz) als Randbedingungen verwendet. Die Temperaturen von Beton und Glas wurden ebenso wie in den thermischen Berechnungen über die Höhe als konstant angenommen. An den festen seitlichen Wänden und den Wänden ganz oben bzw. unten wird als Randbedingung ein verschwindender Wärmestrom vorgeschrieben, was die Realität sicher am besten annähert. Infolge geringer Temperaturunterschiede in den einzelnen Abschnitten war ein geringer, dh. vernachlässigbarer Wärmestrom zu erwarten. Die obere und untere Abdeckung haben eine geringe Fläche, weshalb der über diese Fläche ausgetauschte Wärmestrom (in Ermangelung genauerer Kenntnis) ebenfalls vernachlässigt wurde.

3.7. Phase 1 / Abschätzung

Ausgangssituation

Ausgangspunkt für die fluidmechanischen Simulationsberechnungen waren Daten aus thermischen Simulationsberechnungen, die auf Basis eines bestehenden Klimadatensatzes erstellt worden waren, der allerdings hinsichtlich der örtlichen Gegebenheiten in Baden erst überprüft werden musste.

Aus den thermischen Berechnungen über einen Zeitraum von 72 Stunden wurden jeweils zwei Fälle herausgegriffen, und zwar für einen Maximalwert der Betonwandtemperatur und eine maximale Differenz zwischen Betonwandtemperatur und Glasscheibentemperatur. Zum Vergleich mit den thermischen Berechnungen dienten die mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Fassadenraum bzw. die mittlere Temperatur der Luft im Austrittsquerschnitt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen unter den genannten Rand- und Anfangsbedingungen sind in den Abb. 47 bis Abb. 65 dargestellt. Die spezifischen Werte für die Bedingungen bzw. Parameter sind im jeweiligen Abschnitt erläutert. Die Darstellung der Strömungsgrößen erfolgt durchwegs in der Reihenfolge „oben“, „mittlerer“ Abschnitt - entspricht einer Höhe von ca. 10 m über Boden - bzw. „unten“. Dabei sind jeweils die Geschwindigkeitsverteilung und anschließend die Temperaturverteilung dargestellt. Grundsätzlich erfolgt dabei der Blick von rechts auf die Symmetrieebene, in der die Geschwindigkeiten sowie die Temperaturen dargestellt sind. Weiters sind die relevanten Strömungsgrößen direkt im Eintritts- bzw. Austrittsquerschnitt über die gesamte Breite des berechneten Bereiches dargestellt. In den Darstellungen des Winterfalles sind zusätzlich auch Geschwindigkeiten und Temperaturen nahe der Grenze zum Fensterabschnitt

dargestellt. Aufgrund der Komplexität des Strömungsfeldes im Abschnitt „Fenster“ wurde auf eine ausführliche Darstellung in Einzelbereichen verzichtet, und die Geschwindigkeitskonturen in einer Ebene in Spaltmitte angegeben

3.7.1. Sommerfall 1, Abschnitt „Wand“

Dieser Fall entspricht in den Ergebnissen der thermischen Simulation der Stunde 4526 (= 08. Juli/14:00 Uhr) des Jahres. Die dafür verwendeten Parameter können wie folgt angegeben werden:

Umgebungstemperatur T_U	=	301,33 K	=	28,18 °C
Temperatur der Betonwand T_W	=	313,22 K	=	40,07 °C
Temperatur der Glasscheibe T_G	=	305,94 K	=	32,79 °C

Dieser Fall entspricht dem ersten Maximum der Betontemperatur, die treibende Temperaturdifferenz in diesem Fall beträgt $\Delta T = T_W - T_G = 7,28$ K. Die Ergebnisse sind in den Abb. 47 bis Abb. 52 dargestellt. Man erkennt deutlich die Einströmung im unteren Bereich und die dabei erfolgte Umlenkung in den Fassadenraum. Die Lamellen, die in diesem Bereich angebracht sind, unterstützen diese Umlenkung etwas durch Schräganstellung nach oben. In der Nähe des Insektenschutzgitters erkennt man noch ein stark unsymmetrisches Geschwindigkeitsprofil, das sich aber darüber sehr rasch ausgleicht - mit größerer Geschwindigkeit nahe der wärmeren Betonwand und etwas geringerer Geschwindigkeit nahe der kühleren Glasscheibe. Die Geschwindigkeitsverteilung bleibt dann über die gesamte Höhe gleich und ändert sich erst nahe des oberen Insektenschutzgitters. Die beruhigte Geschwindigkeitsverteilung im Fassadenraum zeigt Abb. 49.

Für den Bereich des Austrittes erscheint das errechnete Geschwindigkeitsprofil auch ohne Nachbildung der Klappen realistisch. Die Lamellen sind in diesem Bereich nach außen geneigt, weisen also die gleiche Stellung auf wie beim Eintritt (siehe Abb. 43). Das bedeutet ein starkes Aufstauen der Strömung im hinteren Bereich der unteren Lamelle bei gleichzeitig stark verringertem Austrittsquerschnitt darunter. Dies wiederum bedeutet einen relativ großen Druckverlust. Die obere Lamelle wirkt in ähnlicher Weise auf die Strömung, weshalb die Simulationsergebnisse mit einem verstärkten Luftaustritt im oberen Bereich als realistisch erachtet werden können.

Die Änderung der Lufttemperatur über die Höhe ist in Abb. 48, Abb. 50 und Abb. 52 zu erkennen. Insbesondere die Entwicklung der Temperaturgrenzschicht bei über der Höhe konstanter Geschwindigkeitsverteilung kann gut beobachtet werden.

Zum Vergleich mit den Ergebnissen der thermischen Simulationsberechnungen werden die über den Fassadenraum gemittelte Geschwindigkeit sowie die Lufttemperatur im Austrittsquerschnitt herangezogen. Die Übereinstimmung kann als sehr gut bezeichnet werden.

Stunde 4526 (= 08. Juli/14:00 Uhr)	therm. Sim	fluidmech. Sim.
Mittlere Geschwindigkeit v [m/s]:	~ 0,48	0,44
Mittlere Temperatur am Austritt T_M	~ 306,5 K = 32,85 °C	307,75 K = 34,6 °C

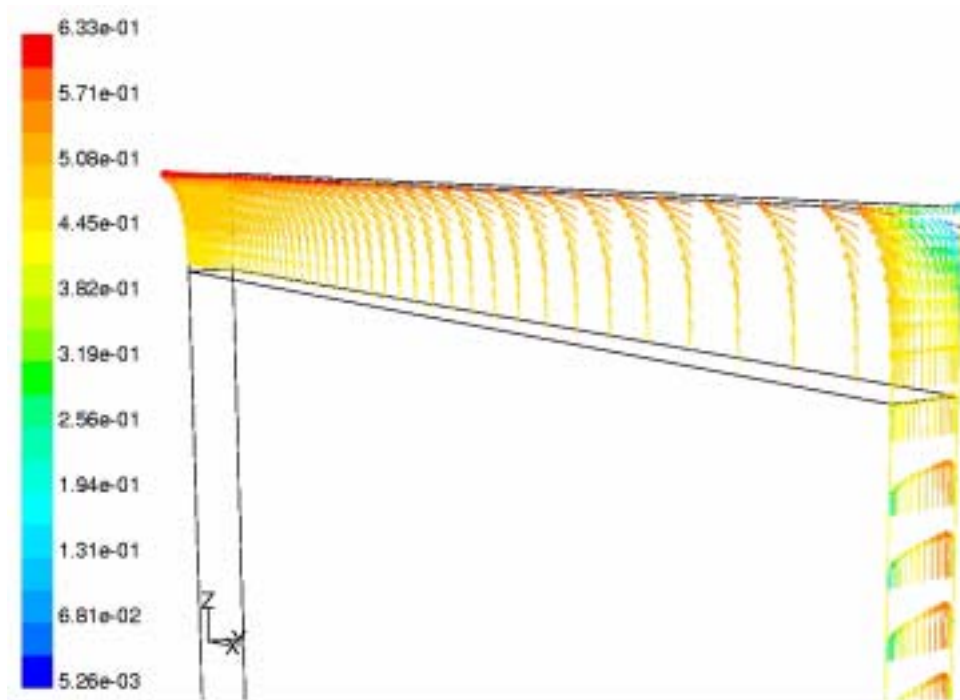


Abb. 47 Sommerfall 1, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im oberen Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

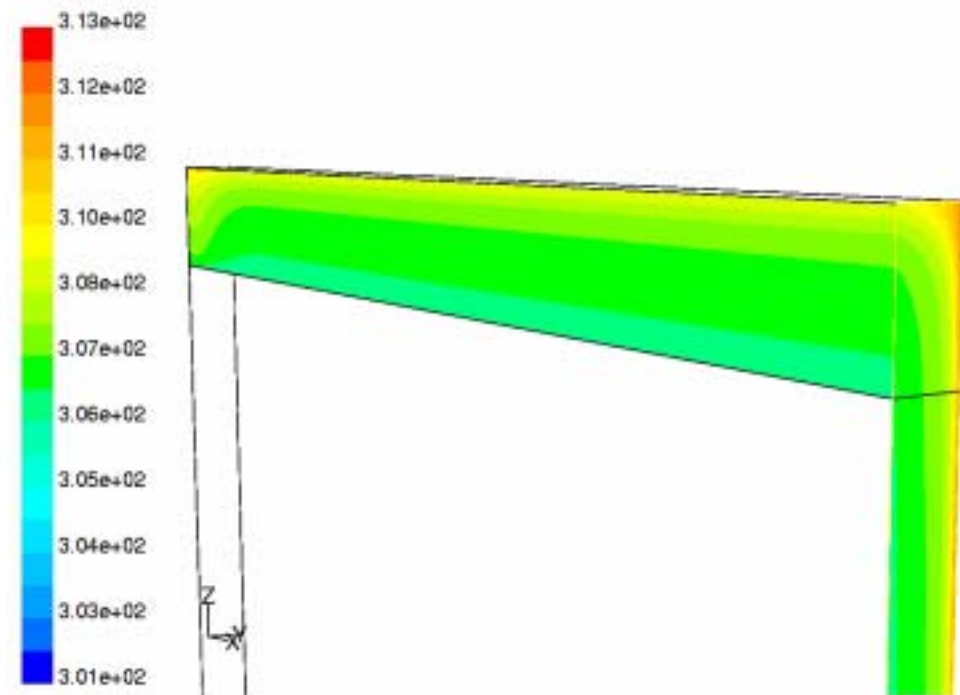
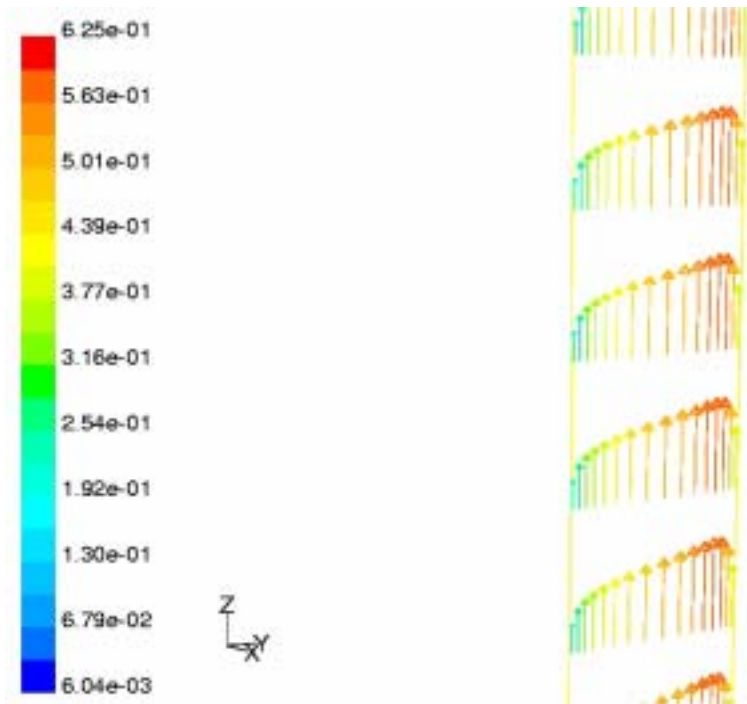


Abb. 48 Sommerfall 1, Temperaturverteilung [K] im oberen Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“



82

Abb. 49 Sommerfall 1, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im mittleren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

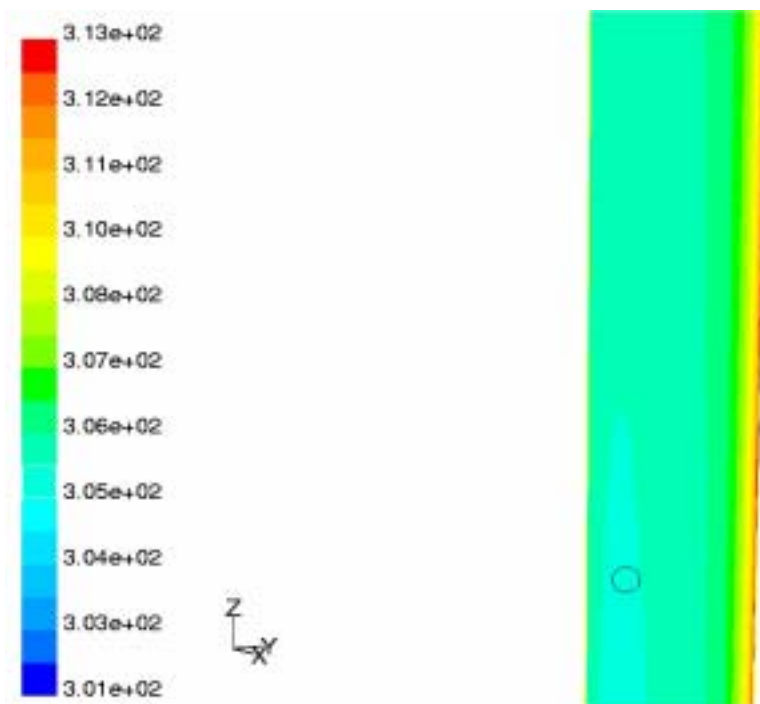


Abb. 50 Sommerfall 1, Temperaturverteilung [K] im mittleren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

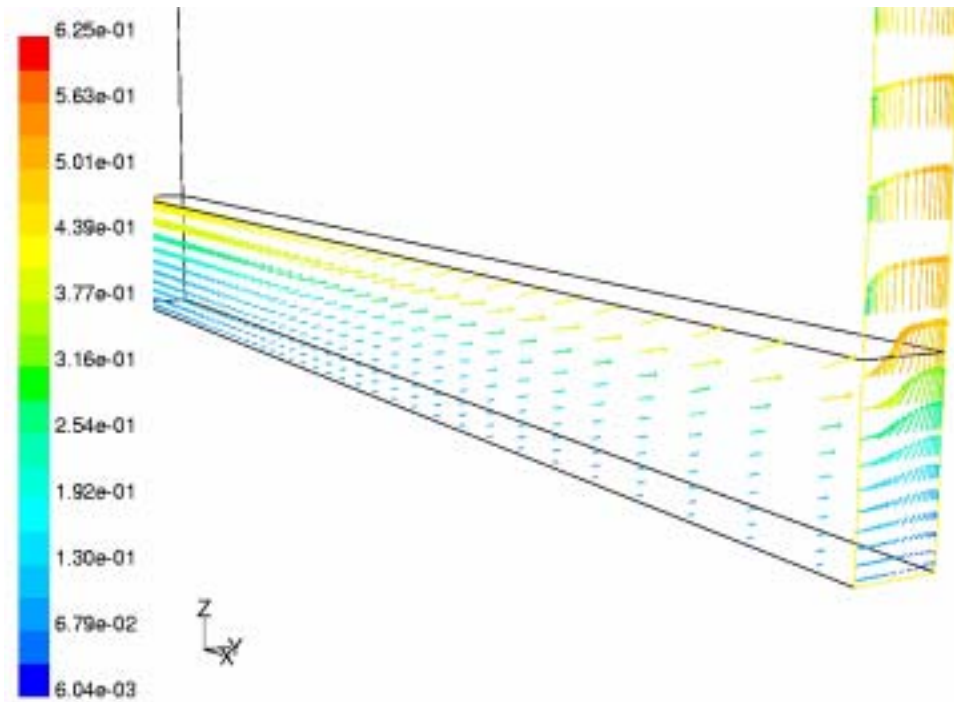


Abb. 51 Sommerfall 1, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im unteren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

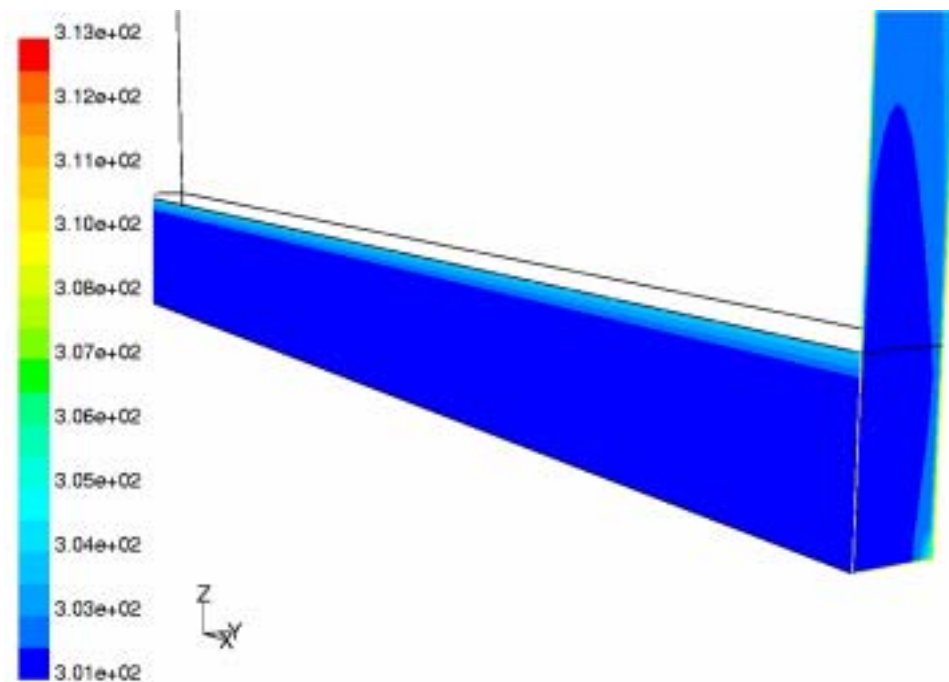


Abb. 52 Sommerfall 1, Temperaturverteilung [K] im unteren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

3.7.2. Sommerfall 2, Abschnitt „Wand“

Dieser Fall entspricht in den Ergebnissen der thermischen Simulation der Stunde 4541 (= 09. Juli/05:00 Uhr) des Jahres. Die dafür verwendeten Parameter können wie folgt angegeben werden:

Umgebungstemperatur T_U	=	287,71 K	=	14,56 °C
Temperatur der Betonwand T_W	=	303,13 K	=	27,98 °C
Temperatur der Glasscheibe T_G	=	292,51 K	=	19,36 °C

Dieser Fall entspricht dem ersten Maximum der Betontemperatur, die treibende Temperaturdifferenz in diesem Fall beträgt $\Delta T = T_W - T_G = 10,62$ K.

Die Ergebnisse sind in den Abb. 53 bis Abb. 58 dargestellt. Bezüglich des Strömungs- und Temperaturverhaltens gelten ähnliche Aussagen wie für Sommerfall 1, 08.07./14:00 Uhr. Lediglich die zum Vergleich herangezogenen Parameter sind etwas unterschiedlich.

Zum Vergleich mit den Ergebnissen der thermischen Simulationsberechnungen werden die über den Fassadenraum gemittelte Geschwindigkeit sowie die Lufttemperatur im Austrittsquerschnitt herangezogen. Auch hier kann die Übereinstimmung als sehr gut bezeichnet werden.

84

Stunde 4541 (= 09. Juli/05:00 Uhr)	therm. Sim.	fluidmech. Sim.
Mittlere Geschwindigkeit v [m/s]:	~ 0,51	0,483
Mittlere Temperatur am Austritt T_M	~ 293,5 K = 19,35 °C	294,34 K = 21,19 °C

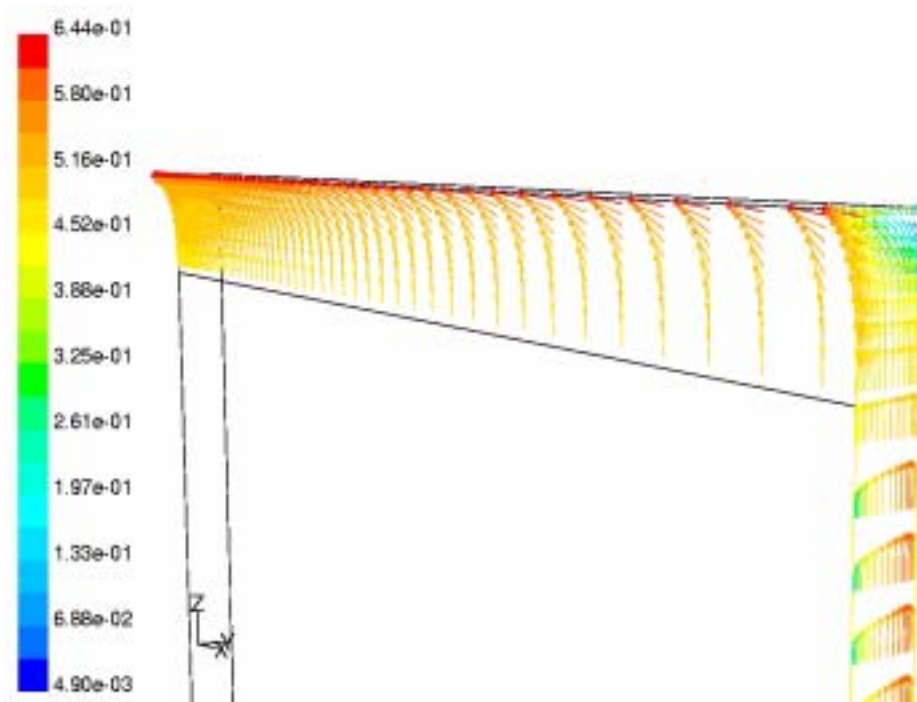


Abb. 53 Sommerfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im oberen Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

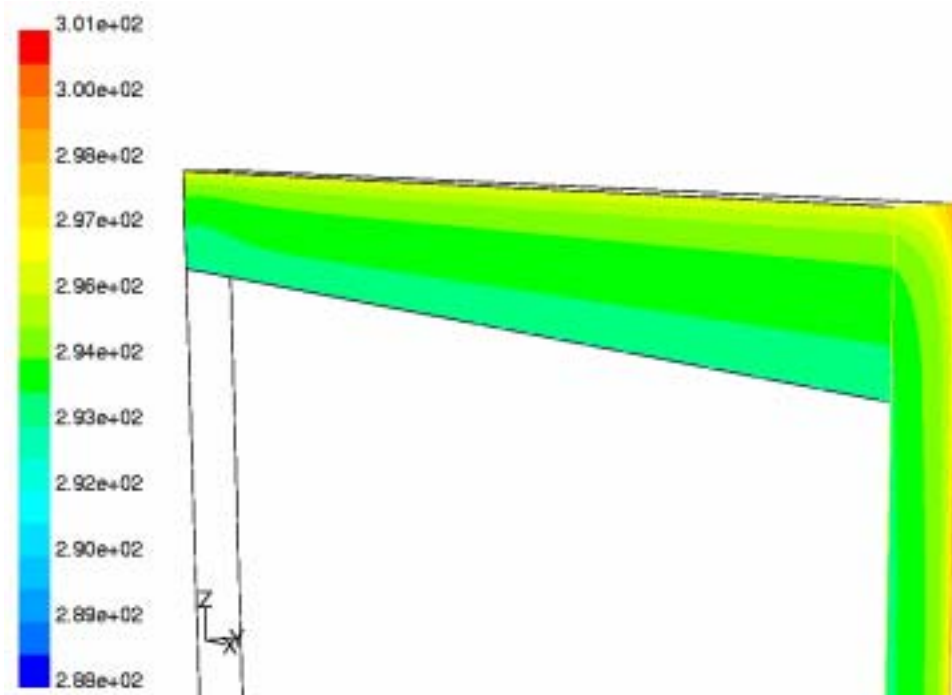
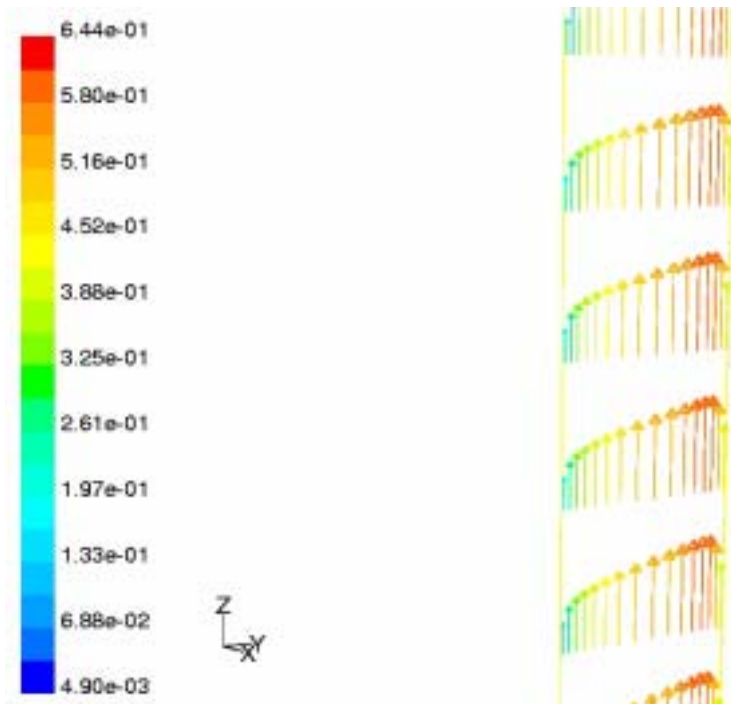


Abb. 54 Sommerfall 2, Temperaturverteilung [K] im oberen Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“



86

Abb. 55 Sommerfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im mittleren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

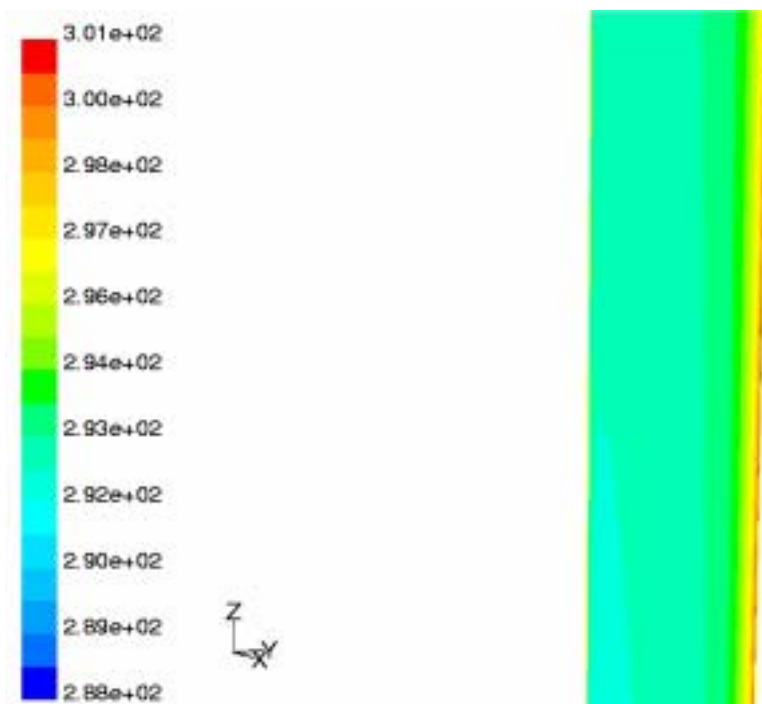


Abb. 56 Sommerfall 2, Temperaturverteilung [K] im mittleren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

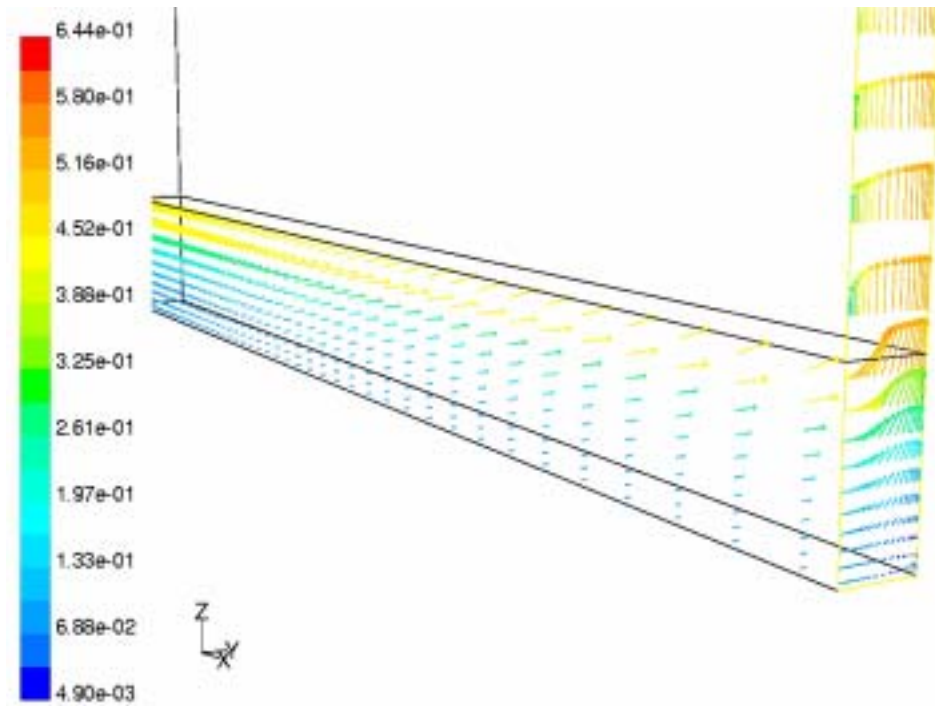


Abb. 57 Sommerfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im unteren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

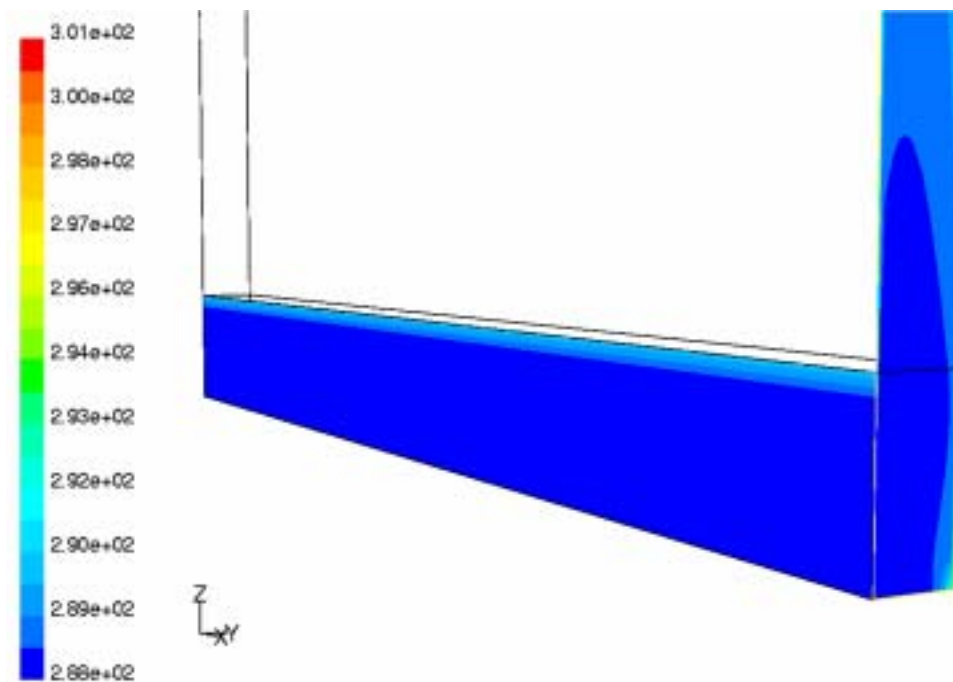


Abb. 58 Sommerfall 2, Temperaturverteilung [K] im unteren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

3.7.3. Winterfall 2, Abschnitt „Wand“

Hier sollte vorerst nur der stationäre Fall von Stunde 466 (= 20. Jänner/10:00 Uhr) des Jahres aus der thermischen Simulationsberechnung dargestellt werden. Die dafür verwendeten Parameter können wie folgt angegeben werden:

Umgebungstemperatur T_U	=	265,67 K	=	-7,48 °C
Temperatur der Betonwand T_W	=	292,11 K	=	18,96 °C
Temperatur der Glasscheibe T_G	=	275,97 K	=	2,82 °C

Dieser Fall entspricht ungefähr einem Maximum der Differenz zwischen Beton- und Glastemperatur, die treibende Temperaturdifferenz beträgt in diesem Fall

$$\Delta T = T_W - T_G = 16,14 \text{ K.}$$

Der Vollständigkeit halber muss hier noch erwähnt werden, dass die Klappen zur Regulierung von Luft Eintritt bzw. -austritt im Winter geschlossen sind, und daher in der Simulation als „feste Wand“ nachgebildet wurden. Zur Vereinfachung (und in Ermangelung genauerer Daten) wurde die Temperatur gleich angesetzt wie für das Fassadenglas.

Aus den Abb. 59 bis Abb. 64 ist ersichtlich, dass drei voneinander beinahe unabhängige Wirbelwalzen entstehen. Bedingt durch die Insektenschutzgitter und den damit verbundenen hohen Druckverlust entstehen sowohl im Eintrittsbereich als auch im Austrittsbereich zwei Wirbel, die vom Wirbel im Fassadenraum fast unabhängig sind. Aufgrund der geringen treibenden Kräfte ist eine Durchströmung der Schutzgitter beinahe unmöglich, was bedeutet, dass diese auf die Strömung näherungsweise wie eine feste Wand wirken.

Die Maximalgeschwindigkeiten in der Nähe der Betonwand bzw. der Glasscheibe betragen ungefähr $v_{\max,W} = v_{\max,G} = 0,146 \text{ m/s}$. Eine Darstellung über die gesamte Breite (aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nicht dargestellt), zeigt nahezu konstante Geschwindigkeiten über die Breite, lediglich nahe der festen Seitenwand wurden etwas höhere Geschwindigkeiten errechnet (bedingt durch die Verdrängungswirkung der Grenzschicht in diesem Bereich).

Die Ergebnisse für den Winterfall 1 (Stunde 448 - 19. Jänner/16:00 Uhr - der thermischen Simulation) wurden nicht dargestellt, da das prinzipielle Verhalten ähnlich ist. Lediglich die Maximalgeschwindigkeiten nahe der Betonwand bzw. der Glasscheibe zeigen geringere Maximalwerte von $v_{\max,W} = v_{\max,G} = 0,139 \text{ m/s}$, was durch die geringere Temperaturdifferenz von $\Delta T = T_W - T_G = 301,53 - 287,79 \text{ K} = 28,38 - 14,64 \text{ °C} = 13,74 \text{ K}$ bei einer Umgebungstemperatur von $T_U = 278,18 \text{ K} = 5,03 \text{ °C}$ erklärbar ist.

