

**Beitrag zu hinterlüfteten Doppelfassaden -  
aerothermodynamische Untersuchungen und mögliche  
Auswirkungen auf lüftungstechnische  
Energieversorgungsstrukturen von Gebäuden**

Von der Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung  
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

Stephan Heinrich

aus Berlin

Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. K. Hänel

Prof. Dr. rer. nat. habil. M. Fröhner

Prof. Dr.-Ing. U. Renz

Tag der Disputation: 09.07.2001

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation ist im Rahmen der Forschungsarbeiten an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus auf Anregung von Herrn Univ.-Prof. Dr. sc. techn. K. Hänel, Leiter des Lehrstuhls Technischer Ausbau an der Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung, entstanden. Die Forschungsziele dieses Lehrstuhls bestehen u. a. darin, zur Entwicklung von Gebäuden mit möglichst niedrigem Energiebedarf unter Einbeziehung regenerativer Energiequellen beizutragen. Im Rahmen der Forschungs- und Lehrtätigkeit konnte der Autor sowohl zahlreiche Anregungen aus den sich entwickelnden Lehrinhalten als auch aus den sehr eng geknüpften Beziehungen zu praktischen Bauvorhaben schöpfen.

Das Vorlegen dieser Arbeit stellt einen Abschluß der meßtechnischen Untersuchungsreihe auf dem Gebiet der hinterlüfteten Doppelfassade am Gebäude „Umweltzentrum Cottbus“ dar, welches im Rahmen der Bundesgartenschau 1995 in Betrieb genommen wurde und mit der installierten Sondermeßtechnik zur Durchführung von Experimenten und zur erforderlichen Datengewinnung beitrug. Gleichzeitig werden neben Untersuchungen zu den Vorgängen in dieser Fassade auch Ansatzpunkte zu weiteren wissenschaftlichen Arbeiten gezeigt, die sich zwangsläufig aus den Entwicklungen der hier untersuchten Bereiche ergeben.

Cottbus, im August 2000

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen der Luftströmung an einer realisierten hinterlüfteten Doppelfassade beschrieben. So dient ein Teil der SSW- bis WSW- orientierten Außenwandfläche durch seine vorgestellte, transluzente Pfosten-Riegelkonstruktion u. a. als Zuluftkollektor für die Lüftungsanlage des Gebäudes.

Neben einer umfangreichen Darstellung und Auswertung der meßtechnisch erfaßten Vorgänge in der Doppelfassade erfolgte eine Quantifizierung des für die Lüftungsanlage des Gebäudes erfaßten Energieeintrages über den Meßzeitraum sowie eine Ausarbeitung zu steuerungs- und regelungstechnischen Lösungsansätzen zur Einbindung der Fassade als Zuluftkollektor in die Anlagentechnik und in das damit verbundene Betriebs- und Nutzungsregime des Gebäudes.

Des weiteren wurde der Versuch unternommen, die thermodynamischen Vorgänge im Bereich der Doppelfassade anhand eines Modells zweidimensional analytisch zu erfassen und Modell- und Meßergebnisse zu validieren. Die Modellierung und Simulation erfolgte dabei unter Anwendung der kontinuumsmechanischen Erhaltungssätze (Navier-Stokes Gleichungen). Als Berechnungsmethode zur Lösung der algebraischen Differenzgleichungen wurde das Finite-Volumen-Verfahren angewendet, notwendige Randbedingungsvorgaben wurden aus Feldmeßdaten übernommen.

## Conclusion

In this thesis results of experimental investigations of air circulation are described. The investigations have been carried out on a building with a ventilated cavity facade (since its construction). A part of the SSW- till WSW- orientated outer wall surface serves, with its projected, translucent post-bolt-construction, among other things, as an air supply collector as the ventilation system of the building.

Apart from a wide description and analysis of the measured processes in the cavity facade a quantification of the entry of energy over the period of measurement of the building's ventilation system took place. So did an elaboration on control-technical attempts including the facade as an air supply collector in the ventilation system and, consequently, in the operational system of the building related to it.

Furthermore, there has been the attempt to capture the thermodynamic processes within cavity facades in a model analytically in a two-dimensional way, and to compare the results of model and measurement. The modelling and simulation have been effected by means of the conservation laws (Navier-Stokes equations). The finite volume procedure has been applied as calculation method for the solution of the algebraic difference equations. Necessary marginal conditions have been taken over from field readings.

## Inhaltsverzeichnis

### Vorwort

### Zusammenfassung

<b>1</b>	<b>Problemstellung und Ziel der Arbeit .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Hinterlüftete Doppelfassaden .....</b>	<b>3</b>
2.1	Energetische Betrachtungen zur Entwicklung und Realisierung von Gebäuden .....	3
2.2	Baukonstruktive Zuordnung des untersuchten Systems.....	5
2.3	Prinzipien von hinterlüfteten Doppelfassaden .....	7
2.4	Beschreibung der Baukonstruktion Umweltzentrum Cottbus.....	11
2.5	Beschreibung der technischen Ausrüstung .....	15
2.6	Meßaufgaben.....	17
2.7	Meßtechnische Ausstattung zur Untersuchung der Doppelfassade .....	18
<b>3</b>	<b>Experimentelle Untersuchung .....</b>	<b>23</b>
3.1	Auswertung der Meßdaten im Meßzeitraum 07/1995 - 10/1998 .....	23
3.1.1	Temperaturverhältnisse der Spaltluft.....	23
3.1.2	Strahlungsverhältnisse .....	31
3.1.3	Luftvolumenströme.....	34
3.2	Auswertung der Meßdaten im Meßzeitraum 07/1995 - 10/1998 – maschinelle Ablüftung der Doppelfassade.....	38
3.2.1	Auswertung der Temperaturverhältnisse (Zuluftvorerwärmung) während des Abluftventilatorbetriebes.....	38
3.2.2	Wärmeleistungen der Doppelfassade für die Zuluftvorerwärmung .....	39
3.3	Untersuchung zu Temperaturschichtungen in der Doppelfassade .....	45
3.3.1	Vertikale Temperaturschichtung.....	45
3.3.2	Horizontale Temperaturschichtung.....	48
3.4	Zusammenfassung der Meßergebnisse.....	53
3.4.1	Betrachtungen zur Arbeitsweise des Fassadenablüfters .....	53
3.4.2	Schlußfolgerungen aus der Meßwertdarstellung .....	58
<b>4</b>	<b>Zu untersuchende Transportvorgänge in der Doppelfassade .....</b>	<b>60</b>
4.1	Wärme- und strömungstechnische Mechanismen.....	60
4.2	Grundlegende Größen zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs.....	60

<b>5</b>	<b>Modellbildung .....</b>	<b>64</b>
5.1	Einführung.....	64
5.2	Grundgleichungen der Strömungsmechanik .....	65
5.3	Erhaltungsgleichungen .....	66
	5.3.1 Impulserhaltungsgleichung.....	66
	5.3.2 Kontinuitätsgleichung (Erhaltung der Masse).....	68
	5.3.3 Energieerhaltungsgleichung.....	69
5.4	Zusammenfassung zu den Navier-Stokes Gleichungen, Zustandsgleichung und Anfangs- und Randwertbedingungen.....	70
5.5	Numerische Berechnungsmethoden zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen als Anfangs-Randwertproblem.....	71
	5.5.1 Methode der Finiten Differenzen (FDM) .....	72
	5.5.2 Methode der Finiten Elemente (FEM).....	73
	5.5.3 Methode der Finiten Volumen (FVM).....	74
5.6	Diskretisierung der Gleichungen.....	76
	5.6.1 Allgemeine Anforderungen an ein numerisches Gittergenerierungs-Verfahren .....	76
	5.6.2 Realisierung der Diskretisierung im Raum.....	78
<b>6</b>	<b>Berechnung eines Fassadenbetriebszustandes .....</b>	<b>79</b>
6.1	Festlegung des Fassadenzustandes und der Randbedingungen für die Berechnungsdurchführung .....	79
6.2	Verwendetes Rechenprogramm .....	80
6.3	Hardware .....	81
6.4	Gittergenerierung .....	81
6.5	Berechnungsdurchführung .....	82
	6.5.1 K-epsilon - Modell.....	83
6.6	Parameter für die Berechnung.....	84
6.7	Ergebnisdarstellung/Diskussion des betrachteten Betriebszustandes .....	85
<b>7</b>	<b>Schlußfolgerungen und Ausblick.....</b>	<b>89</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>92</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Möglicher zukünftiger Beitrag erneuerbarer Energieträger am Primärenergieaufkommen in Deutschland [25].	5
Abb. 2: Ansicht einer Doppelfassade (RWE-Tower in Essen).	6
Abb. 3: Schema zu System Vertikalschachtausbildung	8
Abb. 4: Schema zu System Modulkastenfenster.	9
Abb. 5: Süd-Westansicht des Umweltzentrums Cottbus.	11
Abb. 6: Schema des Luftstroms durch die Doppelfassade.	12
Abb. 7: Fußpunkt Doppelfassade vor Einbau der PV-Module.	13
Abb. 8: Abluftkanal - Vertikalschacht oben mit Übergang in den Sammelkanal	13
Abb. 9: Fassadenablufventilator – Anschluß zur Lüftungstechnischen Anlage des Gebäudes.	14
Abb. 10: Lageplan der Sonden S1-S12 und des Schachtes.	15
Abb. 11: Funktionsschema Heizung und Kühlung [13].	16
Abb. 12: Funktionsschema Lüftung (Wärmerückgewinnung durch Rotationswärmetauscher).	17
Abb. 13: Prinzipschema Meßdatenerfassung (vgl. [13]).	18
Abb. 14: Beispiel für die Installation eines Mantelthermoelementes im Fensterkastenbereich.	19
Abb. 15: Silizium-Pyranometer zur Erfassung des Energieeintrags in den Doppelfassadenabschnitt.	19
Abb. 16: Schaltschema Sondermeßtechnik.	20
Abb. 17: Teilbereich der Doppelfassade (Schnitt A-A: Vertikalschacht und Schnitt B-B: Fensterkastenschacht)	21
Abb. 18: Blick in einen Vertikalschacht (VS 3) mit Anordnung der Meßfühler.	22
Abb. 19: Darstellung Außentemperatur und mittlere Fassadentemperatur im Meßzeitraum.	23
Abb. 20: Temperaturbereiche im Meßzeitraum.	24
Abb. 21: Darstellung der mittleren Fassadentemperaturen in den Bereichen $>26^{\circ}\text{C}$ , $\leq 26^{\circ}\text{C}$ und $\geq 20^{\circ}\text{C}$	24
Abb. 22: Darstellung der mittleren Fassadentemperaturen – Meßwerte absteigend sortiert.	25
Abb. 23: Temperaturdifferenzen im Meßzeitraum – Über- bzw. Untertemperaturdarstellung.	25
Abb. 24: Übertemperaturhäufigkeitsdarstellung in der Doppelfassade.	26
Abb. 25: Dauer der Außen- bzw. mittleren Fassadentemperatur im Meßzeitraum.	27
Abb. 26: Dauer der mittleren Übertemperaturen ( $>0\text{ K}$ ) im Meßzeitraum.	27
Abb. 27: Darstellung der mittleren Fassadenübertemperaturen innerhalb und außerhalb der	28
Abb. 28: Darstellung der mittleren Fassadenübertemperaturen innerhalb der Heizperiode Tag/Nacht.	28
Abb. 29: Darstellung der mittleren Fassadenübertemperaturen in Abhängigkeit von der Tageszeit.	29
Abb. 30: Darstellung der absteigend sortierten Fassadenübertemperaturen in Abhängigkeit der Tageszeit.	29
Abb. 31: Jahresgang – auftretende Untertemperaturen in der Doppelfassade im Meßzeitraum.	30
Abb. 32: Tagesgang – auftretende Untertemperaturen in der Doppelfassade im Meßzeitraum.	30
Abb. 33: Darstellung Strahlungsdauer und –stärken auf den 3 Teilflächen der Doppelfassade im Meßzeitraum.	31
Abb. 34: Zeitliche Darstellung der Strahlungsmaxima auf den Fassaden- Teilflächen.	32
Abb. 35: Häufigkeitsdarstellung Differenzen der Globalstrahlung zur mittleren Vertikalstrahlung in $\text{W}/\text{m}^2$ .	33
Abb. 36: Darstellung Verteilung der Strahlungstärken im Meßzeitraum.	33
Abb. 37: Erfassung der Gesamtlaufzeit des Fassadenablüfters im Meßzeitraum.	34