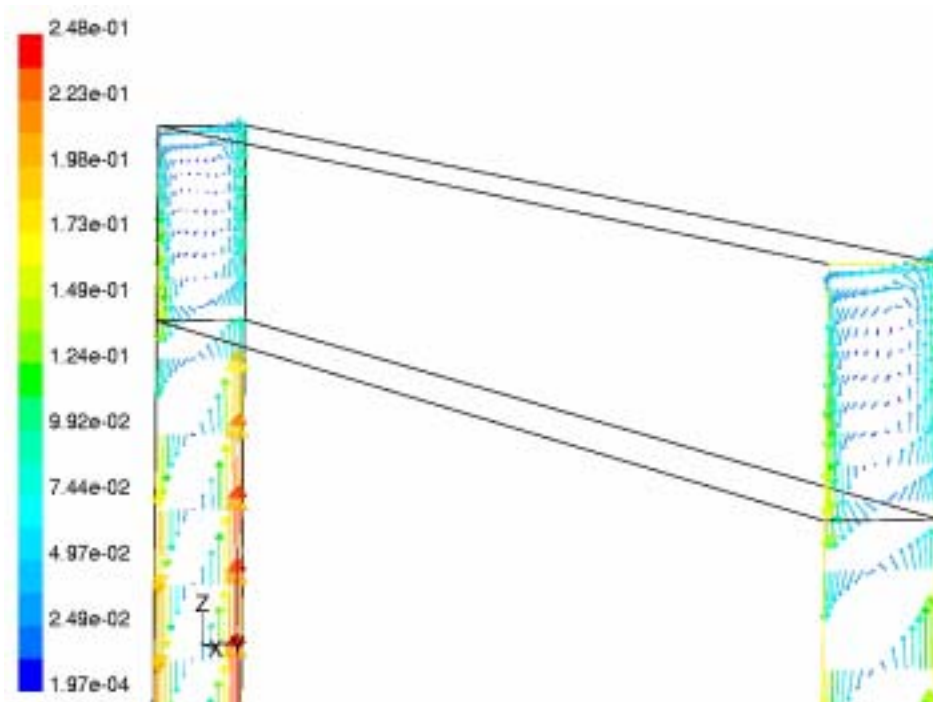


Abb. 59 Winterfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im oberen Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

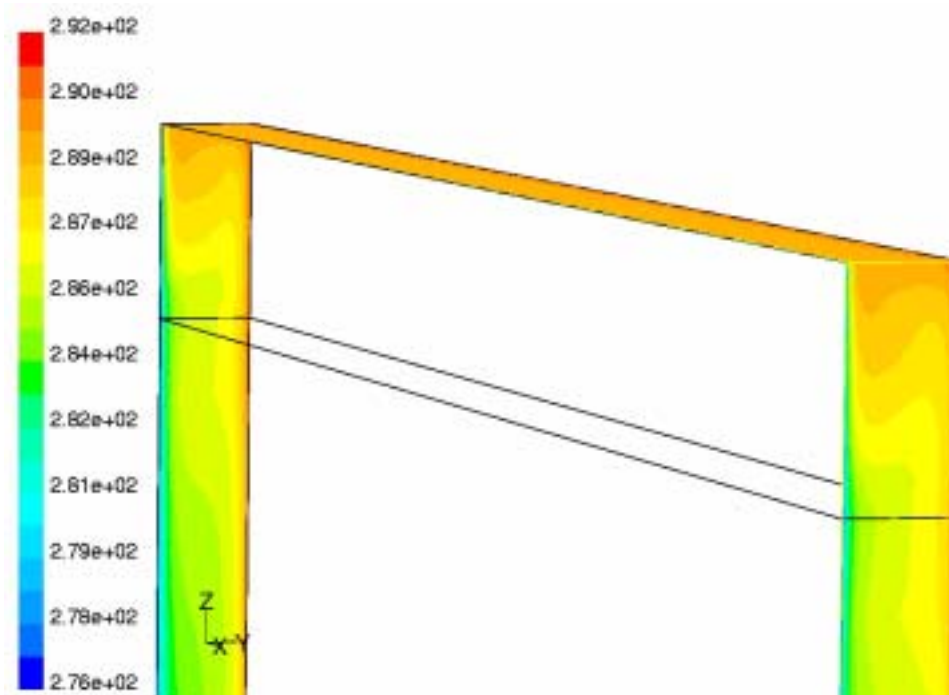
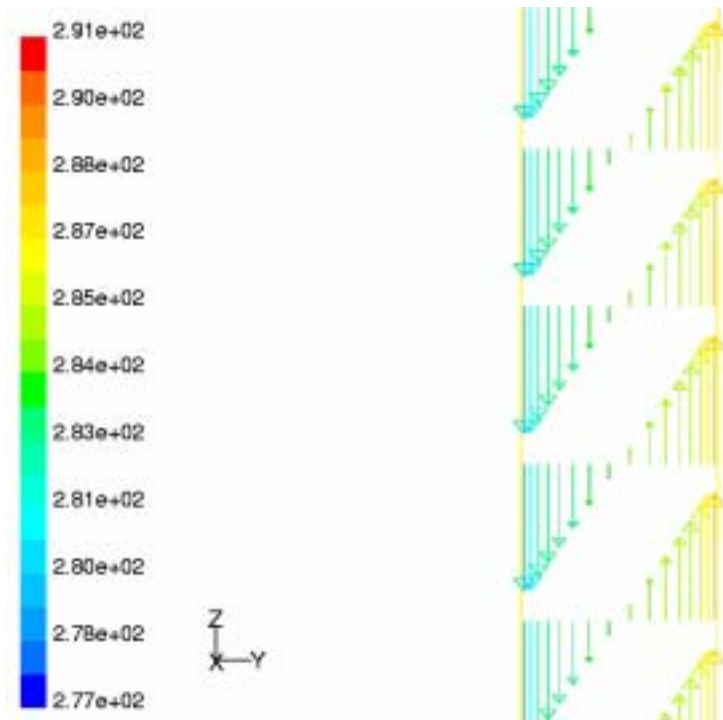


Abb. 60 Winterfall 2, Temperaturverteilung [K] im oberen Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“



90

Abb. 61 Winterfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im mittleren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

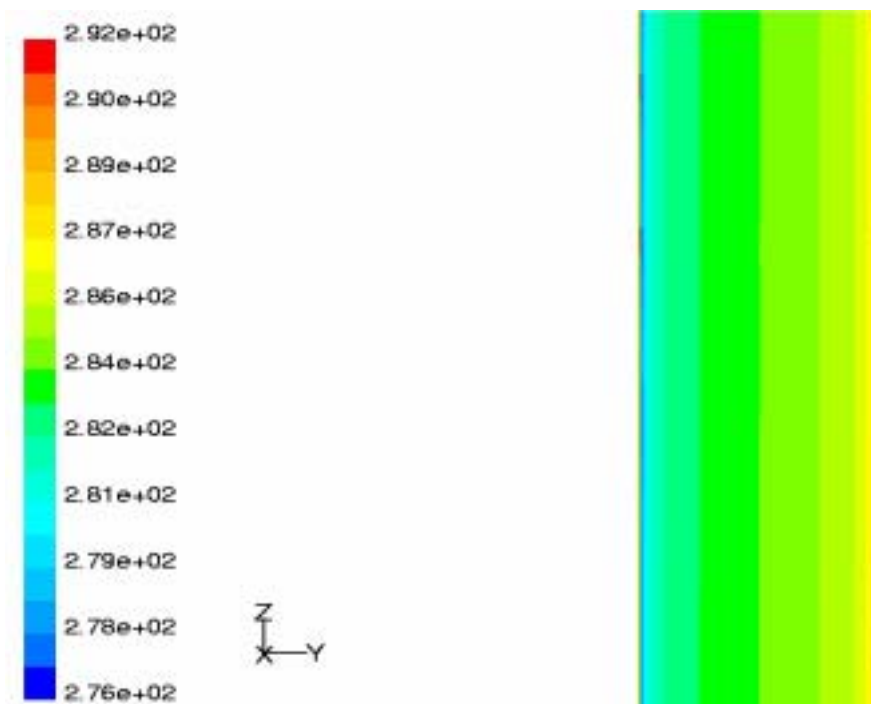


Abb. 62 Winterfall 2, Temperaturverteilung [K] im mittleren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

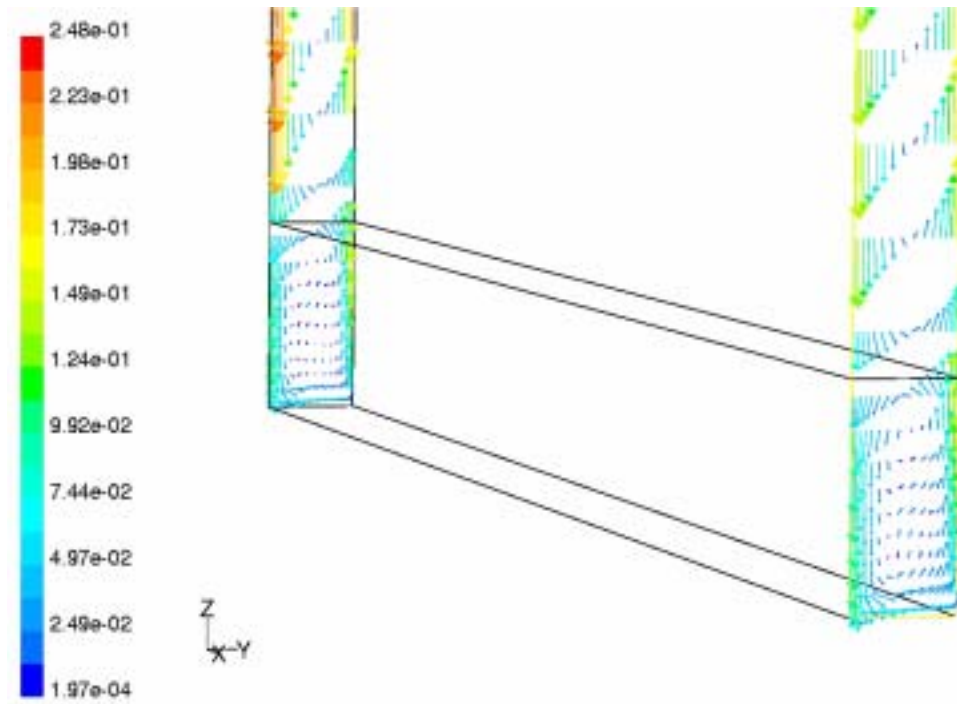


Abb. 63 Winterfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im unteren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

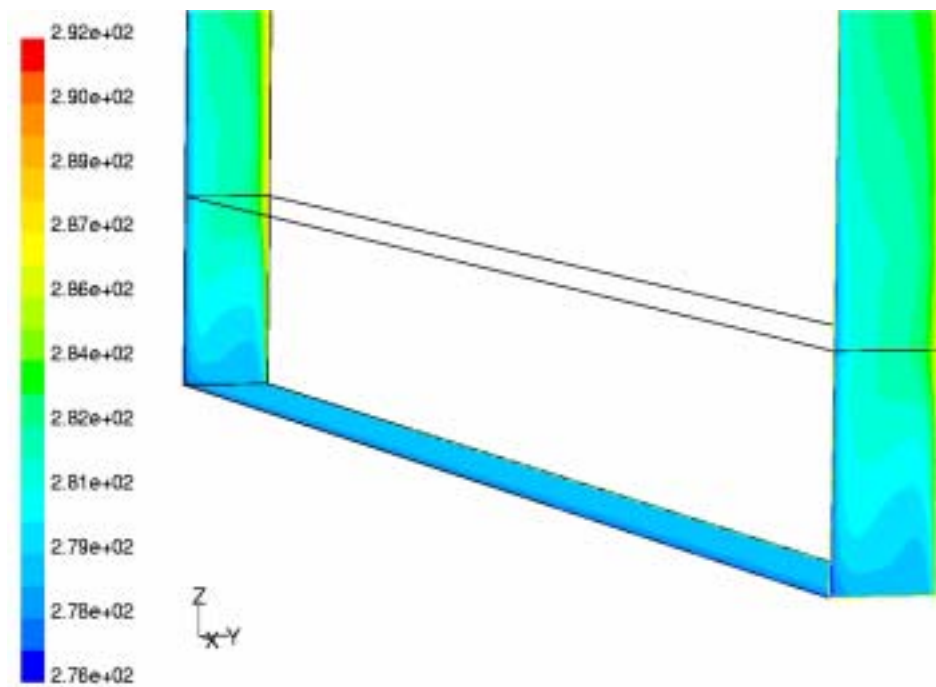


Abb. 64 Winterfall 2, Temperaturverteilung [K] im unteren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“

3.7.4. Sommerfall 2, Abschnitt „Fenster“

Für den Fassadenbereich mit Fenstern sollte in Phase 1 aufgrund der Komplexität vorerst ein einziges Ergebnis dargestellt werden. Die Simulationen zeigen die Ergebnisse für den Sommerfall 2, 09.07./05:00 Uhr, dessen zugehörige Parameter weiter oben (Sommerfall 2, Abschnitt „Wand“) angegeben wurden. Die Abb. 65 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung bei 0,085 m Abstand von der Betonwand. Die Abbildung ist so gestaltet, dass die Geschwindigkeiten in der Ansicht von außen angegeben sind. Grundsätzlich erschienen diese Ergebnisse realistisch, wenn in Betracht gezogen wird, dass an beiden seitlichen Rändern „feste Wände“ als Grenzbedingung einbezogen wurden. In der Realität sind ggf. andere Verhältnisse zu erwarten, da der Luftaustausch mit den benachbarten Abschnitten nicht behindert ist.

92

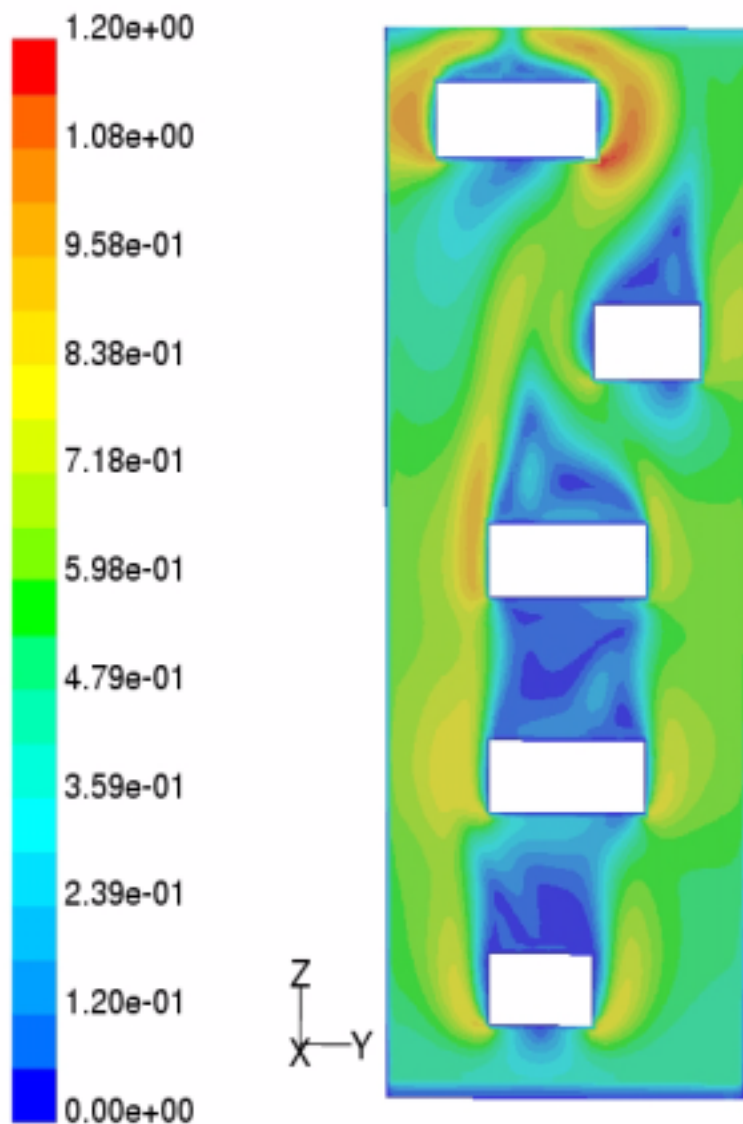


Abb. 65 Sommerfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Mitte Fassade im Abschnitt „Fenster“

3.8. Phase 2 / Vorsimulation

Ausgangssituation

In Phase 2 wurden anhand der vorliegenden Messdaten zwei charakteristische Zeitpunkte zum „Messfall Wand - Winter“ ausgewählt. Die Auswahlkriterien waren das Vorliegen vollständiger Messdatensätze über einen genügend langen Zeitraum, um eine dynamische Simulation zum Vergleich zu ermöglichen, wenig Wind, wenig Regen, sowie starke bzw. verschwindend geringe Sonneneinstrahlung. Der Grund für die Forderung nach geringem Windeinfluss ist der enorme Aufwand, den Windeinfluss überhaupt erfassen zu können, bzw. die Unsicherheiten über Richtung und Geschwindigkeit im Bereich der Ein- bzw. Auslassöffnungen.

Die Simulation erfolgte für den Bereich zwischen den Segmenten 8 und 13. An beiden seitlichen Enden wurden Abschottungen in Form von aufblasbaren Schläuchen montiert, um definierte Verhältnisse zu gewährleisten, die in der Simulation die Stellung geeigneter Randbedingungen erlauben. Die Gesamthöhe des berechneten Bereiches beträgt 17,2 m, die Breite 5,64 m, und die Tiefe des Luftspaltes beträgt 0,14 m (vor Ort gemessen). Im Winter sind die Klappen zur Luftzu- bzw. -abfuhr geschlossen. Beobachtungen vor Ort ergaben jedoch, dass die Klappen keineswegs dicht schließen, sondern ringsum sowie auch im Überlappungsbereich zwischen oberer und unterer Klappe Spalten vorhanden sind, die einen Luftaustausch ermöglichen.

Randbedingungen in der Simulation

An festen Wänden (also auch an den Abschottungen) sind die Geschwindigkeiten Null. Über die Abschottungen sowie die obere und untere Begrenzung des Gesamtbereiches wird ein verschwindender Wärmestrom angenommen. Aufgrund der Notwendigkeit, einen sehr großen Bereich simulieren zu müssen, wird auf die Nachbildung des Wandaufbaues bzw. der Einstrahlung durch die Glasscheibe sowie des konvektiven Wärmeüberganges an der Glasscheibe verzichtet, und stattdessen die Temperaturen von Betonwand bzw. Glasscheibe als Randbedingung vorgegeben. Diese Temperaturen wurden aus den Messergebnissen bzw. von den thermischen Simulationsberechnungen anhand der ermittelten Klimadaten übernommen.

Um den aufgrund der beobachteten Undichtigkeiten der Luftklappen bedingten Luftaustausch in der Simulation zu berücksichtigen, wurde sowohl im Bereich der Einlassklappen wie auch der Auslassklappen die Summe der vor Ort gemessenen Fugen simulationstechnisch in Form eines 1 cm hohen offenen Spaltes über die gesamte Messfeldbreite nachgebildet.

Ausgewählte Zeitpunkte:

Tag	Uhrzeit		T _{Glas} [°C]	T _{Beton} [°C]	T _{außen} [°C]
04.01.2002	12:10	Messung	32,40	16,05	- 5,1
		therm. Simulationsber.	20,16	14,82	- 5,1
10.01.2002	00:00	Messung	1,65	4,91	- 2,35
		therm. Simulationsber.	- 0,24	6,72	- 2,35
	13:40	Messung	2,72	4,44	- 2,1
		therm. Simulationsber.	0,20	5,43	- 2,1

Beide Tage (Zeitpunkte) wurden gewählt, da der Windeinfluss gering war. Weitere Kriterien waren:

- 04. Jänner: starke Sonneneinstrahlung
- 10. Jänner: praktisch keine Sonneneinstrahlung, gleichmäßige Temperaturen über den ganzen Tag; maximale Temperaturdifferenz um 00:00 Uhr, minimale Temperaturdifferenz um 13:40 Uhr.

94**Ergebnisse**

Die Simulation der Strömungsverhältnisse wurde jeweils mit den in der obigen Tabelle angegebenen Temperaturwerten (Messung, thermische Simulationsberechnung) durchgeführt. Im folgenden sind die Ergebnisse für gemessene Temperaturen als Eingabeparameter grafisch dargestellt.

Die Ergebnisse für den Zeitpunkt 10.01.2002, 00:00 Uhr sind fast gleich wie um 13:40 Uhr und werden daher nicht dargestellt. Die Ergebnisse mit berechneten Temperaturen sind qualitativ ähnlich und werden daher ebenfalls nicht dargestellt. Wegen der sehr unterschiedlichen Abmessungen in Höhe und Tiefe werden einzelne Bereiche des Fassadenraumes (Einlass, unterer Bereich - Anlaufströmung, Mitte, Auslass) zur besseren Darstellung getrennt angegeben.

3.8.1. Ergebnisse 04.01.2002, 12:10 Uhr, Simulation mit Messwerten

Parameter: $T_{\text{Glas}} = 32,4 \text{ °C}$; $T_{\text{Beton}} = 16,05 \text{ °C}$; $T_{\text{außen}} = -5,1 \text{ °C}$

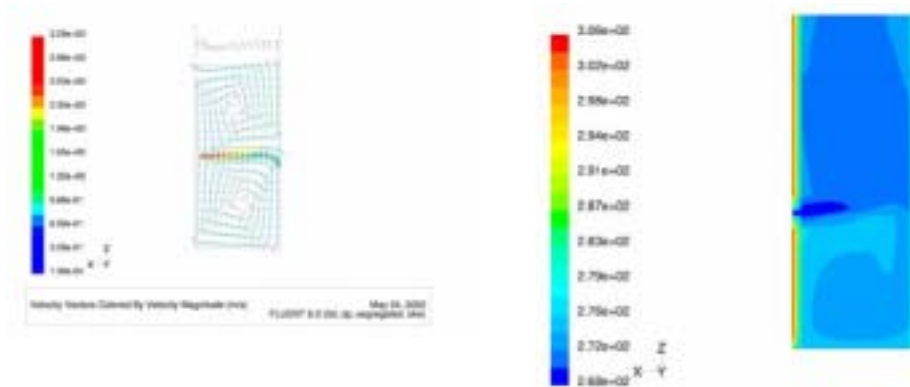


Abb. 66 Einlassbereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)

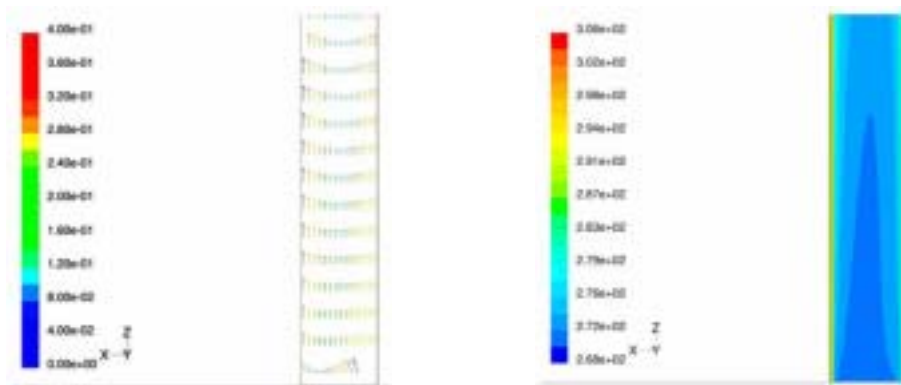


Abb. 67 Unterer Bereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)

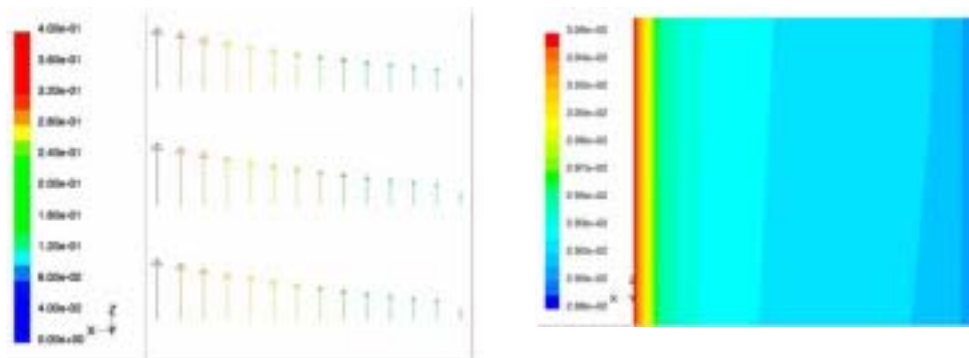


Abb. 68 Mittlerer Bereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)

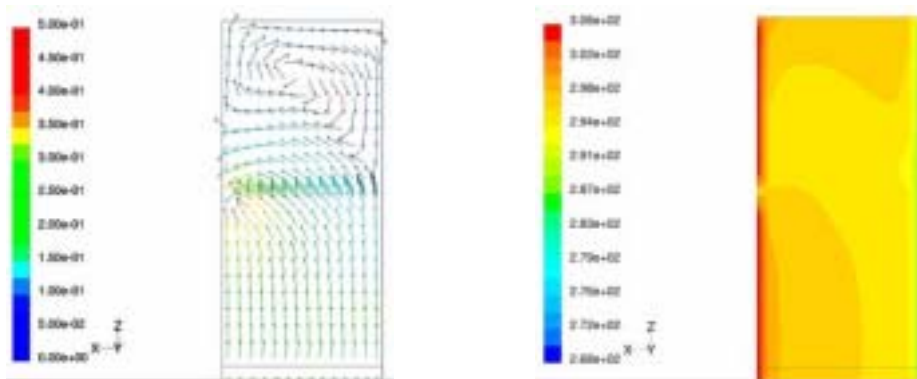


Abb. 69 Auslassbereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)

3.8.2. Ergebnisse 10.01.2002, 13:40 Uhr, Simulation mit Messwerten

Parameter: : $T_{\text{Glas}} = 2,72 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{Beton}} = 4,44 \text{ }^\circ\text{C}$; $T_{\text{au\ss en}} = - 2,1 \text{ }^\circ\text{C}$

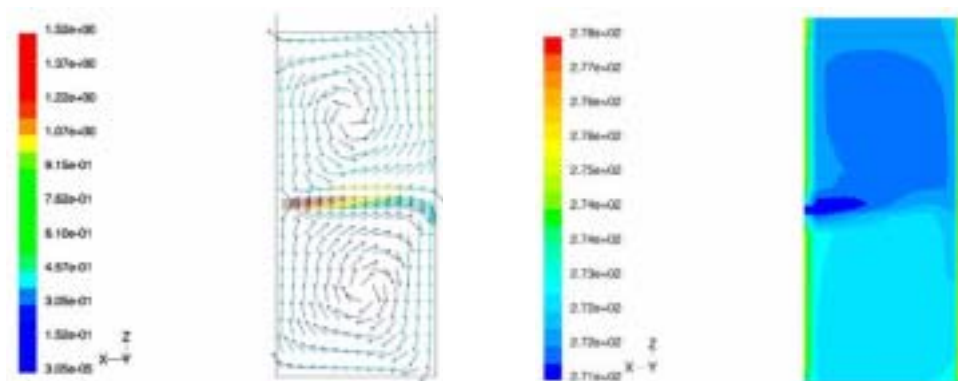


Abb. 70 Einlassbereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)

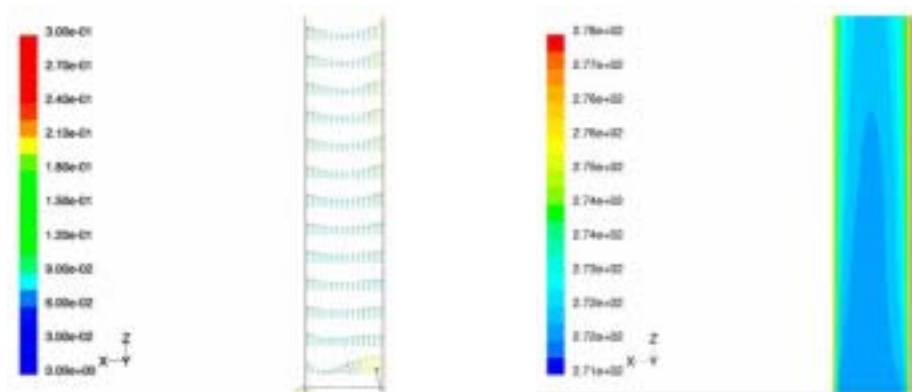


Abb. 71 Unterer Bereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)

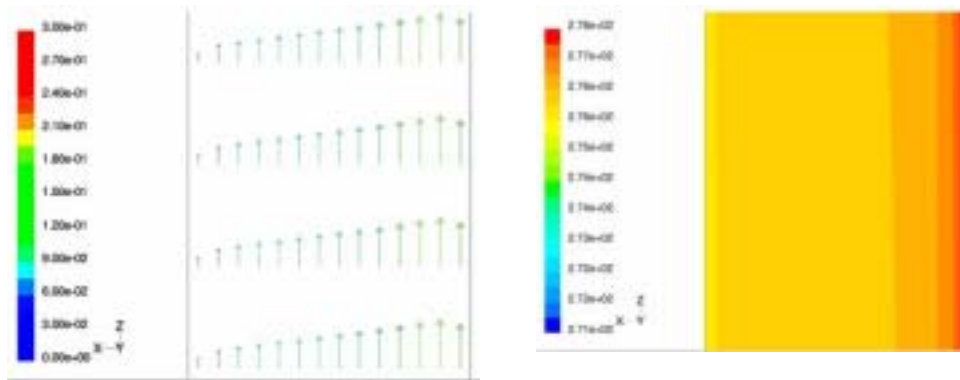


Abb. 72 Mittlerer Bereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)

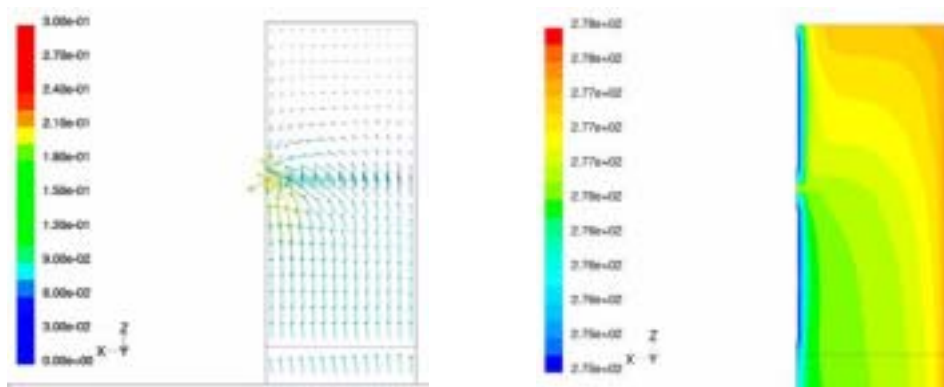


Abb. 73 Auslassbereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)

3.8.3. Vergleich der Ergebnisse

Die folgenden Tabellen zeigen einen Vergleich der Ergebnisse in jenen Punkten, wo Messungen von Strömungsgeschwindigkeit und/oder Temperatur vorliegen.

Die Position der Geschwindigkeitssensoren ist in Abb. 115 neu angegeben, die Lage im Spalt ist wie folgt:

H1, H4: 1 cm von Betonwand

H2, H5: Mitte Spalt

H3, H6: 1 cm von Glasscheibe

Geschwindigkeiten

Tag	Uhrzeit	H1[m/s]	H2[m/s]	H3[m/s]	H4[m/s]	H5[m/s]	H6[m/s]
04. 01. 2002	12:10						
Messung		0,11	0,25	0,34	0,12	0,27	0,37
Simulation mit Messwerten		0,09	0,23	0,35	0,09	0,23	0,35
therm. Simulationsber.		0,101	0,205	0,283	0,1	0,206	0,281
10. 01. 2002	00:00						
Messung		0,162	0,10	0,025	0,166	0,121	0,058
Simulation mit Messwerten		0,164	0,111	0,034	0,163	0,11	0,033
therm. Simulationsber.		0,192	0,11	0,024	0,192	0,11	0,024
10. 01. 2002	13:40						
Messung		0,157	0,118	0,068	0,144	0,118	0,066
Simulation mit Messwerten		0,143	0,113	0,044	0,142	0,113	0,044
therm. Simulationsber.	nicht durchgeführt						

Temperaturen

Vergleichswerte für Temperaturen wurden nicht in allen „Mess“-Punkten ausgegeben, sondern nur am Ort des Geschwindigkeitssensors H5, der auf der gleichen Höhe liegt wie der Temperatursensor 3. OG, und auch nur wenig rechts davon.

Tag	Uhrzeit	EG [°C]	1. EG [°C]	2.OG [°C]	3.OG [°C]
04. 01. 2002	12:10				
Messung		10,988	18,798	22,283	22,637
Simulation mit Messwerten					22,74 (Pos. H5)
therm. Simulationsber.					16,28 (Pos. H5)
10. 01. 2002	00:00				
Messung		2,338	2,432	2,793	3,161
Simulation mit Messwerten					3,145 (Pos. H5)
therm. Simulationsber.					3,11 (Pos. H5)
10. 01. 2002	13:40				
Messung		2,351	2,724	3,202	3,319
Simulation mit Messwerten					3,45 (Pos. H5)
therm. Simulationsber.	nicht durchgeführt				

3.9. Phase 3 / Simulation

Ausgangssituation

Nach Abschluss der Messungen, Evaluierung der Messdaten sowie Vorliegen der korrigierten Datensätze wurden unter Beachtung ähnlicher Kriterien wie in Phase 2 folgende geeignete Zeitpunkte zur fluidmechanischen Simulation ausgewählt. Die Simulationen wurden ausschließlich unter Verwendung der angegebenen Messdaten durchgeführt.

Tag 2002	Uhrzeit	Fall	Klappen	Parameter / Temp [°C]		
				Glas	Beton	außen
06.03.	00:20	Fenster Winter 1	geschlossen	7,56	13,14	3,12
06.03.	11:10	Fenster Winter 2	geschlossen	24,71	19,76	9,89
23.04.	15:50	Fenster Frühjahr 1	geschlossen	34,47	27,58	20,27
24.04.	04:00	Fenster Frühjahr 2	geschlossen	14,03	20,62	10,66
06.05.	05:00	Fenster Frühjahr 3	geschlossen	13,61	19,3	10,57
06.05.	13:00	Fenster Frühjahr 4	geschlossen	37,25	25,38	18,36
17.08.	14:40	Fenster Sommer 1	offen	44,55	33,71	27,37
17.08.	22:40	Fenster Sommer 2	offen	21,75	27,03	19,39
31.08.	05:20	Wand Sommer 1	offen	18,01	24,29	15,05
31.08.	15:30	Wand Sommer 2	offen	44,73	35,22	29,05

Tab. 3 Simulationszeitpunkte

In allen Fällen, die sich auf den Abschnitt „Fenster“ beziehen, werden die Ergebnisse durchwegs für die senkrechte Ebene in Spaltmitte (parallel zu den Wänden) in Form von Geschwindigkeits- und Temperaturverteilungen in Konturdarstellung angegeben. Darüber hinaus wurden die Geschwindigkeits- sowie Temperaturprofile über die Spalttiefe jeweils in der Umgebung der entsprechenden Messpunkte dargestellt. Dazu muss bemerkt werden, dass die Anordnung der jeweiligen Profile in den zugehörigen Abbildungen der Lage der Messpunkte (F1 bis F4) bei Blick von außen auf die Fassade entspricht. Dabei gilt, dass der linke Rand der Betonwand entspricht, und der rechte Rand dem Fassadenglas (entspricht dem Blick in den Spalt von links). Die in den Messpunkten ermittelten Werte von Geschwindigkeit und Temperatur werden abschließend jeweils in einer Tabelle gegenübergestellt. Im Fall Wand-Sommer werden die Geschwindigkeiten in den Punkten H1 bis H3 und die Temperatur im 3.OG verglichen. Die Beschreibung der Abbildungen dazu erfolgt in den jeweiligen Abschnitten.

3.9.1. Messfall „Fenster - Winter 1“ / 06.03, 00:20 Uhr

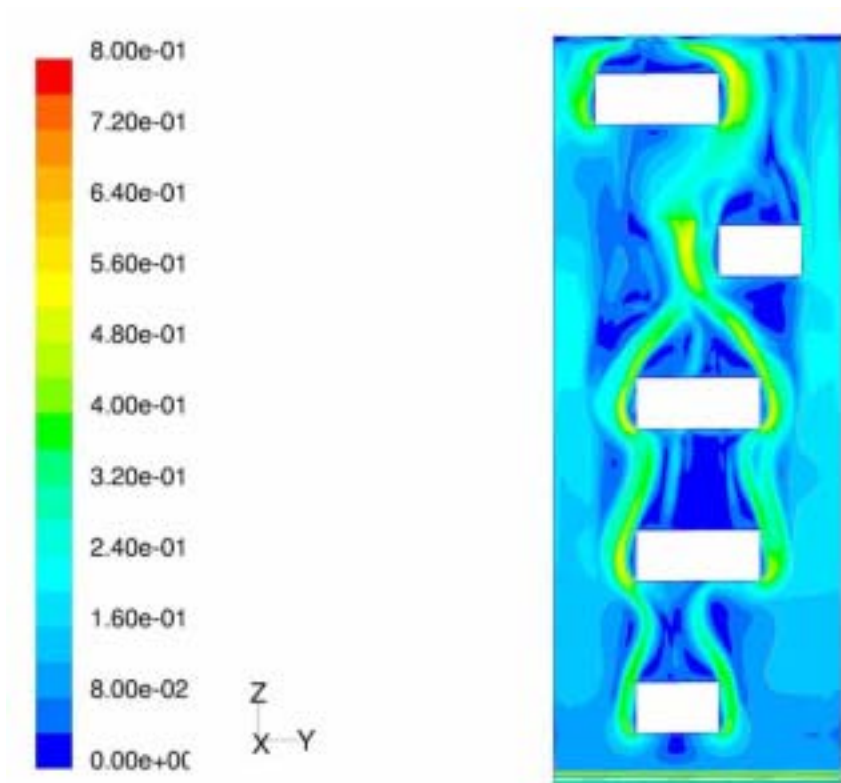


Abb. 74 Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Messfall „Fenster - Winter 1“

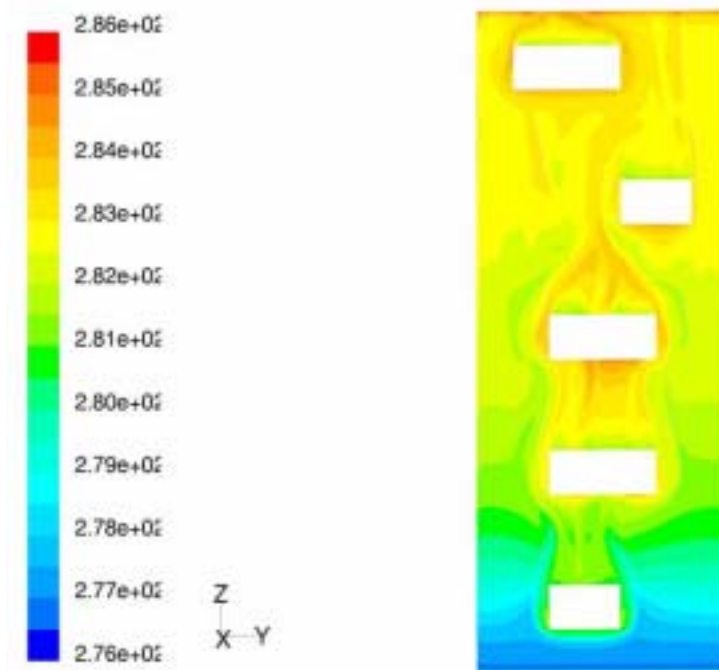
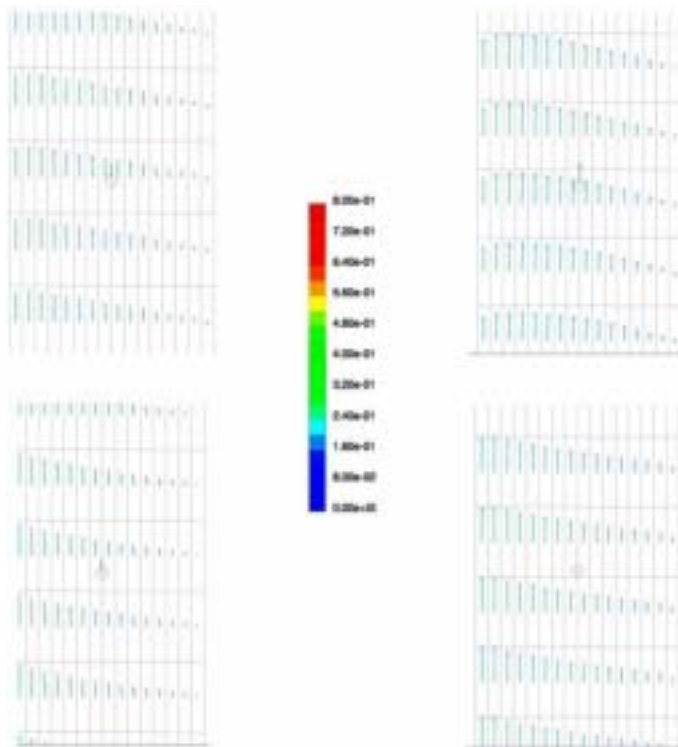


Abb. 75 Temperaturverteilung [K] Messfall „Fenster - Winter 1“



102

Abb. 76 Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Vektordarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Winter 1“

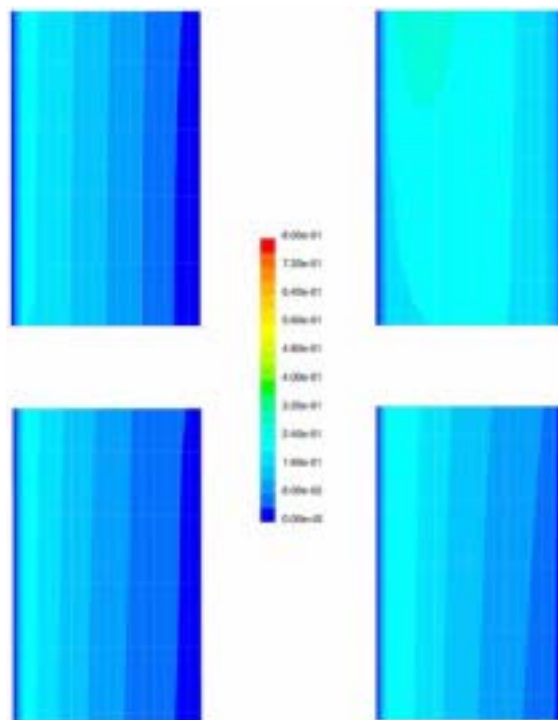


Abb. 77 Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Winter 1“

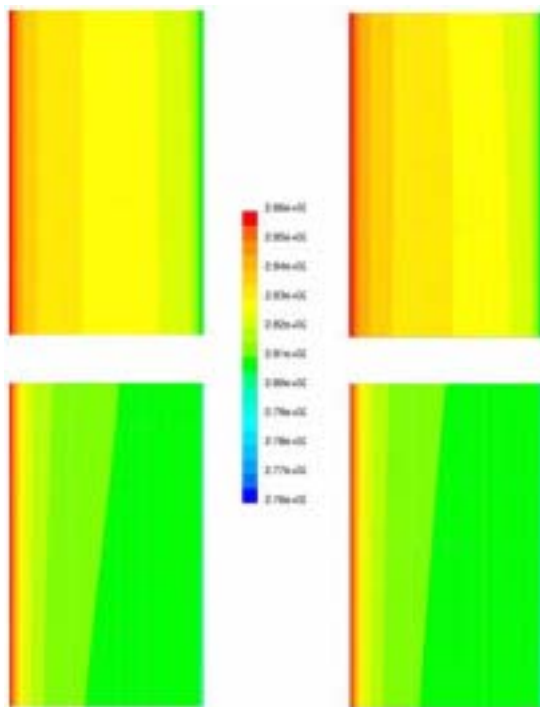


Abb. 78 Temperaturprofil [K] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Winter 1“

103

Messpunkt	V_{Sim} [m/s]	V_{Mess} [m/s]	T_{Sim} [°C]	T_{Mess} [°C] *)
F1	0,133	0,175	8,05	--
F2	0,101	0,407	8,11	--
LQ2	--	--	--	11,45
F3	0,222	0,408	10,18	--
F4	0,122	0,363	9,98	--

„Fenster - Winter 1“: Geschwindigkeiten und Temperaturen in den Messpunkten

*) Temperaturen nicht gemessen bzw. nur im Referenzmesspunkt LQ2 auf halber Fassadenhöhe, etwa in der Mitte zwischen F2 und F3.

3.9.2. Messfall „Fenster - Winter 2“ / 06.03, 11:10 Uhr

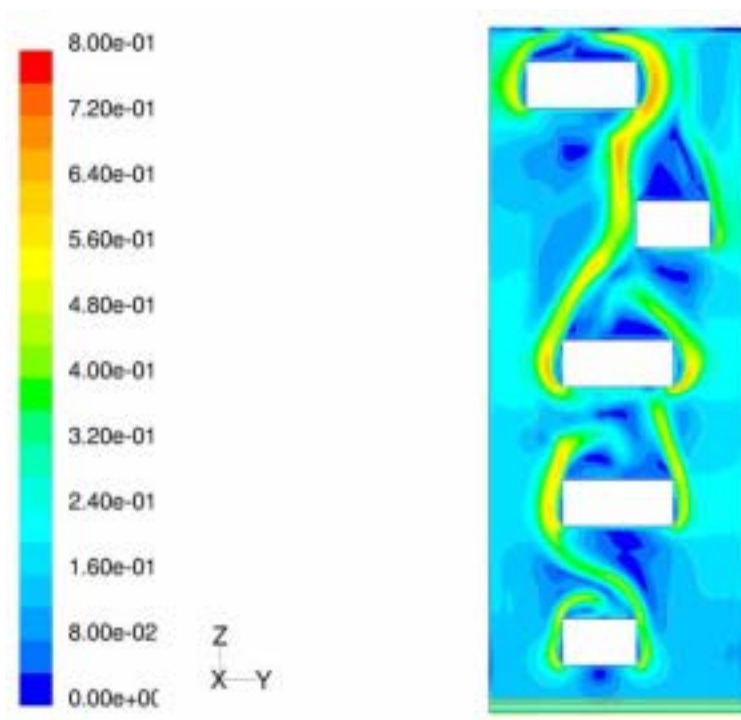
**104**

Abb. 79 Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Messfall „Fenster - Winter 2“

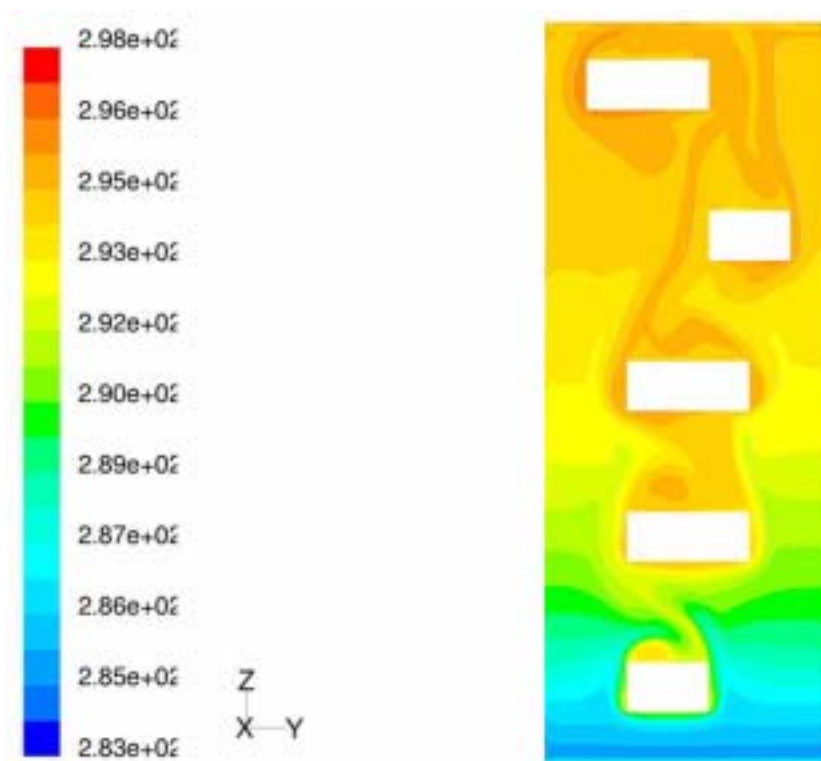


Abb. 80 Temperaturverteilung [K] Messfall „Fenster - Winter 2“

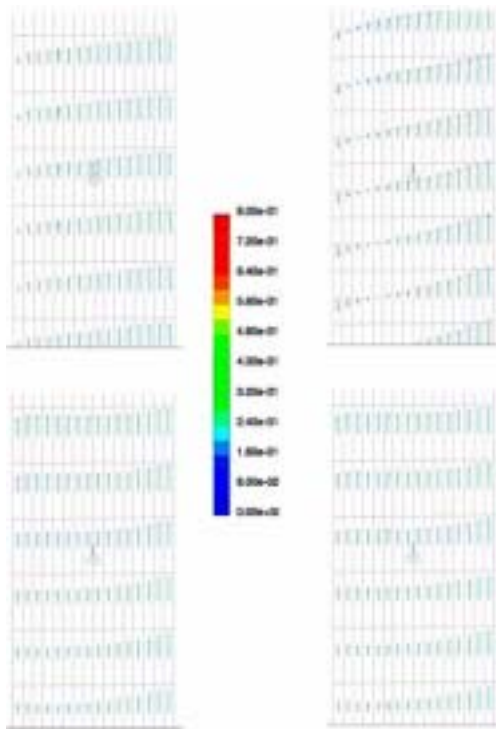


Abb. 81 Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Vektordarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Winter 2“

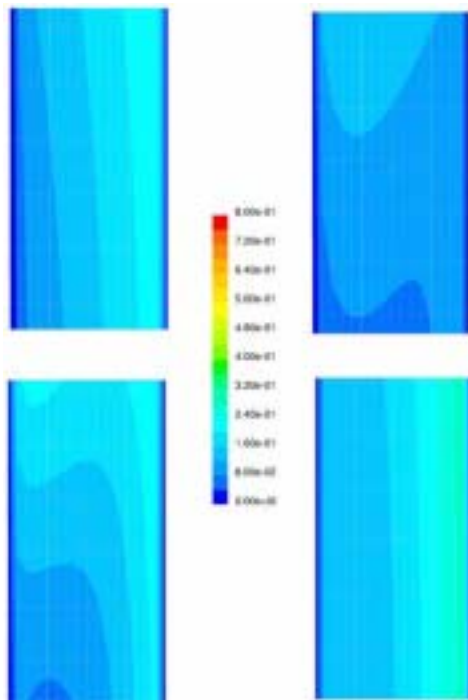
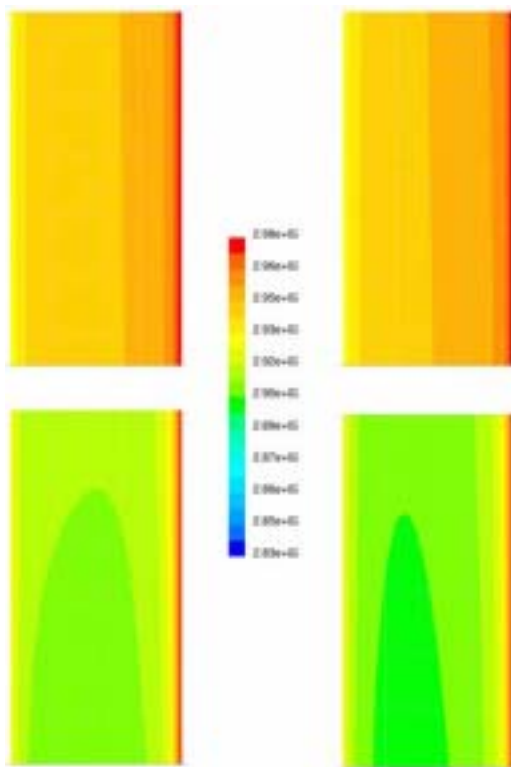


Abb. 82 Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Winter 2“



106

Abb. 83 Temperaturprofil [K] (Konturdarstellung) in den Messpunkten „Fenster - Winter 2“

Messpunkt	V_{Sim} [m/s]	V_{Mess} [m/s]	T_{Sim} [°C]	T_{Mess} [°C] *)
F1	0,163	0,282	17,29	--
F2	0,131	0,539	17,87	--
LQ1	--	--	--	17,64
F3	0,104	0,600	21,73	--
F4	0,154	0,184	21,57	--

„Fenster - Winter 2“: Geschwindigkeiten und Temperaturen in den Messpunkten

*) Temperaturen nicht gemessen bzw. nur im Referenzmesspunkt LQ1 auf halber Fassadenhöhe, etwa in der Mitte zwischen F2 und F3.

3.9.3. Messfall „Fenster - Frühjahr 1“ / 23.04., 15:50 Uhr

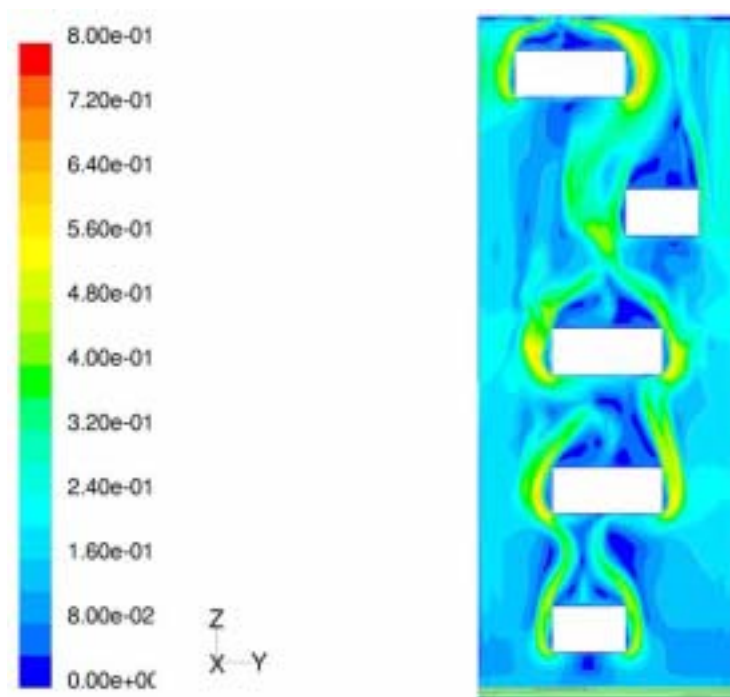


Abb. 84 Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Messfall „Fenster-Frühjahr 1“

107

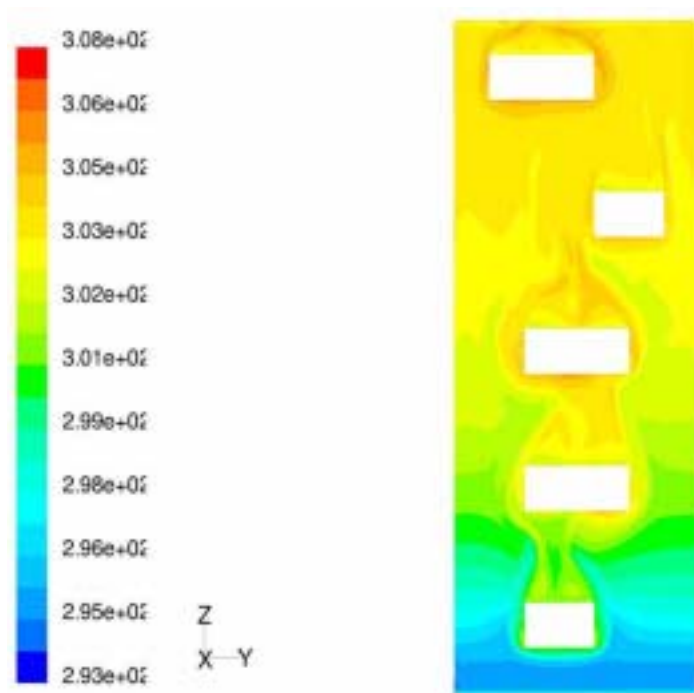
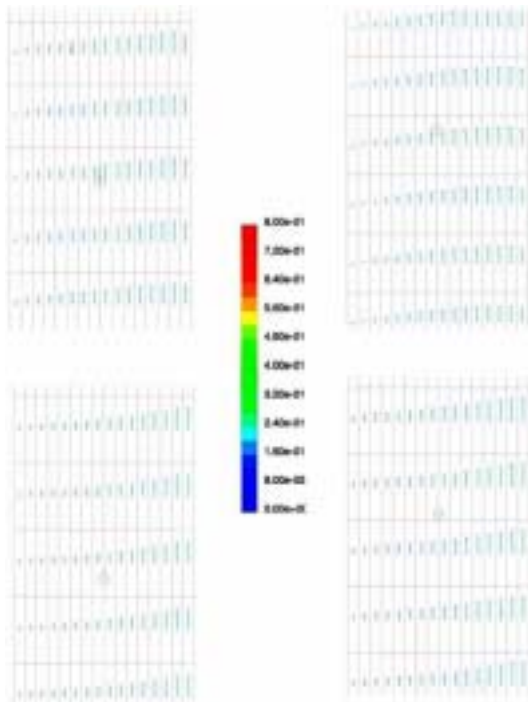


Abb. 85 Temperaturverteilung [K] Messfall „Fenster-Frühjahr 1“



108

Abb. 86 Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Vektordarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 1“

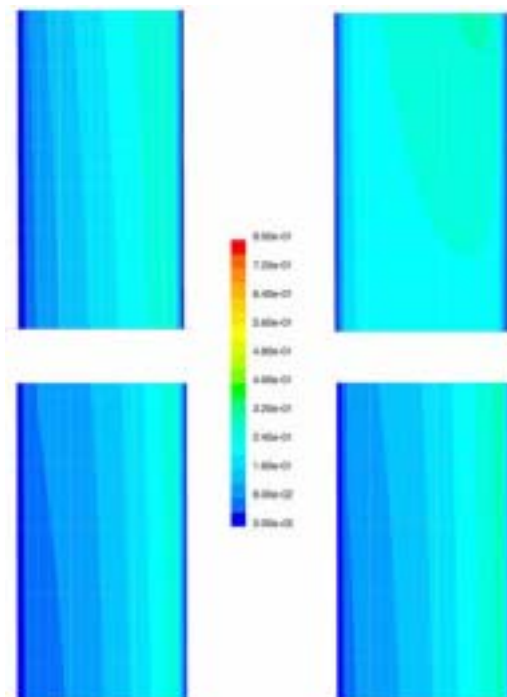


Abb. 87 Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 1“

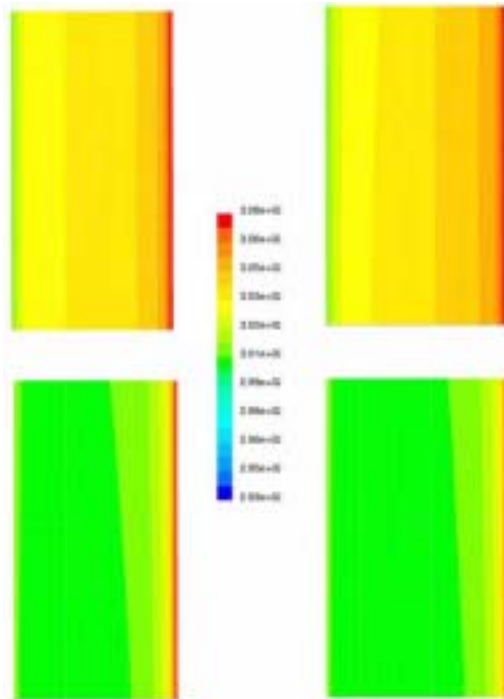


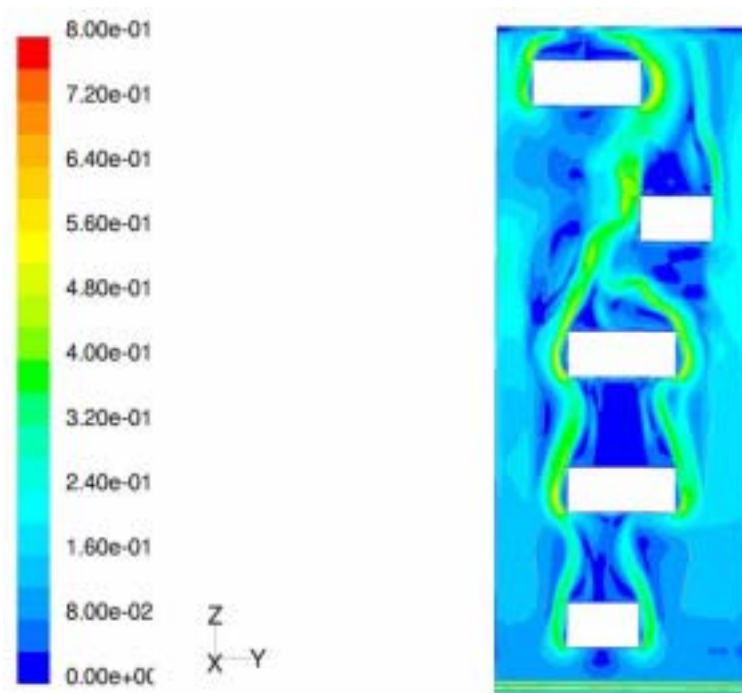
Abb. 88 Temperaturprofil [K] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Frühjahr 1“

109

Messpunkt	V_{Sim} [m/s]	V_{Mess} [m/s]	T_{Sim} [°C]	T_{Mess} [°C]
F1	0,157	0,659	27,04	25,05
F2	0,122	0,193	27,11	28,52
F3	0,248	0,532	30,72	33,37
F4	0,185	0,390	30,44	34,33

„Fenster Frühjahr 1“: Geschwindigkeiten und Temperaturen in den Messpunkten

3.9.4. Messfall „Fenster - Frühjahr 2“ / 24.04., 04:00 Uhr



110

Abb. 89 Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Messfall „Fenster-Frühjahr 2“

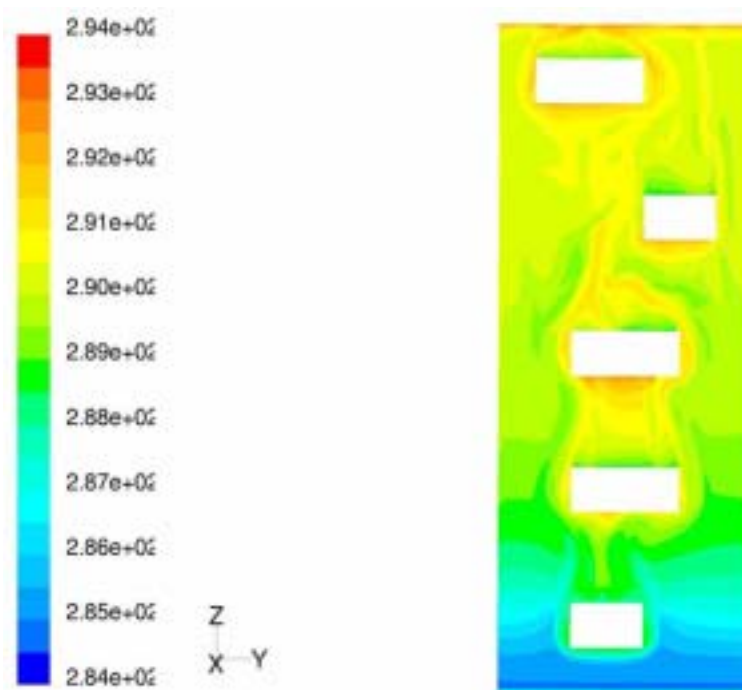


Abb. 90 Temperaturverteilung [K] Messfall „Fenster-Frühjahr 2“

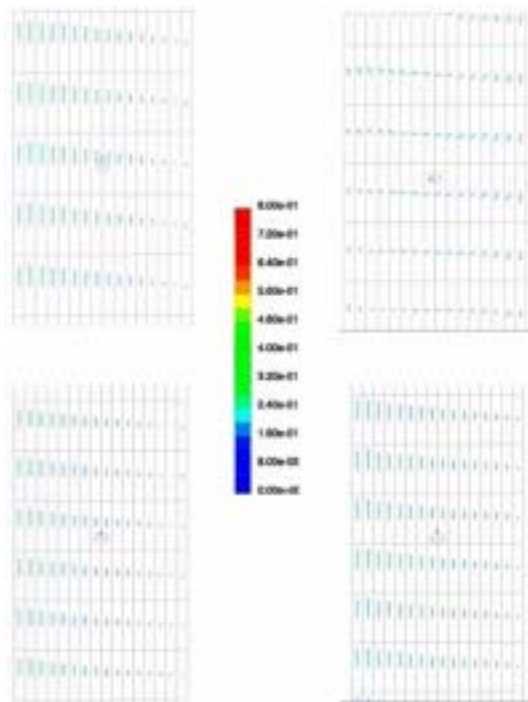


Abb. 91 Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Vektordarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 2“

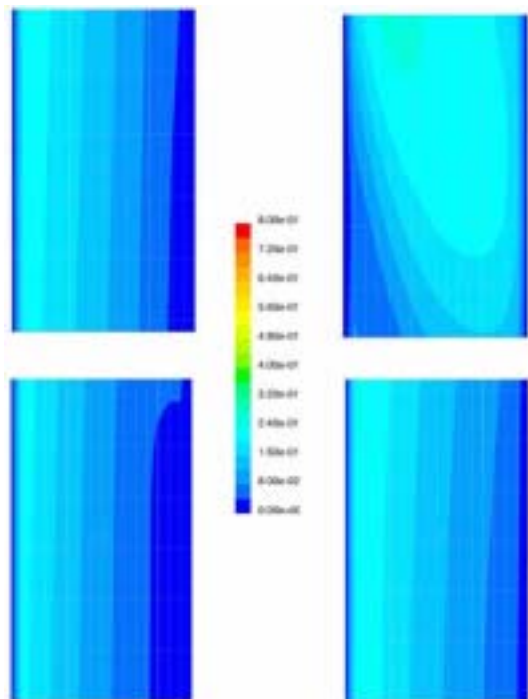
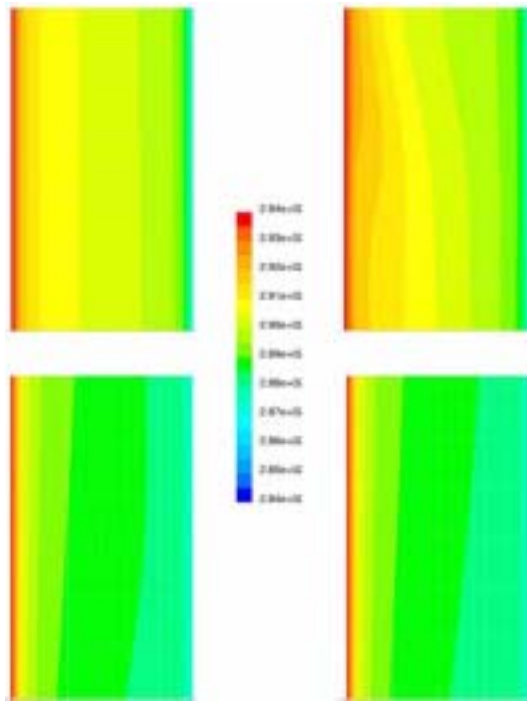


Abb. 92 Geschwindigkeitsprofil [m/s](Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 2“



112

Abb. 93 Temperaturprofil [K] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 2“

Messpunkt	V_{Sim} [m/s]	V_{Mess} [m/s]	T_{Sim} [°C]	T_{Mess} [°C]
F1	0,132	0,415	15,29	14,56
F2	0,095	0,188	15,37	15,69
F3	0,220	0,356	17,02	16,94
F4	0,130	0,416	16,95	17,08

„Fenster - Frühjahr 2“: Geschwindigkeiten und Temperaturen in den Messpunkten

3.9.5. Messfall „Fenster - Frühjahr 3“ / 06.05., 05:00 Uhr

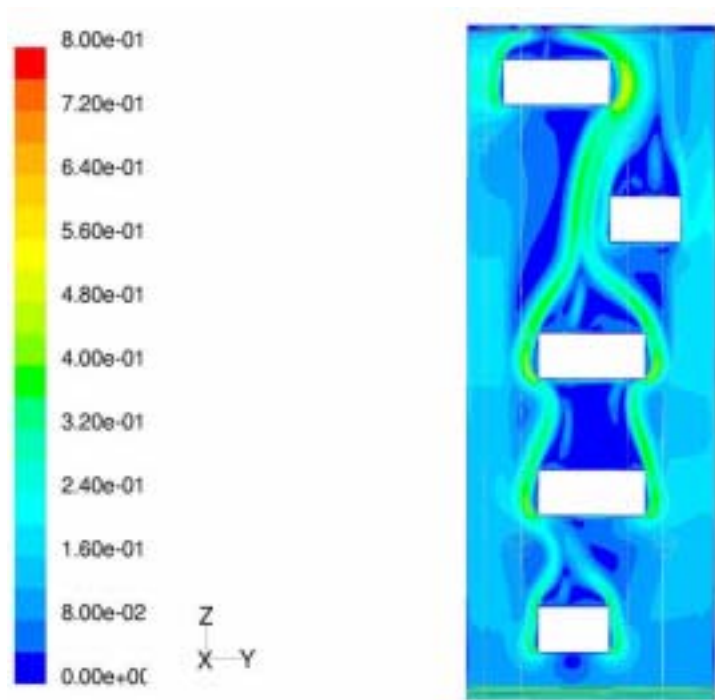


Abb. 94 Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Messfall „Fenster-Frühjahr 3“

113

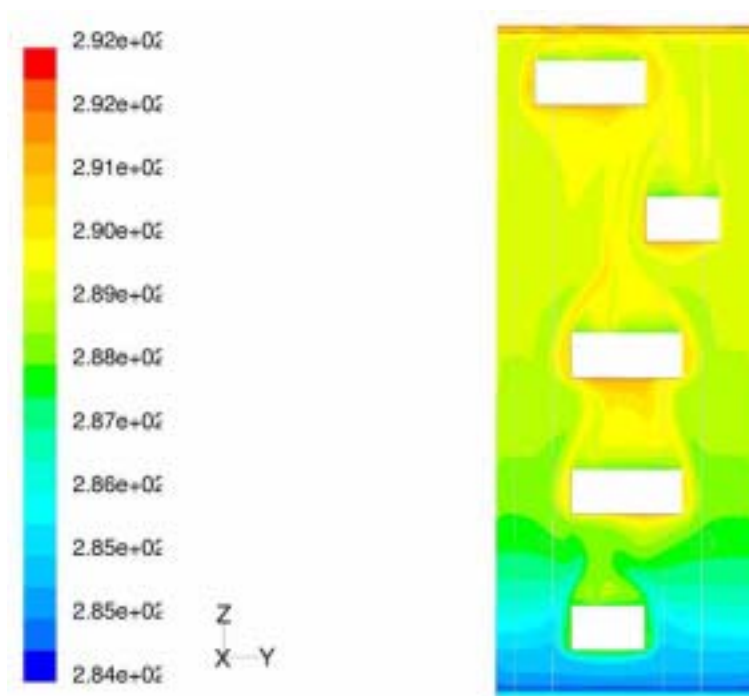
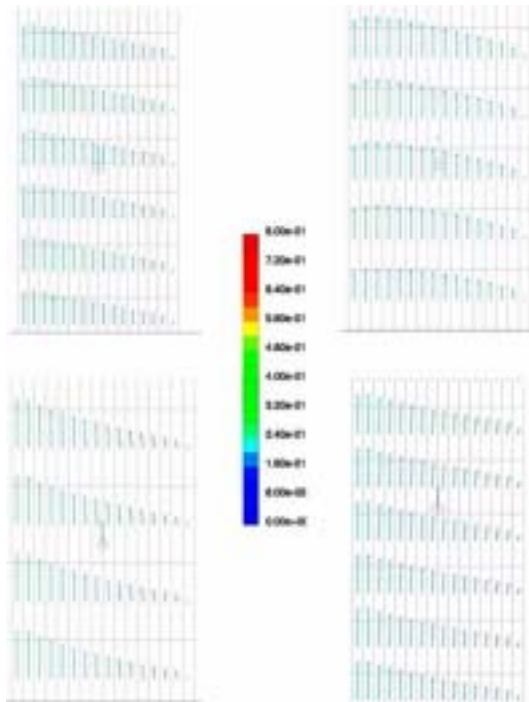


Abb. 95 Temperaturverteilung [K] Messfall „Fenster-Frühjahr 3“



114

Abb. 96 Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Vektordarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 3“

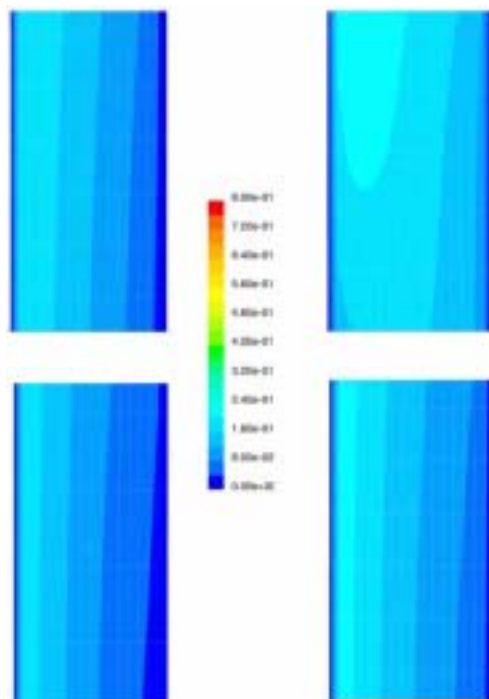


Abb. 97 Geschwindigkeitsprofil [m/s](Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 3“

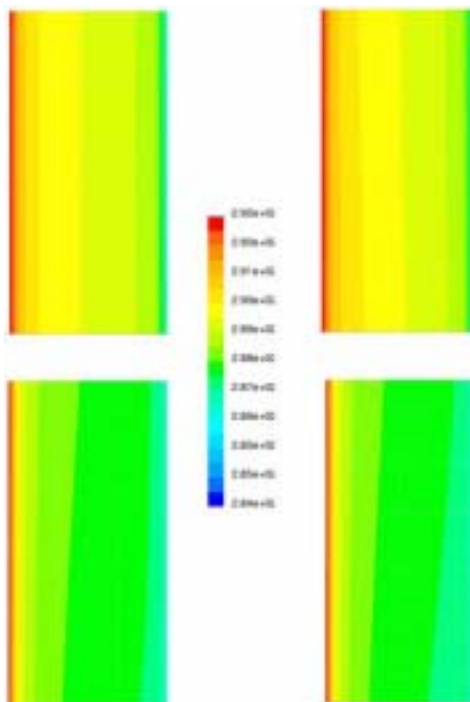
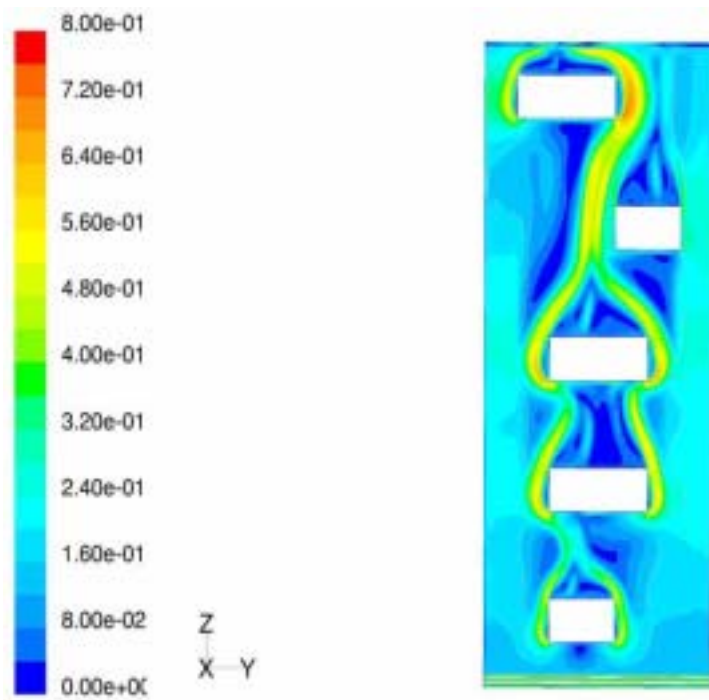


Abb. 98 Temperaturprofil [K] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 3“

Messpunkt	V _{Sim} [m/s]	V _{Mess} [m/s]	T _{Sim} [°C]	T _{Mess} [°C]
F1	0,128	0,384	14,75	14,62
F2	0,093	0,157	14,82	15,42
F3	0,185	0,326	16,29	16,58
F4	0,126	0,381	16,19	16,62

„Fenster - Frühjahr 3“: Geschwindigkeiten und Temperaturen in den Messpunkten

3.9.6. Messfall „Fenster - Frühjahr 4“ / 06.05., 13:00 Uhr



116

Abb. 99 Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Messfall „Fenster-Frühjahr 4“

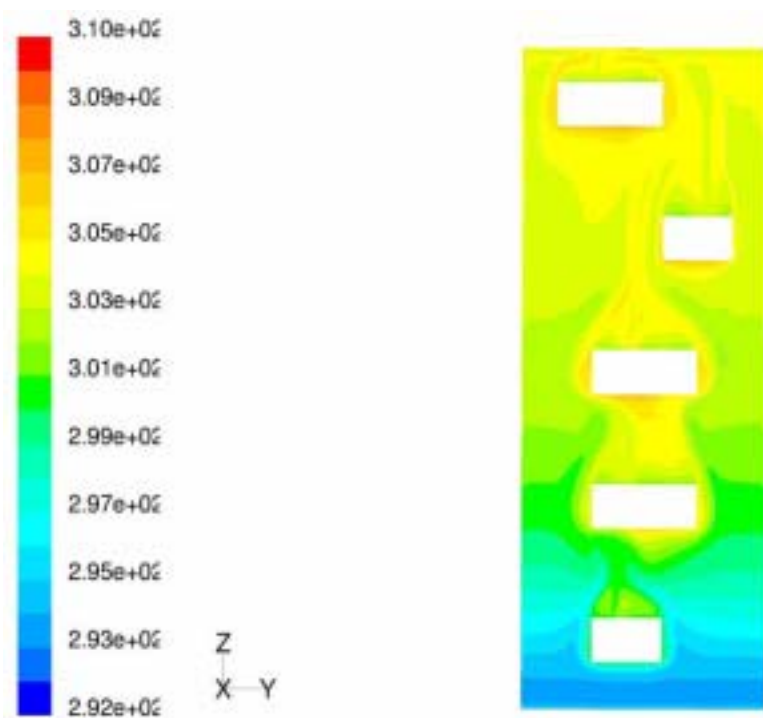


Abb. 100 Temperaturverteilung [K] Messfall „Fenster-Frühjahr 4“

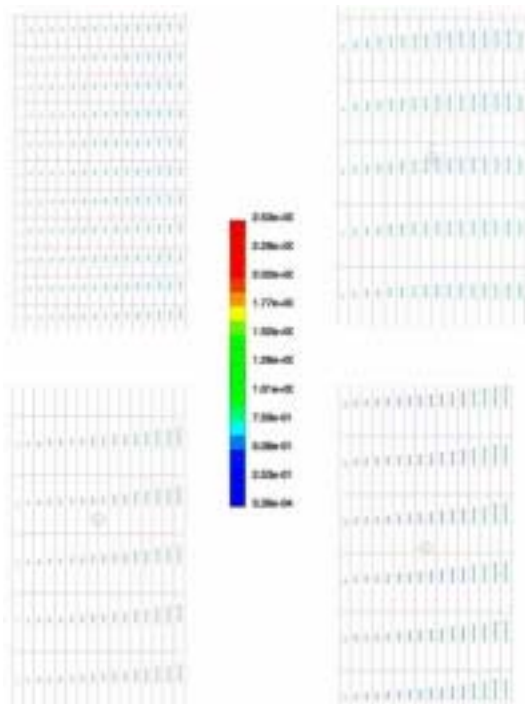


Abb. 101 Geschwindigkeitsprofil [m/s](Vektordarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 4“

117

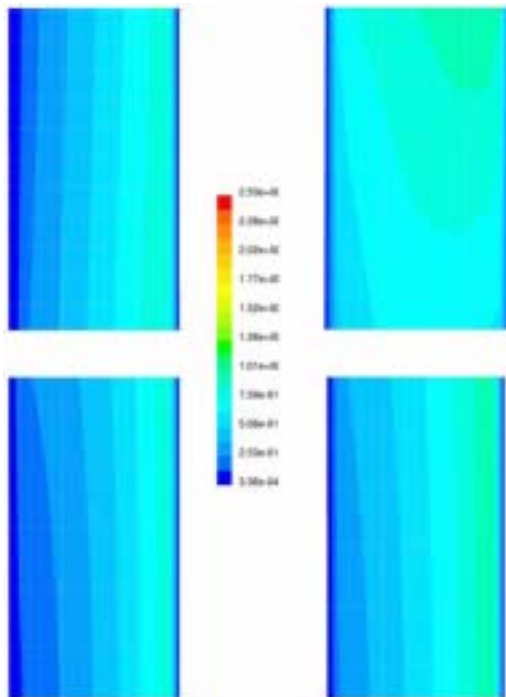
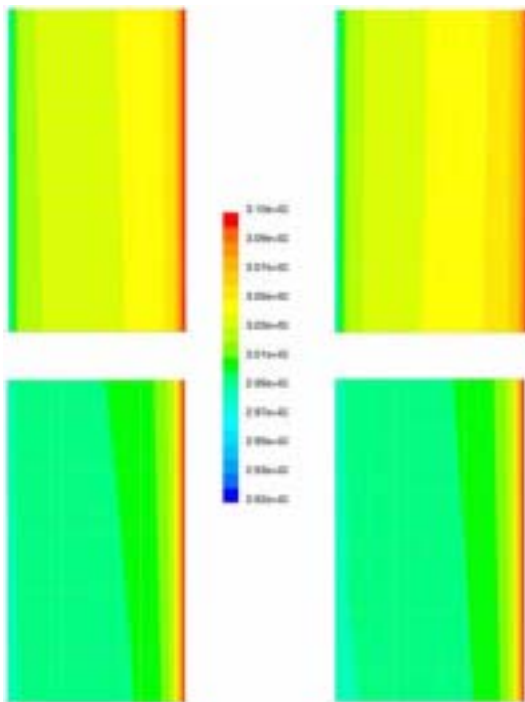


Abb. 102 Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 4“



118

Abb. 103 Temperaturprofil [K] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 4“

Messpunkt	V_{Sim} [m/s]	V_{Mess} [m/s]	T_{Sim} [°C]	T_{Mess} [°C]
F1	0,179	0,694	26,46	27,59
F2	0,128	0,177	26,61	30,29
F3	0,251	0,512	30,73	33,51
F4	0,168	0,211	30,62	33,91

„Fenster - Frühjahr 4“: Geschwindigkeiten und Temperaturen in den Messpunkten

3.9.7. Messfall „Fenster - Sommer“

Für die Fälle „Fenster - Sommer 1“ / 17.08., 14:40 Uhr und „Fenster - Sommer 2“ / 17.08, 22:40 Uhr konnte die fluidmechanische Simulation keine Ergebnisse liefern, dh. es konnte in diesen Fällen keine Konvergenz im Simulationsprogramm erreicht werden. Dies hängt mit der Komplexität des Simulationsraumes in Verbindung mit den spezifischen Parametern (hohe Temperaturen, hohe Geschwindigkeiten, komplexe Ablösungsphänomene an den Fensterlaibungen) zusammen. Aufgrund der Größe des betrachteten Fassadenabschnittes enthält das numerische Gitter eine sehr große Anzahl von Zellen (Gitterpunkten), die eine Hauptspeicherkapazität von 1 GB erforderten.

Durch Erhöhung der Anzahl der Gitterpunkte in Verbindung mit deutlich gesteigerter Rechnerleistung sollten diese Fälle jedoch modellierbar sein. In der folgenden Tabelle werden der Vollständigkeit halber die ermittelten Messwerte dargestellt.

Messpunkt	V_{Mess1} [m/s]	V_{Mess2} [m/s]	T_{Mess1} [°C]	T_{Mess2} [°C]
F1	0,915	0,413	33,83	22,19
F2	0,923	0,501	37,48	22,41
F3	0,691	0,302	41,51	24,39
F4	0,369	0,337	42,35	24,40

„Fenster - Sommer 1“ bzw. „Fenster - Sommer 2“:

Geschwindigkeiten und Temperaturen in den Messpunkten

3.9.8. Messfall „Wand - Sommer 1“ / 31.08., 05:20 Uhr

Für diesen Fall wurden die Geschwindigkeits- und Temperaturprofile im Spalt für die Messstellen H1, H2, H3 und H4, H5, H6 in Form von Vektor- und Konturdarstellung angegeben. Außerdem wird die Temperaturverteilung in der zu den Wänden parallelen Ebene in Spaltmitte dargestellt, um die Erwärmung der Luft beim Aufsteigen im Spalt zu veranschaulichen. Auf eine Darstellung von Geschwindigkeiten in dieser Form bzw. die Darstellung von Geschwindigkeitsprofilen über die gesamte Fassadenhöhe wurde aufgrund der Proportionen des Fassadenzwischenraumes sowie der geringen Unterschiede verzichtet.