## IV

Abb. 38: Erfassung der Laufzeit des Fassadenablüfters im Meßzeitraum.....	35
Abb. 39: Kumulierte Tageslaufzeiten Fassadenablüfter im Meßzeitraum.....	36
Abb. 40: Mittlere Luftwechselzahlen in 1/h während des Abluftventilatorbetriebes.....	36
Abb. 41: Mittlere Luftwechselzahlen (Darstellung bis 70 /h) im Vertikalschacht auf der Südseite – Freie Hinterlüftung.....	37
Abb. 42: Häufigkeitsverteilung der mittleren Fassadenübertemperaturen in Abhängigkeit der Ventilatorleistung.....	38
Abb. 43: Dauer mittlerer Fassadenübertemperaturen im Meßzeitraum bei Fassadenlüfterbetrieb.....	39
Abb. 44: Häufigkeitsdarstellung der Wärmeleistungen der Fassadenabluf in W in Abhängigkeit von der.....	40
Abb. 45: Häufigkeitsdarstellung der Wärmeleistungen der Fassadenabluf in Abhängigkeit von der.....	40
Abb. 46: Häufigkeitsdarstellung – zugeführte Wärmeleistung Fassadenabluf im Meßzeitraum.....	41
Abb. 47: Laufzeit Fassadenlüfter während Heizperiode und Sommerbetrieb im Meßzeitraum.....	42
Abb. 48: Vergleich von Heiz- und Sommerperiode: Häufigkeiten Übertemperaturen in K während.....	42
Abb. 49: Darstellung der Wärmeleistung der Doppelfassade – Teilfassadenflächen bei Abluftventilatorbetrieb.....	43
Abb. 50: Darstellung der Übertemperaturen der Doppelfassade – Teilfassadenflächen bei Abluftventilatorbetrieb.....	44
Abb. 51: Untertemperaturen der Teilfassadenfläche-WSW – Abluftventilator in Betrieb.....	44
Abb. 52: Differenztemperatur Vertikalschacht 3 oben/unten – Dauer im Meßzeitraum.....	45
Abb. 53: Differenztemperatur Vertikalschacht 3 oben/unten – Tag/Nacht.....	46
Abb. 54: Differenztemperatur Vertikalschacht 3 oben/unten – Heizperiode/Sommerperiode.....	46
Abb. 55: Häufigkeitsdarstellung der vertikalen Temperaturschichtung im Vertikalschacht 3 in Abhängigkeit zur Einstrahlung.....	47
Abb. 56: Häufigkeitsdarstellung der vertikalen Temperaturschichtung im Vertikalsschacht VS 3 in Abhängigkeit zur Einstrahlung.....	47
Abb. 57: Differenztemperatur vertikale Schichtung im Vertikalschacht 3 in Abhängigkeit der Betriebsart.....	48
Abb. 58: Horizontales Temperaturprofil an einem Sommertag (Erwärmungsphase/Abkühlungsphase).....	48
Abb. 59: Häufigkeitsdarstellung der Übertemperaturen im Fassadenzwischenraum kumuliert.....	49
Abb. 60: Tagesverlauf Wintertag im Vertikalsschacht 3 mit Volumenstromangabe.....	50
Abb. 61: Tagesverlauf Sommertag im Vertikalsschacht 3 mit Volumenstromangabe.....	50
Abb. 62: Temperaturverhältnisse horizontale Schichtung im VS 3 vom 21.08. –22.08.1996 in Abhängigkeit zur Außentemperatur.....	51
Abb. 63: Temperaturverhältnisse horizontale Schichtung im VS 3 vom 26.01. –27.01.1997 in Abhängigkeit zur Außentemperatur.....	51
Abb. 64: Häufigkeitsdarstellung horizontale Temperaturschichtung im VS 3 in %.....	52
Abb. 65: Horizontale Übertemperaturschichtung kumuliert in Abhängigkeit Fassadenlüfterbetrieb.....	52
Abb. 66: Horizontale Übertemperaturschichtung kumuliert in Abhängigkeit vom Fassadenlüfterbetrieb im Meßzeitraum im VS 3.....	53
Abb. 67: Häufigkeitsverteilung der Fassadenübertemperaturen im Meßzeitraum in Abhängigkeit von der Tageszeit.....	54
Abb. 68: Dauer der Übertemperaturen aus mittlerer Fassadentemperatur und Außenlufttemperatur im Meßzeitraum.....	54

Abb. 69: Übertemperaturen $>5K$ aus mittlerer Fassadentemperatur und Außenlufttemperatur in Abhängigkeit der Tageszeit und den Monaten .....	55
Abb. 70: Übertemperaturen $<5K$ aus mittlerer Fassadentemperatur und Außenlufttemperatur in Abhängigkeit der Tageszeit und den Monaten .....	55
Abb. 71: Jahresgang – auftretende Untertemperaturen in der Doppelfassade während Fassadenlüfterbetrieb im Meßzeitraum .....	56
Abb. 72: Tagesgang – auftretende Untertemperaturen in der Doppelfassade während Fassadenlüfterbetrieb im Meßzeitraum .....	56
Abb. 73: Häufigkeiten der Fassadenübertemp. $> 5 K$ in Abhängigkeit des Monats über den Meßzeitraum .....	57
Abb. 74: Häufigkeit der Fassadenübertemperaturen $> 5 K$ in Abhängigkeit eines Jahres .....	57
Abb. 75: Sichtbarmachung der Grenzschicht durch Rauchversuch [28]. .....	61
Abb. 76: Darstellung Flächenelement zur Herleitung der Impulserhaltungsgleichung / Oberflächenintegral. ....	67
Abb. 77: Beispiel unstrukturierte Netzgenerierung: Fußpunkt Doppelfassade.....	72
Abb. 78: Beispiel Dreieckszelle für Finite-Volumen Methode. ....	75
Abb. 79: Rechengitterdarstellung. ....	77
Abb. 80: Beispiel eines zweidimensionalen Block- Strukturierten Netzes [11]. ....	77
Abb. 81: Ausschnitt Zustand aus dem realisierten Anlagenschaltenschema des Untersuchungsgegenstandes .....	79
Abb. 82: Fassadengeometrie und Ansicht der Dreieckszellenvernetzung. ....	82
Abb. 83: Darstellung Temperaturprofil am gelösten Fallbeispiel 1 mit Detailansicht Einström- bzw. Ausströmbereich. ....	87
Abb. 84: Darstellung Geschwindigkeitsprofil am gelösten Fallbeispiel 1 mit Detailansicht Einström- bzw. Ausströmbereich. ....	87
Abb. 85: Darstellung Temperaturprofil am gelösten Fallbeispiel 2 mit Detailansicht Einström- bzw. Ausströmbereich. ....	88
Abb. 86: Darstellung Geschwindigkeitsprofil am gelösten Fallbeispiel 2 mit Detailansicht Einström- bzw. Ausströmbereich. ....	88



**Tabellenverzeichnis**

Tab. 1: Weltprimärenergieverbrauch wichtiger Energieträger für ausgewählte Jahre in PJ [9]. .....	3
Tab. 2: Regelzustände der Doppelfassade. ....	14
Tab. 3: Meßstellenübersicht (lfd. Nr. 13-20, vgl. Abb. 17) – Untersuchung Bereich Doppelfassade. ....	22
Tab. 4: Viskosität von Gasen bei Drücken unter 100 Pa nach [5]. ....	61
Tab. 5: Eingabeparameter für berechnete Fallbeispiele 1 und 2 mit FLUENT 5.5. ....	84

## 1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Die Forderungen der bisherigen Wärmeschutzverordnung (WSchV '95) zielen weitgehend auf die Anwendung wärmeschutztechnisch verbesserter Umhüllungskonstruktionen und auf den Einsatz energieeffizienter Heiz- und Lüftungssysteme ab. In Zukunft sind hier zur weiteren Reduzierung des Energie- und damit Schadstoffhaushalts für neu zu errichtende bzw. bestehende Gebäude weitere Ressourcen zu erschließen. Energieoptimierte Gebäudeplanung erfordert in der Regel auch den Einsatz innovativer Technologien. Eine Möglichkeit stellt die passive Nutzung der Sonnenenergie im Bereich der vertikalen Gebäudehülle dar. Der Wunsch, eine Fassade zu entwickeln, die die lokal und temporär sehr verschiedenen Behaglichkeitsanforderungen im Gebäude selbständig einhalten kann, führte zur versuchsweisen Ausbildung von großflächig verglasten Fassaden bzw. Fassadenelementen mit einer großen funktionellen, strukturellen und geometrischen Vielfalt. Hieraus erwachsen aber auch die Schwierigkeiten, z. B. wie dem Planer solcher Fassadensysteme sinnvolle Planungsinstrumente zur komplexen Beurteilung der physikalischen Wirkungen und damit zur konstruktiven Ausbildung gegeben werden können. Neue Material-, Produkt- und Technologieentwicklungen im Bauwesen führten zum vermehrten Einsatz neuerer, noch nicht ausreichend erprobter Fassadenkonstruktionen, die ihren Stellenwert besonders im Bereich der allumfassenden Funktionssicherheit, der allgemeinen Wertigkeit im Gebäudekonzept und nicht zuletzt in der Wirtschaftlichkeit und Ökologie behaupten müssen. Die Idee zur Nutzung der Fassade als passives System im Gegensatz zu den aktiven solartechnischen Systemen, liegt in dem Versuch, schon geringe Einstrahlungen mit möglichst geringem technischen Aufwand im Gebäude thermisch nutzbar zu machen. Durch die konstruktive Realisierung einer Hinterlüftung (d. h., einer thermisch gedachten Trennung der Fassade durch einen Hinterlüftungsstrom mit nach außen hin orientierten transparenten Vorsatzschalen und einem evtl. Sonnenschutz) erhofft man sich u. a. eine thermische Pufferung und Regulierbarkeit der Fassade zur Außenluft unter Einhaltung der, auch vom Nutzer individuell beeinflussbaren, Behaglichkeitskriterien mit geringerem Energieverbrauch und somit geringeren Schadstoffemissionen. Dabei mußte berücksichtigt werden, daß jedes Fassadensystem seine spezifischen Auswirkungen hinsichtlich der bauphysikalischen Wirksamkeit mit der Gebäudekonstruktion und Nutzungskonzeption besitzt. Die ständig wachsende Zahl von Versuchsbauwerken mit sehr verschiedenen Fassadensystemen und -funktionen läßt das Streben nach allgemeingültigen Aussagen zur baukonstruktiven Auslegung im Zusammenhang mit gebäudetechnischen und

nutzungsspezifischen Gegebenheiten erkennen. Vielfach konnte aufgrund der nur empirisch gesammelten Erfahrungen an Einzelobjekten und der Schwierigkeiten bei der numerischen Erfassung der verschiedenen Fassadenzustände keine sichere Übertragung auf andere Planungsvorhaben erfolgen. Die Schwierigkeiten liegen vor allem in der Erfassung des sich einstellenden strömungstechnischen Gleichgewichts des im einzelnen ausgebildeten Fassadenzwischenraumes, das maßgeblich an der wärmetechnischen Beurteilung der Außenwandkonstruktion beteiligt ist. Mit der vorliegenden Arbeit soll ein spezieller Beitrag zur Erhöhung der Planungssicherheit anhand einer realisierten Doppelfassade, die als Hybridfassade ausgebildet wurde, geleistet werden. Im einzelnen liegen die Bearbeitungsschwerpunkte bei

- der Charakterisierung des Untersuchungsgegenstandes,
- der Realisierung der meßtechnischen Untersuchung am Objekt,
- Auswertung der Meßergebnisse und Darstellung ausgewählter Fassadenzustände im Untersuchungszeitraum,
- den theoretischen Untersuchungen zu aerothermodynamischen Vorgängen in der Doppelfassade,
- der 2-dimensionalen Darstellung von Zustandsgrößen eines ausgewählten Fassadenbetriebszustandes mit Hilfe der Lösung der Navier-Stokes Gleichungen unter Berücksichtigung der viskosen, reibungsbehafteten Randschichten und
- der Validierung der Initialisierungs- und Ergebnislösungen aus Feldmeßdaten zur quantitativen thermodynamischen Beschreibung des ausgewählter Fassadenzustandes.

## 2 Hinterlüftete Doppelfassaden

### 2.1 Energetische Betrachtungen zur Entwicklung und Realisierung von Gebäuden

Die Entwicklung und Errichtung von Gebäuden vollzieht sich in der Regel in Verbindung mit den wachsenden Bedürfnissen der Menschheit. Heutige Probleme des Bauens stehen dadurch u. a. im engen Zusammenhang mit dem Bevölkerungswachstum und deren Demographie, dem ständig wachsenden Energiebedarf (vgl. Tab. 1), der Verknappung der Ressourcen und der Erhaltung des menschlichen Lebensraumes unter Berücksichtigung der Möglichkeiten zur Adaption. Das dramatische Bevölkerungswachstum und die zunehmenden Ressourcenkämpfe zwingen die Industrieländer und die Länder der dritten Welt zum gemeinsamen Handeln, um die Lebensgrundlagen zukünftiger Generationen zu sichern. Knapper werdende Wasservorkommen, eine Zunahme der Verseuchung von Böden und des Grundwassers, die Verschlechterung der Luftqualität und die Zunahme des Abfallaufkommens gefährden vor allem die Lebensräume in den Großagglomerationen. Weltweit nimmt die Anzahl sogenannter Megastädte, also Städten mit mehr als 20 Millionen Einwohnern, zu.

Tab. 1: Weltprimärenergieverbrauch wichtiger Energieträger für ausgewählte Jahre in PJ [9].

<i>PJ=10<sup>12</sup> kJ</i>	<i>1925</i>	<i>1938</i>	<i>1950</i>	<i>1960</i>	<i>1968</i>	<i>1980</i>	<i>1992</i>
<i>feste Brennstoffe<sup>1)</sup></i>	36.039	37.856	46.675	58.541	67.830	77.118	90.596
<i>flüssige Brennstoffe<sup>2)</sup></i>	5.772	11.017	21.155	43.921	79.169	117.112	130.971
<i>Naturgas</i>	1.406	2.930	7.384	17.961	33.900	53.736	74.569
<i>Wasserkraft</i>	293	674	1.260	2.520	3.868	6.358	7.911
<i>Kernenergie</i>	-	-	-	-	176	2.461	7.354
<b><i>Gesamt</i></b>	<b>43.511</b>	<b>52.476</b>	<b>76.473</b>	<b>122.943</b>	<b>184.766</b>	<b>256.785</b>	<b>311.400</b>

1) Braunkohle, Steinkohle, u.a., 2) Erdölprodukte

Angesichts dieser immensen Problematik und der sich schon abzeichnenden klimatischen und demographischen Veränderungen wurden auf dem Gebiet der Planung, Errichtung, Nutzung sowie Nutzungsänderung und der Demontage von Gebäuden erhebliche Anstrengungen unternommen, um neue, verbesserte Technologien für den Gebäudekreislauf zu finden, die sich insgesamt positiv auf die Energie-, Rohstoff- und Umweltsituation auswirken sollen. Gebäude sollten auch zukünftig zu den langlebigsten Wirtschaftsgütern mit einer Mindestnutzungsdauer von 50 bis 100 Jahren gehören. Für die heute neu zu errichtenden Gebäude und Arbeiten am bereits bestehenden Gebäudebestand muß die Frage

beantwortet werden, wie und zu welchen Preisen die Gesellschaft in den nächsten Jahrzehnten dieses Raumvolumen schaffen und erhalten möchte. Ein bedeutender Punkt ist dabei die Gebäudenutzung. In den Regionen mit gemäßigttem Klima müssen dabei teilweise ganzjährig notwendige Energieversorgungsstrukturen für den Betrieb der Gebäude vorgesehen werden, da ansonsten nur eine eingeschränkte Nutzung möglich wird. In der Bundesrepublik Deutschland wird rund ein Drittel der Energieströme für die Aufrechterhaltung der Behaglichkeit im Gebäude verwandt [10]. Dies entspricht einer jährlichen Emission von ca. 1050 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>.

Das nun immer stärker werdende politische, wirtschaftliche und wissenschaftliche Interesse an einer Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäude hängt auch mit der beschleunigten Zunahme der CO<sub>2</sub> - Konzentration in der Erdatmosphäre zusammen [26], die u. a. durch die vermehrte Verbrennung fossiler Energieträger für die Versorgung von Gebäuden mit Wärme, Kälte und Strom sowie dem Verkehr forciert wird und mit als Hauptverursacher des Treibhauseffektes gilt. Die Bundesregierung beschloß im November 1990, die CO<sub>2</sub> - Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2005 um 25 bis 30% und im Bereich der Gebäudeheizung um sogar bis zu 40% zu senken. Dieses Ziel soll u. a. durch Verabschiedung und Durchsetzung von Verordnungen erreicht werden (wie z. B. dem Energieeinsparungsgesetz, der Wärmeschutz- bzw. Energiesparverordnung, der Heizungsanlagen-Verordnung, der 1. Bundes-Immissionsschutzverordnung), die auch den bestehenden Gebäudebestand berücksichtigen sollen. Dies hat u. a. zur Folge, daß sich die Jahresheizwärmebedarfsanteile der Gebäude künftig immer mehr verschieben werden. So wurden in der Vergangenheit ca. 1/3 des Jahresheizwärmebedarfs zur Deckung der Lüftungswärmeverluste aufgewendet. Dies wird sich bei gut gedämmten Gebäuden auf 50 - 60% steigern. Gleichzeitig steigt aber auch der Anteil für die Trinkwassererwärmung von bisher 10 - 15% auf 25 - 30% und kann damit unter Umständen zur maßgebenden wärmetechnischen Anschlußgröße für Gebäude werden. Bei der Entwicklung der Strukturen des Primärenergieverbrauchs in Deutschland wird es eine Verschiebung von dem Einsatz konventioneller Energieträger, deren Vorräte begrenzt sind [7], zu einem vermehrten Einsatz erneuerbarer Energieträger kommen (vgl. Abb. 1). Der Anteil dieser Energieträger würde dann nach Schätzungen des Freiburger Öko-Instituts e.V. (<http://www.oeko.de>) zur Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland im Jahr 2020 ca. 18,2% betragen, dies aber unter der Voraussetzung eines Ausstiegs aus der Nutzung der Kernenergie.