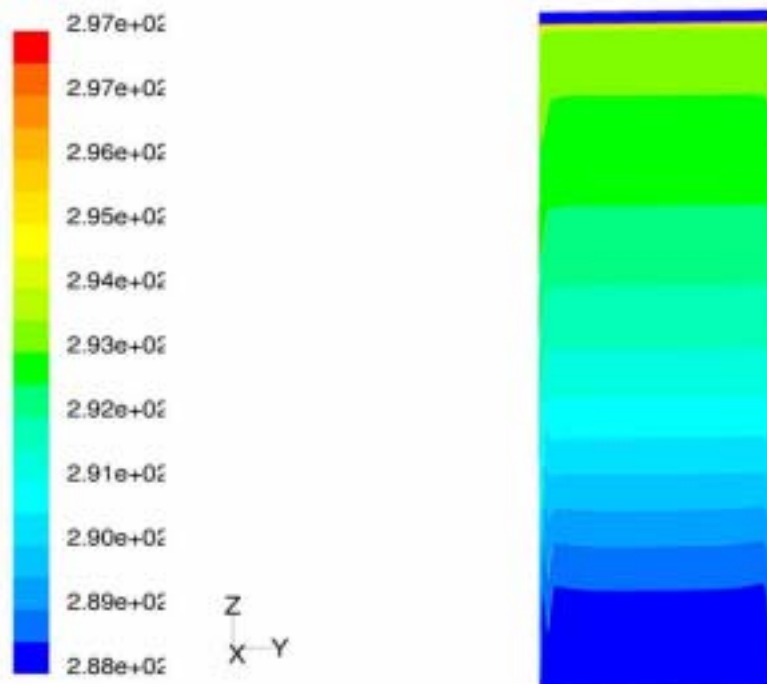
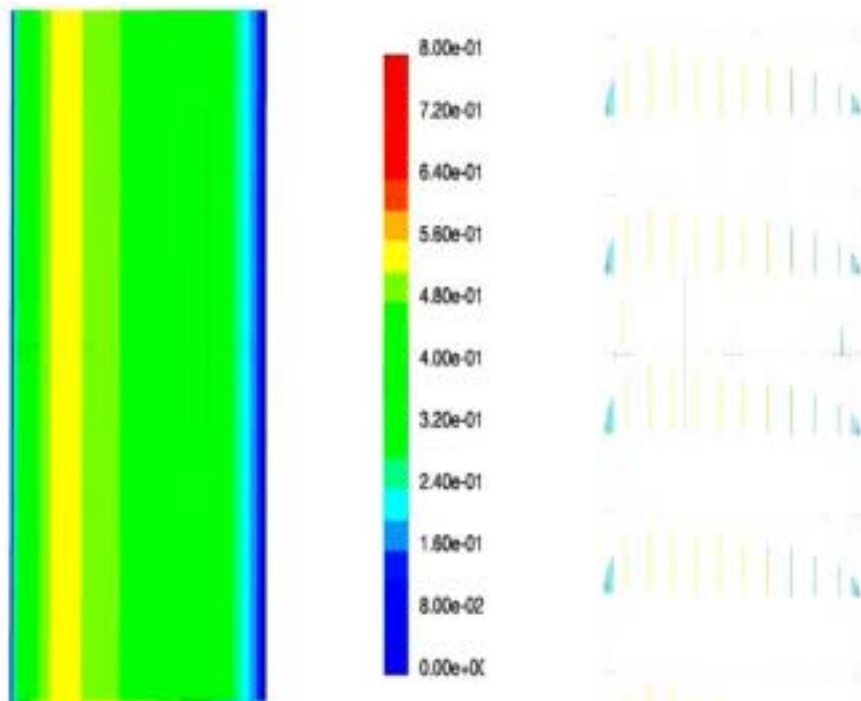


Abb. 104 Temperaturverteilung [K] Messfall „Wand - Sommer 1“



120

Abb. 105 Geschwindigkeitsprofil [m/s] in den Messpunkten H1 bis H3, „Wand - Sommer 1“

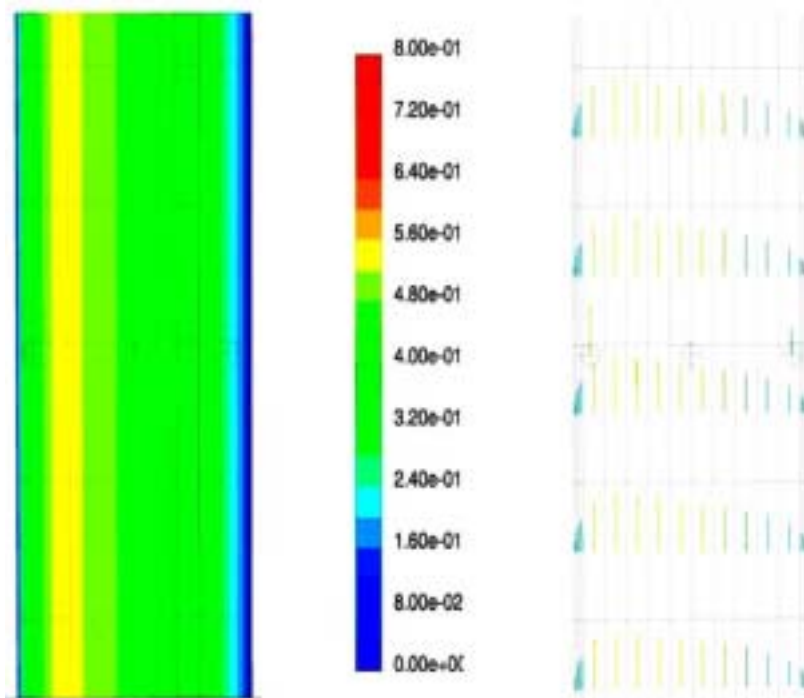


Abb. 106 Geschwindigkeitsprofil [m/s] in den Messpunkten H4 bis H6, „Wand - Sommer 1“

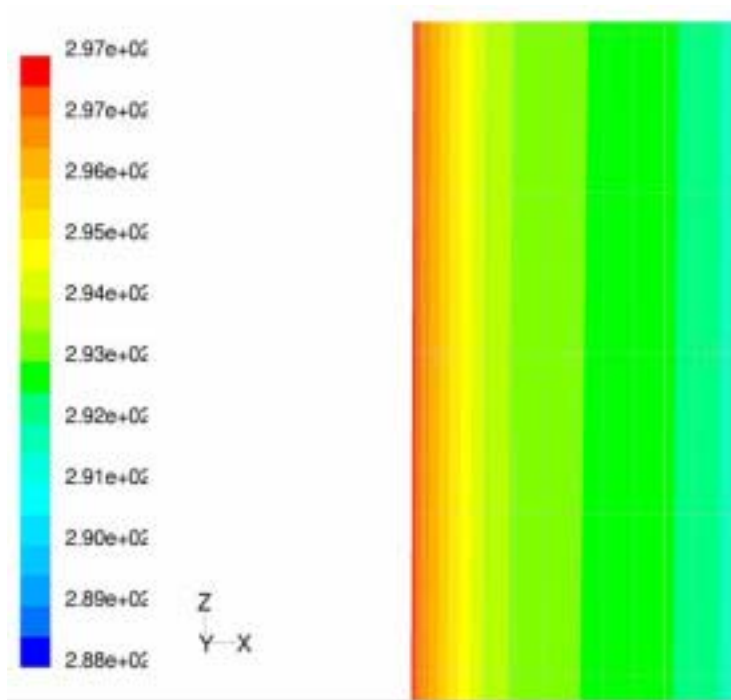


Abb. 107 Temperaturprofil [K] in den Messpunkten H1 bis H3, „Wand - Sommer 1“

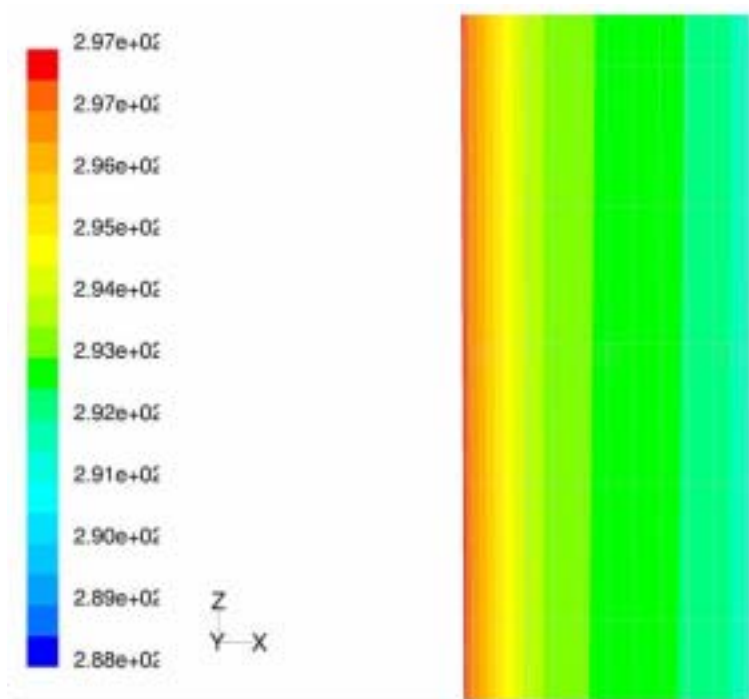


Abb. 108 Temperaturprofil [K] in den Messpunkten H4 bis H6, „Wand - Sommer 1“

Messpunkt	V _{Sim} [m/s]	V _{Mess} [m/s]	Messpunkt	T _{Sim} [°C]	T _{Mess} [°C]
H1	0,391	0,372	KG	--	--
H2	0,459	0,277	EG	--	--
H3	0,211	0,127	1. OG	--	--
H4	0,389	--	2. OG	--	19,63
H5	0,461	--	3. OG	19,65	20,06
H6	--	--	--	--	--

„Wand - Sommer 1“: Geschwindigkeiten und Temperaturen in den Messpunkten

Der Temperaturwert 3. OG wurde als Mittelwert zwischen H2 und H4 bestimmt.

3.9.9. Messfall „Wand - Sommer 2“ / 31.08., 15:30 Uhr

Für diesen Fall wurden die Ergebnisse ähnlich wie für „Wand - Sommer 1“ / 31.08., 05:20 Uhr dargestellt, allerdings werden die Profile über der Spalttiefe für die Mitte der Fassade gezeigt, und nicht für beide Lagen der Messpunkte. Grund dafür ist die in allen Fällen beobachteten nur geringfügigen Änderungen in diesem Bereich.

122

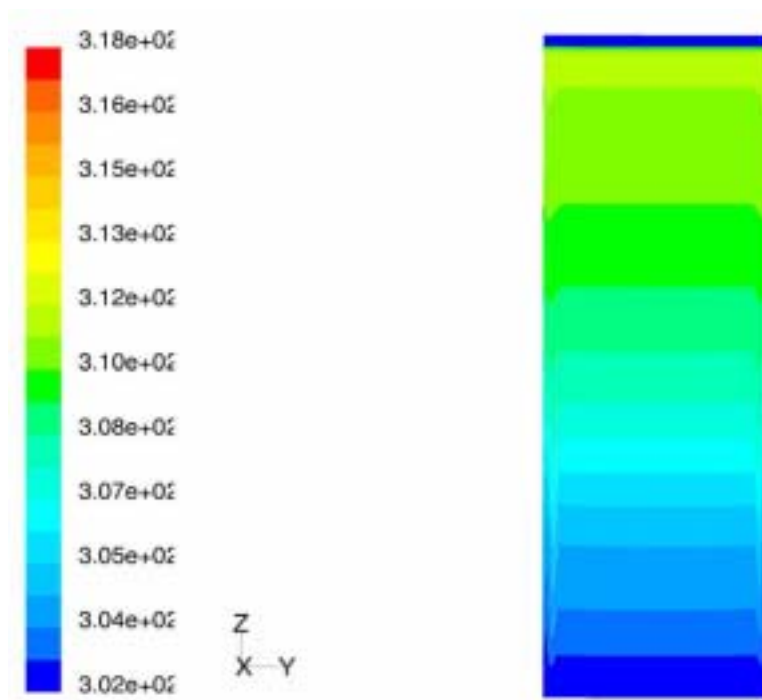


Abb. 109 Temperaturverteilung [K] Messfall „Wand - Sommer 2“

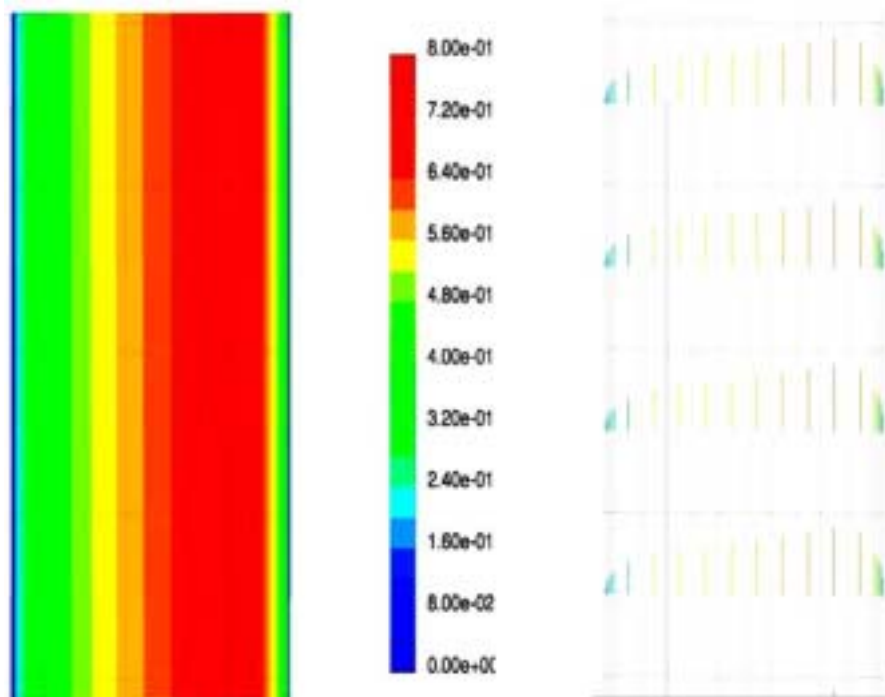


Abb. 110 Geschwindigkeitsprofil [m/s] in der Mitte des Abschnittes, „Wand - Sommer 2“

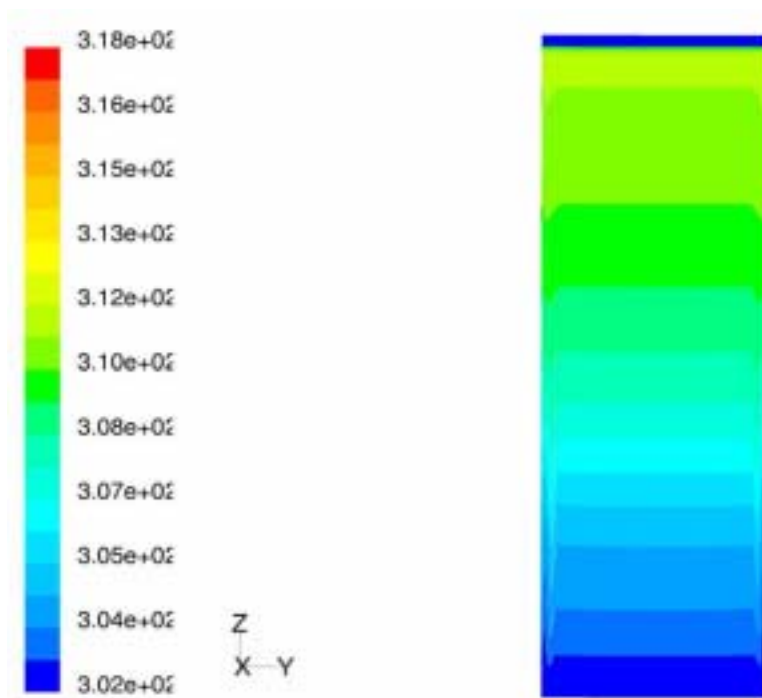


Abb. 111 Temperaturprofil [K] in der Mitte des Abschnittes, „Wand - Sommer 2“

Messpunkt	V _{Sim} [m/s]	V _{Mess} [m/s]	Messpunkt	T _{Sim} [°C]	T _{Mess} [°C]
H1	0,316	0,316	KG	--	--
H2	0,631	0,438	EG	--	--
H3	0,528	0,293	1. OG	--	--
H4	0,315	--	2. OG	--	39,07
H5	0,632	--	3. OG	37,45	38,79
H6	0,526	--	--	--	--

„Wand - Sommer 2“: Geschwindigkeiten und Temperaturen in den Messpunkten

3.10. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Aus fluidmechanischer Sicht kann festgestellt werden, dass die Simulationen grundsätzlich eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten ergaben, und daher zur Durchführung von Vergleichsberechnungen ausgezeichnet geeignet sind.

Insbesondere in der deutlich einfacheren Konfiguration der Messfälle „Wand“ konnte sowohl hinsichtlich der Temperaturen wie auch der Geschwindigkeiten eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden. Die Simulationen des Falles „Wand - Winter“ (Phase 2) zeigten auch, dass mit den durch thermische Simulationsberechnungen ermittelten Oberflächentemperaturen als Eingabeparameter für die fluidmechanischen Simulationen ähnliche Geschwindigkeiten errechnet wurden, da die Temperaturdifferenzen als entscheidende Größe nahezu gleich bleiben. Dies zeigt auch, dass diese in der Gebäudesimulation eingesetzten Werkzeuge gut für Vorausberechnungen bei Problemstellungen geeignet sind, die der hier behandelten ähnlich sind.

Die Abbildungen zu den berechneten Fällen im Abschnitt „Fenster“ zeigen deutlich, dass hier relativ komplexe Strömungen mit relativ hohen Übergeschwindigkeiten, aber auch Ablösegebiete auftreten können. Die im Vergleich zum Abschnitt Wand etwas deutlicheren Abweichungen der Geschwindigkeiten in den Vergleichspunkten können plausibel erklärt werden.

Mögliche Gründe sind einerseits Schwächen der numerischen Simulation, deren Ursachen dem verwendeten groben Gitter zugeschrieben werden können. Andererseits kann aus den entsprechenden Abbildungen leicht erkannt werden, dass die Geschwindigkeiten in der Umgebung der Messpunkte in allen Richtungen deutliche Gradienten aufweisen. Geringfügig unterschiedliche Lagen der Messfühler, deren Toleranzen vor allem in Bereichen niedriger Geschwindigkeiten, oder bauliche Gegebenheiten können zu den zum Teil beobachteten Differenzen führen. Weitere Fehlerquellen sind durch die Dichtschräuche oder Schwierigkeiten in der Steuerung/Bedienung der Luftklappen möglich.

Weiters können Abweichungen zwischen Simulation und Messung durch die Vereinfachungen und Vernachlässigungen entstehen, die zwar nach bestem Wissen geprüft wurden, aber erst die Simulation der riesigen Volumina mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen ermöglicht haben. Aufgrund der vorliegenden Messdaten mussten mit Ausnahme des in Phase 2 berechneten Falles durchwegs Zeitpunkte gewählt werden, wo eine nicht unerhebliche Windbelastung auftrat, die die Strömung im Fassadenspalt gravierend beeinflussen kann.

Die Auswirkungen derartiger Windkräfte auf gegebenenfalls nicht dichtschießende Lüftungsklappen stellen ein, für die Konstruktion von (Glas)Doppelfassaden wichtiges Phänomen dar, da die thermischen Auftriebsströmungen im Extremfall sogar umgedreht bzw. durch Sogwirkung bedeutend höhere Strömungsgeschwindigkeiten erreicht werden können.

Im Hinblick auf baupraktische Berechnungen zur Auslegung von Doppelfassaden kann festgestellt werden, dass fluidmechanische Simulationen in der hier angewandten Form aufgrund des enormen Bedarfes an Ressourcen (Hardware, Rechenzeit) eher nicht geeignet erscheinen. Zur wissenschaftlichen Kontrolle in Einzelfällen kann diese Art der Simulation aber mit guter Aussagekraft eingesetzt werden. Bei Verfügbarkeit geeigneter Ressourcen könnten auch die hier vorgenommene Vereinfachungen umgangen werden, und damit die Aussagekraft der Ergebnisse erhöht werden.

4. Sondierungsmessungen

Mag. Günther Hofmann

Am Freitag, den 11.06.2001 fanden in der Zeit von 10.00 bis 12.30 Uhr mit Unterstützung von Herrn Dir. HR Mag. Wolfram Thorwartl und Herrn Salachov, alle BiSoP Baden, erste Sondierungsmessungen der Strömungsgeschwindigkeiten im Fassadenzwischenraum der Süd- und Westfassade statt.

Die Lüftungsklappen im Attikabereich der Südfassade waren im östlichen und westlichen Drittel der Hausfront geöffnet, im mittleren Drittel geschlossen.

Die unteren Lüftungsklappen (zwei Reihen) an der Südfassade waren alle geöffnet.



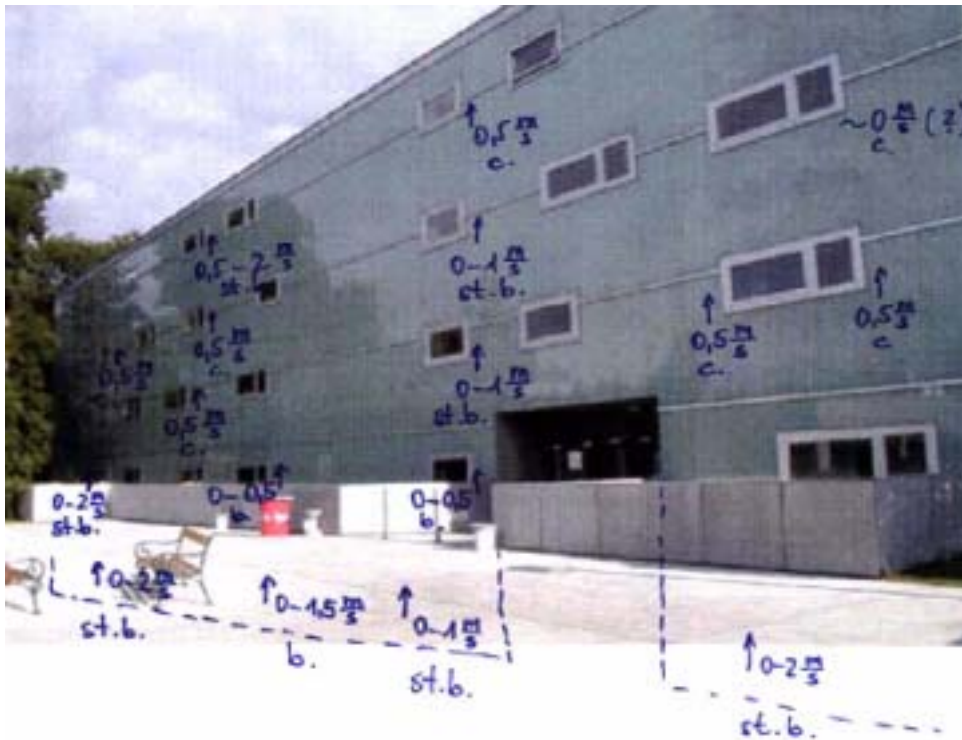
Abb. 112 Ansicht Südfassade mit oberen (links) und unteren Lüftungsklappen (rechts)

Es herrschte regnerisches Wetter, 15 °C, böig wechselnder Wind mit Geschwindigkeiten zwischen 0 und mehr als 3 m/s. Die Sonne war kaum sichtbar, sodass durch die geringere Thermik im Vergleich zu einem Hochsommertag die geringen Strömungsgeschwindigkeiten hinter der Glasfassade erklärbar sind.

Gemessen wurde an 16 Stellen der Südfront in fünf verschiedenen hoch gelegenen Etagen sowie an zwei Stellen der Westfront. Dabei wurde ein Schalenkreuz-Anemometer mit Kunststoffschalenkreuz verwendet, das ein recht sanftes Ansprechverhalten für geringe Windgeschwindigkeiten aufweist (Gerät der EUR 145,- Klasse).

Die Messungen wurden soweit links von den Fensterkästen vorgenommen, wie das Messgerät mit der Hand durch den geöffneten Fensterflügel in den Fassadenzwischenraum eingeführt werden konnte. Der untere Fensterflügel war dabei so wenig wie möglich nach innen geklappt. Dennoch war ein deutlicher Luftzug aus dem Spalt heraus wahrnehmbar.

Die Ergebnisse der Messungen sind in untenstehender Graphik dargestellt:



Legende: **st.b.:** stark böig, **b.:** böig, **c.** ziemlich constant scheinende Strömung

128

Abb. 113 Südfassade mit ersten Sondiermessungen

Die Messwerte am Fuß der Südfassade zeigten generell recht hohe Strömungsgeschwindigkeiten. Die Strömungsgeschwindigkeiten hinter der Glasfassade kann unter den gegebenen, regnerischen Bedingungen auf etwa 0,2 bis 0,5 m/s geschätzt werden. Wie stark der tatsächliche Wert durch das Öffnen der Klappen zwecks Zugang verfälscht wurde und wie stark der Strömungswert in der Mitte zwischen zwei Fensterkästen vom gemessenen abweicht, kann nicht eingeschätzt werden. Um die Fensterkästen muss der Luftstrom rechts und links vorbei.

Die Messwerte an der Westfassade waren ähnlich zur Südfassade; 2 m/s im Untergeschoss beim 1. Fenster oberhalb des Erdniveaus und 0,5 m/s ziemlich konstant im 1.Stock.

5. Vorort- Messungen

o.Univ.Prof. DI DDr. Jürgen Dreyer, Univ.Ass. DI Dr. Thomas Bednar,
DI Christian Jachan, Ing. Georg Eger

Ausgangssituation

Der Einbau, die Verkabelung der Sensoren sowie der Messbetrieb hatten unter größtmöglicher Schonung des Gebäudes und minimalster Störung des Schulbetriebes zu erfolgen. Eine temporäre Demontage der Glasfassade zum Zwecke des Messaufbaus wurde aus wirtschaftlichen Gründen unterlassen.

5.1. Messbereiche

Auf Grund der hohen Kosten für die Sensorik wurde die Messung in zwei Abschnitte unterteilt. Die Montage und Verkabelung der Messinstrumente wurde so ausgeführt, dass der Umbau zwischen den Messbereichen mit minimalem Aufwand durchgeführt werden konnte. Für einige Messinstrumente, wie zB die Wetterstation, war kein Umbau notwendig. Diese werden im folgenden als „Messung - ortsfest“ bezeichnet.

Die Messung „Fenster“ wurde im Bereich der Elemente 1 bis 7 durchgeführt. Die Verhältnisse im Fassadenzwischenraum werden in diesem Abschnitt von Fensterkästen beeinflusst. Die Fenster sind bündig mit der Außenhaut angeordnet und die Laibungen sind umlaufend bis zur Innenseite der Außenwand verkleidet. Es findet kein Luftaustausch zwischen den Fensterbauteilen und dem Fassadenzwischenraum statt.

Im Bereich zwischen dem 8. und dem 13. Element wurde die Messung „Wand“ vorgenommen. Hier ist das ungestörte Verhalten der über fünf Geschosse durchlaufenden Fassadenkonstruktion beobachtbar.

Um störende Querströmungen im Fassadenzwischenraum auszuschließen, wurde an den Rändern der Messbereiche vertikale Trennelemente eingebaut. Diese Trennungen bestehen aus Kunststoffschläuchen, die von einem Gebläse mit vorgeschaltetem Schalldämpfer unter Überdruck gehalten werden. Der Durchmesser der Schläuche ist größer als der Fassadenspalt, sodass sie satt am Glas bzw. an der Betonwand anliegen und dadurch die Messbereiche vom übrigen Fassadenzwischenraum abtrennen.

In der Abb. 114 ist einer der als Abschottung eingesetzten Kunststoffschläuche im eingebauten Zustand ersichtlich.



Abb. 114 eingebaute Abschottung und teilweise demontiertes Insektenschutzgitter

5.2. Einbau der Sensoren

Die Sensorik im Messbereich „Wand“ war mittels eines 2 cm dicken Metallrohres, das von der Attika aus eingebracht und an der Betonwand befestigt wurde, in vertikaler Richtung positioniert. Horizontale Auskragungen wurden mittels geeigneter Metallprofile hergestellt. Im Bereich „Fenster“ wurden die Sensoren auf Metallstäben befestigt, die vom nächstgelegenen Fenster aus eingebaut wurden. Die Halterungen waren so ausgeführt, dass sie die minimalste strömungstechnische Behinderung darstellen. Die Verkabelung und die fallweise erforderlichen Messumformer der Sensoren waren am Metallrohr montiert.

5.3. Zeitplan und Klappenstellung

Um die Stellung der Klappen am Fuß- und Kopfpunkt der Fassade, die sich an den Außenverhältnissen orientiert, zu berücksichtigen, wurden je Messung zwei Fälle untersucht. In der folgenden Tabelle sind die Beginn- und Endzeitpunkte der Messungen mit den zugehörigen Klappenstellungen dargestellt.

Messung	Klappenstellung	Beginn	Ende
„Wand - geschlossen“	geschlossen	24.10.2001	26.01.2002
„Fenster - geschlossen“	geschlossen	18.04.2002	07.08.2002
„Fenster - offen“	offen	08.08.2002	22.08.2002
„Wand - offen“	offen	23.08.2002	09.09.2002

Tab. 4 Messzeiträume

5.4. Messpositionen

Die Südfassade wurde in ein Raster unterteilt, um die Positionen für die Anordnung der Sensoren festlegen zu können. Die Fassadenelemente wurden in Längsrichtung fortlaufend nummeriert. Die Elementnummer 1 wurde dem Element rechts neben der Doppeltür im Kellergeschoss zwischen Fassadenachse 5 und 6 zugeordnet. Die Gliederung der Höhe nach erfolgte anhand der Geschossbezeichnungen.

In der folgenden Südsicht des Messobjektes sind die Messabschnitte „Fenster“ (Fassadenelement 1 bis 7) und „Wand“ (Fassadenelement 8 bis 13) mit den zugehörigen Messpositionen verzeichnet.

Generell waren die Messpunkte nicht in der Nähe von Fassadenbefestigungen angeordnet.

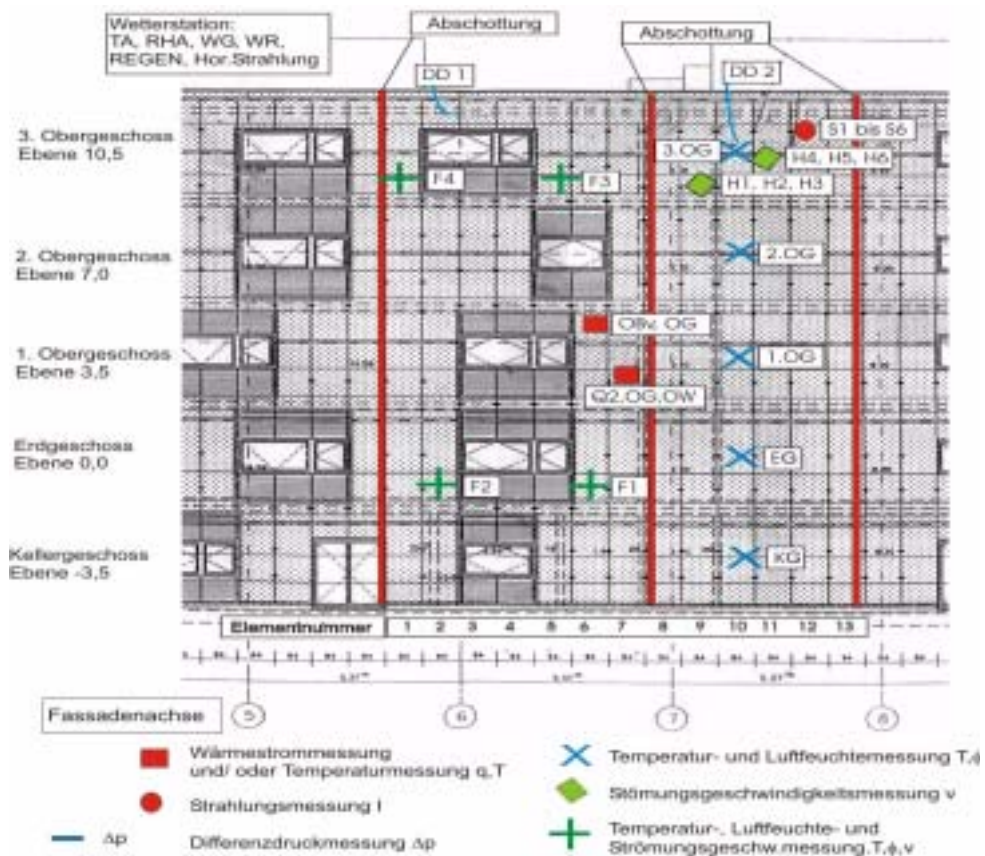


Abb. 115 Südsicht mit Messpositionen

5.4.1. Messung „ortsfest“

Wärmestrom

Der Wärmestrom durch die opake Wandkonstruktion wurde mit einer auf der Innenseite der Innendämmung angebrachten Wärmestrommessfolie **Q1** im Bereich des Technikraumes im 1. Obergeschoss in Parapettmitte bestimmt. Die Innenoberflächentemperatur **OI** und die Raumlufttemperatur **TI** wurden im Technikraum des 1. Obergeschosses bestimmt.

Strahlung

Ein Pyrradiometer für den kurz- und langwelligen Bereich bestimmte die vertikale Sonnenstrahlung vor der Fassade **S3** und die Reflexion von der Fassade **S4** (je ein CM3; siehe dazu Kapitel A3 „Sensorik“). Die Strahlungsmessinstrumente **S1** (CM11) und **S2** (CM3) in analoger Anordnung maßen den kurzwelligen Strahlungsanteil. Die außenliegenden Strahlungsmessgeräte waren ca. 0,5 m vor dem Fassadenelement 12 im Bereich des 3. Obergeschosses so angeordnet, dass sie die innenliegenden nicht beeinflussen.

Die Strahlungsmessung mit CM3-Geräten für den kurzwelligen Bereich im Fassadenzwischenraum war bei Fassadenelement 12 im oberen Bereich des 3. Obergeschosses angeordnet. Um den Strahlungseintrag auf die Betonwand zu bestimmen, wurde der Strahlungsmesser **S5** auf der Außenoberfläche des Betons mit Blickrichtung Glas befestigt. Ein direkt an der Scheibe angeordneter Sensor **S6** mit Blickrichtung zur Betonoberfläche maß deren Reflexion. Dadurch konnten die Reflexions- und Absorptionseigenschaften der Fassadenbauteile bestimmt werden.

Außenklima

Mit Hilfe der Wetterstation, die am Dach des Gebäudes aufgebaut war, wurden die Außentemperatur **TA**, die Luftfeuchtigkeit **RHA**, die Windgeschwindigkeit **WG** und -richtung **WR** und der **REGEN** gemessen.

5.4.2. Messung „Wand - Klappen geschlossen“

Die Messung wurde von Ende Oktober 2001 bis Ende Januar 2002 durchgeführt, wobei die Klappen der Fassadenkonstruktion geschlossen waren.

Temperatur und Luftfeuchte

Die Temperatur- und Luftfeuchtesensoren waren im Messfall „Wand“ über die Gebäudehöhe verteilt angeordnet, um die Schichtung der Luft im Fassadenspalt zu beobachten.

An fünf Positionen **KG**, **EG**, **1.OG**, **2.OG**, **3.OG** wurde die Temperatur und die Luftfeuchte gemessen. Alle Positionen befanden sich in der Mitte des Elements 10 und jeweils in Geschossmitte. Die Sensoren befanden sich in einem lotrecht angeordneten Rohr, das die direkte Sonnenbestrahlung abschirmte. Die unbehinderte Luftumströmung der Sensoren ermöglichte die Messung der Lufttemperatur und der Luftfeuchtigkeit im Fassadenzwischenraum. Die Betauungsdauer des Sensors **K6** in der Mitte des verschatteten Kellergeschosses ging über dessen Belastbarkeit hinaus. Mitte Dezember 2001 ist dieser ausgefallen.

Strömungsgeschwindigkeit

Die Strömungsgeschwindigkeiten **H1**, **H2**, **H3** wurden in der Mitte des Elements 9 ca. 2,5 m von der Fassadenoberkante und **H4**, **H5**, **H6** in der Mitte des Elements 11 ca. 1,5 m von der Fassadenoberkante gemessen. Je Messung waren drei Messpunkte vorgesehen. Jeweils ein Sensor (**H2**, **H5**) war in der Mitte des Luftspaltes platziert, die anderen in einem Abstand von ca. 1 cm zur Betonwand (**H1**, **H4**) bzw. zur Glasscheibe (**H3**, **H6**).

Differenzdruck

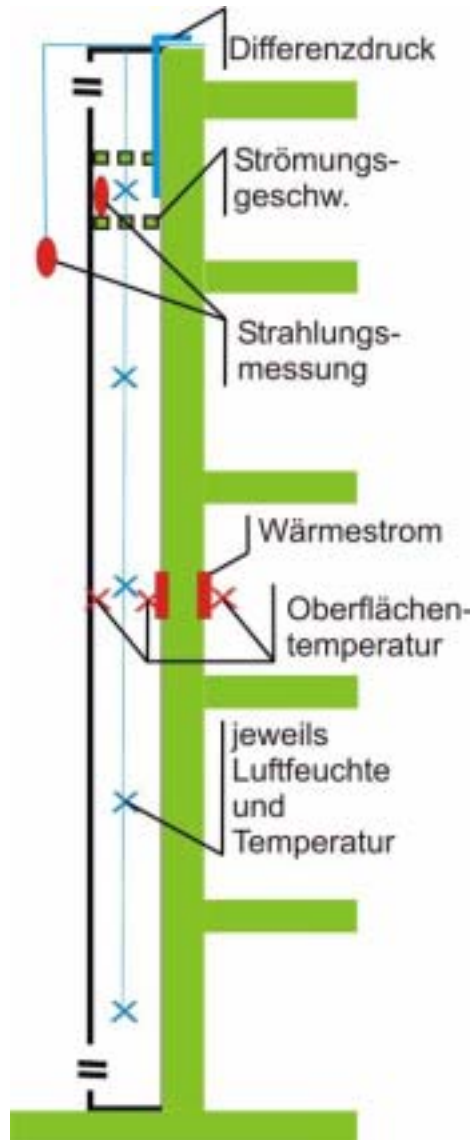
Der Druckunterschied **DD** wurde zwischen der Außenluft vor der Fassade und dem Fassadenzwischenraum im Bereich der Ausströmöffnungen bei Element 10 gemessen. Der Messpunkt in der Fassade lag ca. 1 m unterhalb eines horizontalen Gitters, das den unteren Abschluss der Auslassklappen bildete. Damit konnte auf den Strömungswiderstand des Insektenschutzgitters und der Auslassklappen geschlossen werden.

Wärmestrom

Die Messung des Wärmestroms **Q2** vom Fassadenzwischenraum in die Betonwand und die dazugehörige Temperatur an der Außenoberfläche des Betons **OB** wurde am 20. Dezember 2001 ergänzt. Diese Sensoren befanden sich im Fassadenzwischenraum vor dem Technikraum im 1. Obergeschoss und waren der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt. In unmittelbarer Nähe der Wärmestrommessung **Q2** wurde die Lufttemperatur **LQ1** mit Verschattung (der Sensor befand sich in einem ca. 15 cm langem lotrecht angeordnetem Rohr, das die Sonneneinstrahlung abschirmte) und die unverschattete Lufttemperatur **LQ2** aufgezeichnet. Die Innenoberflächentemperatur des Glases **OG** im Sturzbereich des Fensters im 1. Obergeschoss neben dem Technikraum war unverschattet.

Schnitt

Im folgenden Schnitt durch das Fassadenelement 10 sind die Messpositionen im Messfall „Wand“ schematisch dargestellt.



134

Abb. 116 Schnitt durch die Südseite im Fassadenelement 10 mit den Messstellen

Die Spaltbreite von 14 cm ist in der Zeichnung vergrößert dargestellt.

Detail Attika

In der folgenden Abbildung ist für den Messfall „Wand“ der Attikabereich detailliert dargestellt.

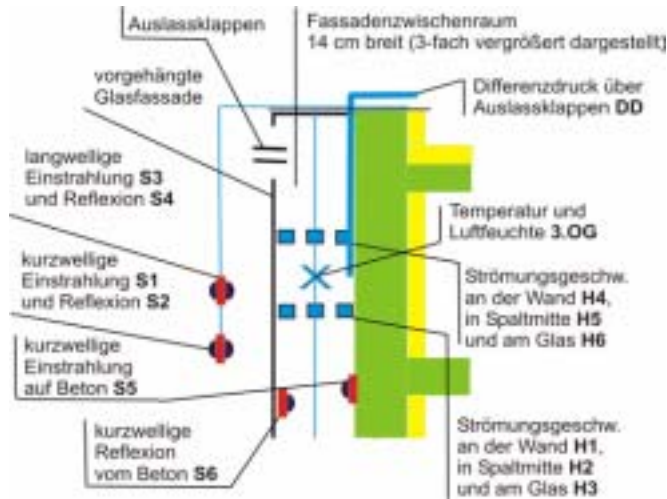


Abb. 117 Detail des Attikabereiches mit den Messstellen für den Messfall „Wand“

In der detaillierten Darstellung des Attikabereichs der Südfassade sind die Messpunkte verzeichnet. Die Betonwand ist 23 cm dick. Die Innendämmung weist laut Plan eine Dicke von 8 cm auf und die Vorsatzschale 2 cm.

135

Detail Technikraum 1. Obergeschoss

In der folgenden Abbildung ist der Bereich der Wärmestrommessung detailliert dargestellt.

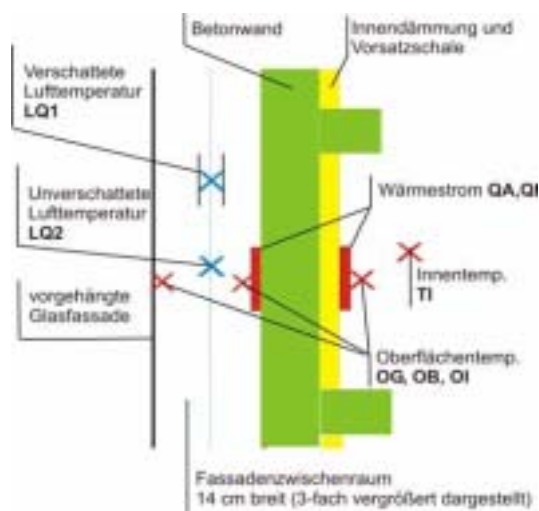


Abb. 118 Detailschnitt mit den Messstellen für den Wärmestrom und die zugehörigen Temperaturen

5.4.3. Messung „Fenster - Klappen geschlossen“

Der Umbau wurde im März 2002 vorgenommen. Die Sensoren **Q2**, **OB**, **LQ1** und **LQ2** und die Messgeräte der Messung „ortsfest“ blieben bis auf die Ergänzung der kurzwelligigen Horizontalstrahlung **S7** (mit einem CM3) auf der Wetterstation unverändert. Die Messstellen **2.OG**, **3.OG** und **H5** der Messung „Wand“ wurden weiterhin betrieben. Die Messung lief nach einer Testphase ab Anfang April 2002.

Temperatur, Luftfeuchte und Strömungsgeschwindigkeit

Bei der Messung „Fenster“ waren Messungen im Erdgeschoss und im 3. Obergeschoss vorgesehen. An vier Positionen (**F1 bis F4**) wurden Messungen der Temperatur, der Luftfeuchte und der Strömungsgeschwindigkeit durchgeführt. Diese Positionen befanden sich an folgenden Punkten:

F1	Mitte Element 6, Mitte Fenster des Erdgeschosses
F2	Mitte Element 2, Mitte Fenster des Erdgeschosses
F3	Mitte Element 5, Mitte Fenster des 3. Obergeschosses
F4	Mitte Element 1, Mitte Fenster des 3. Obergeschosses

Tab. 5 Messpositionen

136

Differenzdruck

Bei Element 2 wurde der Differenzdruck **DD1** zwischen dem Fassadenzwischenraum und unmittelbar außerhalb der Auslassklappe der Südfassade gemessen. Der Punkt in der Fassade lag ca. einen Meter vor einem Gitter, das ungefähr 0,40 m unter der Oberkante der Fassade platziert ist. Bei Element 10 wurde der Differenzdruck **DD2** zwischen einem Meter vor dem Gitter und direkt dahinter gemessen.

Oberflächentemperaturen

Die Messung der Innenoberflächentemperatur des Glases **OG** im Sturzbereich des Fensters im 1. Obergeschoss neben dem Technikraum war seit März 2002 mit einem Aluklebeband auf der Außenseite der Glasscheibe verschattet. Ein weiterer Temperatursensor an der Außenoberfläche des Betons **OBv** wurde in der Nähe der Messstelle für die Glastemperatur eingebaut und war durch einen 30 cm breiten und 20 cm hohen Aluminiumschirm im Abstand von 5 cm zur Betonwand verschattet.

5.4.4. Messung „Fenster - Klappen offen“

Am 8. August 2002 wurden die Klappen der Fassadenkonstruktion geöffnet. Die Anordnung der Sensoren blieb im Vergleich zum Messfall mit geschlossenen Klappen unverändert.

5.4.5. Messung „Wand - Klappen offen“

Am 23. August erfolgte der Umbau auf die Messung „Wand - offen“. Dieser lief bis zum 9. September 2002.

Die Strömungsgeschwindigkeiten **H1**, **H2**, **H3** wurden in Mitte des Elements 9 ca. 2,5 m von der Fassadenoberkante angeordnet. Die Temperatur- und die Luftfeuchtesensoren **EG**, **1.OG**, **2.OG**, **3.OG** wurden ebenfalls an den Messstellen des Messfalls „Wand“ angeordnet.

5.5. Messergebnisse

In den folgenden Abbildungen ist exemplarisch jeweils eine Woche der Messperiode der vier Fälle dargestellt.

5.5.1. Messung „Wand - Klappen geschlossen“

In den folgenden Diagrammen sind die wichtigsten Messwerte vom 31. Oktober bis zum 6. November 2001 des Messfalls „Wand - Klappen geschlossen“ dargestellt.

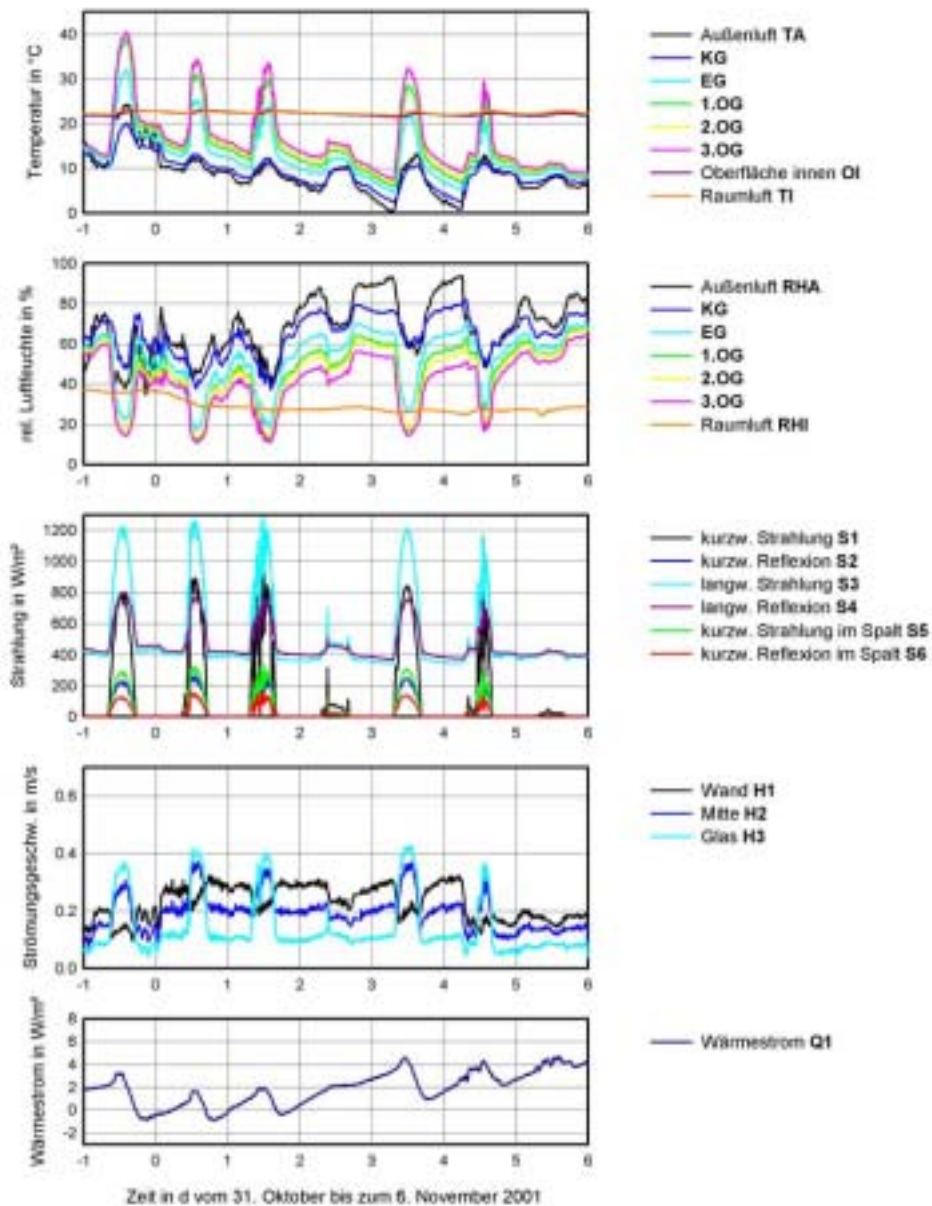


Abb. 119 Messwerte des Messfalls „Wand - Klappen geschlossen“

5.5.2. Messung „Wand - Klappen offen“

In den folgenden Diagrammen sind die wichtigsten Messwerte vom 1. bis zum 7. September 2002 des Messfalls „Wand - Klappen offen“ dargestellt.

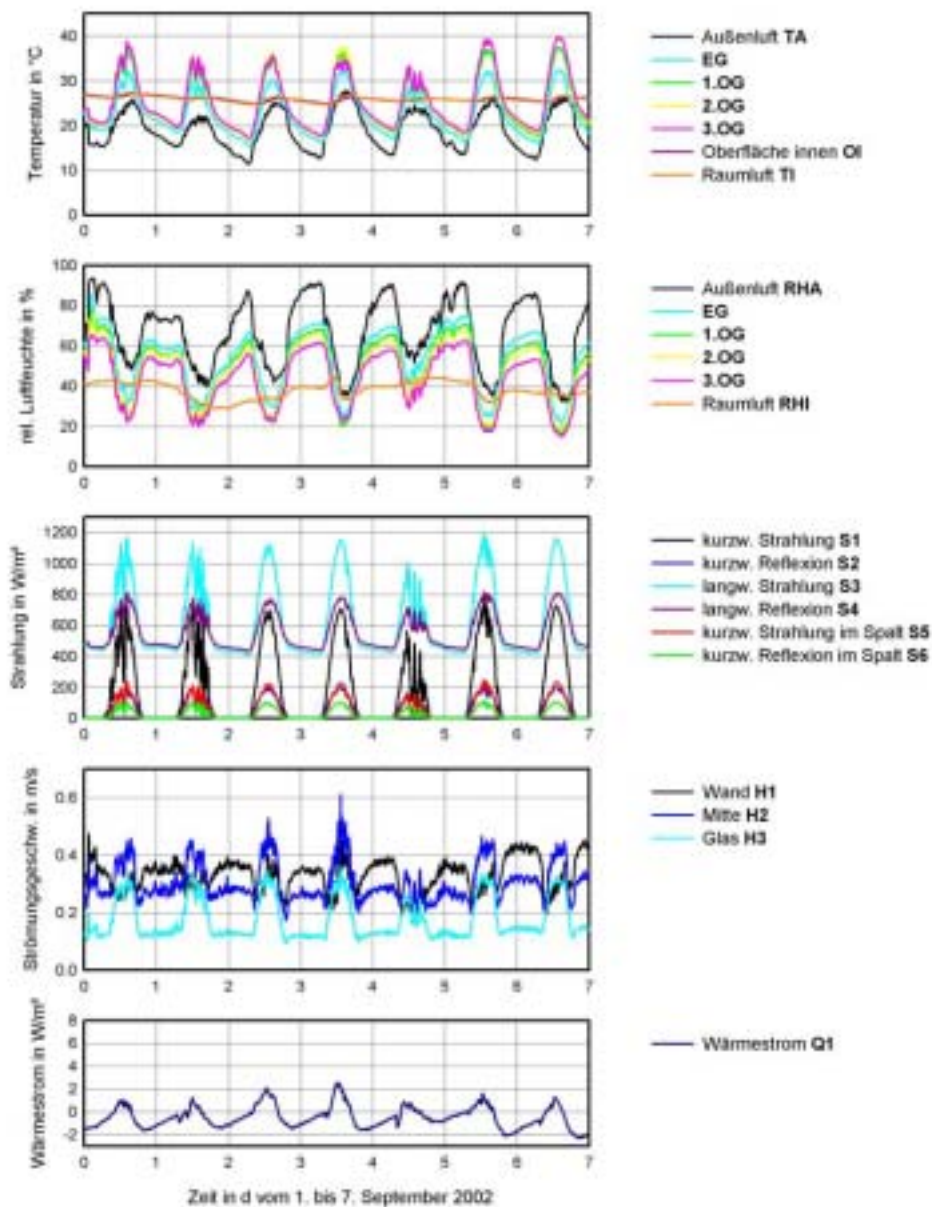


Abb. 120 Messwerte des Messfalls „Wand - Klappen offen“

5.5.3. Messung „Fenster - Klappen geschlossen“

In den folgenden Diagrammen sind die wichtigsten Messwerte vom 4. bis zum 10. Juli 2002 des Messfalls „Fenster - Klappen geschlossen“ dargestellt. Die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit der Außenluft ist teilweise ausgefallen.

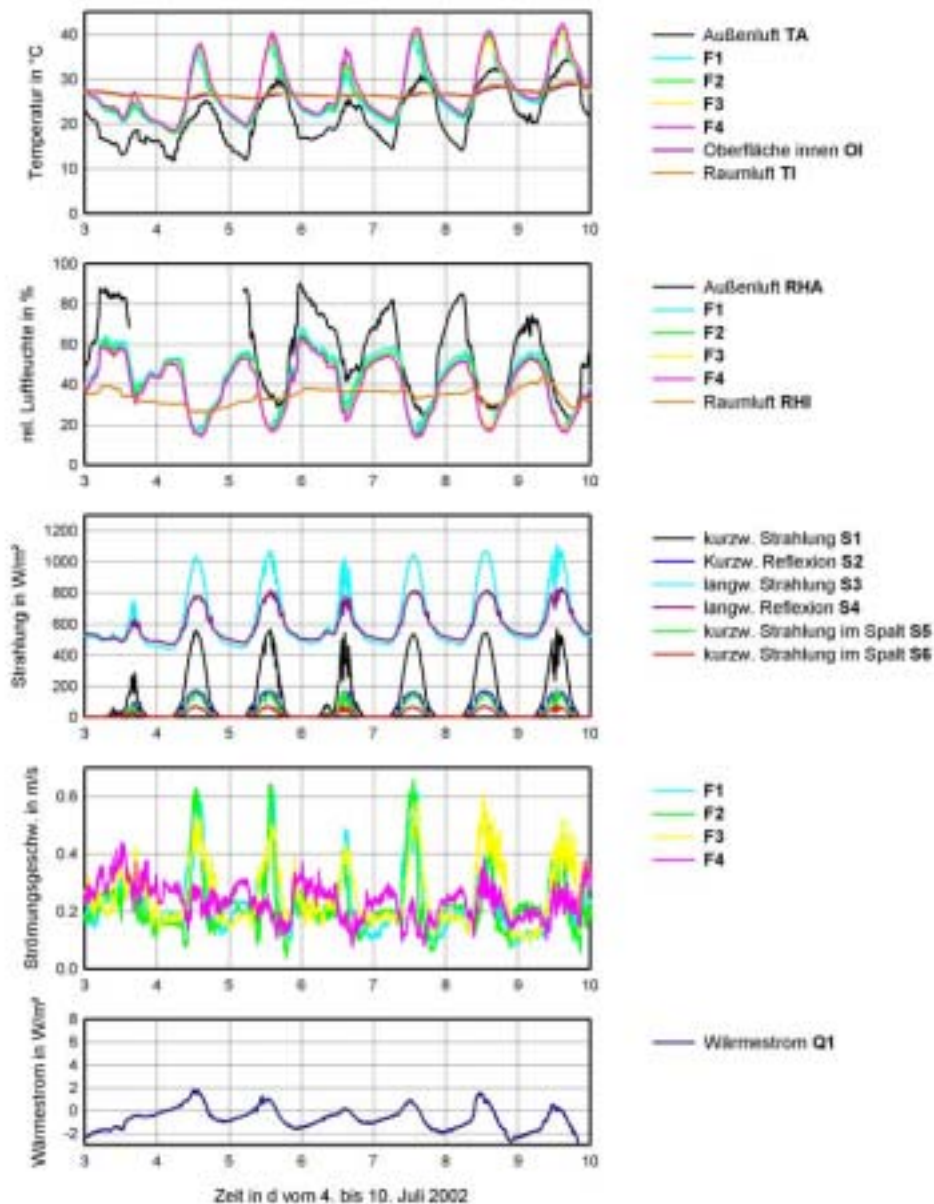


Abb. 121 Messwerte des Messfalls „Fenster - Klappen geschlossen“

5.5.4. Messung „Fenster - Klappen offen“

In den folgenden Diagrammen sind die wichtigsten Messwerte vom 14. bis zum 20. August 2002 des Messfalls „Fenster - Klappen offen“ dargestellt.

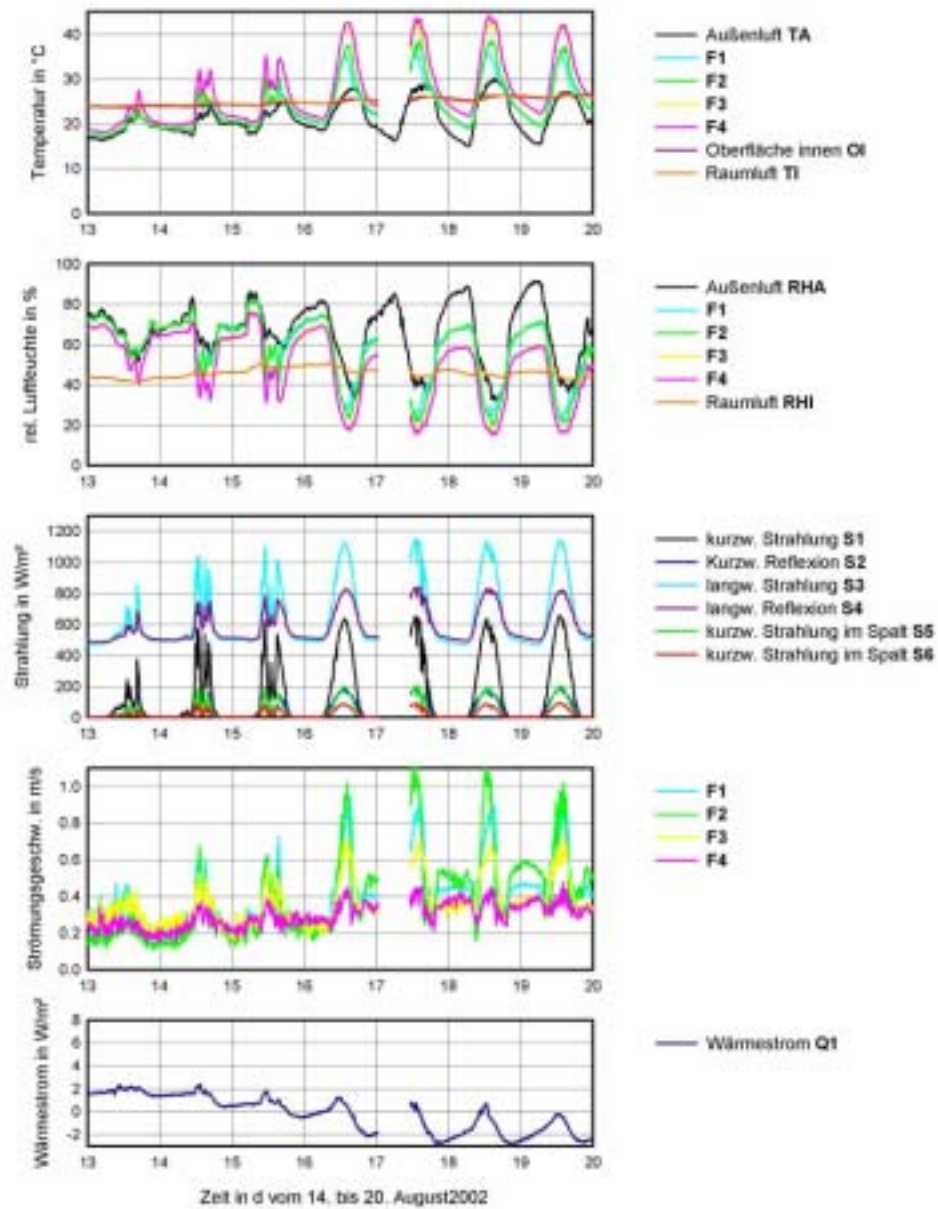


Abb. 122 Messwerte des Messfalls „Fenster - Klappen offen“

5.6. Interpretation der Messergebnisse

5.6.1. Messfälle Wand

Die beiden ersten Diagramme der Messfälle „Wand - Klappen offen“ bzw. „Wand - Klappen geschlossen“ zeigen die Temperatur- und die Luftfeuchtigkeitsverteilung über die Gebäudehöhe. An Tagen mit kurzweiligen Strahlungsintensitäten bis ca. 800 W/m² wurden Temperaturspitzen im Fassadenzwischenraum von ca. 40 °C erreicht. Der maximale Temperaturunterschied zwischen Außenluft und 3. Obergeschoss von ca. 22 °C im Winterfall / 24.10.01 - 26.01.02 trat am 4. November auf. Beim Sommerfall / 23.08.02 - 09.09.02 lag die größte Differenz bei ca. 15 °C.

Dieser Umstand ist auf die geöffneten Klappen und die damit verbundene Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten zurückzuführen. Im dargestellten Winterzeitraum lagen die durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeiten der Messstelle an der Wand **H1** bei 0,23 m/s, in Spaltmitte **H2** bei 0,19 m/s und am Glas **H3** 0,14 m/s. In der Sommerperiode / 23.08.02 - 09.09.02 traten mit 0,33 m/s bei **H1** 0,31 m/s bei **H2** und 0,18 m/s bei **H3** wesentlich größere Strömungen auf.

Beim Messfall „Wand - Klappen geschlossen“ wurde der Wärmestrom **Q1** von der Innenoberfläche durch die Wand nach außen durch die Strahlungsgewinne verringert. An den ersten drei Tagen kehrte sich der Wärmestrom kurzzeitig um und Energie floss in den Innenraum.

Beim Messfall „Wand - Klappen offen“ gelangten in der betrachteten Sommerperiode durchschnittlich ca. 0,47 W/m² in den Technikraum.

5.6.2. Messfälle Fenster

Auch bei den Messfällen „Fenster - Klappen geschlossen“ / 18.04.02 - 07.08.02 und „Fenster - Klappen offen“ / 08.08.02 - 22.08.02 ergaben sich ähnliche Temperaturspitzen. Der Temperaturunterschied zwischen erstem und drittem Obergeschoss war mit geschlossenen Klappen geringer als mit offenen.

Die Spitzen der Strömungsgeschwindigkeiten stiegen von ca. 0,6 m/s durch das Öffnen der Klappen auf ca. 1,1 m/s. Die Mittelwerte stiegen bei **F1** von 0,22 auf 0,41 m/s, bei **F2** von 0,22 auf 0,39 m/s, bei **F3** von 0,26 auf 0,36 m/s und bei **F4** von 0,24 auf 0,30 m/s.

Der Wärmestrom zeigte bei beiden Messfällen die typische durch Strahlungsgewinne verursachte Wellenbewegung.

6. Zusammenfassung

Motivation

Im Zuge des sprunghaften Anstiegs der „Glas-Architektur“ werden seit über 10 Jahren sogenannte GlasDoppelFassaden (GDF) international äußerst kontroversiell diskutiert.

Von den einen als innovative, ökologische und zukunftssträchtige Konzepte gepriesen, werden sie von anderen als unwirtschaftlich, bauphysikalisch problematisch und in unseren Breiten als Fehl am Platz bezeichnet.

Grundsätzlich bestehen Glasdoppelfassaden aus einer inneren oder Primärfassade, meist in Form einer Zweischeibenisolierverglasung, einem Fassadenzwischenraum von etwa

20 - 100 cm Tiefe und einer äußeren oder Sekundärfassade aus Einscheibensicherheitsglas. Unterschiede zwischen den zahlreichen Ausführungsvarianten bestehen vor allem in der Unterteilung des Fassadenzwischenraumes und in den Lüftungskonzepten.

Die zum Teil berechtigten Bedenken gegen GlasDoppelFassaden haben ihre Ursache unter anderem darin, dass die geometrische Gestaltung von GDF häufig nicht von strömungsmechanischen, akustischen und energetischen Überlegungen, sondern vom ästhetischen Empfinden bestimmt war und ist.

Unter dem Gesichtspunkt einer umfassenden Bewertung von GlasDoppelFassaden bildete die messtechnische Erfassung der kombinierten Wärmetransportmechanismen im Fassadenzwischenraum und die Untersuchung der Korrelation zwischen den Messergebnissen und den thermoischen und fluidmechanischen Simulationsberechnungen den Schwerpunkt der gegenständlichen Forschungsarbeit.

Insbesondere die CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) konnten - trotz einiger Abweichungen von den Vorort-Messungen - wertvolle Aufschlüsse über die komplexen strömungstechnischen Vorgänge im Fassadenzwischenraum liefern.

Dadurch können die überaus wichtigen, aber oftmals schwer zu bestimmenden Ausgangsparameter zukünftiger Simulationsmodelle realistischer gewählt und in weiterer Folge präzisere Vorhersagen zum energetischen Verhalten von GlasDoppelFassaden getroffen werden.

In einem Folgeprojekt ist die Adaptierung der numerischen Simulationsmodelle soweit anzustreben, dass Planern und Ausführenden ein leicht anzuwendendes Werkzeug zur Abschätzung der komplexen Vorgänge in derartigen Fassaden an die Hand gegeben werden kann. Dadurch könnten fundiertere Aussagen hinsichtlich der vielfach diskutierten möglichen Energieeinsparung durch GlasDoppelFassaden getroffensowie unerfüllbare Erwartungen von Bauherrn und Nutzern hintangehalten werden

Um den finanziellen Rahmen des gegenständlichen Projektes nicht zu sprengen, wurde die Forschungsaufgabe auf die Untersuchung der temperatur- und windinduzierten Strömungsverhältnisse im Fassadenzwischenraum unter realen Außenklimabedingungen beschränkt. Die ebenfalls sehr interessanten Forschungsgebiete Wärme-, Schall- und Brandschutz sowie Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von GlasDoppelFassaden mußten zukünftigen Forschungsprojekten vorbehalten bleiben.

In Baden bei Wien wurde 1998 der von den Grazer Architekten Florian Riegler/Roger Riewe geplante Neubau des Bundesinstituts für Sozialpädagogik fertiggestellt. Das fünfgeschossige, allseitig verglaste Gebäude bot die Möglichkeit, zwei Extremfälle einer vorgehängten Glasfassade zu untersuchen: die freie, solar- und windinduzierte Strömung in dem 17 m hohen und 14 cm tiefen, nicht unterteilten Luftspalt zwischen Beton- und Glasfassade und den Fall der komplex turbulenten Strömungsverhältnisse im Bereich der doppelten Glasflächen bzw. der „Fensterkästen“. Die vorgehängte Glasfassade mit Fensterkästen stellt einen interessanten Sonderfall von GlasDoppelFassaden dar, indem sie die Vorteile einschaliger Fassaden - Möglichkeit der direkten Fensterlüftung und Vermeidung von Brandrauch- und Schallübertragung zwischen benachbarten Fensteröffnungen - mit den wärmetechnischen Vorteilen von „klassischen“ GDF verbindet.

Geschichte

144

GlasDoppelFassaden nutzen das Prinzip der Mehrschaligkeit zur Verbesserung des thermischen Komforts der angrenzenden Räume ebenso wie ihr wohl ältester Vorläufer, das Kastenfenster, welches in Mitteleuropa etwa ab dem Beginn des 18. Jahrhunderts insbesondere in den Städten eine rasante Verbreitung erfuhr.

Durch die Entwicklung des Skelettbbaus, bei dem die Außenwand keine tragende, sondern nur mehr begrenzende Hüllfunktion übernimmt, boten sich für die Architekten zu Beginn des 20. Jahrhunderts neue Möglichkeiten der Gestaltung.

Die Literaturrecherche zeigt, dass bereits 1903 ein Fabrikgebäude in der Nähe von Ulm/Deutschland mit einer Glaspufferfassade ausgestattet worden war. In der Folge verwendeten nahezu alle bedeutenden Architekten der Klassischen Moderne die faszinierenden Gestaltungsmöglichkeiten großflächiger Verglasungen.

Die Entwicklung des Floatglasverfahrens Ende der 50er Jahre schuf schließlich die Voraussetzung für den sprunghaften Anstieg der Glasarchitektur, der immer noch andauert.

Typologie

Die nahezu unüberschaubare Fülle von Ausführungsvarianten der seit den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts gebauten GlasDoppelFassaden kann je nach Unterteilung des Fassadenzwischenraumes in fünf unterschiedliche Typen klassifiziert werden.

Unsegmentierte Vorhangfassaden mit regelbaren Klappen am Fuß bzw. an der Oberkante des Gebäudes, sogenannte Umluftfassaden, bei denen nach zwei bis drei Geschossen eine horizontale Abschottung erfolgt und mit Ventilatorschienen eine horizontale, erzwungene Umluftströmung erzeugt wird. Korridorfassaden mit einer horizontalen Trennebene nach jedem Geschoss und Kastenfenster-Fassaden, bei denen zusätzlich zur horizontal, geschossweisen Unterteilung pro Achsabschnitt auch eine vertikale Abschottung vorgenommen wird. Kastenfenster-Fassaden sind das am weitesten verbreitete Doppelfassadensystem.

Ausgehend vom System der Kasten-Kasten-Fassaden werden bei sogenannten Schacht-Kasten-Fassaden alle übereinander liegenden Fensterkästen in jedem zweiten Achsabschnitt durch das Entfernen der horizontalen Trennelemente zu einer Art Thermischschacht zusammengefasst.

Die Messfassade

Für die Durchführung des Forschungsprojektes wurde der von den Grazer Architekten Florian Riegler und Roger Riewe geplante und 1998 fertiggestellte Neubau des Bundesinstituts für Sozialpädagogik (BiSoP) in Baden bei Wien ausgewählt.

Dies deshalb, weil zum einen die Größe des Objektes einen im Rahmen des Projektvolumens vertretbaren messtechnischen Aufwand ermöglichte. Zum anderen war das Gebäude für die Projektbeteiligten relativ leicht zu erreichen und zugänglich, was bei der Installation und vor allem Wartung der Messeinrichtungen von großer Bedeutung war.

Das 53,7 m lange, 14 m breite und 17 m hohe, Ost-West orientierte, fünfgeschossige Gebäude ist mit einer allseitigen Glasfassade ausgestattet, welche als sogenannte unsegmentierte Vorhangfassaden bezeichnet werden kann. Das heißt, es gibt abgesehen von einzelnen „Fensterkästen“, welche gegen den Fassadenzwischenraum durch gedämmte Metallpaneele abgeschottet sind, weder horizontale noch vertikale Unterteilungen des Fassadenzwischenraumes.

Die Fensterkästen ermöglichen eine direkte Lüftung der dahinterliegenden Räume unter Umgehung des Fassadenzwischenraumes. Dadurch wird im Sommer ein Hereinlüften von warmer Spaltluft in das Gebäude vermieden. Zudem verhindert diese Konstruktion weitgehend die Schall- und Brandrauchübertragung über den Fassadenzwischenraum.

Durch die, geschossweise zum Teil horizontal versetzten „Fensterkästen“ mit den darüber bzw. darunter liegenden transluzenten Ober- bzw. Unterlichtern und die dazwischenliegenden opaken Stahlbetonflächen bot die Fassade zwei strömungstechnische Extremfälle: unmittelbar nebeneinander konnten sowohl die solar induzierten Strömungsverhältnisse in einem 17 m hohen und 14 cm tiefen ungestörten Luftspalt, als auch die komplexen strömungsmechanischen Vorgänge rund um die Fensterelemente mess- und simulationstechnisch untersucht werden. Eine weitere, wenn auch bauphysikalisch nicht gewollte, Besonderheit der Fassade liegt in der satinierten (und nicht wie allgemein üblich transparenten) Ausführung der Sekundärfassade.

Am unteren bzw. oberen Abschluss der Fassaden befinden sich regelbare Be- und Endlüftungsklappen. Diese werden im Frühjahr geöffnet und im Herbst geschlossen, sodass im Sommer die warme Spaltluft abgeführt und im Winter die Pufferwirkung der vorgesetzten Fassade genutzt werden kann.

Um die Ausgangssituation für die Simulationsberechnungen möglichst genau nachbilden zu können und Verfälschungen der Messergebnisse durch Querströmungen zu vermeiden, wurden die beiden Messfelder durch aufblasbare Kunststoff-Schläuche von der übrigen Fassade abgeschottet.

Im Hinblick auf den finanziellen Rahmen des Projektes bestand das Forschungsziel in der Untersuchung der temperatur- und windbedingten Strömungsverhältnisse im Fassadenzwischenraum unter realen Außenbedingungen und ihrer Korrelation mit thermischen und fluidmechanischen Simulationsberechnungen. Die Auswirkungen der Glasfassade auf die Gesamtenergiebilanz des Gebäudes und die ebenfalls sehr interessanten Forschungsgebiete Wärme-, Schall- und Brandschutz sowie Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von GlasDoppelFassaden mussten zukünftigen Forschungsprojekten vorbehalten bleiben.

Thermische Simulation

Das verwendete Simulationsmodell des Programmpaketes TRNSYS basiert auf dem Konzept eines eindimensionalen thermischen Netzwerkes und ist in seinem Detaillierungsgrad so konzipiert, dass Simulationszeiträume von etlichen Wochen mit einem für die Praxis vertretbaren rechentechnischen Aufwand durchgeführt werden können.

Das zu modellierende System umfasst im wesentlichen fünf Komponenten: Außenraum/Außenklima - Sekundärfassade/vorgehängte Glasscheibe - Fassadenzwischenraum - Primärfassade/Betonwand bzw. Isolierglas - Innenraum des Gebäudes.

In den Wintermonaten (Heizperiode) sind bei dem zu untersuchenden Fassadensystem die Lüftungsklappen geschlossen, wodurch der Wärmeaustausch zwischen der Luft im Fassadenzwischenraum und der Außenluft primär über Wärmeleitung durch die Glasscheibe erfolgt. Das Strömungsverhalten der Fassadenluft entspricht jenem eines Fluids in einem geschlossenen vertikalen Spalt, dessen Begrenzungsflächen unterschiedliche Temperaturen aufweisen. An der wärmeren Fläche (Betonwand) steigt die Luft auf, während sie an der kälteren Fläche (Glasscheibe) absinkt.

In den Sommermonaten sind die Ein- und Auslassklappen hingegen geöffnet. Dadurch gelangt Außenluft durch die bodennahen Einlassklappen in den Fassadenzwischenraum und wird dort durch die auf höheren Temperaturniveaus befindlichen Begrenzungsflächen erwärmt.

Die sich dadurch einstellende Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Fassadenluft bedingt den thermischen Auftrieb, der durch eine charakteristische, aufwärts gerichtete, mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Fassadenluft (freie Konvektion) quantifiziert wird.

Der Wärmeaustausch zwischen Außen- und Fassadenluft wird also im Sommerfall sowohl über Wärmeleitung an der Glasscheibe als auch über die zu- und abströmende Fassadenluft wirksam.

Der Vergleich mit den gemessenen Daten aus insgesamt vier Messperioden im Fassadenbereich „Wand“ (zwei Messperioden sind dem Szenario „geschlossene Fassadenklappen“ und zwei Messperioden dem Szenario „offenen Fassadenklappen“ zuzuordnen) zeigt folgende Ergebnisse:

Die Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Temperaturwerten an der vorgehängten Glasscheibe, der Betonoberfläche und der Luft an der Austrittsöffnung des Fassadenspaltes ist für die untersuchten Messreihen als gut zu bewerten, wobei Abweichungen von maximal ± 3 °C auftreten. Die Messreihen umfassen dabei sowohl Tag- als auch Nachtstunden und beinhalten unterschiedlichste klimatische Bedingungen im Bezug auf solare Einstrahlung, Außenlufttemperaturen und Windverhältnisse.

Die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten (v_m) sind ebenfalls reproduzierbar, wobei allerdings für kleine Strömungsgeschwindigkeiten ($< 0,3$ m/s) die berechneten Werte tendenziell größer sind als die gemessenen. Die festgestellten Abweichungen liegen im Bereich von $0,05 - 0,1$ m/s und können zum Teil, insbesondere nahe der unteren Messwertgrenze der eingesetzten Hitzdrahtanemometern von $0,125$ m/s mit der maximalen Messwertgenauigkeit von $\pm 0,05$ m/s erklärt werden.

Der Vergleich zwischen Simulation und Messung zeigt die Komplexität und Vielfältigkeit der bei dieser Art der Fassadenkonstruktionen auftretenden physikalischen Effekte und den damit verbundenen Anforderungen an die Simulation. Der messtechnisch erfasste und simulationstechnisch untersuchte Fassadenabschnitt Betonaußenwand - Luftspalt - Glasfassade stellt in diesem Zusammenhang eine relativ einfache Konstruktionsvariante dar. Die hierbei gewonnen Erkenntnisse können als Grundlage bei der Weiterentwicklung der Rechenmodelle für komplexere Fassadenkonstruktionen mit teiltransparenten Außenwänden (Doppelfassaden) herangezogen werden.

Bei vergleichbaren konstruktiven und thermischen Voraussetzungen (unsegmentierte Vorhangfassade, geringer Luftaustausch zwischen Fassadenspalt und dahinterliegenden Räumlichkeit über Fensterlüftung, etc.) ist zu erwarten, dass ein entsprechend erweitertes Simulationsmodell eine ähnlich gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation liefern kann, wie sie in dieser Arbeit erzielt wurde.

Strömungssimulation

Die fluidmechanischen Berechnungen wurden mittels des Programmpaketes FLUENT, einem der modernsten Programme zur Simulation von Strömungs- und Wärmeübertragungsvorgängen in komplexen Geometrien, in drei Phasen durchgeführt: eine erste Abschätzung, eine detaillierte Berechnung anhand erster Messdaten für einen Messfall einschließlich detaillierter Vergleiche mit den thermischen Simulationen, sowie die Simulation der verbleibenden Messfälle nach endgültigem Vorliegen und Evaluierung der Messdaten.

Im ersten Schritt wurden aus fluidmechanischen Berechnungen die notwendigen Anhaltspunkte zur Positionierung der Fühler zur messtechnischen Erfassung von Geschwindigkeiten und Temperaturen gewonnen. Den Ausgangspunkt bildeten dabei die thermischen Simulationsberechnungen der Temperaturen der Betonwand bzw. der vorgesetzten Glasscheibe, die als Randbedingungen für die fluidmechanischen Berechnungen verwendet wurden. Die Übereinstimmung der Ergebnisse hinsichtlich Lufttemperatur am Austritt des Spaltes sowie der mittleren Geschwindigkeit mit den Ergebnissen der thermischen Simulation kann als sehr gut bezeichnet werden.

In der zweiten Phase wurden die fluidmechanischen Simulationen für den bis zu diesem Zeitpunkt messtechnisch erfassten Fall „Wand - Winter“ durchgeführt. Die zur Simulation erforderlichen Randbedingungen wurden einerseits aus den gemessenen Wetterdaten sowie Messdaten für die Oberflächentemperaturen gewonnen, und andererseits aus jenen Oberflächentemperaturen, die im Rahmen der thermischen Simulationsberechnungen ermittelt wurden. Detaillierte Vergleiche wurden durchgeführt für Geschwindigkeiten und Temperaturen in den Messpunkten, um den Einfluss der Oberflächentemperaturen auf die Strömung im Luftspalt abschätzen zu können.