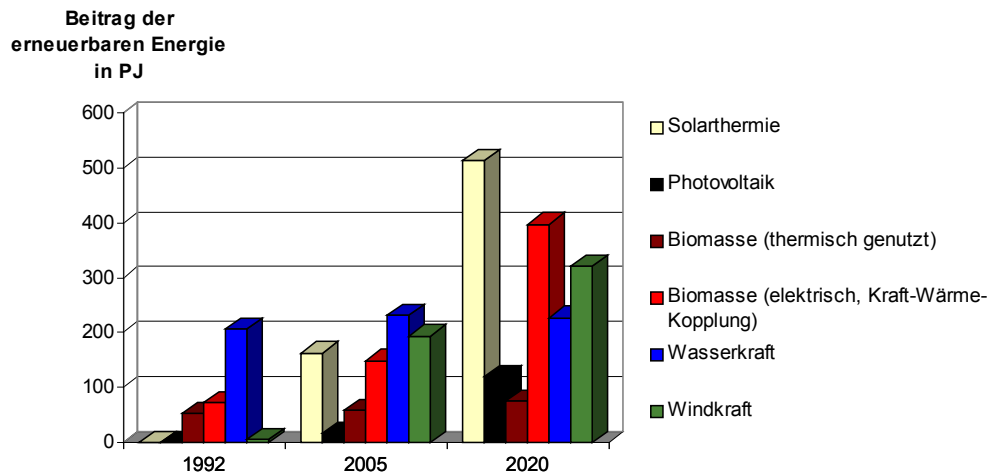


Abb. 1: Möglicher zukünftiger Beitrag erneuerbarer Energieträger am Primärenergieaufkommen in Deutschland [25].

Diese Hintergründe und der Versuch, die CO<sub>2</sub> - Emissionen in der Erdatmosphäre zumindest zu stabilisieren, erfordern nach Ansicht des Autors grundsätzlich die Berücksichtigung aller energetischen Faktoren und ökologisch-sozialen Aspekte in der Planung, Ausführung, Nutzung und dem Recycling von Bauwerken. Die Verantwortung der Architekten und Ingenieure zur Reduzierung des derzeit sehr hohen Primärenergieverbrauch für Gebäude liegt also nicht nur im Bereich der technischen Gebäudeausrüstung, sondern auch im Zusammenwirken aller gebäudetechnischen Komponenten und dessen Umsetzung, womit Einfluß auf den Endenergieverbrauch genommen werden kann.

## 2.2 Baukonstruktive Zuordnung des untersuchten Systems

Da die bisherigen Ausbildungen von Doppelfassaden sehr vielgestaltig sind, wird hier der Versuch unternommen, eine allgemeine Bezeichnung der untersuchten Konstruktionsart zu finden, damit eine baukonstruktive Einordnung von hinterlüfteten Doppelfassaden an Hand von wesentlichen Merkmalen ermöglicht wird. Die begriffliche Zuordnung ist insofern erforderlich, als z. B. eine deutliche Abgrenzung zu den vorgehängten Fassaden und den Klimafassaden mit natürlicher Be- und Entlüftung von Räumen erfolgt. Die Realisierung von hinterlüfteten Doppelfassaden mit ihren projektabhängigen baukonstruktiven Ausführungen führte in der Vergangenheit zu einer Ansammlung von zum Teil projektspezifischen Fachtermini für die jeweiligen Fassadensysteme (z. B. Klimafassade, Hybridfassade, durchströmte Vorhangfassade, Twinface-Fassade, Kasten-Fenster-Doppelfassade, Intelligente Fassade, Synergiefassade, Kollektorfassade etc.), die aber aufgrund der gestellten Anforderungen z. T. völlig verschiedenartige Konzepte beinhalten (vgl. auch [18],

[36], [24]). Der in dieser Arbeit verwendete Begriff der Doppelfassade enthält baukonstruktiv folgende Merkmale:

Es sind zwei- oder mehrschichtige Außenwandkonstruktionen, deren veränderbare Hinterlüftung mit Zu- und Abluftöffnungen integraler Bestandteil des Heizungs- und Lüftungssystems des Gebäudes wird. Die äußere Schale soll dabei vorrangig Aufgaben des Witterungs- und Schallschutzes, der Ästhetik und Gestaltung wahrnehmen. Das thermische Verhalten der Konstruktion wird maßgeblich sowohl durch die Regulierung der Hinterlüftung als auch durch konstruktive Parameter (z. B. Absorption, Reflexion und Strahlungsdurchgang der verwendeten Materialien) beeinflusst, wobei durch die Flächenanteile an transparenten, transluzenten bzw. opaken Bauteilen mit evtl. variablem Strahlungsschutz der Verlauf der lokalen und temporären Spalttemperaturen mit beeinflusst werden kann.



Abb. 2: Ansicht einer Doppelfassade (RWE-Tower in Essen).

### 2.3 Prinzipien von hinterlüfteten Doppelfassaden

Grundsätzlich bestehen doppelschalige Fassaden aus einer Außenfassade, einem dahinter liegenden Zwischenraum und einer Innenfassade. Grundelement der Außenfassade ist der Baustoff Glas, der in seinen Eigenschaften in erster Linie als Witterungsschutz dient. Alle Fassadentypen beruhen aber auf dem Prinzip der Mehrschaligkeit der Umhüllungskonstruktion und versuchen damit, die schichtspezifischen Eigenschaften in physikalischer und gestalterischer Hinsicht zu nutzen. Die verschiedenartige Ausbildung des Fassadenzwischenraumes (z. B. vertikale bzw. horizontale Abtrennung, Lage, Form und Größe der Zu-, Abluft- bzw. Überströmöffnung, innere Geometrie) trägt maßgeblich zur aerodynamischen Ausbildung der Fassadeninnendurchströmung mit bei.

Als ein Prinzip von hinterlüfteten Doppelfassaden hat sich, unabhängig von der Lüftungstechnischen Ausstattung des Gebäudes, vor allem die Ausbildung von Vertikalschächten im Zusammenhang mit Fensterkastenschächten durchgesetzt. Daneben existieren aber auch Fassaden, die diese Elemente zum Teil und unter Umständen auch nur in bestimmtem Fassadenbereichen (z. B. Abtrennung von Untergeschoßbereichen) besitzen. Sie sind in der Regel als reine Vertikalschacht- bzw. Fensterkastenschachtfassade ausgebildet worden (s. Abb. 2), die keine oder nur eine teilweise Ankopplung an das Lüftungssystem des Gebäudes haben (Beispiele dazu s. Abb. 3, Abb. 4, Abb. 5).

Die Lüftungstechnische Verbindung von der Doppelfassade zum Gebäude kann dabei sowohl über freie Lüftung als auch durch erzwungene Lüftung, z. T. auch nur die freie unterstützend, erfolgen. Maßgebend für diese Verbindung sind dabei die projektspezifischen Anforderungen bzw. Bedingungen, die eine den umfassenden Erfordernissen entsprechende (z. B. Schallschutz, Feuchtigkeitsschutz, Wärmeschutz, Brandschutz, Behaglichkeitskriterien etc.), durch Einzeluntersuchungen aufgestellte Lüftungsstrategie erkennen lassen. Vielfältige Beispiele realisierter Doppelfassadenkonstruktionen sind in [24] zu finden.

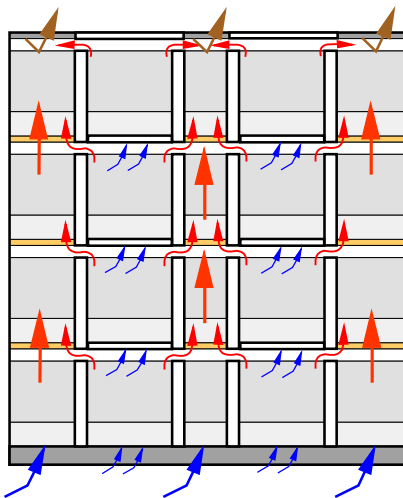


## System Vertikalschacht



reine Vertikalschachtfassade

② ③



Vertikalschachtfassade mit  
seitlichen Überströmöffnungen  
zu übereinander angeordneten  
Fensterkästenbereichen

①\* ③

\* besonders bei integrierter Gebäude-  
querlüftung

① freie Lüftung des Gebäudes möglich

② freie Lüftung des Gebäudes bedingt  
möglich

③ Nutzung Abluft möglich

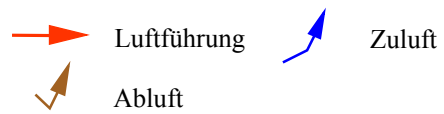
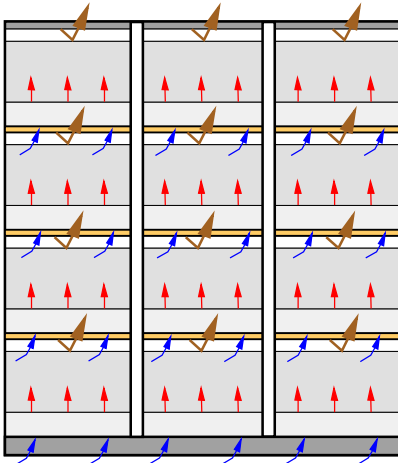


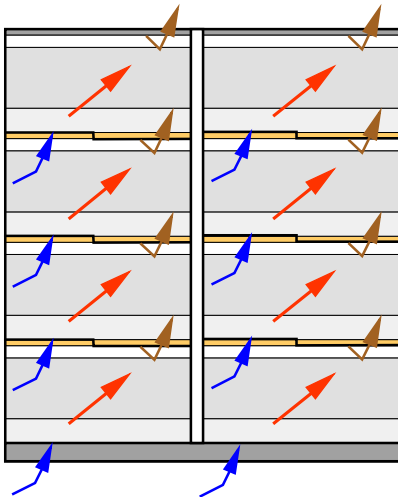
Abb. 3: Schema zu System Vertikalschachtausbildung.

## System Modulkastenfenster



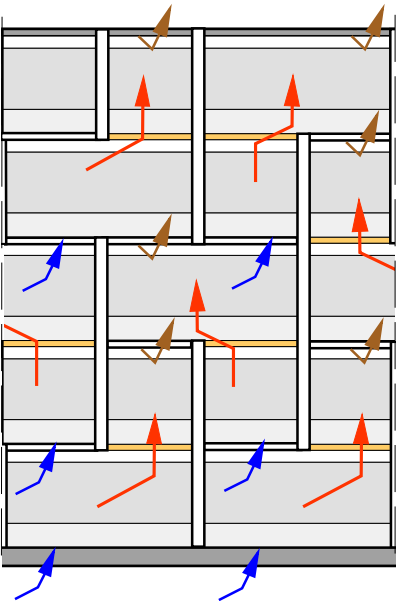
Geschoßhohe Fensterkästen  
mit übereinander angeordneten  
Zu- und Abluftöffnungen

①



Geschoßhohe Fensterkästen  
mit übereinander versetzt  
angeordneten Zu- und Abluft -  
öffnungen

①



Fensterkästen über mehrere  
Geschosse mit übereinander  
versetzt angeordneten Zu- und  
Abluftöffnungen

②

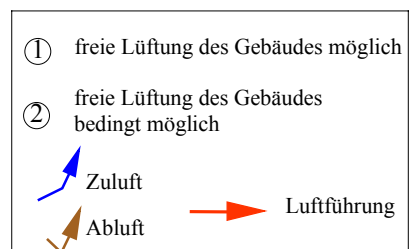


Abb. 4: Schema zu System Modulkastenfenster.

### System Vorhangfassade

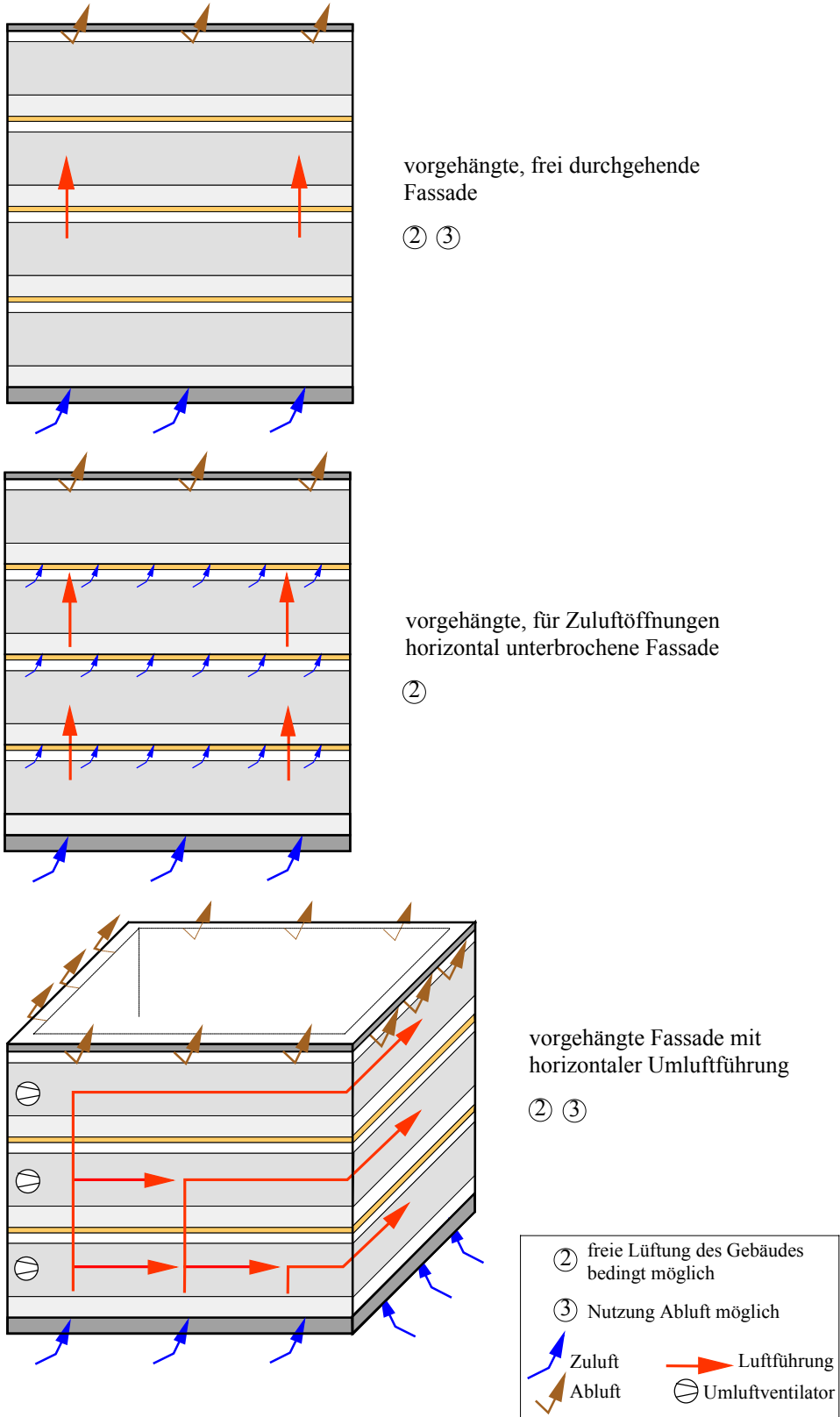


Abb. 5: Schema zu System Vorhangfassade.

## 2.4 Beschreibung der Baukonstruktion Umweltzentrum Cottbus

Für die Forschungstätigkeit zu hinterlüfteten Doppelfassaden konnte bereits im Vorfeld der Untersuchungen ein Gebäude [14], welches im Rahmen der Bundesgartenschau 1995 in Cottbus geplant und errichtet wurde, herangezogen werden. Der primäre Bestimmungszweck des Gebäudes besteht darin, moderne, umweltgerechte und ressourcenschonende Technik durch geeignete Konstruktionen, bewußte Materialauswahl und energiesparende Versorgungssysteme zur Anwendung zu bringen und für den Betrachter transparent und erlebbar zu machen. Funktional ist das Gebäude ein Versammlungs-, Büro- und Gaststättegebäude. Es besteht aus zwei Vollgeschossen, einer teilweisen Unterkellerung und einem stark zurückgesetzten 2. Obergeschoß. Die massiven Teile der Außenwandkonstruktion wurden in Kalksandstein-Mauerwerk mit Wärmedämmung und Putz ausgeführt. Das Holzdach mit Wärmedämmung wurde teilweise als Gründach ausgebildet. Im Inneren befinden sich im nördlichen Teil massive Geschosßdecken, im südlichen Teil wurden Holzdecken eingebaut. Ein Teil der zur SSW-, SW- und WSW- Seite orientierten Außenwandfläche wurde zweigeschossig durch eine hinterlüftete Doppelfassadenkonstruktion ausgebildet, die sich auf drei, um ca. 22,5° polygonal abgewinkelte Felder (6.30 x 4.25m) erstreckt (s. Abb. 5).



Abb. 5: Süd-Westansicht des Umweltzentrums Cottbus.

Der äußere Wandabschluß der Doppelfassade wurde aus einer Pfosten-Riegelkonstruktion aus Aluminium gefertigt, wobei zu Demonstrationszwecken für die Anwendung alternativer Energien die opaken Bereiche mit Photovoltaik-Modulen (PV-Elemente) belegt wurden ( $W_p \approx 3 \text{ kW}$ ). Durch die Einbettung der monokristallinen Siliziumscheiben in Einscheibensicherheitsgläser (ESG-Glas) wurde eine teiltransparente Fassade geschaffen, so daß zusätzlich die raumseitige Abstrahlungswärme der PV-Elemente über spezielle

Vertikalschächte zur Lüftungsanlage des Gebäudes geführt werden kann. Durch Beimischung der erwärmten Fassadenabluft (Kollektorprinzip) zur Zuluft des Gebäudes soll somit ein Beitrag zur teilweisen Deckung des Lüftungswärmebedarfs geleistet werden (s. Abb. 6).

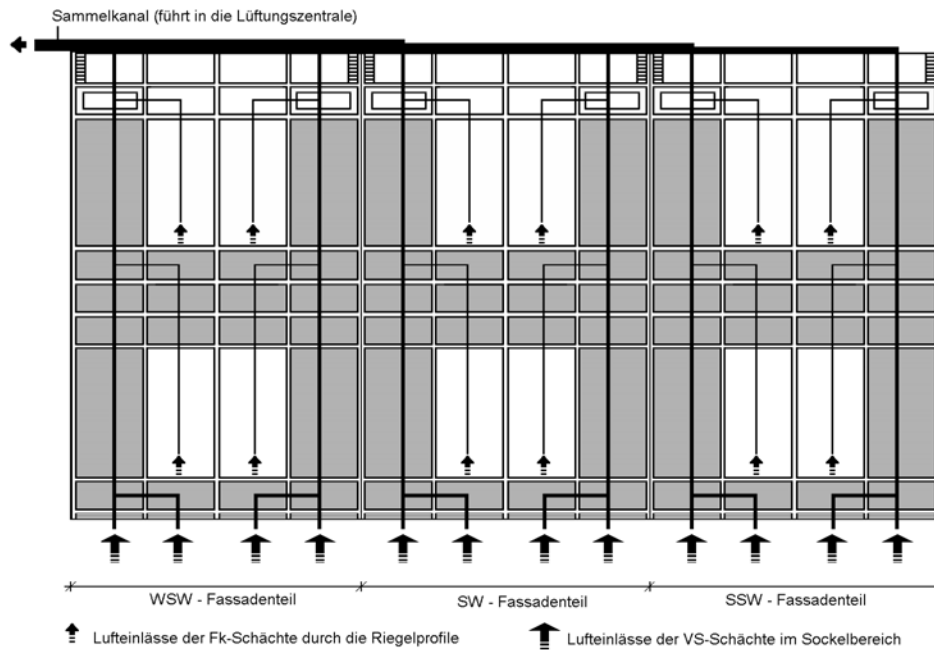


Abb. 6: Schema des Luftstroms durch die Doppelfassade.

Aufgrund der zweifachen energetischen Nutzung der Doppelfassade (integrierte Photovoltaikmodule und Wärmekollektor) wird diese Fassadenkonstruktion auch als Hybrid- oder Synergiefassade bezeichnet.