Die Übereinstimmung sowohl mit den thermischen Simulationsberechnungen als auch mit den Vorort-Messungen hinsichtlich Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturen kann - bis auf wenige Ausnahmen - als gut bezeichnet werden.

148

In der dritten Phase wurden nach vollständigem Vorliegen der Messergebnisse bzw. nach deren Evaluierung weitere fünf Messfälle - jeweils für Zeitpunkte mit und ohne Strahlungseinfall (Tag bzw. Nacht) - berechnet. Die im Vergleich zum Abschnitt Wand etwas deutlicheren Abweichungen der Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich Fenster können plausibel erklärt werden. Insbesondere kann aus den entsprechenden Abbildungen leicht erkannt werden, dass die Geschwindigkeiten in der Umgebung der Messpunkte in allen Richtungen deutliche Gradienten aufweisen. Geringe Lageunterschiede der Messfühler, deren Toleranzen vor allem in Bereichen niedriger Geschwindigkeiten, sowie Abweichungen der baulichen Gegebenheiten von den Konstruktionszeichnungen (aus denen die Position der Messfühler für die Simulationen errechnet wurde) können zu den aus den Vergleichstabellen ersichtlichen Differenzen führen. Bei den beiden Sommerfällen im Bereich des Fassadenabschnittes mit eingebauten Fensterkästen konnte hardwarebedingt keine Konvergenz erzielt werden.

Weiters konnte festgestellt werden, dass die zum Teil nicht unerheblichen Windbelastungen, die zu einigen Messzeitpunkten auftraten, insbesondere bei geöffneten Lüftungsklappen aber auch infolge der Undichtigkeiten im geschlossenen Zustand die Strömungssituation im Fassadenspalt gravierend beeinflussen können.

Im Hinblick auf praktische Berechnungen zur Auslegung von Doppelfassaden kann festgestellt werden, dass fluidmechanische Simulationen in der hier angewandten Form aufgrund des enormen Bedarfes an Ressourcen (Hardware, Rechenzeit) eher nicht geeignet erscheinen. Zur wissenschaftlichen Bearbeitung in Einzelfällen kann diese Art der Simulation aber mit guter Aussagekraft eingesetzt werden.

Vorort-Messung

Zum Vergleich mit den numerischen Simulationsberechnungen wurden ab Ende Oktober 2001 bis September 2002 umfangreiche Messungen der Oberflächen- und der Lufttemperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Strömungsgeschwindigkeit im Fassadenzwischenraum, der Strahlung im Zwischenraum und außen, des Differenzdruckes zwischen Fassadenzwischenraum und außen, des Außenklimas und des Wärmestroms vom Fassadenzwischenraum nach Innen durchgeführt.

Aufgrund der hohen Kosten der Sensorik wurden die Messungen in jeder Jahreszeit mit jeweils dem gesamten Gerätepark für den Messbereich „Wand“ und unmittelbar anschließend für den Messbereich „Fenster“ getrennt durchgeführt.

Die Klimastation auf dem Dach des Gebäudes zeichnete unterdessen ständig die Außentemperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit und -richtung und die Niederschlagsmenge auf. In jedem Geschoss war zudem jeweils ein Datenlogger zur Aufzeichnung des Raumklimas angeordnet.

Der Einbau und die Verkabelung der Sensoren sowie der Messbetrieb erfolgten unter größtmöglicher Schonung des Gebäudes und minimalster Störung des Schulbetriebes, wobei die Leitung der Schule großes Interesse an einer Einbeziehung der Messungen in den Unterricht hatte.

Eine temporäre Demontage der Glasfassade zum Zwecke des Messaufbaus wurde aus wirtschaftlichen Gründen unterlassen. Statt dessen wurde die gesamte Sensorik über die geöffnete Attika in den Fassadenzwischenraum eingebracht.

Um den störenden Einfluss von Querströmungen auszuschließen, wurden vertikale Trennelemente zwischen den Messfeldern „Wand“ und „Fenster“ eingebaut. Diese Abtrennungen bestanden aus Kunststoffschläuchen, die von einem Gebläse unter Überdruck gehalten wurden. Der Durchmesser der Schläuche war größer als der Abstand zwischen Vorhangfassade und Betonaußenoberfläche, sodass sie satt an der Glasscheibe bzw. an der Betonwand anlagen. Das Messprogramm zur Aufzeichnung der Messdaten wurde am Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Abteilung Bauphysik unter Verwendung der Programmiersoftware TESTPOINT entwickelt und ermöglichte die Online-Abfrage der gewonnenen Messdaten.

Messung „Wand“

An fünf Positionen wurden die Lufttemperatur und die Luftfeuchte gemessen, während das Strömungsgeschwindigkeitsprofil an zwei Stellen bestimmt wurde. Je Messung waren dabei drei Messpunkte vorgesehen. Ein Sensor war in der Mitte des Luftspaltes platziert, die beiden anderen in einem Abstand von ca. 1 cm zur Betonwand bzw. zur Glasscheibe.

Weiters wurde der Differenzdruck zwischen der Außenluft vor der Fassade und dem Fassadeninneren unterhalb des Insektenschutzgitters nahe der Ausströmöffnungen gemessen. Damit konnte auf den Strömungswiderstand des Insektenschutzgitters und der Auslassklappen geschlossen werden.

Der Wärmestrom vom Fassadenzwischenraum in die Betonwand und die dazugehörige Temperatur an der Außenoberfläche des Betons wurde an einer Position aufgezeichnet. Weiters wurde im Bereich des obersten Geschosses die kurzwellige und langwellige Einstrahlung auf die Glasfassade, die kurzwellige Strahlung auf die Betonoberfläche sowie in beiden Fällen deren Reflexionen bestimmt.

Messung „Fenster“

An vier, anhand der ersten CFD Simulationen bestimmten Positionen, wurden die Lufttemperatur und -feuchte sowie die Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt. In der Nähe der Ausströmöffnung im obersten Geschoss wurde wie im Messfall „Wand“ der Differenzdruck gemessen sowie die Oberflächentemperaturen von Glas, Beton und Innendämmung.

7. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Strahlungsbilanz einer zweischaligen Glasfassade	23
Abb. 2	Kastenfenster in der Grazer Altstadt. Die äußeren Scheiben können im Sommer durch Holzläden ersetzt werden. Zwischen den beiden Glasebenen können nachträglich Sonnenschutz-einrichtungen eingebaut werden	25
Abb. 3	Glaspufferfassade der Steiff Fabrik in Giengen an der Brenz, 1903	25
Abb. 4	Lever House, New York, 1952	26
Abb. 5	Systemskizze Abluffassade	27
Abb. 6	Schematisiertes Ordnungsschema für GlasDoppelFassaden	28
Abb. 7	Unsegmentierte Vorhangfassade: Funktionsschema und ausgeführtes Beispiel am Verwaltungsgebäude des Deutschen Ring in Hamburg (Architekten: von Bassewitz, Hupertz, Limbrock).....	29
Abb. 8	Umluffassade („SolSkin“): Schematisches Funktionsprinzip und ausgeführtes Beispiel am Verwaltungsgebäude der Götz GmbH, Würzburg (Architekten: Webler und Geissler).....	30
Abb. 9	Korridorfassade: Schematisches Funktionsprinzip und ausgeführtes Beispiel am Düsseldorfer Stadttor (Architekten: Petzinka und Partner) und am Bürogebäude am Halensee in Berlin (Architekten: Leon und Wohlhage)	31
Abb. 10	Funktionsskizze der Korridorfassade der Daimler Benz „debis“-Hauptverwaltung am Potsdamerplatz in Berlin (Architekten: Renzo Piano Building Workshop mit Christoph Kohlbecker)	32
Abb. 11	Kasten-Kasten-Fassade: Schematisches Funktionsprinzip und ausgeführte Beispiele am RWE Gebäude in Essen (Architekten: IOP Ingenhoven, Overdiek und Partner) und dem Hauptsitz der Victoria-Versicherung in Düsseldorf (Architekten: HPP Hentrich, Petschnigg und Partner)	33
Abb. 12	Schacht-Kasten-Fassade: Schematisches Funktionsprinzip und ausgeführte Beispiele am Verwaltungsgebäude der Bausparkasse Schwäbisch Hall (Architekten: HENN Architekten Ingenieure) und dem „Tempel“ der Fa. Alco	34
Abb. 13	Bundesinstitut für Sozialpädagogik in Baden bei Wien (Architekten Riegler und Riewe), Lageplan	39
Abb. 14	Grundriss 2.OG mit Messfeldern	39
Abb. 15	Südfassade Ansicht mit eingetragendem Messfeld „Fenster“	40

Abb. 16	Systemschnitt der Fußpunkt- und Attikaausbildung mit „Fensterkasten“	40
Abb. 17	Südfassade Ansicht gegen Westen und von innen. Die Glasflächen über und unter den Fensterkästen sind mit drehbaren Sonnenschutzlamellen versehen.	41
Abb. 18	Ansicht Südfassade mit Messfeld „Fenster“ (links) und Messfeld „Wand“ (rechts)	41
Abb. 19	Südfassade: Fassadenzwischenraum im Bereich Stahlbetonwand (links) und im Bereich Fensterelement mit geschlossenen und geöffneten Sonnenschutzlamellen (rechts)	42
Abb. 20	Prinzipskizze der auftretenden Energieströme [aus Kapitel 5]	45
Abb. 21	Thermisches Ersatzschaltbild des betrachteten Fassadenelements ...	45
Abb. 22	Energiebilanz für zwei repräsentative Stunden der drei aufeinanderfolgenden Sommertage	54
Abb. 23	Temperaturverläufe verschiedener Fassadenkomponenten an drei aufeinander folgenden sonnigen Sommertagen. Die gewählte Referenzstunde 0 entspricht der Stunde 4512 (08.07./00:00 Uhr) in der Gesamtjahresbetrachtung	55
Abb. 24	Zeitlicher Verlauf des Temperaturhubes der Luftsäule im Fassadenzwischenraum und der resultierenden Auftriebsgeschwindigkeit an drei sonnigen Sommertagen. Die gewählte Referenzstunde 0 entspricht der Stunde 4512 (08.07./00:00 Uhr) in der Gesamtjahresbetrachtung	55
Abb. 25	Temperaturverläufe verschiedener Fassadenkomponenten an drei aufeinanderfolgenden Wintertagen. Die gewählte Referenzstunde 0 entspricht der Stunde 408 (18.01./00:00 Uhr) in der Gesamtjahresbetrachtung	56
Abb. 26	Energiebilanz für zwei repräsentative Stunden der drei aufeinanderfolgenden Wintertage	56
Abb. 27	gemessene und berechnete Wandtemperaturen im Vergleich	58
Abb. 28	gemessene und berechnete Glastemperaturen im Vergleich	58
Abb. 29	gemessene und berechnete Fassadenlufttemperaturen im Vergleich	59
Abb. 30	gemessene und berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturhübe im Vergleich	59
Abb. 31	gemessene und berechnete Wandtemperaturen im Vergleich	61
Abb. 32	gemessene und berechnete Glastemperaturen im Vergleich	61

Abb. 33	abgemessene und berechnete Fassadenlufttemperaturen im Vergleich	62
Abb. 34	abgemessene und berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturhübe im Vergleich	62
Abb. 35	gemessene und berechnete Wandtemperaturen im Vergleich	64
Abb. 36	gemessene und berechnete Glastemperaturen im Vergleich	64
Abb. 37	gemessene und berechnete Fassadenlufttemperaturen im Vergleich	65
Abb. 38	gemessene und berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturhübe im Vergleich	65
Abb. 39	gemessene und berechnete Wandtemperaturen im Vergleich	67
Abb. 40	gemessene und berechnete Glastemperaturen im Vergleich	67
Abb. 41	gemessene und berechnete Fassadenlufttemperaturen im Vergleich	68
Abb. 42	gemessene und berechnete mittlere Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturhübe im Vergleich	68
Abb. 43	Lüftungsklappen am Eintritt, maximale Öffnung (links) und am Austritt, geschlossen (rechts)	76
Abb. 44	Rechengitter im Bereich des Treppenhauses, Abschnitt „Wand“, Symmetrieebene gelb dargestellt	77
Abb. 45	Ansicht Fensterbereich von innen mit Sonnenschutzlamellen ober- und unterhalb des „Fensterkastens“	77
Abb. 46	Rechengitter im Bereich der Fenster (Verringerung der Gitterabstände im Bereich der Fensterlaibung nicht dargestellt)	78
Abb. 47	Sommerfall 1, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im oberen Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	81
Abb. 48	Sommerfall 1, Temperaturverteilung [K] im oberen Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	81
Abb. 49	Sommerfall 1, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im mittleren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	82
Abb. 50	Sommerfall 1, Temperaturverteilung [K] im mittleren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	82
Abb. 51	Sommerfall 1, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im unteren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	83
Abb. 52	Sommerfall 1, Temperaturverteilung [K] im unteren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	83

Abb. 53	Sommerfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im oberen Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	85
Abb. 54	Sommerfall 2, Temperaturverteilung [K] im oberen Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	85
Abb. 55	Sommerfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im mittleren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	86
Abb. 56	Sommerfall 2, Temperaturverteilung [K] im mittleren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	86
Abb. 57	Sommerfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im unteren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	87
Abb. 58	Sommerfall 2, Temperaturverteilung [K] im unteren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	87
Abb. 59	Winterfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im oberen Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	89
Abb. 60	Winterfall 2, Temperaturverteilung [K] im oberen Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	89
Abb. 61	Winterfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im mittleren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	90
Abb. 62	Winterfall 2, Temperaturverteilung [K] im mittleren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	90
Abb. 63	Winterfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] im unteren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	91
Abb. 64	Winterfall 2, Temperaturverteilung [K] im unteren Fassadenbereich, Abschnitt „Wand“	91
Abb. 65	Sommerfall 2, Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Mitte Fassade im Abschnitt „Fenster“	92
Abb. 66	Einlassbereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)	95
Abb. 67	Unterer Bereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)	95
Abb. 68	Mittlerer Bereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)	95
Abb. 69	Auslassbereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)	96
Abb. 70	Einlassbereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)	96

Abb. 71	Unterer Bereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)	97
Abb. 72	Mittlerer Bereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)	97
Abb. 73	Auslassbereich: Geschwindigkeiten [m/s] (a) und Temperatur [K] (b)	97
Abb. 74	Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Messfall „Fenster - Winter 1“	101
Abb. 75	Temperaturverteilung [K] Messfall „Fenster - Winter 1“	101
Abb. 76	Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Vektordarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Winter 1“	102
Abb. 77	Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Winter 1“	102
Abb. 78	Temperaturprofil [K] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Winter 1“	103
Abb. 79	Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Messfall „Fenster - Winter 2“	104
Abb. 80	Temperaturverteilung [K] Messfall „Fenster - Winter 2“	104
Abb. 81	Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Vektordarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Winter 2“	105
Abb. 82	Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Winter 2“	105
Abb. 83	Temperaturprofil [K] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Winter 2“	106
Abb. 84	Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Messfall „Fenster-Frühjahr 1“	107
Abb. 85	Temperaturverteilung [K] Messfall „Fenster-Frühjahr 1“	107
Abb. 86	Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Vektordarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 1“	108
Abb. 87	Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 1“	108
Abb. 88	Temperaturprofil [K] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster - Frühjahr 1“	109
Abb. 89	Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Messfall „Fenster-Frühjahr 2“	110
Abb. 90	Temperaturverteilung [K] Messfall „Fenster-Frühjahr 2“	110
Abb. 91	Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Vektordarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 2“	111
Abb. 92	Geschwindigkeitsprofil [m/s](Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 2“	111

Abb. 93	Temperaturprofil [K] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 2“	112
Abb. 94	Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Messfall „Fenster-Frühjahr 3“	113
Abb. 95	Temperaturverteilung [K] Messfall „Fenster-Frühjahr 3“	113
Abb. 96	Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Vektordarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 3“	114
Abb. 97	Geschwindigkeitsprofil [m/s](Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 3“	114
Abb. 98	Temperaturprofil [K] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 3“	115
Abb. 99	Geschwindigkeitsverteilung [m/s] Messfall „Fenster-Frühjahr 4“	116
Abb. 100	Temperaturverteilung [K] Messfall „Fenster-Frühjahr 4“	116
Abb. 101	Geschwindigkeitsprofil [m/s](Vektordarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 4“	117
Abb. 102	Geschwindigkeitsprofil [m/s] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 4“	117
Abb. 103	Temperaturprofil [K] (Konturdarstellung) in den Messpunkten, „Fenster-Frühjahr 4“	118
Abb. 104	Temperaturverteilung [K] Messfall „Wand - Sommer 1“	119
Abb. 105	Geschwindigkeitsprofil [m/s] in den Messpunkten H1 bis H3, „Wand - Sommer 1“	120
Abb. 106	Geschwindigkeitsprofil [m/s] in den Messpunkten H4 bis H6, „Wand - Sommer 1“	120
Abb. 107	Temperaturprofil [K] in den Messpunkten H1 bis H3, „Wand - Sommer 1“	121
Abb. 108	Temperaturprofil [K] in den Messpunkten H4 bis H6, „Wand - Sommer 1“	121
Abb. 109	Temperaturverteilung [K] Messfall „Wand - Sommer 2“	122
Abb. 110	Geschwindigkeitsprofil [m/s] in der Mitte des Abschnittes, „Wand - Sommer 2“	123
Abb. 111	Temperaturprofil [K] in der Mitte des Abschnittes, „Wand - Sommer 2“	123
Abb. 112	Ansicht Südfassade mit oberen (links) und unteren Lüftungsklappen (rechts)	127
Abb. 113	Südfassade mit ersten Sondierungsmessungen	128

Abb. 114	eingebaute Abschottung und teilweise demontiertes Insektenschutzgitter	130
Abb. 115	Südan­sicht mit Messpositionen	131
Abb. 116	Schnitt durch die Südfassade im Fassadenelement 10 mit den Messstellen	134
Abb. 117	Detail des Attikabereiches mit den Messstellen für den Messfall „Wand“	135
Abb. 118	Detailschnitt mit den Messstellen für den Wärmestrom und die zugehörigen Temperaturen	135
Abb. 119	Messwerte des Messfalls „Wand - Klappen geschlossen“	138
Abb. 120	Messwerte des Messfalls „Wand - Klappen offen“	139
Abb. 121	Messwerte des Messfalls „Fenster - Klappen geschlossen“	140
Abb. 122	Messwerte des Messfalls „Fenster - Klappen offen“	141

Anhang

Abb. A1	Temperatur- und Feuchtemessfühler des Messfalls „Wand“	A7
Abb. A2	Flügelrad MiniAir64 und Hitzdrahtanemometer	A8
Abb. A3	Differenzdrucksensoren DD1 und DD2	A9
Abb. A4	Strahlungsmessgeräte vor Fassade	A10
Abb. A5	Strahlungsmessgeräte im Fassadenzwischenraum	A11
Abb. A6	Wetterstation	A13
Abb. A7	Verkabelungsplan Verteiler V10/13, im Messbereich „Wand“	A15
Abb. A8	Verkabelungsplan Verteiler 4/-3,5 im Messbereich „Fenster“	A16
Abb. A9	Verkabelungsplan Verteiler 3/0 im Messbereich „Fenster“	A17
Abb. A10	Verkabelungsplan Verteiler 5/0 im Messbereich „Fenster“	A18
Abb. A11	Verkabelungsplan Verteiler V5/3.5 im Messbereich „Fenster“	A19
Abb. A12	Verkabelungsplan Verteiler V2/10.5 im Messbereich „Fenster“	A20
Abb. A13	Verkabelungsplan Verteiler V4/10.5 im Messbereich „Fenster“	A21
Abb. A14	Grundmaske des Messprogramms	A22
Abb. A15	Temperatur/Feuchte Rohwert speichern	A28
Abb. A16	Strahlung/Strömung Rohwert speichern	A29
Abb. A17	Temperatur/Feuchte skalierte Werte speichern	A30
Abb. A18	Strahlung/Strömung skalierte Werte speichern	A31
Abb. A19	Anzeige Rohwerte	A32
Abb. A20	Anzeige skalierte Werte	A34

8. Verwendete und weiterführende Literatur

- 1) Achermann, M.; Zweifel, G.: Gebäudesimulationsprogramme: Validierung als Eignungstest, Tagungsband 11. Schweizerisches Status-Seminar 2000, 14./15.09.00, ETH Zürich, S. 145-152
- 2) Bielefeld, Hans-Walter: Doppelfassadentechnik - Ein Konstruktionsprinzip zur Energieeinsparung, in: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift 10/97, S 125-132
- 3) Binz, Armin; Fregnan, Franco: Thermisch optimierte Unterkonstruktionen für hinterlüftete Fassaden, Tagungsband 11. Schweizerisches Status-Seminar 2000, 14./15.09.00, ETH Zürich, S. 67-74
- 4) Blum Clemens: Bauen mit Glas - Ausblick in die Gegenwart (Referat WS 1998/99), Institut für Baugeschichte, Universität Karlsruhe (TH)
- 5) Borth, Joachim (Referent); Zaccheddu, Elia: Planungshilfsmittel bei der Auslegung von Doppelfassaden, Tagungsband 11. Schweizerisches Status-Seminar 2000, 14./15.09.00, ETH Zürich, S. 83-89
- 6) Borth, Joachim; Zaccheddu, Elia: Berechnungsverfahren für Doppelfassaden, in: Sulzer Technical Review, 1/2001, S. 4-5
- 7) Brunner, Conrad U.: Gebäude mit hohem Glasanteil, Tagungsband 11. Schweizerisches Status-Seminar 2000, 14./15.09.2000, ETH Zürich, S. 91-97
- 8) Churchill, S. W. et al.: Int. J. Heat Mass Transfer, 18, 1049, 1975.
- 9) Klima Suisse: „Lüftung von großen Räumen - Handbuch für Planer“
- 10) Compagno, Andrea: Intelligente Glasfassaden: Material, Anwendung, Gestaltung, 1., unveränd. Nachdr., Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 1995
- 11) Compagno, Andrea: Intelligente Glasfassaden: Material, Anwendung, Gestaltung, 4., rev. und erw. Aufl., Basel; Boston; Berlin: Birkhäuser, 1999
- 12) Döge, Klaus; Franzke, Uwe: Zusammenwirken von Außenklima, Doppelfassade und Raumklima, in: TAB - Technik am Bau 1/98, S. 41-46
- 13) Dorer, V; Weber, A: Air, contaminant and heat transport models: integration and application; in: Energy and Buildings 30/1999, S. 97-104
- 14) Duffie, J. A.; Beckman, W. A.: Solar Engineering of thermal processes, 2nd ed., John Wiley & Sons, p. 400-402 (1991)
- 15) Empa Energierengruppe (erg) Abteilung Haustechnik, Dübendorf: „Integrales Planen mit Gebäudesimulationsprogrammen“
- 16) Faist, André P.: Double-Skin Walls, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, 1998
- 17) FLUENT 5: User's Guide, Fluent Incorporated, 1998.
- 18) Fux, Volker: Strömungstechnische Untersuchungen an Doppelfassaden, Online im Internet: http://www.fht-stuttgart.de/fbp/fbpweb/einricht/piv_fassade.shtml (10.12.2002)

- 19) Gan, Guohui: Prediction of Turbulent Buoyant Flow Using an RNG Model, in: Numerical Heat Transfer, Part A, 33/1998, S. 169-189
- 20) Gartner, J. & Co, Werkstätten für Stahl- und Metallkonstruktionen, Gundelfingen: Neubau eines Verwaltungsgebäudes in D-45128 Essen; Online im Internet: <http://www.baunetz.de/arch/bauobjekte/01.7/komplett/12998> (10.12.2002)
- 21) Gasser, Josias F.: Bürohaus Gasser: Nachhaltigkeits-Vision mit Praxis, Tagungsband 11. Schweizerisches Status-Seminar 2000, 14./15.09.00, ETH Zürich, S. 109-114
- 22) Gasser, Robert: Energetische Betrachtung einer doppelschaligen Fassade - Ansätze zu einer vereinfachten rechnerischen Beurteilung, Diplomarbeit TU Graz, 10/2000
- 23) Gertis, K.: „Sind neuere Fassadenentwicklungen sinnvoll? Teil2: Glas-Doppelfassaden“ Bauphysik 21 (1999), Heft 2, S. 54-66
- 24) Gertis, Karl: Thermotrope Beschichtungen zur Verschattung von Außenwänden; TU-Berlin, Internationaler Bauphysikkongress 1997, „Bauphysik der Außenwände“, S. 137 ff
- 25) Gertis, Karl: Zero-Haus und Zero-Stadt, in: Sonderdruck aus Intelligente Architektur 19/1999, S. 66-70
- 26) Gertis, Karl; Reiß, Johann; Wetzel, Christian; Sinnesbichler, Herbert: Sind neuere Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll, Teil 1: Transparente Wärmedämmung, in: Bauphysik 21 (1999), Heft 1, S. 1-9
- 27) Gnielinski, V.: Int. Chem. Eng., 16, 359, 1976.
- 28) Graz 68/Halozan, H.; Katona, O.; Gilli, P. V.: Klimadaten von Graz, gemessen im Jahr 1968, in: Inverter-Driven Heat Pumps. HP-CR-4, IEA Heat Pump Center, Karlsruhe. Inverter Study, 1988
- 29) Hauser, G.: Energetische Wirkung einer durchströmten Fassade. TAB H. 20, S. 329-338, 1989
- 30) Hauser, Gerd: Energetische Wirkung einer durchströmten Glasfassade, in: Sonderdruck aus TAB - Technik am Bau 20 (1989), Heft 4, Seite 329-338
- 31) Hauser, Gerd; Heibel, Bernd: Bemessungsgrundlagen für Zuluftfassaden, in: Bauphysik 20 (1998), Heft 3, S. 74-80
- 32) Hauser, Gerd; Heibel, Bernd: Zuluftfassaden - Simulationsmodell und maßtechnische Validation, in: gi Gesundheits - Ingenieur - Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik 117 (1996) Heft 1, S. 1-8
- 33) Hausladen, Gerhard; Kippenberg, Kaja; Langer, Ludwig; Saldanha de, Michael: Solare Doppelfassaden: Energetische und raumklimatische Auswirkungen, in: Ki Luft- und Kältetechnik 11/1998, S. 524-529
- 34) Heros, Mireille: Optimising lightweight double-skin facade performances, CSTB Recherche, Newsletter N° 41, January/February 2000, Online im Internet: http://www.cstb.fr/frame.asp?URL=lettres_rech/TLettre.asp (10.12.2002)

- 35) Heschl, Ch.; Fesharaki, M.; Pichler, J.; Grassler, W.: Für mehr Behaglichkeit - Messungen und Simulation der Raumlufstörung an der FH-Pinkafeld, in: TGA Technische Gebäudeausrüstung 4/2001, S. 7-8
- 36) Heusler, Winfried: Integrale Planung und Fassadentechnik, in: TAB - Technik am Bau 12/2000, S. 26
- 37) Heusler, Winfried; Compagno, Andrea: Mehrschalige Fassaden - Eine Gegenüberstellung verschiedener zweischaliger Fassadensysteme, in: DBZ - Deutsche Bauzeitschrift 6/98, S. 131-138
- 38) IGH Institut: Runde Lösung für das Bundespresseamt, Berlin; Online im Internet, Url: http://www.igh.com/die_igh-gruppe/igh_institut/referenzen/ref_presseamt.html (10.12.2002)
- 39) Incropera F. P., DeWitt D. P.: Fundamentals of Heat and Mass transfer, 5th edition, John Wiley&Sons, New York, 2002.
- 40) Ito, N. et al.: A field experiment study on the convection heat transfer coefficient on an exterior surface of a building, ASHRAE Transactions Nr. 2225, 1972.
- 41) Kallinich, Dietmar: Doppelfassaden. Zu Grundlagen technischer, bauphysikalischer und strömungsmechanischer Art, in: Beratende Ingenieure 9/1994, S. 36-44
- 42) Kays, W. M.: Convective heat and mass transfer, McGraw-Hill Book Co., p. 180, 1966
- 43) Kilian, Hans-Ulrich; Hagmann, Hans K.: Gebrauchsmuster DE 298 28 579 U 1, Deutsches Patentamt, 1999
- 44) Kiraly, J.: Architektur mit der Sonne, 1x1 der passiven Sonnenheizsysteme. Haustypologien + Energiebilanzen. 7., neubearb. Aufl. 1996. C.F. Müller Verlag
- 45) Kockert, Roland: Volumenstrommessung an einer Doppelfassade mit Hilfe der Kompensationsmethode (Diplomarbeit), Fachhochschulstudiengang Gebäudetechnik, Pinkafeld, 1998
- 46) Kolle, E.; Sperlich, V.; Verheyen, O.: Wissenschaftliches Begleitprogramm für das Haus der Wirtschaftsförderung (HdW) in Duisburg (Abschlußbericht), Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg, 1997
- 47) Konradt, Oliver; Lehmann, Lutz; Zapp, Franz Josef: Doppelfassaden: Nutzen und Kosten, in: Bauphysik 21 (1999), Heft 1, S. 10-19
- 48) Lang, Werner; Typologische Klassifikation von Doppelfassaden und experimentelle Untersuchung von dort eingebauten Lamellensystemen aus Holz zur Steuerung des Energiehaushaltes hoher Häuser unter besonderer Berücksichtigung der Nutzung von Solarenergie Dissertation, München, 2000
- 49) Le Corbusier: 1929. Feststellungen zu Architektur und Städtebau. Wiesbaden, 1964, S. 70 ff

- 50) Limmer, T.; Schlichter, H.; Schmidt, H.: Eine spezielle doppelschalige Fassade im Hochbau zur Lösung von sommerlichem und winterlichem Wärmeschutz, zu natürlichen Be- und Entlüftung und zur Verbesserung des Schallschutzes, in: VDI Berichte, Nr. 1527, 2000, S. 309-318
- 51) Lödel, Thomas: Geprüft. Erfahrungsbericht über das sol-skin Gebäude der Götz GmbH in Würzburg, in: AIT Architektur, Innenarchitektur, Technischer Ausbau; AIT Spezial, Intelligente Architektur 11, 1997
- 52) Marek, Rudi: Doppelschalige Fassaden als polyvalente Gebäudehüllen, in: TAB Technik am Bau 5/2000, S. 55-62
- 53) Mercer, W. E.; Pearce, W. M.; Hitchcock, W. M.: Journal of Heat Transfer 89, p. 251 - 257, 1967
- 54) Möhle, Peter: Zwischen den Schalen, in: db - Deutsche Bauzeitung 1/01, S. 89-98
- 55) Müller, H.: Messungen eines Gebäudes mit Doppelfassade in Essen, Abschlußbericht, Universität Dortmund, 2000
- 56) Müller, R.: Erhaltung der Kastenfenster durch gezielte Verbesserungsmaßnahmen, Abschlußbericht, Rosenheim, 1996
- 57) Neubert, Steffi: Doppelfassaden - Ein Beitrag zur Nachhaltigkeit?, Teil 1 (Seminararbeit), Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 1999
- 58) Neubert, Steffi: Doppelfassaden - Ein Beitrag zur Nachhaltigkeit?, Teil 2 (Seminararbeit), Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, 1999
- 59) Nolte, Ch.; Pasquay T.; Thiel, D.; Bericht zu Messvorhaben an drei Gebäuden mit Doppelfassaden. AIT Spezial, H. 15, S. 81-85, 1998
- 60) Nolte, Christoph: Zum Lüftungsverhalten von Doppelfassaden, in: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 4 Bauingenieurwesen, Nr. 158, 1999
- 61) Nolte, Christoph; Pasquay, Till; Thiel, Dieter: Geprüft. Bericht zu Messvorhaben an drei Gebäuden mit Doppelfassaden, in: AIT Architektur, Innenarchitektur, Technischer Ausbau; AIT Spezial, Intelligente Architektur, 15/1998, S. 81-85
- 62) Oesterle, E.; Fischer Chr.; Lieb, R.: Die doppelte Haut unter der Lupe. CCI H 3 u 4, 1997
- 63) Oesterle, Eberhard: Doppelfassaden: Grundlagen und ausgeführte Konzepte, Symposium industrieBau, 31. Jänner/1. Feber 2001, Dresden
- 64) Oesterle, Eberhard: Doppelschalige Fassaden - Konzepte der Zukunft?, in: Sonderdruck aus CCI 7/93
- 65) Oesterle, Eberhard: Gebäude für das nächste Jahrhundert; in: Fassadentechnik 2/99
- 66) Oesterle, Eberhard: Richtig geplante doppelschalige Fassaden besser als ihr Ruf, in: HLH Bd. 51, 1/2000, S. 3
- 67) Oesterle, Eberhard; Lieb, Rolf-Dieter: Die doppelschalige Fassade, in: Der Architekt, 12/97, S. 766-771
- 68) Oesterle, Eberhard; Lieb, Rolf-Dieter: Die doppelschalige Fassade des Düsseldorfer Stadttors, in: TAB - Technik am Bau, 7/97, S. 35-43

- 69) Oesterle; Lieb; Lutz; Heusler: Doppelschalige Fassaden, Callwey Verlag, München (1999)
- 70) Oesterle; Lieb; Lutz; Heusler: Double-Skin Facades, Prestel Verlag, München (2001)
- 71) ÖN EN 832 - Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heizenergiebedarfs - Wohngebäude; September 1998
- 72) ÖNORM M7701 - Vornorm 1.September 1985 - Sonnentechische Anlagen
- 73) ÖNORM M7703 - Vornorm 1.September 1985 - Passive sonnentechische Anlagen, Bemessungsverfahren
- 74) Petukhov, B. S.: Advances in Heat Transfer, Vol. 6, Academic Press, New York, 1970.
- 75) Randall, K. R.; Mitchell, J. W.; El-Wakil, M. M.: Journal of Heat Transfer, p. 120 - 125, 1979
- 76) Recknagel; Schramek; Sprenger: Grundlagen, Tb. für Heizung und Klimatechnik, 2000
- 77) Rohde, Christian; Voss, Linn: Verwaltungsgebäude Götz GmbH, Würzburg, in: Glaskonstruktionen zwischen, an und über Gebäuden. (Hrsg. Doris Haas-Arndt), Universität Hannover, 2000
- 78) Rudischer, Rainer: Offenlegungsschrift DE 196 49 509 A 1, Deutsches Patentamt, 1998
- 79) Schälin, Alois: Optimierung von Doppelfassaden mit Hinterlüftung - Planungshilfe mit numerischer Strömungsberechnung Tagungsband 11. Schweizerisches Status-Seminar 2000, 14./15.09.00, ETH Zürich, S. 75-82
- 80) Schmidt, M.: Irrwege der Architektur?, VDI Jahrbuch 1996, S. 40 - 51
- 81) Schuler, Matthias: Luft in Hülle und Fülle. Doppelfassaden an Hochhäusern sind oft umstritten, in: db Deutsche Bauzeitung 4/97, S. 113-123
- 82) Schwab, Armin Josef: Wärmeübertragung bei Mischkonvektion in luftdurchströmten Fassaden Dissertation Technische Universität München, 1993
- 83) Schwarz, Bernhard: Witterungsbeanspruchung von Hochhausfassaden, in HLH 24, Nr. 12, 1973, S. 376-384
- 84) Schweger, P.: „Doppelfassade - ein Muß für Hochhäuser“. Arch. Baufocus 1997, H. 136, S.109-113
- 85) Sedlacek, Gerhard; Wellershoff, Frank; Hortmanns, Michael: Windlasten für belüftete Doppelfassaden, in: Glasforum 4/99, S. 30-33
- 86) Sedlacek, Gerhard; Ziller, Claudia: „Strömungstechnische Untersuchungen von Doppelfassaden“; TU-Berlin, Internationaler Bauphysikkongress 1997, "Bauphysik der Außenwände"

- 87) Sedlacek, Gerhard; Ziller, Claudia: Bauphysik der Außenwände: Strömungstechnische Untersuchungen von Doppelfassaden, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 1997
- 88) Sedlacek, Gerhard; Ziller, Claudia: Natürliche Lüftung von Gebäuden mit Doppelfassaden, in: Festschrift Joachim Lindner, Stuttgart, Fraunhofer IRB-Verlag, 1998
- 89) Sedlacek, Gerhard; Ziller, Claudia; Ruscheweyh, H.; Oesterle, Eberhard; Lieb, Rolf-Dieter: Natürliche Belüftung eines Hochhauses mit Doppelfassade, in: Ki Luft- und Kältetechnik 8/1996, S. 343-346
- 90) Sedlbauer, Klaus; Künzel, Hartwig M.: Der Einfluß von Luftkonvektion auf die Dämmwirkung von Mineralwolle, in: Fassadentechnik 6/99
- 91) Sedlbauer, Klaus; Künzel, Hartwig M.: Luftkonvektionseinflüsse auf den Wärmedurchgang von belüfteten Fassaden mit Mineralwollendämmung, in: wksb Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz 43/1999, S. 53-59
- 92) Siikala, Antti-Matti; Söderlund, Jan: Sanomatalo, Online im Internet: <http://www.vtt.fi/virtual/try/Terak/csm1-99-1.htm> (10.12.2002)
- 93) Stahl, Manfred: Alles nur reine Fassade?, in: CCI 2/96, S. 21-27
- 94) Stahl, Manfred: Götz-Neubau: Ist das ein „Intelligentes Gebäude?“, in: CCI 12/96, S. 54-58
- 95) Stahl, Manfred: Nicht viel mehr als ein „teures Spielzeug“?, in: CCI 14/97, S. 22-23
- 96) Stahl, Manfred: Streitfall Doppelfassade Klinikum Ludwigshafen, in: CCI 12/97, S. 13-14
- 97) Stelzer, Franz: Selbstregelnde Verglasungen, TU-Graz, Bauphysik 1998
- 98) Stoll, J.: Eine neue Art der Doppelfassade, in: VDI Berichte Nr. 1527, 2000, S. 409-438
- 99) Stoll, Joachim: Glasfassaden als energetische Hüllfläche, in: Stahlbau 67, 1998, Heft 4, S. 252-268
- 100) Tenhunen, O.; Lintula, K.; Lehtinen, T.; Lehtovaara, J.; Viljanen, M.; Kesti, J.; Mäkeläinen, P: Double Skin Facades - Structures and Building Physics, Glass Processing Days, Helsinki, 18-21 June 2001
- 101) Thiel, Dieter: Intelligenten Fassaden gehört die Zukunft. Bausteine auf dem Weg zum energetisch optimierten emissionsarmen Bürogebäude, in: CCI 7/1997, S33-37
- 102) Todorovic, B.; Maric, B.: The influence of double facades on building heat losses and cooling loads, Online im Internet: <http://www.rcub.bg.ac.yu/~todorom/tutorials/rad31.html> (10.12.2002)
- 103) TRNSYS 15: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Februar 2000.
- 104) Troeltsch, M.: Numerische Simulation des Wärmeverbrauchs und des Temperaturverhaltens von Räumen als repräsentative Teile von Gebäuden. Dissertation an der TU München, 1986.

- 105) VDI 2078 - Richtlinien (August 1977), Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume
- 106) Völkel, G.E.: Zur Problematik geklebter Fassaden, TU-Berlin, Internationaler Bauphysikkongress 1997, „Bauphysik der Außenwände“
- 107) Wilde, K.: Wärme- und Stoffübertragung in Strömungen, Steinhoff - Verlag, Darmstadt, 1978.
- 108) Witz, Bertram: Doppelfassaden - Wertewandel oder Modeerscheinung?, in: Glasforum 4/99, S. 23-29
- 109) Wymond, Bruce: Sealing the building envelope. Curtain wall and cladding in Hong Kong, Online im Internet, Url: <http://www.building.com.hk/supplement/curtain/curtaincon.htm> (10.12.2002)
- 110) Ziller, Claudia: Modellversuche und Berechnungen zur Optimierung der natürlichen Lüftung durch Doppelfassaden, RWTH Aachen, Dissertation, 1999
- 111) Zöllner, Andreas: Experimentelle und theoretische Untersuchungen des kombinierten Wärmetransports in Doppelfassaden. Diss. München, 2001
- 112) Zürcher Ch., et al.: The influence of Thermal and Solar radiation on the Energy Consumption of Buildings. Infrared Physics 22, 1982.