In den Fensterbereichen, die von innen nur zu Reinigungszwecken geöffnet werden sollen, wurde anstelle der Photovoltaikmodule transparentes ESG-Glas eingebaut. Zwischen der inneren Isolierverglasung und der außenliegenden ESG-Scheibe wurde ein motorisch betriebener Lamellensonnenschutz eingebaut. Die Abschottungen zu den Fensterbereichen erfolgen durch einen Brandschutzstreifen mit einer Grundstärke von 30 mm; in ihnen sind auch die seitlichen Überströmöffnungen zu den Vertikalschächten angeordnet. In den Bereichen der Fensterkästen erfolgt die Zuluftzuführung durch Riegelöffnungen (Ausklinkung der Dichtformteile und der Andruckleiste im unteren Riegel) und in den Bereichen der Vertikalschächte durch Lochblechöffnungen (Bohrlochdurchmesser 2 mm) am Fußpunkt der Fassade. Entsprechend der Rasterbreite der Pfostenkonstruktion wurden die Einströmöffnungen mit einem Sockelblech und einer doppelten Wetterschutzleiste

ausgebildet (s. Abb. 7). Oberhalb der einzelnen Vertikalschächte erfolgt eine Zusammenführung der erwärmten Fassadenluft durch einen Sammelkanal in Form eines horizontal liegenden flexiblen Lüftungsrohres (Nenndurchmesser: DN 250) mit integrierten Wickelfalzrohrabgängen je Vertikalschacht, der diese zum Fassadenablüfter (maximale Luftmenge: 1000 m<sup>3</sup>/h, Nennleistung: 0,37 kW) in die Lüftungszentrale des Gebäudes führt (s. Abb. 8, Abb. 9).



Abb. 7: Fußpunkt Doppelfassade vor Einbau der PV-Module.



Abb. 8: Abluftkanal - Vertikalschacht oben mit Übergang in den Sammelkanal und Fassadentemperaturfühler.

Weiterhin besteht die Möglichkeit einer freien Hinterlüftung der Vertikalschächte durch motorisch zu öffnende Abluftklappen (vgl. auch Abschnitt 2.4), die auch in Abhängigkeit der geforderten Betriebszustände (Rückkopplung zur Gebäudeleittechnik (GLT)) gesteuert werden können, wenngleich ihre geplante Hauptfunktion im Schutz der Fassade vor

thermischer Überhitzung besteht (vgl. Tab. 2). Als Führungsgröße zum Überhitzungsschutz (motorisches Öffnen aller Fassadenklappen) dient ein Fassadentemperaturfühler, der direkt im oberen Fassadenzwischenraum installiert wurde (s. Abb. 8).

Tab. 2: Regelzustände der Doppelfassade.

Nr.	Zustand	Stellglied	
		Abluftventilator	Abluftklappen
I.	Wärmegewinnung für LTA <sup>1</sup>	ein	zu
II.	Wärmespeicherung	aus	zu
III.	Kühlung maschinell <sup>2</sup>	ein	zu
IV.	freie Kühlung	aus	auf



Abb. 9: Fassadenabluftventilator – Anschluß zur Lüftungstechnischen Anlage des Gebäudes.

<sup>1</sup> auch als Fortluft möglich

<sup>2</sup> Betriebszustand III wurde nach der ersten Einlauf- bzw. Nutzungsphase des Gebäudes im Zusammenhang mit einer Meßwertauswertung im Sommer 1996 aus dem Regelprogramm der GLT genommen.

## 2.5 Beschreibung der technischen Ausrüstung

Die Wärmeversorgung des Gebäudes erfolgt über eine monovalent betriebene, zweistufige Wärmepumpenanlage (elektrisch). Das dazugehörige Erdsondenfeld und der Anschlußschacht befinden sich in unmittelbarer Nähe vor dem Gebäude (s. Abb. 10).

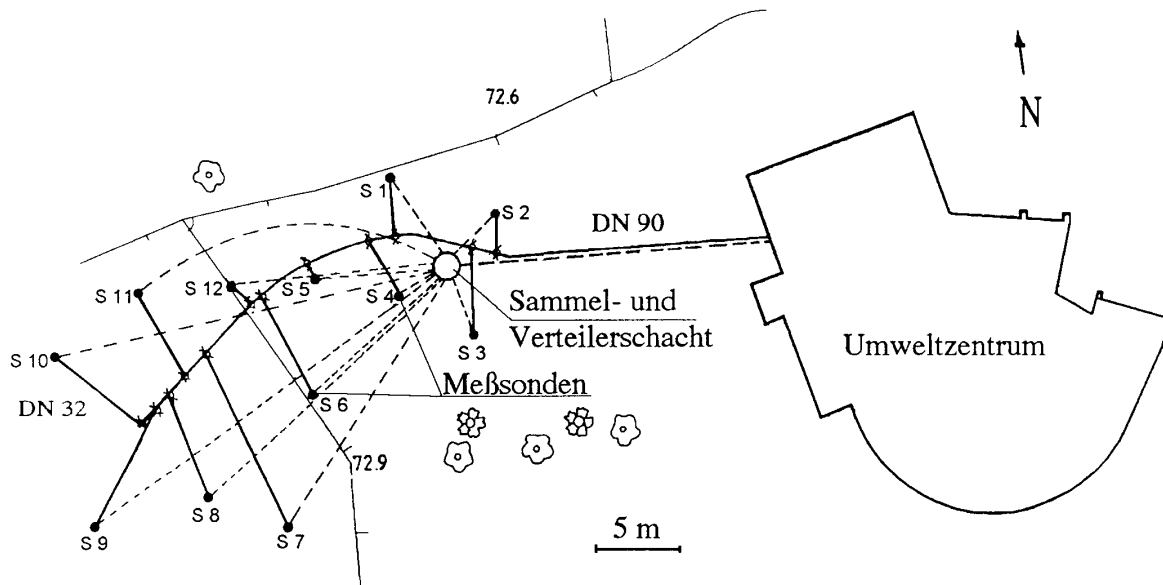


Abb. 10: Lageplan der Sonden S1-S12 und des Schachtes.

Jede der Erdsonden ist 50 m tief und enthält einen Doppel-U Wärmeaustauscher aus Polyethylen (HDPE). Zwei Sonden (Meßsonden – s. Abb. 10) wurden zusätzlich mit Temperaturfühler versehen. Es ergibt sich damit eine Gesamtlänge der Wärmeaustauscher von 2.400 m. Mit der Energie aus den Erdsonden wird über die Wärmepumpe ein Niedertemperaturheizsystem 55/45°C für die Gebäudeheizung als monovalentes System betrieben. Eine Besonderheit dieser Konfiguration ist, daß die Anlage mit geringem Mehraufwand für die Kühlung des Gebäudes genutzt werden kann. Mit dem Anlagenkonzept können drei verschiedene Betriebsarten gefahren werden (s. Abb. 11). Das sind:

- Heizen mit Wärmepumpe,
- Kühlen mit Wärmepumpe,
- direkte Erdreichkühlung.

Im Gebäude wurde die Heizung als Fußbodenheizung mit Unterflurkonvektoren bzw. mit stationären Heizkörpern ausgebildet. Der Wärmebedarf nach DIN 4701 beträgt 48 kW, der Kühlbedarf liegt bei 37 kW. Davon werden 11 kW über Oberflächenkühlung und 26 kW



über Luftkühlung abgedeckt. Die Flächenkühlung in den Vortragsräumen hinter der Doppelfassade wird über die Deckenfläche eingebracht.

Die Lüftung erfolgt im Büroteil und in den Nebenräumen über freie Lüftung. In den Versammlungsräumen ist eine kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung (max. Volumenstrom: 6170 m<sup>3</sup>/h) vorhanden. Für den Küchenbereich wurde eine gesonderte Lüftungsanlage (3550 m<sup>3</sup>/h) nachträglich eingebaut (s. Abb. 12).

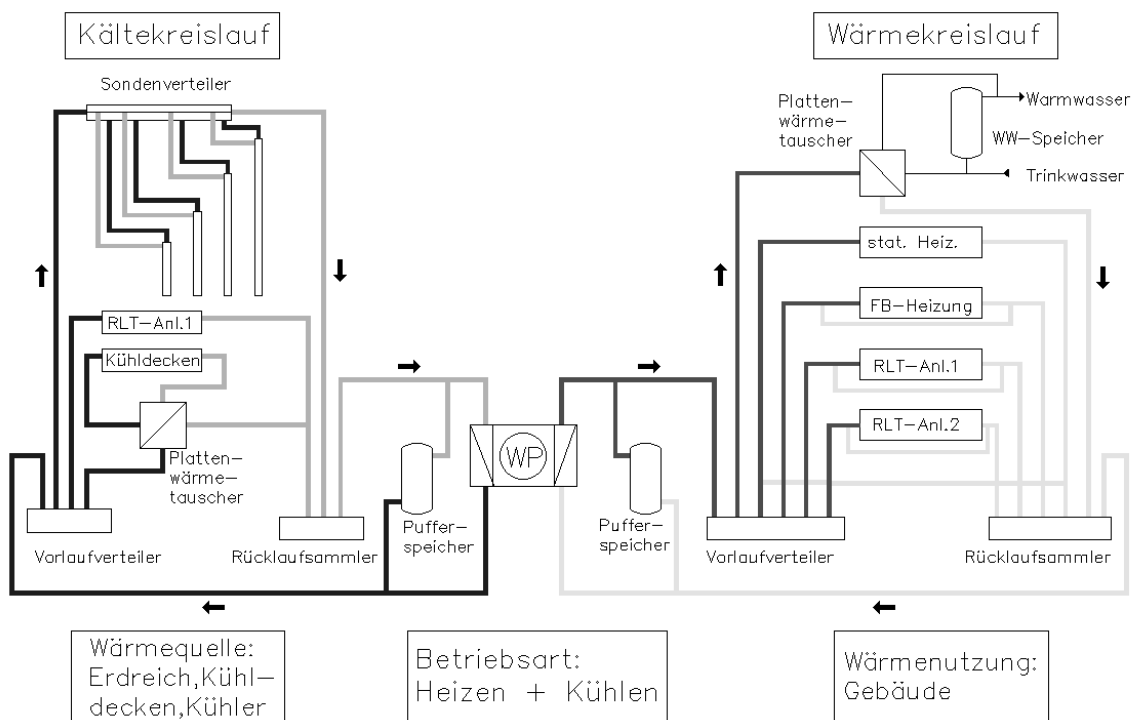


Abb. 11: Funktionsschema Heizung und Kühlung [13].

Die Photovoltaik - Anlage des Gebäudes ist als Fassadenkonstruktion ausgeführt und über drei Wechselrichter angeschlossen. Der Jahresenergieeintrag wird bei etwa 2200 kWh liegen. Der über die Wechselrichter erzeugte Wechselstrom wird zunächst in das Hausnetz eingespeist, je Wechselrichter eine Phase. So wird die Bezugsenergie um den Betrag gemindert, den die PV-Anlage selbst liefert.