Anhang

1. Glas

Glas ist ein anorganisches Schmelzprodukt, das durch eine bestimmte Kühltechnik ohne Kristallisation vom flüssigen in den festen Zustand übergeht. Der Hauptbestandteil von Glasprodukten ist Siliziumdioxid, es kann aber auch aus Bor (B), Germanium (Ge), Phosphor (P), und Arsen (As) hergestellt werden. Geringe "Verunreinigungen", etwa durch Metalloxyde, beeinflussen die Färbung (zB Grünstich) des Materials.

Silikatgläser sind für Strahlen mit einer Wellenlänge von 315 nm bis 3000 nm durchlässig. Der ultraviolette (UV) Bereich unter 315 nm und der infrarote (IR) Bereich über 3000 nm werden fast vollständig absorbiert. Durch die Undurchlässigkeit des Glases für langwellige Strahlung (> 3000 nm) entsteht in durch Glasflächen begrenzten Räumen eine Art Wärmefalle, bekannt als "Treibhauseffekt". Für das menschliche Auge ist der UV-Bereich unter 380 nm und der IR-Bereich über 780 nm nicht sichtbar, wobei die Empfindlichkeit des menschlichen Auges und das Maximum der spektralen Intensität der Sonneneinstrahlung bei etwa 550 nm liegen.

Gewöhnliches Floatglas mit einer Dicke von 4 mm weist eine Tageslichttransmission von etwa $\tau_L = 0,90$ [-] und einen Gesamtenergiedurchlassgrad von etwa $g = 0,87$ [-] auf. Durch chemische Reinigung wird eine verbesserte Durchlässigkeit erreicht. Dieses eisenärmere, sogenannte "weiße Glas" wird bei der Herstellung von Sonnenkollektoren verwendet. Seine Tageslichttransmission beträgt etwa: $\tau_L = 0,92$ und $g = 0,90$ (4 mm Scheibe).

A1

Kriterien des Strahlungsdurchgangs von Gläsern

nach [Gertis, TU Berlin 1997] und [Stelzer, TU Graz 1998]

Mit unterschiedlichen Konzepten wird versucht, eine Variation der Durchlässigkeit von Gläsern zu erreichen, um den Wärmehaushalt in Gebäuden zu regeln. Dies kann durch Sensoren gesteuert, oder abhängig von Lichtintensität bzw. Temperatur selbstregelnd erfolgen.

Bei elektrochromen Gläsern ermöglicht eine zwischen zwei Elektroden befindliche flüssigkristalline Schicht mit freier Wahl des Schaltpunktes ähnlich einem LC-Display die Verdunkelung von Gläsern.

Thermotrope Schichten wirken im gesamten Spektralbereich, indem die Schicht bei Temperaturanstieg zunehmend opak und lichtstreuend wird ($\tau_L = 0,9 - 0,1$ und $g = 0,9 - 0,05$). Bei thermochromen Schichten beeinflusst die Erwärmung vor allem die Strahlungsdurchlässigkeit im IR-Bereich.

Bei Photosensitivem Glas ist die Durchlässigkeit des Glases durch die lamellenförmige Struktur stark winkelabhängig. Die Winkeleinstellungen werden bei der Produktion festgelegt ($\tau = 0,16 - 0,3$ und $g = 0,35 - 0,44$).

Beschichtungen

Durch die Verwendung beschichteter, getönter Gläser kann der Transmissionsgrad L gesenkt werden. Die Scheibe wird allerdings durch die erhöhte Absorption stärker erwärmt.

Eine erhöhte Reflexion bedingt geringere Transmission und dadurch eine Reduktion der Gesamtdurchlässigkeit. Mit selektiven Beschichtungen wird versucht, im IR-Bereich stark reflektierende Verglasungen zu erzeugen, welche im sichtbaren Bereich jedoch möglichst durchlässig sind. Die reflektierenden Schichten werden meist erst nach der Scheibenherstellung mittels verschiedener Verfahren aufgebracht. Goldbedampfte Gläser kommen bei Isolier- oder Zweischeibenverbund-Verglasungen vor, Metalloxydbeschichtung auch bei Einfachverglasungen ($\tau = 0,1 - 0,6$ und $g = 0,2 - 0,7$).

Niedrig emittive Beschichtungen ermöglichen eine Senkung der Emissivität der Glasoberfläche von $\varepsilon = 0,85$ auf $\varepsilon = 0,05$. Damit kann die Abstrahlung im IR-Bereich auf 20 % gesenkt werden, ohne die Lichtdurchlässigkeit auf Werte unter 0,70 zu reduzieren.

Emailbeschichtungen (Schichtdicke ca. 100 - 150 nm) sind abnutzungs- und witterungsbeständig. Bei 20 % Bedruckungsgrad und 6 mm dickem Floatglas erzielt man einen τ -Wert von etwa 0,70 und einen g -Wert von 0,74. Bei 60 % Deckung sinkt g auf 0,52 und τ auf 0,49.

A2

2. Aerophysik

2.1. Luftströmungen im Fassadenzwischenraum

Die Luftströmungen in der Fassade werden hauptsächlich durch Temperaturdifferenzen und Wind beeinflusst. Der thermische Auftrieb erzeugt eine Strömung von unten nach oben. Die höhere Windgeschwindigkeit in den oberen Fassadenbereichen kann die Luft im Zwischenraum in entgegengesetzter Richtung, von oben nach unten bewegen.

2.2. Thermischer Auftrieb

Die Dichte der Luft ändert sich mit der Temperatur.

$$\Delta\rho = \rho / T_m \cong 0,004 \text{ [kg/m}^3\text{K]}$$

mit

$$T_m = t_{zu} + \Delta t_m + 273,15 \text{ [K]}$$

$\Delta\rho$ spezifische Dichteänderung der Luft [kg/m³K]

t_{zu} Zulufttemperatur in den Zwischenraum; Außenlufttemperatur [K]

Δt_m mittlere Übertemperatur [K]

Die Sonneneinstrahlung erwärmt die Luft im Fassadenzwischenraum. Die Luft im Zwischenraum dehnt sich aus und steigt durch die geringere Dichte nach oben. Die „schwerere“ Außenluft drängt an der unteren Öffnung in den Spalt nach. Die Druckdifferenz des thermischen Auftriebs ergibt sich zu:

$$\Delta\rho_{th} = \Delta\rho \cdot g \cdot \Delta h \cdot \Delta t_m \text{ [N/m}^2\text{ = Pa]}$$

Δh wirksame Auftriebshöhe [m]

g Erdbeschleunigung, 9,81 [m/s²]

Die mittlere Übertemperatur Δt_m ist abhängig von der Temperaturschichtung in der Fassade. Näherungsweise kann eine quadratische Temperaturzunahme über die Höhe angenommen werden.

$$\Delta t_m \cong \Delta t_{max} / 3$$

Die Luft versucht diesen Potentialunterschied auszugleichen und setzt sich in Bewegung.

2.3. Druckdifferenzen durch Windwirkung

Unterschiedliche lokale Winddrücke führen ebenfalls zu Luftbewegungen in der Fassade.

Der Staudruck hängt vor allem von der Windgeschwindigkeit ab.

$$q = \rho/2 * v^2$$

q Staudruck [Pa]

v Windgeschwindigkeit [m/s]

$\rho \sim 1,2 \text{ kg/m}^3$ Dichte der Luft bei 20 °C

Kombiniert mit spezifischen Winddruckbeiwerten c_p [-] lassen sich lokale Druckverhältnisse in Abhängigkeit von Windrichtung und Gebäudegeometrie bestimmen.

$$p_{\text{Wind}} = c_p * q \quad [\text{Pa}]$$

An der windzugewandten Seite wird lokal ein Überdruck aufgebaut, an der abgewandten Seite ein lokaler Unterdruck.

A4

2.4. Strömung

Quantitative Aussagen über die Luftströmung sind für die energetische Bewertung des Systems unbedingt nötig. Die konstruktive Ausbildung des Luftkanals bestimmt die Größe der Eintritts- und Austrittsverluste und die Strömungsverhältnisse.

$$\Delta p_{\text{Verlust}} = q * \sum \xi \quad \xi \text{ spezifischer Druckverlust}$$

Um die Summe der Druckverluste zu bilden müssen diese auf die gleiche Geschwindigkeit bezogen werden. Aus der Kontinuitätsgleichung folgt

$$\sum \xi = \xi_1 + (A_1 + A_2)^2 \times \xi_2$$

A_1 Querschnittsfläche bei Bezugsgeschwindigkeit v_1

A_2 Querschnittsfläche bei Geschwindigkeit v_2

Der spezifische Druckverlust basiert auf einem Überwiegen der Trägheitskräfte und diese stehen in einem quadratischen Verhältnis zur Luftgeschwindigkeit. Sind Druckverluste und "treibende" Druckdifferenzen gleich groß, so hat sich am System ein Druckgleichgewicht eingestellt.

$$\Delta p_{th} + \Delta p_{Wind} = \Delta p_{Verlust}$$

Starke Trägheitskräfte in der Luft können zu turbulenten Strömungsverhältnissen führen. Trägheitskräfte sind abhängig von der Luftgeschwindigkeit in Bezug auf das Ausmaß lokaler Richtungsänderungen der Strömung. Die Reynoldszahl Re beschreibt das Verhältnis zwischen Trägheits- und Reibungskraft.

$$Re = v * L / \nu$$

ν 15,5*10⁻⁶ [m²/s] Zähigkeit der Luft bei + 20 °C

L Maß für die Richtungsänderung der Strömung

Oberhalb der kritischen Reynoldszahl ist die Strömung turbulent.

$Re_{kritisch}$ = ca. 10.000 - 20.000 bei doppelschaligen Fassaden

Sinkt die Luftgeschwindigkeit in doppelschaligen Fassaden unter 0,1 m/s so treten laminare Strömungen auf. Bei laminaren Strömungen treten die Reibungskräfte gegenüber den Trägheitskräften in den Vordergrund. Die ξ -Werte können somit nicht mehr als konstant angesehen werden.

Die Luftströmung im Fassadenzwischenraum sollte so groß sein, dass eine Überhitzung des Spaltes vermieden wird. Steigt die Strömungsgeschwindigkeit zu stark an sind unangenehme Zugscheinungen im Gebäude möglich.

Der Auftriebsdruck kann bei einem Hochhaus mit angenommen 100 m Höhe enorme Luftmengen ansaugen. Wird der Bedarf nicht durch die vorgesehenen Zuluftöffnungen gedeckt, so sind Zugscheinungen im Inneren des Gebäudes die Folge, da die fehlende Luft durch Gebäudeöffnungen, wie zB Fugen, aus den an die Fassade angrenzenden Räumen angesaugt wird.

3. Messanlage

3.1. Sensorik

Die eingesetzte Sensorik wurde entweder entsprechend kalibriert oder es ist durch Kalibrierzertifikate nachgewiesen, dass die Genauigkeit den Erfordernissen der Messaufgabe entspricht. Die Angaben zu den Messgeräten sind den Bedienungshandbüchern der Hersteller entnommen.

3.1.1. Temperaturmessung

In der Abb. A1 sind die Temperatur- und Feuchtemessfühler und deren Halterung in der Messanordnung „Wand“ ersichtlich.



Abb. A1 Temperatur- und Feuchtemessfühler des Messfalls „Wand“

A7

NTC-Widerstand

Der Widerstand des NTC-Bauteils sinkt mit zunehmender Temperatur. „NTC“ steht für „negativ temperature coefficient“. Der Widerstand wird gemessen und daraus die Temperatur mittels entsprechender Kalibrierkurven errechnet.

Humichip U

Die Temperatur- und Feuchtesonde, Modell Humichip U der Firma Vaisala (Helsinki, Finnland) ist ein miniaturisierter Messchip mit integrierter Messelektronik.

Der Messchip kann im Temperaturbereich von -10 bis 50 °C eingesetzt werden. Der Fehler liegt im Bereich von 10 bis 30 °C bei $\pm 0,75$ °C und steigt bis zur oberen und unteren Messgrenze linear auf ± 1 °C an. Das Ausgangssignal liegt zwischen 0,01 und 1 V im Bereich zwischen -19 und 80 °C.

3.1.2. Feuchtemessung

Humitter 50 U

Der Feuchtwertgeber, Modell Humitter 50 U der Firma Vaisala ist eine kleine Feuchtesonde mit integrierter Messelektronik.

Der Messbereich liegt zwischen 10 und 90 % relativer Luftfeuchtigkeit. Der relative Fehler liegt bei einer relativen Luftfeuchte von 10 % bei ± 2 % und steigt linear bis auf $\pm 3,5$ % bei 90 % relativer Luftfeuchtigkeit. Der Feuchtwertgeber kann im Temperaturbereich von -10 bis 60 °C eingesetzt werden. Der temperaturabhängige relative Fehler beträgt bei -10 °C $\pm 1,5$ % und fällt von diesem Wert linear auf 0 % bei 15 °C. Dieser bleibt bis 25 °C bei 0 % und steigt dann linear auf $\pm 1,5$ % bei 60 °C. Das Ausgangssignal liegt zwischen 0 und 1 V im Bereich zwischen 0 und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit.

Feuchtwertgeber Humichip U

Der Messbereich liegt zwischen 1 und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit. Der relative Fehler bei +20 °C liegt bei einer relativen Luftfeuchte von 1 % bis 80 % bei ± 4 % und steigt im Bereich von 80 bis 100 % linear auf ± 5 % des Messwertes an. Der Messchip kann im Temperaturbereich von -10 bis 50 °C eingesetzt werden. Der temperaturabhängige relative Fehler beträgt bei -10 °C ± 5 % und fällt von diesem Wert linear auf ± 4 % bei 25 °C. Zwischen 25 und 50 °C steigt der Fehler von ± 4 % linear auf ± 5 % an. Das Ausgangssignal liegt zwischen 0,01 und 1 V im Bereich zwischen 1 und 100 % relativer Luftfeuchtigkeit. Der Sensor ist unempfindlich gegenüber kurzzeitiger Betauung.

3.1.3. Messung der Strömungsgeschwindigkeit

Die Strömungsgeschwindigkeitsmessungen erfolgten mittels Hitzdrahtanemometer. Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit bei hohen Temperaturen wurde zusätzlich ein Flügelradanemometer vorgesehen.

In der Abb. A2 sind drei Hitzdrähte und das Flügelrad ersichtlich, die durch eine Metallhalterung positioniert werden.

A8



Abb. A2 Flügelrad MiniAir64 und Hitzdrahtanemometer

Hitzdrahtanemometer

Der Luftgeschwindigkeitstransmitter, Modell 8455-150 der Firma TSI Incorporated (USA) hat einem sogenannten Hitzdraht, der auf konstanter Temperatur gehalten wird. Die dazu notwendige Energiemenge ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit.

Der Sensor liefert temperaturkompensierte Werte im Bereich von 0 bis 60 °C. Messbereiche des Luftgeschwindigkeitstransmitters zwischen 0,125 und 50 m/s sind möglich, wobei 0,125 bis 10 m/s gewählt wurde. Der Fehler ist kleiner $\pm 0,5$ % der gewählten Messbereichsobergrenze und kleiner ± 2 % vom Messwert im Bereich von 18 bis 28 °C. Außerhalb dieses Temperaturbereiches ist der Genauigkeitsbereich um 0,2 % pro °C zu erweitern. Engere Messbereiche der Strömungsgeschwindigkeit können ausgewählt werden. Das minimale Auflösungsvermögen beträgt 0,07 % des gewählten Geschwindigkeitsbereiches.

Um eine schwankende Anzeige besser lesbar zu machen, ist eine Ausgabzeitkonstante zwischen 0,05 und 10 Sekunden möglich, wobei eine Sekunde gewählt wurde. Der Durchschnittswert während der letzten Zeitkonstantenperiode wird ausgegeben. Messungen erfolgen 20 mal pro Zeitkonstantenperioden bei Zeitkonstanten von mehr als einer Sekunde und 20 mal pro Sekunde bei Zeitkonstanten von einer Sekunde oder weniger.

Flügelrad MiniAir64

Der Strömungssensor, Modell MiniAir64 der Firma Schildknecht Messtechnik AG (Gossau, Schweiz) dient zur Erfassung der Strömungsgeschwindigkeit von gasförmigen und flüssigen Medien. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit einem Flügelradanemometer gilt als die genaueste unter den möglichen Messmethoden. Das Messsignal des Flügelrades ist nahezu linear zur Strömungsgeschwindigkeit und weitestgehend unabhängig von Druck, Temperatur, Dichte und Feuchtigkeit. Der Messbereich liegt zwischen 0,3 und 20 m/s. Die Messgenauigkeit ist im Datenblatt mit $\pm 0,5$ % vom Endwert plus weitere $\pm 1,5$ % vom Messwert angegeben. Das Flügelrad kann im Temperaturbereich von -10 bis 80 °C eingesetzt werden.

A9

3.1.4. Differenzdruckmessung

In der Abb. A3 sind die Differenzdrucksensoren **DD1** und **DD2** und deren Halterungen zu sehen.



Abb. A3 Differenzdrucksensoren DD1 und DD2

Differenzdruck-Messumformer

Der Differenzdruck-Messumformer, Typ PI der Firma Halstup-Walcher GmbH (Kirchzarten, Deutschland) ist ein pneumatisch-elektronischer Messumformer zur Differenzdruckmessung. Die verwendete Druckmessdose ist für Luft und nicht aggressive Gase geeignet. Kernstück ist eine Druckmessdose mit einer Membranfeder aus Berylliumbronze, die entsprechend der Druckdifferenz zwischen den beiden Kammern der Druckmessdose ausgelenkt wird. Die Auslenkung wird mittels induktiver Wegaufnehmer berührungslos gemessen. Der Messbereich erstreckt sich von 0 bis 100 Pa, wobei der Sensor zehnfach überbelastbar ist. Der Fehler durch Nichtlinearität ist kleiner als 1 %. Der Ausschlag-Drift sowie der Nullpunkt-Drift ist jeweils mit 0,04 % je K im Bereich von 10 bis 50 °C angegeben. Der Nullpunkt-Drift beträgt 0,5 % pro Jahr. Die Arbeitstemperatur des Differenzdruck-Messumformers liegt im Bereich von 0 bis 60 °C und die Zeitkonstante ist 1 s.

3.1.5. Wärmestrommessung

Wärmestrommessplatten

Es wurden zwei Wärmestrommessplatten der Firma Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH (Holzkirchen, Deutschland) verwendet. Die Platten mit einer aktiven Fläche von 180 x 180 mm liefern bei einer Wärmestromdichte von 4,59 W/m² bzw. 4,80 W/m² eine Thermospannung von 1 mV. Die relative Messunsicherheit beträgt 5 %.

A10

3.1.6. Strahlungsmessung

In der Abb. A4 zeigt die vor der Fassade angeordneten Strahlungsmessgeräte und deren Halterungen.



Abb. A4 Strahlungsmessgeräte vor Fassade

In der Abb. A5 sind die im Fassadenzwischenraum angeordneten Strahlungsmessgeräte und deren Halterungen ersichtlich.



Abb. A5 Strahlungsmessgeräte im Fassadenzwischenraum

Pyranometer CM3

Pyranometer dienen zur Messung der Sonnenstrahlung auf eine ebene Fläche. Der halbkugelförmige Aufbau erlaubt das Empfangen von Strahlung aus der gesamten Hemisphäre. Der ausgegebene Messwert ist proportional zur Ausrichtung der Strahlungsquelle in bezug auf die betrachtete Ebene. Eine Schutzhaube schützt das Gehäuse vor Erwärmung. Die Pyranometer sind mit einer Libelle und mit einer Schraube zum genauen Ausrichten ausgestattet. Trocknungspatronen aus Silicagel halten das Gehäuseinnere frei von Feuchtigkeit. Das CM3 enthält eine Thermosäule aus 100 Thermoelementen, die unter der Kuppel angeordnet sind. Diese ist mit einer schwarzen Ummantelung versehen, die einfallende Strahlung absorbiert und in Wärmestrahlung umwandelt. Aus dem resultierenden Energiestrom wird von der Thermosäule eine Spannung generiert.

Das Pyranometer CM3 der Firma Kipp&Zonen (Delft, Holland) für den kurzwelligen Strahlungsbereich hat folgende Spezifikationen:

Der spektrale Messbereich liegt zwischen 305 und 2800 nm. Die Kalibrierung ist für natürliches Licht und für die meisten künstlichen Lichtquellen gültig. Das Pyranometer kann im Temperaturbereich von -40 bis 80 °C eingesetzt werden.

Die Reaktionszeit für 95 % des Messwertes ist kleiner 18 s. Der Nullpunkt-Offset bei einer Strahlung von 200 W/m² ist kleiner 15 W/m² und der Nullpunkt-Offset bei einer Änderung der Umgebungstemperatur von 5 K/h ist kleiner 4 W/m². Die Unstabilität der Messwerte ist kleiner 1 % pro Jahr. Die Nichtlinearität ist kleiner ±2,5 % des Messwertes im Bereich bis 1000 W/m². Der Richtungsfehler ist kleiner ±25 W/m² bei 1000 W/m². Die maximale Abweichung bei einem Einfallswinkel von 60 ° zur Flächennormalen ist ±2 % vom Messwert. Die spektrale Selektivität ist kleiner ± 5% des Messwertes bei einer Wellenlänge von 350 bis 1500 nm.

Der temperaturabhängige Fehler ist kleiner 6 % des Messwertes beim Wechsel von -10 zu 40 °C. Die Abweichung vom Messwert bei einer Strahlungsrichtung von 0° in bezug auf eine Strahlung von 1000 W/m² ist kleiner 2 %. Die Empfindlichkeit liegt zwischen 10 und 35 µV/(W/m²). Die Signalbandbreite für atmosphärische Strahlung ist 0 bis 50 mV. Die Genauigkeit für Tagessummen ist ±10 %.

Pyranometer CM11

Das genauere Messinstrument CM11 der Firma Kipp&Zonen dient zur Überprüfung der baugleichen CM3. Das Pyranometer CM11 hat folgende Spezifikationen:

Der spektrale Messbereich liegt zwischen 305 und 2800 nm. Die Kalibrierung ist für natürliches Licht und für die meisten künstlichen Lichtquellen gültig. Das Pyranometer kann im Temperaturbereich von -40 bis 80 °C eingesetzt werden.

Die Reaktionszeit für 95 % des Messwertes ist kleiner 15 s. Der Nullpunkt-Offset bei einer Strahlung von 200 W/m² ist kleiner 7 W/m². Der Nullpunkt-Offset bei einer Änderung der Umgebungstemperatur von 5 K/h ist kleiner 2 W/m². Die Unstabilität der Messwerte ist kleiner 0,5 % pro Jahr. Die Nichtlinearität ist kleiner ±0,6 % Abweichung für den Messwert bei 500 W/m² bei einem Wechsel von 100 bis 1000 W/m². Der Richtungsfehler ist kleiner ±10 W/m² einer Strahlung von 1000 W/m² aus einer beliebigen Richtung. Die spektrale Selektivität ist kleiner ± 2% des Messwertes bei einer Wellenlänge von 350 bis 1500 nm. Der temperaturabhängige Fehler ist kleiner 1 % des Messwertes beim Wechsel der Umgebungstemperatur von -10 zu 40 °C relativ zu 20 °C. Die Abweichung für den Messwert bei einer Strahlungsrichtung von 0° in bezug auf eine Strahlung von 1000 W/m² ist kleiner ±0,25 %. Der Strahlungsmessbereich liegt zwischen 0 und 1400 W/m². Die Empfindlichkeit liegt zwischen 4 und 6 µV/(W/m²).

A12

Pyrradiometer

Das Pyrradiometer Typ 8111 der Firma Philipp Schenk GmbH & Co KG (Wien) dient zur exakten Bestimmung der Strahlungsbilanz im kurz- und langwelligen Strahlungsbereich mittels zwei getrennt arbeitender Empfänger. Der eingebaute Messwiderstand Pt-100 erfasst die Gehäusetemperatur. Das Messprinzip beruht auf einer Messung des Temperaturunterschiedes zwischen den nach oben und nach unten orientierten geschwärzten Empfängerflächen mittels Thermoelementen. Der Einfluss der Gehäusetemperatur wird rechnerisch berücksichtigt. Die beiden Empfängerflächen sind getrennt ausgeführt.

Das Pyrradiometer hat folgende Spezifikationen:

Der Strahlungsmessbereich liegt zwischen 0 und 1500 W/m². Der spektrale Messbereich liegt zwischen 300 und 100 000 nm. Die Empfindlichkeit liegt bei ca. 15 µV/(W/m²). Das Pyrradiometer kann im Temperaturbereich von -40 bis 60 °C eingesetzt werden. Die Auflösung ist kleiner als 1 W/m². Die Unstabilität der Messwerte ist kleiner 3 % pro Jahr bei fallweisen Einsätzen. Der Richtungsfehler, auch Kosinuseffekt, ist kleiner 5 % des Messwertes bei Neigungen zwischen 0 und 80° zur Flächennormalen auf die Messfläche. Der Azimutheffekt ist kleiner 5 % des Messwertes. Der Temperatureinfluss ist kleiner 2 % des Messwertes im Bereich von -20 bis 40 °C.

Die Nichtlinearität ist kleiner $\pm 2\%$ Abweichung für den Messwert im Bereich von 0,5 bis 1330 W/m². Die Reaktionszeit für 95 % des Messwertes ist kleiner 25 s. Die Reaktionszeit für 99 % des Messwertes ist kleiner 45 s.

3.1.7. Wetterstation

In der Abb. A6 ist die am Dach des Messobjektes eingerichtete Wetterstation mit der notwendigen Sturmsicherung zu sehen.



Abb. A6 Wetterstation

A13

3.1.8. MAWS Weather Station

Mit der MAWS Automatic Weather Station, der Firma Vaisala (Helsinki, Finnland) wird die Außentemperatur, die Luftfeuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit und -richtung, die Niederschlagsmenge und die Horizontalstrahlung bestimmt.

3.2. Verkabelung

Die Klemmen des Verteilersystems wurden von der Fa. Waidmüller (Wiener Neudorf) geliefert und sind in hoher Qualität ausgeführt, um Verfälschungen der Messwerte auszuschließen. Die Sensoren sind mittels Steckverbindungen angeschlossen. Damit ist gewährleistet, dass die erforderlichen Ortsveränderungen der Sensoren mit Fehlerfreiheit und minimalem Zeitaufwand erfolgen können.

3.2.1. Verkabelung Messbereich „Wand“

Am Dach des Gebäudes wurde für die Sensorik ein Klemmverteiler angebracht. Der Kabelplan im Kapitel 3.4 zeigt die Verkabelung von den Sensoren zum Verteiler und von dort zum Digitalmultimeter. Dieser Klemmverteiler wurde wasserdicht nach Schutzart IP65 ausgeführt und ist die einzige Klemmstelle zwischen der Sensorik und dem loggenden Meßsystem.

Die Verkabelung vom Klemmverteiler zum Meßsystem erfolgte mit 16poligen Kabel. Diese sind in der Attika bis zum Fensterbereich geführt und danach im Bereich zwischen der Hauswand und der vorgesetzten Glasfassade bis zum 1. Obergeschoss herabgelassen. Im dortigen Fenster wurden dann diese Kabel in die Zwischendecke eingezogen und zum Technikraum geführt, in dem sich das Meßsystem befand.

3.2.2. Verkabelung Messbereich „Fenster“

Die Subverteiler für die örtliche Sensorik im Fensterbereichen wurden direkt mittels mehrpoligen Kabel mit dem DMM verbunden. Die Kabelpläne des Messbereichs „Fenster“ befinden sich im Kapitel 3.4.

3.3. Datenlogging und Messcomputer

Die Datenlogging erfolgte mit dem Digitalmultimeter DMM 2000 und der Erweiterung für die Relaiskarten SWITCH SYSTEM 7001 der Firma KEITHLEY (Cleveland, USA) zum Einlesen der Messwerte. Das Messprogramm wurde mit der Programmiersoftware TESTPOINT der Firma KEITHLEY erstellt.

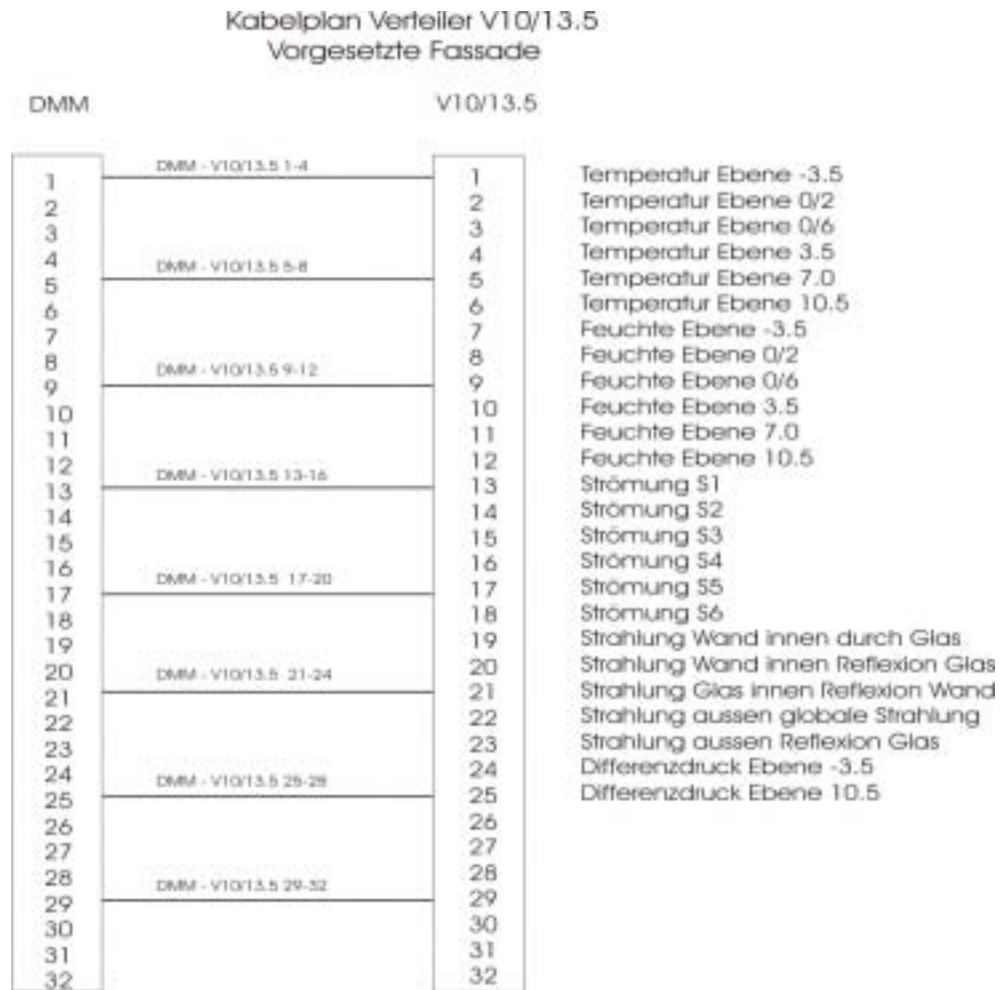
Die Temperatur, die Luftfeuchte und der Wärmestrom wurden im Intervall von 120 Sekunden gemessen. Die Strahlung, die Strömungsgeschwindigkeit und der Differenzdruck wurden im Abstand von 20 Sekunden geloggt, und als 120 Sekundenmittelwerte abgelegt.

Die Wetterstation mass die Windgeschwindigkeit jede Sekunde, die Windrichtung und die Strahlung alle 10 Sekunden, die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit und den Regen alle 60 Sekunden und generierte daraus Zehnminutenmittelwerte.

Die Messwerte vom DMM und von der Wetterstation wurden am Messcomputer zwischengespeichert. Aus den gewonnenen Daten wurden Zehnminutenmittelwerte gebildet, die an die Projektpartner weitergegeben wurden.

3.4. Kabelpläne

Kabelplan Messfall „Wand“			
Verteiler	Elementnummer	Ebene	entspricht Geschoss
V 10/13,5	10	13,5	Dachgeschoss

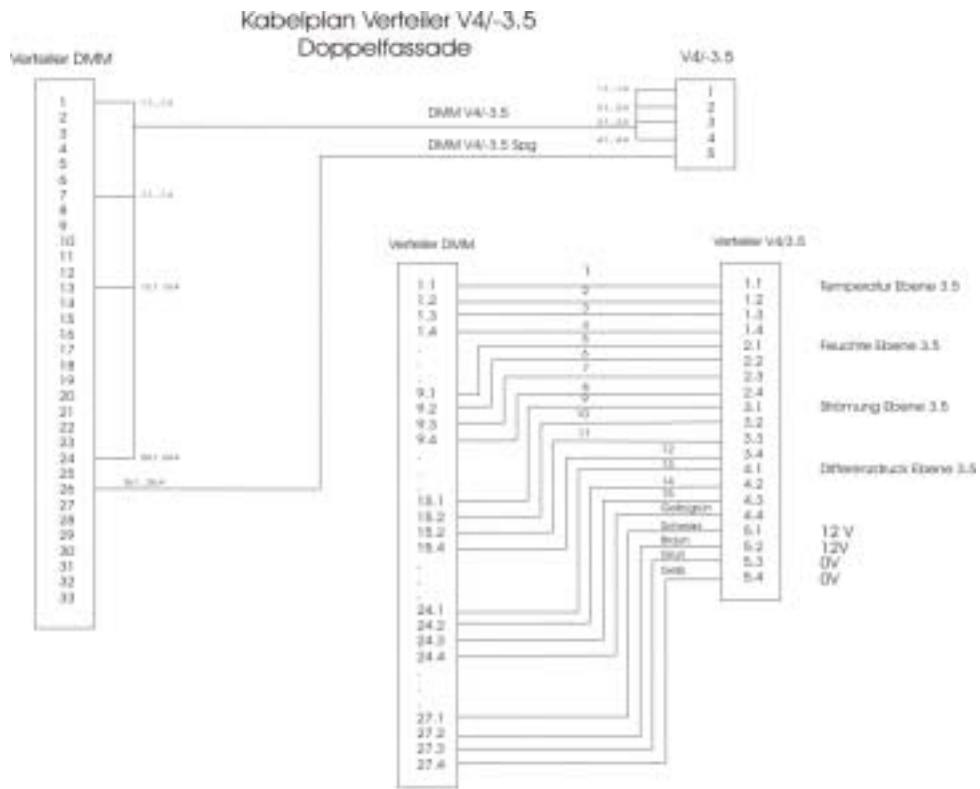


A15

Abb. A7 Verkabelungsplan Verteiler V10/13, im Messbereich „Wand“

Kabelpläne Messfall „Fenster“			
Verteiler	Elementnummer	Ebene	entspricht Geschoss
V4/-3,5	4	-3,5	KG
V3/0	3	0	EG
V5/0	5	0	EG
V5/3,5	5	3,5	1. OG
V2/10,5	2	7	3. OG
V4/10,5	4	10,5	3. OG

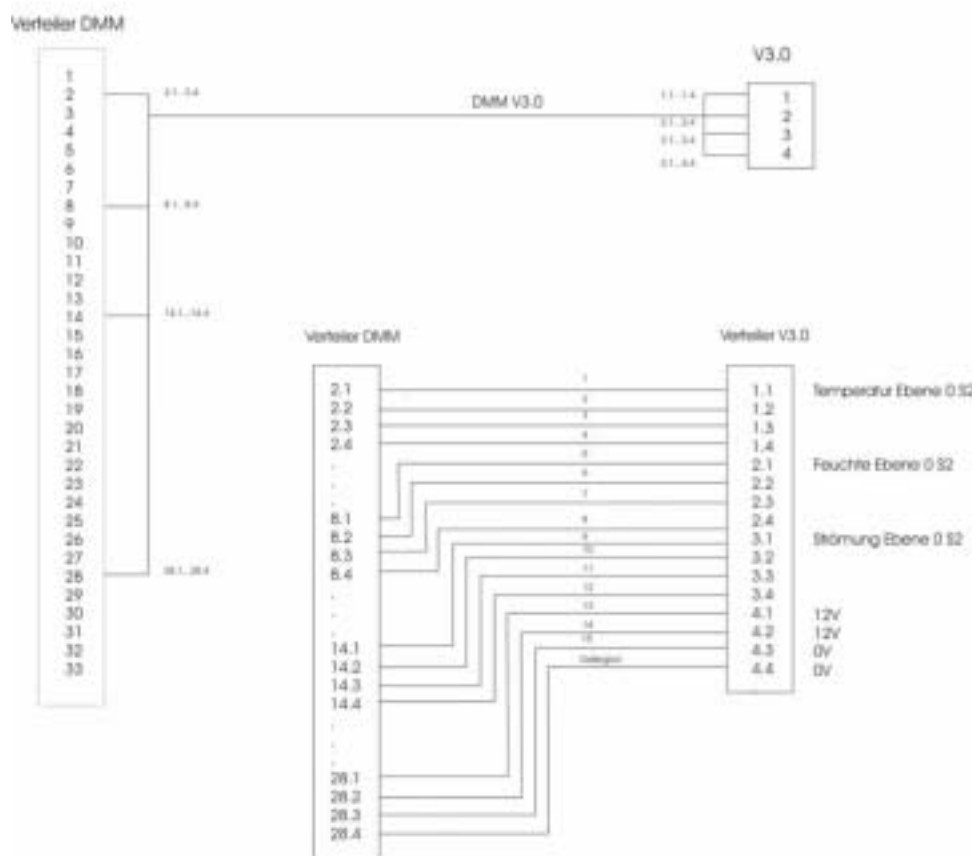
A16



Ersteller: Ing. Georg EGGER
 Bauzeichner: EGGER
 Inhalt: am 03.08.2000

Abb. A8 Verkabelungsplan Verteiler 4/-3,5 im Messbereich „Fenster“

Kabelplan Verteiler V3/0
Doppelfassade



A17

Abb. A9 Verkabelungsplan Verteiler 3/0 im Messbereich „Fenster“

A18

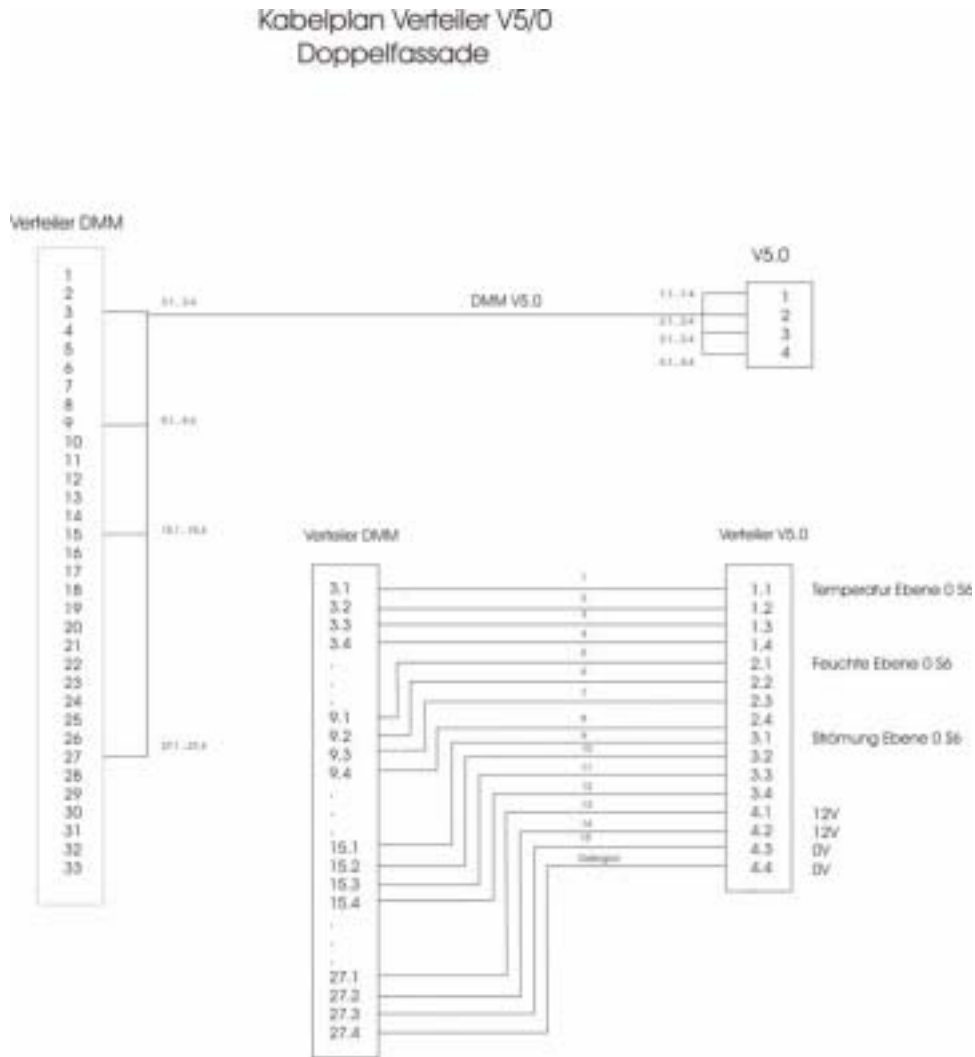
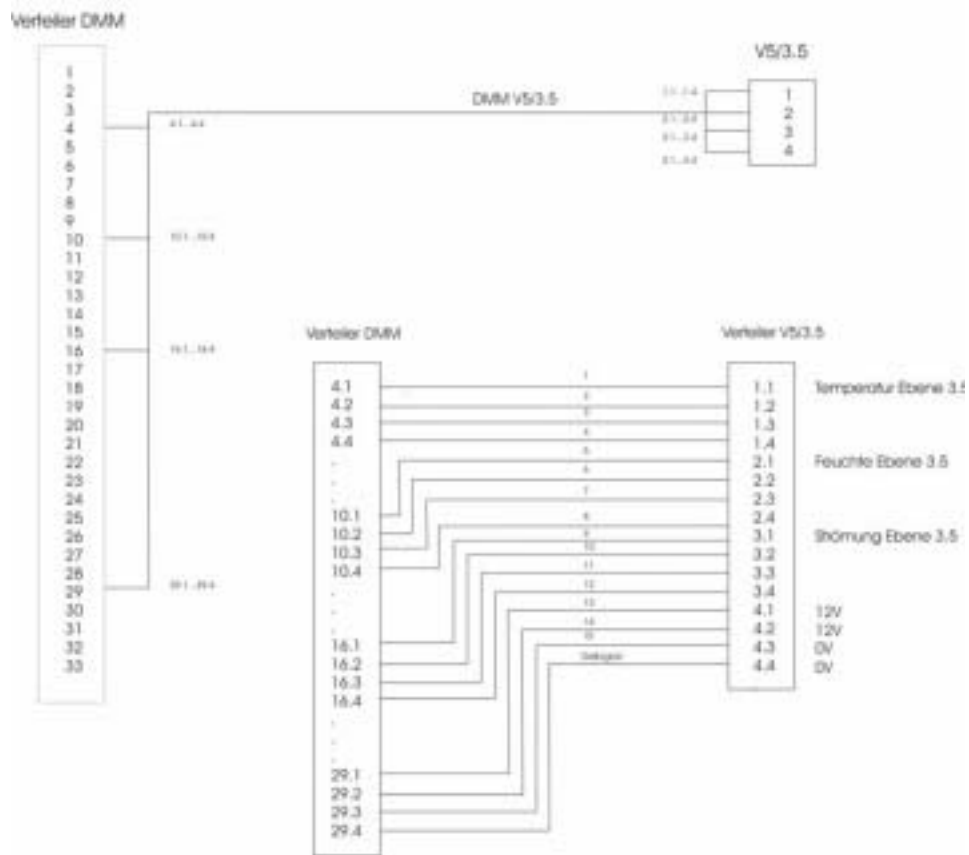