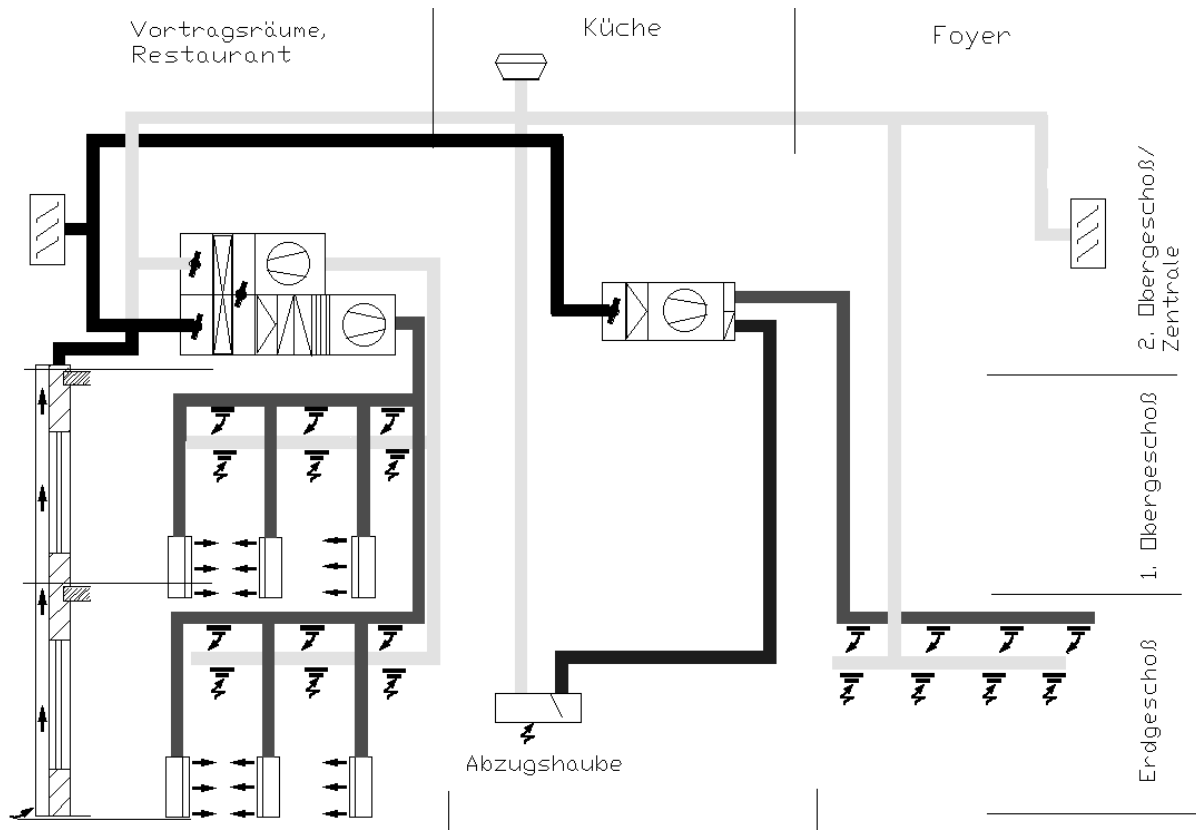


Abb. 12: Funktionsschema Lüftung (Wärmerückgewinnung durch Rotationswärmetauscher).

## 2.6 Meßaufgaben

Durch Langzeituntersuchungen am Gebäude sollen der Einsatz von Niedrigenergiesystemen, die Nutzung der Sonnenenergie, der Einsatz einer Wärmepumpe mit Erdsondenkollektor sowie andere Bau- und Ausrüstungskomponenten untersucht werden. Parallel zur Bauausführung des Umweltzentrums konnte ein umfangreiches Meßsystem im Gebäude installiert werden, um anhand eines breiten Datenspektrums energetische Wechselwirkungen verschiedenartiger gebäudetechnischer Komponenten genauer analysieren und vergleichen zu können.

Die Meßwerterfassung erfolgt dezentral mit Hilfe von Meßwerterfassungsmodulen im Gebäude, die über ein Datenkabel mit einem Leitreechner verbunden sind. Der Leitreechner, der durch spezielle Softwareprogramme die Datenerfassung, -übernahme und -weiterleitung sicherstellt, befindet sich im 2. Obergeschoss des Gebäudes (Lüfterzentrale) (vgl. [14], Abb. 13, Abb. 16).

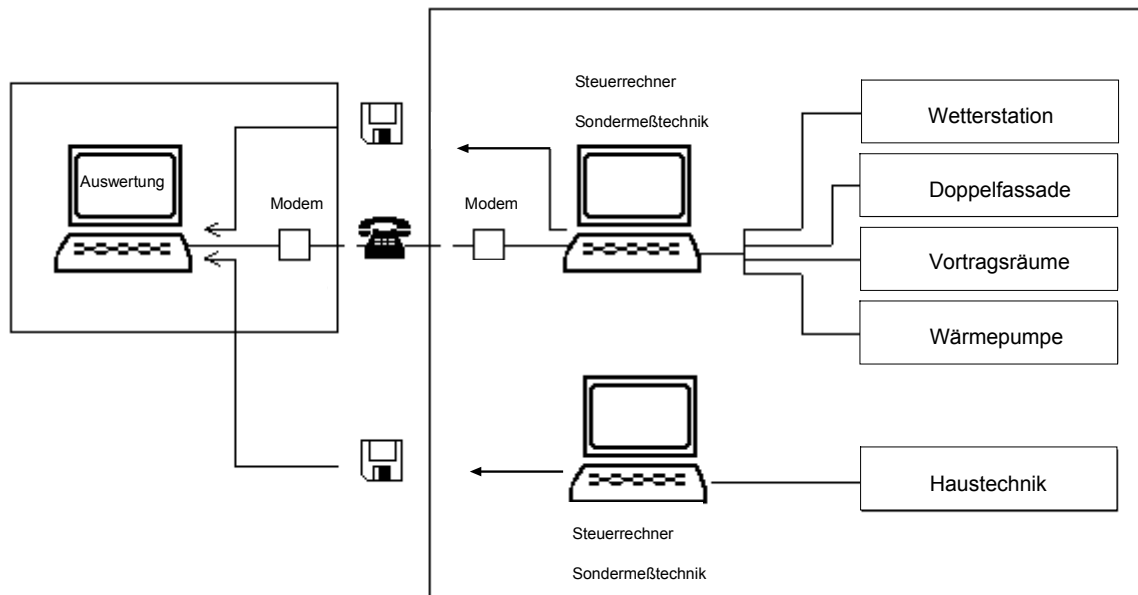


Abb. 13: Prinzipschema Meßdatenerfassung (vgl. [13]).

Zur Erfassung der meteorologischen Einflüsse wurde auf dem Gebäude eine Wetterstation angebracht, die neben der Außentemperatur die Windgeschwindigkeit, die Windrichtung und die Globalstrahlung erfaßt.

Bei einigen Meßwerten wird eine Umrechnung (z. B. für den Volumenstrom) erforderlich. Hier erfolgt die Darstellung anhand der gemessenen Luftgeschwindigkeiten und der gegebenen Geometrien, an denen die Meßfühler eingebaut sind. Die einzelnen Meßfühler werden in einem Intervall von 15 Minuten abgefragt, die Rohdaten werden in Tagesdateien abgespeichert und können variabel miteinander kombiniert werden. Dabei werden für die Meßwertaufnahme das Softwareprogramm der Firma Ahlborn (AMR WIN-Control) und für die Auswertung ein Tabellenkalkulationsprogramm verwendet. Eine Beschreibung der Rohdatenerfassung und die Bestimmung absoluter und relativer Meßfehlergrößen finden sich in [1].

## 2.7 Meßtechnische Ausstattung zur Untersuchung der Doppelfassade

Die hinterlüftete Doppelfassade vor zwei übereinanderliegenden Versammlungsräumen soll einen Beitrag zur Energiebilanz des Gebäudes und der dahinter liegenden Räume liefern. Dazu müssen die Vorgänge im Fassadenzwischenraum selbst und deren möglichen Auswirkungen auf das energetische Gesamtverhalten des Gebäudes untersucht werden.

Im vorliegenden Beispiel wird der sich einstellende Luftstrom im Fassadenzwischenraum durch thermischen Auftrieb und durch einen Schubventilator erzeugt. Über einen Abluftkanal, in dem Temperatur- und Volumenstrommeßfühler eingebaut wurden, gelangt die Luft aus der Doppelfassade in die Lüftungsanlage des Gebäudes.

Zur Untersuchung dieser Abhängigkeiten wurden insgesamt im Bereich der Doppelfassade sieben Thermo-Anemometer, zwölf Mantelthermoelemente T 430-3 und drei Silizium-Pyranometer installiert (s. Abb. 14, Abb. 15, Abb. 17, Tab. 3).



Abb. 14: Beispiel für die Installation eines Mantelthermoelementes im Fensterkastenbereich.



Abb. 15: Silizium-Pyranometer zur Erfassung des Energieeintrags in den Doppelfassadenabschnitt.