Abb. A10 Verkabelungsplan Verteiler 5/0 im Messbereich „Fenster“

Kabelplan Verteiler V5/3.5 Doppelfassade



A19

Abb. A11 Verkabelungsplan Verteiler V5/3.5 im Messbereich „Fenster“

A20

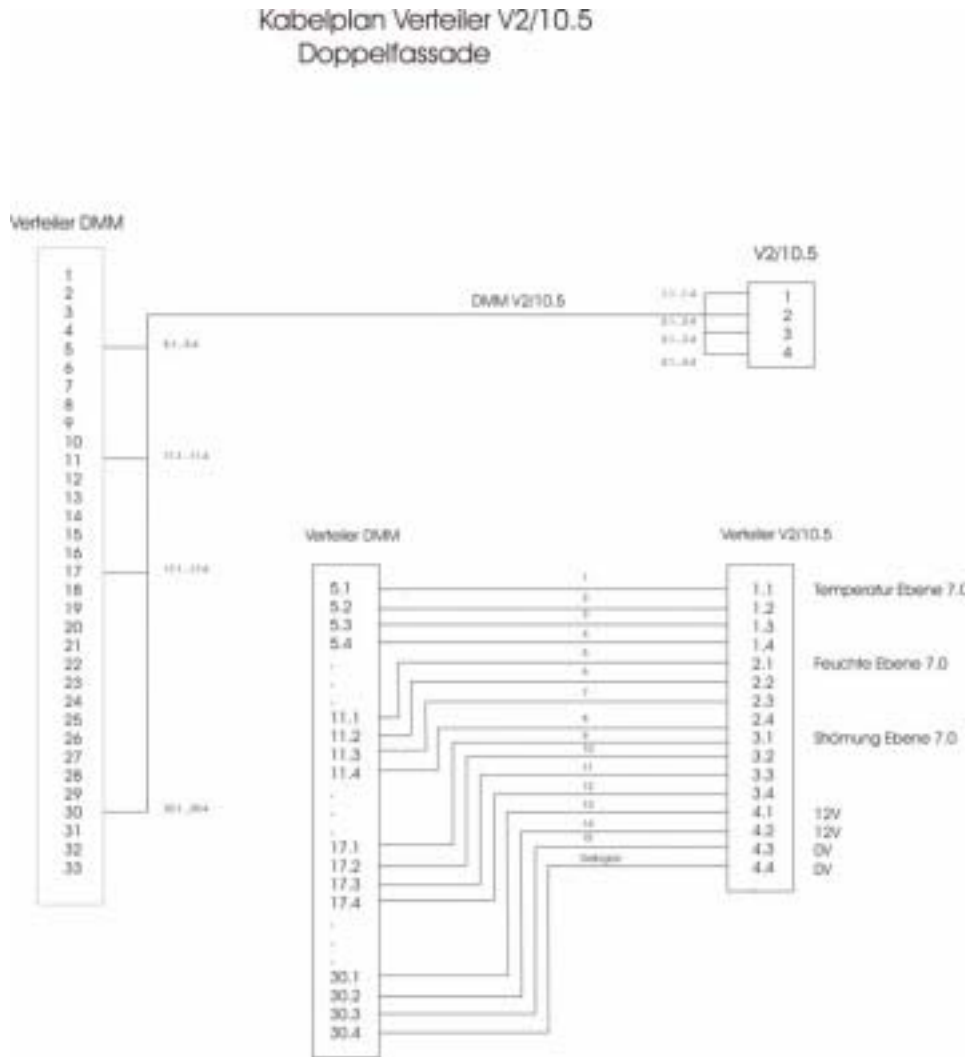
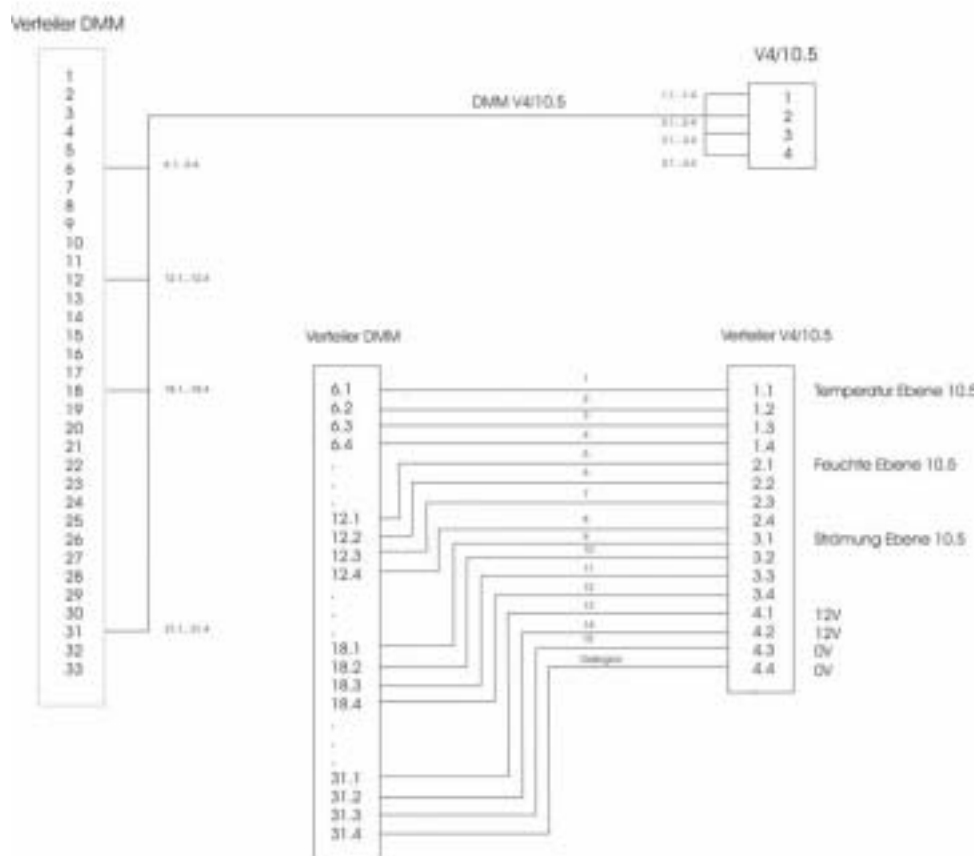


Abb. A12 Verkabelungsplan Verteiler V2/10.5 im Messbereich „Fenster“

Kabelplan Verteiler V4/10.5 Doppelfassade



A21

Abb. A13 Verkabelungsplan Verteiler V4/10.5 im Messbereich „Fenster“

4. Beschreibung des Messprogrammes

Ing. Georg EGER

4.1. Grundmaske

Bei Aufruf des Programms erscheint die Grundmaske, mittels derer die entsprechenden Einstellungen für die Messung vorgenommen werden.



A22

Abb. A14 Grundmaske des Messprogramms

4.1.1. Die Anzeigen der Grundmaske

Die Anzeigen der Grundmaske können vom Bedienpersonal nicht verändert werden. Folgende Anzeigen stehen zur Verfügung:

Datum

Es wird das aktuelle Systemdatum des PC's angezeigt. Änderungen am aktuellen Datum können nur durch Verstellen des Systemdatums des verwendeten PC's vorgenommen werden.

Uhrzeit

Es wird die aktuelle Systemuhrzeit des PC's angezeigt. Änderungen an der aktuellen Uhrzeit können nur durch Verstellung der Systemuhrzeit des verwendeten PC's vorgenommen werden.

Nächste Einlesung Temperatur und Feuchte

Es wird die Zeit bis zur nächsten Einlesung der Messwerte in Sekunden angezeigt. Dies erfolgt zur Information für den Anwender, um bei längeren Messintervallen eine Funktionskontrolle des Systems anzubieten.

Nächste Einlesung Strahlung und Strömung

Es wird die Zeit bis zur nächsten Einlesung der Messwerte in Sekunden angezeigt. Dies erfolgt zur Information für den Anwender um bei längeren Messintervallen eine Funktionskontrolle des Systems anzubieten.

Messung Automatik

Hier wird angezeigt, ob ein automatischer Messstart aktiviert wurde oder nicht. Bei Aktivierung des automatischen Starts wechselt die LED von der Signalfarbe ROT auf die Signalfarbe GRÜN und der Schriftzug STOP auf den Schriftzug AUTOMATISCHER START.

Stop Messung Automatik

Wurde die Messung mit Hilfe der Startautomatik gestartet, dann wechselt die Signalfarbe der LED von ROT auf die Signalfarbe GRÜN. Der Schriftzug MESSUNG BEENDET wechselt auf den Schriftzug MESSUNG GESTARTET.

Auswahl und Eingaben

Die Intervallzeiten für langsame und schnellere Vorgänge wurden in zwei Gruppen unterteilt:

- Intervall Temperatur und Feuchte
- Intervall Strahlung und Strömung

Dies ermöglicht für schnellere Messvorgänge eine kürzere Intervallzeit und für langsamere Messvorgänge eine längere Intervallzeit auszuwählen.

Intervall Temperatur und Feuchte

Mit der Auswahl INTERVALL TEMPERATUR UND FEUCHTE sind folgende Messungen fest verbunden:

- Temperatur
- Feuchte
- Differenzdruck

Die Grundeinstellung für INTERVALL TEMPERATUR UND FEUCHTE beträgt eine Minute.

Das Intervall TEST ist für eine Überprüfung der Messanlage vor dem Start der Messung konzipiert. Damit soll die Möglichkeit angeboten werden, die Messwerte auf die Funktionsfähigkeit zu überprüfen, ohne dass längere Zeitintervalle abgewartet werden müssen. Sollte eine Messung diese Intervallzeit benötigen, dann kann selbstverständlich die Messung mit dieser Intervallzeit durchgeführt werden.

Intervall Strahlung und Strömung

Mit der Auswahl INTERVALL STRAHLUNG UND STRÖMUNG sind folgende Messungen fest verbunden:

- Wand innen Strahlung durch Glas
- Wand innen Reflexion Glas
- Glas innen Reflexion Wand
- Glas außen globale Strahlung
- Glas außen Reflexion Glas
- Luftströmungen

Die Grundeinstellung für das INTERVALL STRAHLUNG UND STRÖMUNG beträgt 90 Sekunden.

Das Intervall TEST ist für eine Überprüfung der Messanlage vor dem Start der Messung konzipiert. Damit soll die Möglichkeit angeboten werden die Messwerte auf die Funktionsfähigkeit zu überprüfen, ohne dass längere Zeitintervalle abgewartet werden müssen. Sollte eine Messung diese Intervallzeit benötigen, dann kann selbstverständlich die Messung mit dieser Intervallzeit durchgeführt werden.

A24

Anzeige Messwerte

Die Auswahl der Messwertanzeige kann nur in der Grundmaske durchgeführt werden. Entsprechend dieser Auswahl erfolgt die Anzeige der Messwerte als Rohwerte oder skalierte Werte. Die Auswahl der Messwerte hat keinen Einfluss auf die Speicherung der Messwerte. Diese Auswahl hat keine Grundstellung, so dass ohne der Anwahl einer Anzeigemaske auch keine entsprechende aktiviert wird.

Auswahl Start

Es stehen dem Anwender die Startmöglichkeiten

- Manueller Start

oder

- Automatischer Start

und die Funktion

- Stop

zur Verfügung.

Manueller Start

Bei Anwahl der Funktion MANUELLER START wird die Messung sofort gestartet. Es erfolgt jedoch

- keine Visualisierung

und

- keine Speicherung

der Messwerte. Dies wird erst durch die entsprechende Funktionsanwahl ausgeführt.

Automatischer Start

Bei Anwahl der Funktion AUTOMATISCHER START wird der Start der Messung zum vorgewähltem Zeitpunkt gestartet und zum vorgewähltem Zeitpunkt wieder beendet. Die Anzeige START MESSUNG AUTOMATIK wechselt automatisch in den Status AUTOMATISCHER START.

Syntax für die Eintragung Datum

Die Syntax für die Eintragung des Datums ist im System begründet und kann vom Programmierer der Software nicht verändert werden.

Für den Eintrag des Start- und Stopdatums ist folgendes zu beachten:

An erster Stelle wird das Monat eingetragen. Es muss mit den ersten drei Buchstaben der englischen Schreibweise des Startmonats eingetragen werden. Hat der einzutragende Monat mehr als drei Buchstaben, dann ist nach dem dritten Buchstaben ein Punkt zu setzen. Hat der einzutragende Monat nur drei Buchstaben (Mai), dann ist kein Punkt sondern ein Leerzeichen zu setzen.

Nach dem Monat wird der gewünschte Tag eingetragen. Zwischen dem Monat und Tag muss ein Leerzeichen gesetzt werden. Im Falle des Monats Mai sind zwei Leerzeichen zu setzen, da der Mai nicht mit einem Punkt abgeschlossen wird. Der Tag muss immer zweistellig eingetragen werden.

An letzter Stelle wird das Jahr eingetragen. Zwischen dem Tag und Jahr muss ein Leerzeichen gesetzt werden.

Syntax für die Eintragung Uhrzeit

Die Uhrzeit wird wie folgt beschrieben eingetragen

hh:mm:ss

Der Doppelpunkt als Trennzeichen muss unbedingt eingehalten werden.

Achtung

Sind die Parameter für den Start der Messung nicht eingegeben, erfolgt kein Start der Messung.

Sind die Parameter für den Start der Messung falsch, d.h. das Startdatum oder die Startzeit liegen vor dem aktuellen Datum oder der aktuellen Zeit, dann erfolgt kein Start der Messung.

Sind die Parameter für den Start der Messung nicht entsprechend der Syntax, wie sie dargestellt wurde, eingetragen, erfolgt ebenfalls kein Start der automatischen Messung.

Sind die Parameter für die Beendigung der Messung falsch, d.h. das Stopdatum oder die Stopzeit liegen vor dem aktuellen Datum oder der Startzeit, erfolgt kein Start der Messung.

Sind die Parameter für das Beenden der Messung nicht entsprechend der Syntax eingetragen, erfolgt ebenfalls kein Beenden der automatischen Messung.

STOP

Durch die Anwahl STOP wird sowohl die

- Automatisch gestartete Messung

als auch die

- Manuell gestartete Messung

abgebrochen.

A26

Eingaben

Startdatum

Hier wird jenes Datum eingetragen, zu dem die Messung gestartet werden soll. Es kann jedes Datum eingegeben werden, das zumindest dem aktuellen Datum entspricht oder danach liegt.

Wird ein Datum vor dem aktuellen Datum eingegeben, dann erfolgt kein Start der Messung. Es erfolgt in diesem Fall keine Fehlermeldung.

Sind die Parameter für den Start der Messung nicht entsprechend der Syntax eingetragen, dann erfolgt ebenfalls kein Start der automatischen Messung.

Startzeit

Hier wird jener Zeitpunkt eingetragen, zudem die Messung gestartet werden soll.

Wurde beim STARTDATUM das aktuelle Datum eingetragen, dann muss die Startzeit nach der aktuellen Zeit liegen, da ansonsten der automatische Messstart nicht erfolgt. In diesem Fall wird keine Fehlermeldung ausgegeben.

Wurde beim STARTDATUM ein späteres Datum als das aktuelle Datum eingetragen, dann kann jeder beliebige Zeitpunkt für den Messstart eingetragen werden.

Sind die Parameter für den Start der Messung nicht entsprechend der Syntax eingetragen, erfolgt ebenfalls kein Start der automatischen Messung.

Stopdatum

Hier wird jenes Datum eingetragen, zu dem die Messung beendet werden soll. Es kann jedes Datum eingegeben werden, das zumindest dem aktuellen Datum entspricht oder danach liegt.

Wird ein Datum vor dem aktuellen Datum eingegeben, dann erfolgt keine Beendigung der Messung. Es erfolgt in diesem Fall keine Fehlermeldung.

Sind die Parameter für das Beenden der Messung nicht entsprechend der Syntax eingetragen, erfolgt ebenfalls kein Beenden der automatischen Messung.

Stopzeit

Hier wird jener Zeitpunkt eingetragen, zu dem die Messung beendet werden soll.

Wurde beim STOPDATUM das aktuelle Datum eingetragen, dann muss die Stopzeit nach der Startzeit liegen, da sonst der automatische Messstop nicht erfolgt. In diesem Fall wird keine Fehlermeldung ausgegeben.

Wurde beim STOPDATUM ein späteres Datum als das aktuelle Datum eingetragen, kann jeder beliebige Zeitpunkt für den Messstop eingetragen werden.

Sind die Parameter für den Start der Messung nicht entsprechend der Syntax eingetragen, erfolgt ebenfalls kein Start der automatischen Messung.

Messwerte speichern

Für das Speichern der Messwerte stehen vier Speichermöglichkeiten zur Verfügung:

- Temperatur/Feuchte Rohwerte speichern
- Strahlung/Strömung Rohwerte speichern
- Temperatur/Feuchte skalierte Werte speichern
- Strahlung/Strömung skalierte Werte speichern

A27

Die Aktivierung der Funktion MESSWERTE SPEICHERN erfolgt durch den Eintrag des entsprechenden Pfades und Dateinamen. Es steht dem Anwender frei, entsprechende Pfade und Dateinamen auszuwählen. Mit dem Appendix .xls wird automatisch eine EXCEL-Datei generiert.

Durch das Betätigen der Taste FILE wird im gewohnten WINDOWS-Standard die Auswahl für den entsprechenden Eintrag angeboten.

Durch die Angabe des Pfades und des Dateinamens wird automatisch die Kopfzeile der entsprechenden Datei generiert. Solange kein neuer Pfad und Dateiname angegeben wird, wird auch keine neue Kopfzeile generiert, auch wenn die Messung, aus welchen Gründen immer, unterbrochen wurde. Wurde das Programm beendet und erneut aktiviert, dann muss wieder eine Datei für die Abspeicherung der Messwerte angegeben werden. In diesem Falle generiert sich eine Kopfzeile. Wird eine bestehende Datei wieder aufgerufen, dann wird in der bestehenden Datei am Ende wieder eine neue Kopfzeile generiert.

Obwohl die entsprechenden Messwerte in vier verschiedenen Dateien abgespeichert werden, sind die einzelnen Messwerte eindeutig zuordenbar, da sie alle die gleiche Zeitmarke aufweisen und diese der Echtzeit entspricht.

Temperatur/Feuchte Rohwert speichern

Wurde der Pfad und der Dateiname eingegeben, ist automatisch die Kopfzeile der Messdatei generiert worden, die folgende Eintragungen in der Kopfzeile enthält:

- Datum Aktuelles Datum zum Zeitpunkt der Messung
- Uhrzeit Aktuelle Uhrzeit zum Zeitpunkt der Messung
- Temp-3.5 Rohwert der Temperatur in der Ebene -3.5 [kOhm]
- Temp0/2 Rohwert der Temperatur in der Ebene 0 [kOhm]
- Temp0/6 Rohwert der Temperatur in der Ebene 0 Reihe 6 [kOhm]
- Diese Messung erfolgt nur im Fensterbereich.
- Temp3.5 Rohwert der Temperatur in der Ebene 3.5 [kOhm]
- Temp7.0 Rohwert der Temperatur in der Ebene 7.0 [kOhm]
- Temp10.5 Rohwert der Temperatur in der Ebene 10.5 [kOhm]
- Feucht-3.5 Rohwert Relative Feuchte in der Ebene -3.5 [V]
- Feucht0/2 Rohwert Relative Feuchte in der Ebene 0 [V]
- Feucht0/6 Rohwert Relative Feuchte in der Ebene 0 Reihe [V]
- Diese Messung erfolgt nur im Fensterbereich.
- Feucht3.5 Rohwert Relative Feuchte in der Ebene 3.5 [V]
- Feucht7.0 Rohwert Relative Feuchte in der Ebene 7.0 [V]
- Feucht10.5 Rohwert Relative Feuchte in der Ebene 10.5 [V]
- Druck-3.5 Rohwert Differenzdruck in der Ebene -3.5 [V]
- Druck10.5 Rohwert Differenzdruck in der Ebene 10.5 [V]

A28

The image shows a Microsoft Excel spreadsheet with a data table. The columns are labeled as follows: 'Datum', 'Zeit', 'Temp-3.5', 'Temp0/2', 'Temp0/6', 'Temp3.5', 'Temp7.0', 'Temp10.5', 'Feucht-3.5', 'Feucht0/2', 'Feucht0/6', 'Feucht3.5', 'Feucht7.0', 'Feucht10.5', 'Druck-3.5', and 'Druck10.5'. The data rows show measurements for August 11, 2009, at intervals of 30 seconds. The values are numerical, representing raw data for temperature and humidity at different levels.

Abb. A15 Temperatur/Feuchte Rohwert speichern

Strahlung/Strömung Rohwert speichern

Wurde der Pfad und der Dateiname eingegeben, ist automatisch die Kopfzeile der Messdatei generiert worden, die folgende Eintragungen in der Kopfzeile enthält:

-	Datum	Aktuelles Datum zum Zeitpunkt der Messung	
-	Uhrzeit	Aktuelle Uhrzeit zum Zeitpunkt der Messung	
-	Strömung1	Rohwert Strömung in Position 1	[V]
-	Strömung2	Rohwert Strömung in Position 2	[V]
-	Strömung3	Rohwert Strömung in Position 3	[V]
-	Strömung4	Rohwert Strömung in Position 4	[V]
-	Strömung5	Rohwert Strömung in Position 5	[V]
-	Strömung6	Rohwert Strömung in Position 6	[V]
-	StrgInGlas	Rohwert Wand innen Strahlung durch Glas	[V]
-	RefInGlas	Rohwert Wand innen Reflexion Glas	[V]
-	RefInWand	Rohwert Glas innen Reflexion Wand	[V]
-	StrgGlob	Rohwert Glas außen globale Strahlung	[V]
-	RefAusGlas	Rohwert Glas außen Reflexion Glas	[V]

Datum	Zeit	Strömung1	Strömung2	Strömung3	Strömung4	Strömung5	Strömung6	StrgInGlas	RefInGlas	RefInWand	StrgGlob	RefAusGlas
Aug 17 2007	14:35:11	0,174	0,100	0,080	0,032	4,800	4,573	4,982	4,573	4,328	3,210	1,573
Aug 17 2007	14:35:21	0,898	0,852	4,982	4,573	4,328	3,210	4,328	3,218	1,573	3,210	0,900

A29

Abb. A16 Strahlung/Strömung Rohwert speichern

Temperatur/Feuchte skalierte Werte speichern

Wurde der Pfad und der Dateiname eingegeben, ist automatisch die Kopfzeile der Messdatei mit folgende Eintragungen generiert worden:

-	Datum	Aktuelles Datum zum Zeitpunkt der Messung	
-	Uhrzeit	Aktuelle Uhrzeit zum Zeitpunkt der Messung	
-	Temp -3.5	Temperatur in der Ebene -3.5	[°C]
-	Temp 0/2	Temperatur in der Ebene [°C]	
-	Temp 0/6	Temperatur in der Ebene 0 Reihe 6	[°C]
	Diese Messung erfolgt nur im Fensterbereich.		
-	Temp 3.5	Temperatur in der Ebene 3.5	[°C]
-	Temp 7.0	Temperatur in der Ebene 7.0	[°C]
-	Temp 10.5	Temperatur in der Ebene 10.5	[°C]
-	Feucht -3.5	Relative Feuchte in der Ebene -3.5	[%rF]
-	Feucht 0/2	Relative Feuchte in der Ebene 0	[%rF]
-	Feucht0/6	Relative Feuchte in der Ebene 0 Reihe 6	[%rF]
	Diese Messung erfolgt nur im Fensterbereich.		
-	Feucht3.5	Relative Feuchte in der Ebene 3.5	[%rF]
-	Feucht7.0	Relative Feuchte in der Ebene 7.0	[%rF]
-	Feucht10.5	Relative Feuchte in der Ebene 10.5	[%rF]
-	Taupkt-3.5	Taupunkttemperatur in der Ebene -3.5	[°C]
-	Taupkt0/2	Taupunkttemperatur in der Ebene 0/2	[°C]
-	Taupkt0/6	Taupunkttemperatur in der Ebene 0/6	[°C]
	Dieser Wert wird nur bei der Messung im Fensterbereich angezeigt		
-	Taupkt3.5	Taupunkttemperatur in der Ebene 3.5	[°C]
-	Taupkt7.0	Taupunkttemperatur in der Ebene 7.0	[°C]
-	Taupkt10.5	Taupunkttemperatur in der Ebene 10.5	[°C]
-	Druck-3.5	Differenzdruck in der Ebene -3.5	[hPas]
-	Druck10.5	Differenzdruck in der Ebene 10.5	[hPas]

A30

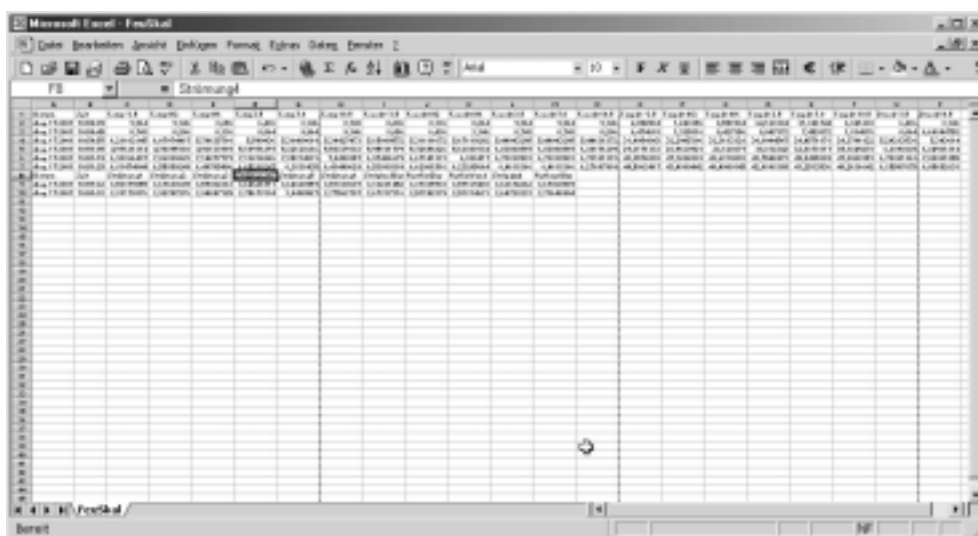


Abb. A17 Temperatur/Feuchte skalierte Werte speichern

Strahlung/Strömung skalierte Werte speichern

Wurde der Pfad und der Dateiname eingegeben, ist automatisch die Kopfzeile der Messdatei mit folgende Eintragungen generiert worden:

- Datum Aktuelles Datum zum Zeitpunkt der Messung
- Uhrzeit Aktuelle Uhrzeit zum Zeitpunkt der Messung
- Strömung1 Strömung in Position 1 [m/s]
- Strömung2 Strömung in Position 2 [m/s]
- Strömung3 Strömung in Position 3 [m/s]
- Strömung4 Strömung in Position 4 [m/s]
- Strömung5 Strömung in Position 5 [m/s]
- Strömung6 Strömung in Position 6 [m/s]
- StrgInGlas Wand innen Strahlung durch Glas [W/m2]
- ReflInGlas Wand innen Reflexion Glas [W/m2]
- ReflInWand Glas innen Reflexion Wand [W/m2]
- StrgGlob Glas außen globale Strahlung [W/m2]
- ReflAusGlas Glas außen Reflexion Glas [W/m2]

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

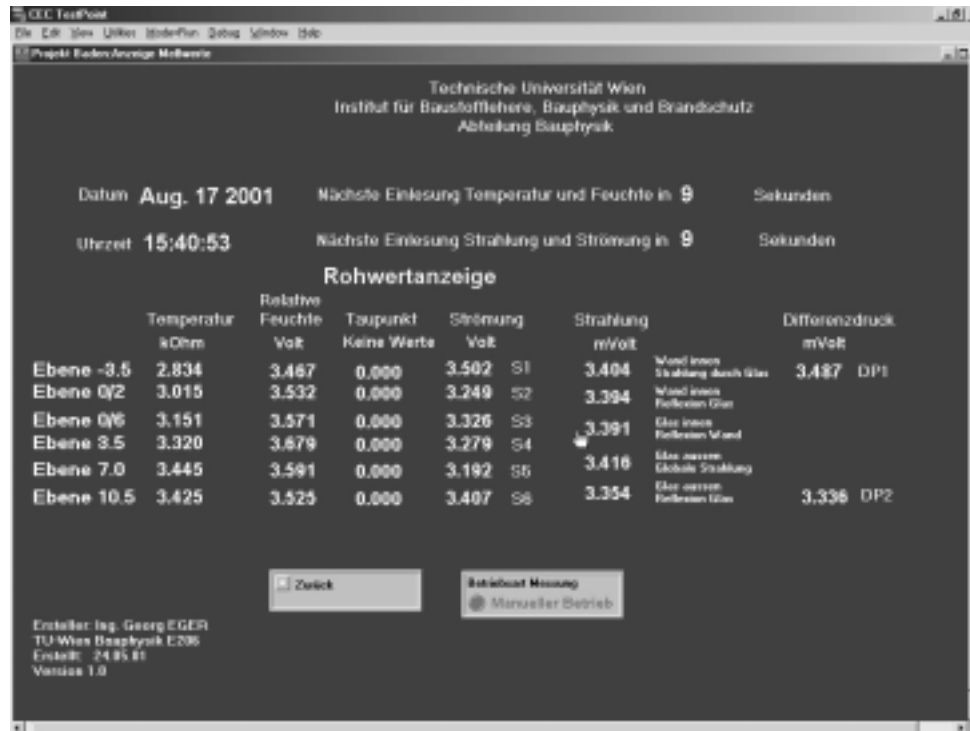
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Catum	Uhrzeit	Gstr1	Gstr2	Gstr3	Gstr4	Gstr5	Gstr6	Strahlung	Reflexion	Reflexion	Globale	Reflexion
2	Aug 17 2001	10:51:25	5,5446847	5,7111771	5,8786614	5,4318312	5,3622181	5,095862	6,1214331	6,2942116	6,0081109	5,7648253	6,3086812
3	Catum	Uhrzeit	Gstr1	Gstr2	Gstr3	Gstr4	Gstr5	Gstr6	Strahlung	Reflexion	Reflexion	Globale	Reflexion
4	Aug 17 2001	10:57:32	7,1779811	7,3420127	7,5060444	7,2876382	7,2864711	7,0286025	8,384828	8,7577181	7,1433882	7,3334492	7,3412702
5	Aug 17 2001	10:50:32	7,7635875	7,8549455	7,8931425	7,5126177	7,0899954	7,5512741	7,3583483	7,6238470	7,0062936	7,2845847	7,5126301

A31

Abb. A18 Strahlung/Strömung skalierte Werte speichern

Anzeige Rohwerte

Wurde in der Grundmaske die Funktion ANZEIGE ROHWERTE angewählt, wird die Anzeige für die Rohwertmessung aufgeschlagen.



A32

Abb. A19 Anzeige Rohwerte

In der Maske ROHWERTE ANZEIGEN können keine Eingaben gemacht oder Daten verändert werden. Die einzige Zugriffsmöglichkeit, die der Anwender hat, ist durch Betätigung der Funktionstaste ZURÜCK wieder die Grundmaske anzuzeigen. Ein Wiederaufrufen der Grundmaske hat keinen Einfluss auf die Erfassung der Messwerte.

Folgende Anzeigen stehen dem Anwender zur Verfügung:

- Datum Aktuelles Datum zum Zeitpunkt der Messung
- Uhrzeit Aktuelle Uhrzeit zum Zeitpunkt der Messung
- Nächste Einlesung Temperatur und Feuchte inSekunden [s]
- Nächste Einlesung Strahlung und Strömung inSekunden [s]
- Temp-3.5 Rohwert der Temperatur in der Ebene -3.5 [kOhm]
- Temp0/2 Rohwert der Temperatur in der Ebene 0 [kOhm]
- Temp0/6 Rohwert der Temperatur in der Ebene 0 Reihe 6 [kOhm]
- Diese Messung erfolgt nur im Fensterbereich.
- Temp3.5 Rohwert der Temperatur in der Ebene 3.5 [kOhm]
- Temp7.0 Rohwert der Temperatur in der Ebene 7.0 [kOhm]
- Temp10.5 Rohwert der Temperatur in der Ebene 10.5 [kOhm]
- Feucht-3.5 Rohwert Relative Feuchte in der Ebene -3.5 [V]
- Feucht0/2 Rohwert Relative Feuchte in der Ebene 0 [V]

-	Feucht0/6	Rohwert Relative Feuchte in der Ebene 0 Reihe 6 Diese Messung erfolgt nur im Fensterbereich.	[V]
-	Feucht3.5	Rohwert Relative Feuchte in der Ebene 3.5	[V]
-	Feucht7.0	Rohwert Relative Feuchte in der Ebene 7.0	[V]
-	Feucht10.5	Rohwert Relative Feuchte in der Ebene 10.5	[V]
-	DP1	Rohwert Differenzdruck in der Ebene -3.5	[V]
-	DP2	Rohwert Differenzdruck in der Ebene 10.5	[V]
-	Strömung1	Rohwert Strömung in Position 1	[V]
-	Strömung2	Rohwert Strömung in Position 2	[V]
-	Strömung3	Rohwert Strömung in Position 3	[V]
-	Strömung4	Rohwert Strömung in Position 4	[V]
-	Strömung5	Rohwert Strömung in Position 5	[V]
-	Strömung6	Rohwert Strömung in Position 6	[V]
-	StrgInGlas	Rohwert Wand innen Strahlung durch Glas	[V]
-	ReflInGlas	Rohwert Wand innen Reflexion Glas	[V]
-	ReflInWand	Rohwert Glas innen Reflexion Wand	[V]
-	StrgGlob	Rohwert Glas außen globale Strahlung	[V]
-	ReflAusGlas	Rohwert Glas außen Reflexion Glas	[V]

Die Funktion TAUPUNKT steht bei der Rohwertanzeige nicht zur Verfügung, da aus den eingelesenen Rohwerten keine Taupunktberechnung erfolgen kann.

Die Funktion BETRIEBSART MESSUNG zeigt an, ob die Messung mittels

- Automatischem Start

oder

- Manuell

erfolgte.

Erfolgte der Start der Messung manuell, dann

- hat die LED die Signalfarbe ROT

und

- der Eintrag MANUELLER BETRIEB wird in roter Farbe angezeigt.

Erfolgt der Start der Messung mit automatischer Vorwahl, dann

- hat die LED die Signalfarbe GRÜN

und

- der Eintrag AUTOMATIKBETRIEB wird in grüner Farbe angezeigt.

Die Anzeige AUTOMATIKBETRIEB informiert lediglich über die Anwahl der Funktion AUTOMATISCHER MESSSTART, bedeutet aber nicht, dass der Messstart bereits erfolgt ist. Ob der Messstart bereits erfolgt ist, erkennt man in dieser Maske daran, dass die Zeit bis zur nächsten Messung bereits angezeigt wird.

-	Taupkt0/6	Taupunkttemperatur in der Ebene 0/6 Dieser Wert wird nur bei der Messung im Fensterbereich angezeigt.	[°C]
-	Taupkt3.5	Taupunkttemperatur in der Ebene 3.5	[°C]
-	Taupkt7.0	Taupunkttemperatur in der Ebene 7.0	[°C]
-	Taupkt10.5	Taupunkttemperatur in der Ebene 10.5	[°C]
-	DP1	Rohwert Differenzdruck in der Ebene -3.5	[V]
-	DP2	Rohwert Differenzdruck in der Ebene 10.5	[V]
-	Strömung1	Rohwert Strömung in Position 1	[V]
-	Strömung2	Rohwert Strömung in Position 2	[V]
-	Strömung3	Rohwert Strömung in Position 3	[V]
-	Strömung4	Rohwert Strömung in Position 4	[V]
-	Strömung5	Rohwert Strömung in Position 5	[V]
-	Strömung6	Rohwert Strömung in Position 6	[V]
-	StrgInGlas	Rohwert Wand innen Strahlung durch Glas	[V]
-	ReflInGlas	Rohwert Wand innen Reflexion Glas	[V]
-	ReflInWand	Rohwert Glas innen Reflexion Wand	[V]
-	StrgGlob	Rohwert Glas außen globale Strahlung	[V]
-	ReflAusGlas	Rohwert Glas außen Reflexion Glas	[V]

Die Funktion BETRIEBSART MESSUNG zeigt an, ob die Messung mittels

- Automatischem Start

oder

- Manuell

erfolgte.

Erfolgte der Start der Messung manuell, dann

- hat die LED die Signalfarbe ROT

und

- der Eintrag MANUELLER BETRIEB wird in roter Farbe angezeigt.

Erfolgt der Start der Messung mit automatischer Vorwahl, dann

- hat die LED die Signalfarbe GRÜN

und

- der Eintrag AUTOMATIKBETRIEB wird in grüner Farbe angezeigt.

Die Anzeige AUTOMATIKBETRIEB informiert lediglich über die Anwahl der Funktion AUTOMATISCHER MESSSTART, bedeutet aber nicht, dass der Messstart bereits erfolgt ist. Ob der Messstart bereits erfolgt ist, erkennt man in dieser Maske daran, dass die Zeit bis zur nächsten Messung bereits angezeigt wird.