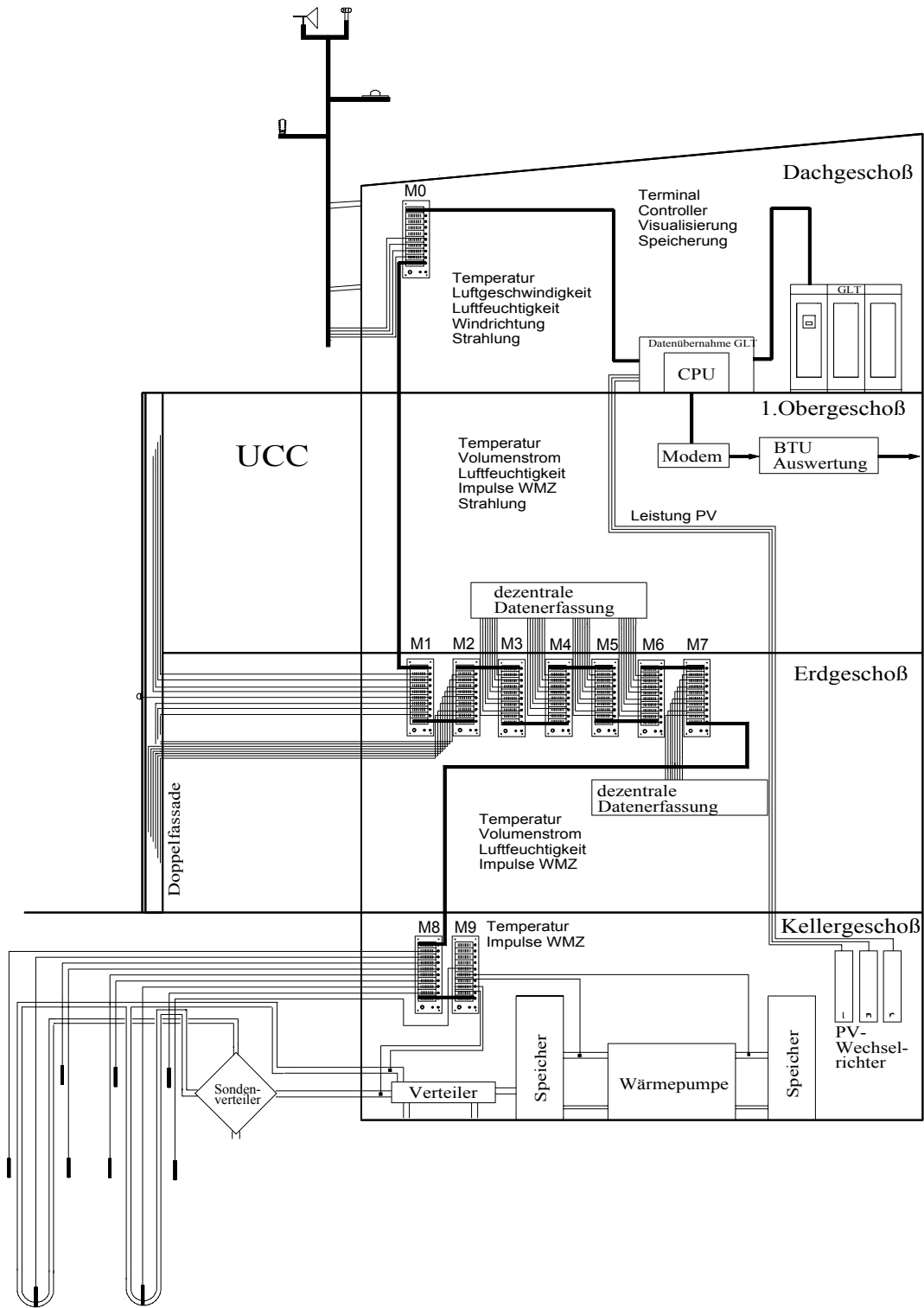


Abb. 16: Schaltschema Sondermeßtechnik.

Eine besondere Konzentration von Meßfühlern liegt dabei im Fassadenmittelfeld vor (s. Abb. 17). Hier stellen die punktuell erfaßten Temperaturfelder in horizontaler und vertikaler Schichtung im Vertikalschacht einen Schwerpunkt dar. Aufgrund der geringen Meßspitzengröße der Mantelthermoelemente (zum Einsatz kamen NiCr-Ni Thermoelemente mit einem Meßbereich von  $-200^{\circ}\text{C} - 1350^{\circ}\text{C}$  und einer Linearisierungsgenauigkeit von  $\pm 0,05 \text{ K}$  bzw.  $\pm 0,05 \%$  vom Meßwert) eignen sich diese Fühler besonders zu Messungen in oberflächennahen Schichten (s. Abb. 14, Abb. 18, [1]). In den Abluftschächten wurden Pt 100 - Widerstandsthermometer installiert.

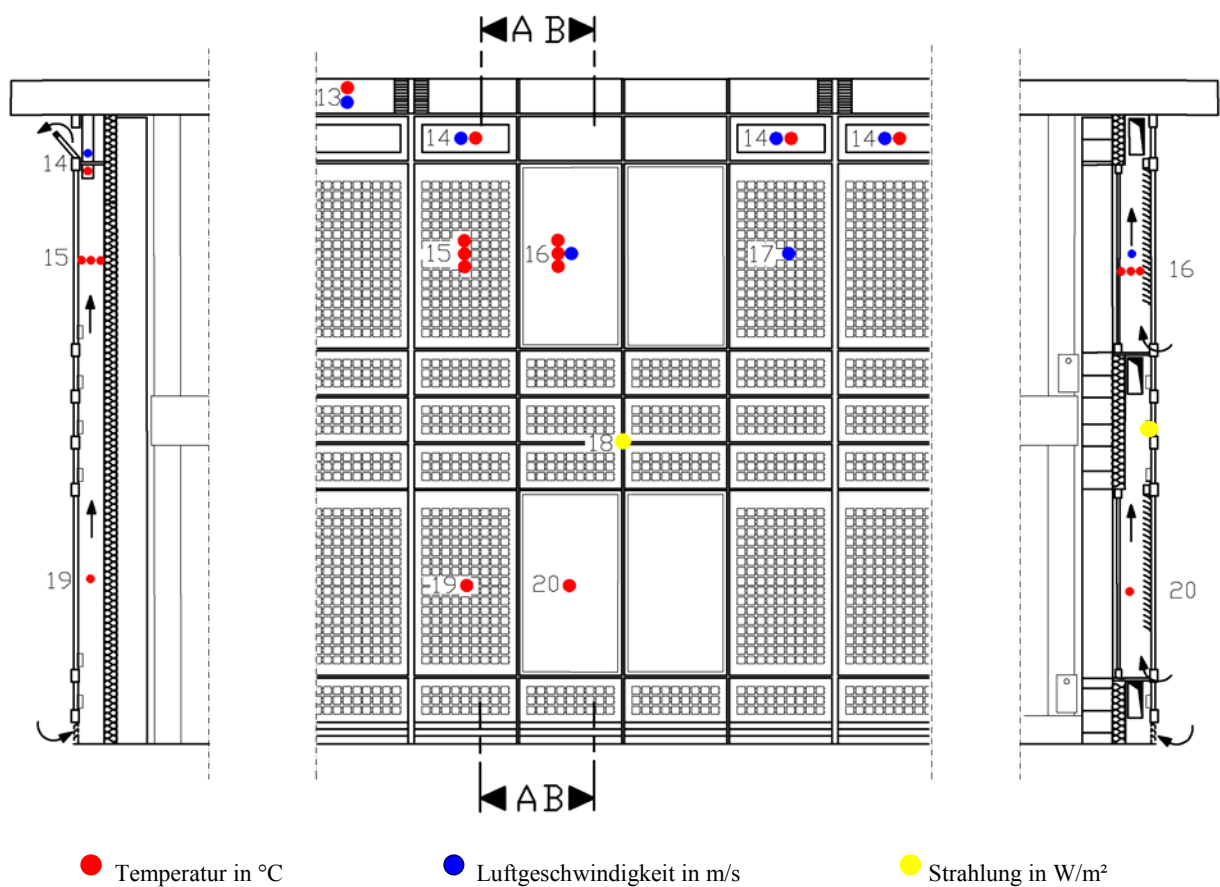


Abb. 17: Teilbereich der Doppelfassade (Schnitt A - A: Vertikalschacht und Schnitt B - B: Fensterkastenschacht) mit Lage der Meßfühler (lfd. Nr. 13-20).

Tab. 3: Meßstellenübersicht (Ifd. Nr. 13-20, vgl. Abb. 17) – Untersuchung Bereich Doppelfassade.

lfd. Nr.	Meßgröße	Einheit	Meßort	Meßfühler zur Untersuchung der Doppelfassade
13	Lufttemperatur Luftgeschwindigkeit	°C m/s	Abluftkanal DN 250 Doppelfassade	P 05 Thermo-Anemometer
14	Lufttemperatur Luftgeschwindigkeit	°C m/s	Abluftkanal DN 100 Vertikalschächte	P 05 Thermo-Anemometer
15	Lufttemperatur in horizontaler Schichtung	°C	oberer Vertikalschacht	Mantelthermoelement T 430-3
16	Lufttemperatur in horizontaler Schichtung	°C	oberer Fensterkastenschacht	Mantelthermoelement T 430-3
17	Luftgeschwindigkeit	m/s	oberer Vertikalschacht	Thermo-Anemometer
18	Strahlung	W/m <sup>2</sup>	vertikal vor Doppelfassade	Silizium-Pyranometer
19	Lufttemperatur	°C	unterer Vertikalschacht	Mantelthermoelement T 430-3
20	Lufttemperatur	°C	unterer Fensterkastenschacht	Mantelthermoelement T 430-3

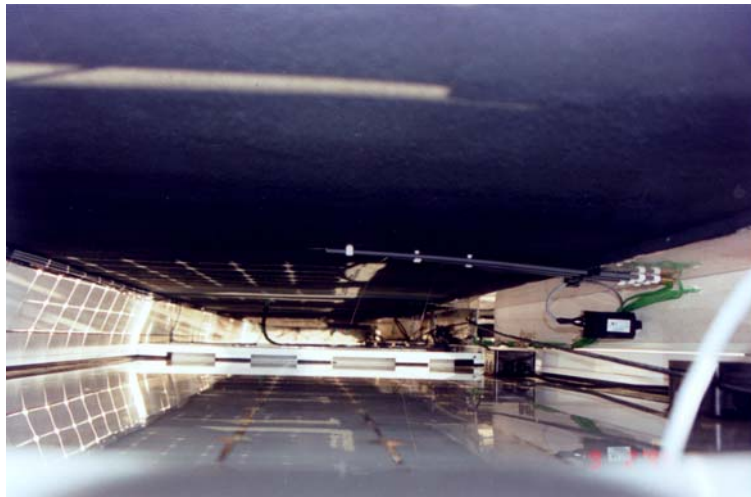


Abb. 18: Blick in einen Vertikalschacht (VS 3) mit Anordnung der Meßfühler.

### 3 Experimentelle Untersuchung

#### 3.1 Auswertung der Meßdaten im Meßzeitraum 07/1995 - 10/1998

##### 3.1.1 Temperaturverhältnisse der Spaltluft

Aus den gewonnenen Meßdaten (Meßzeitraum 07/1995 – 10/1998) wird in Abb. 19 der Vergleich zwischen den gemessenen Außentemperaturen (Wetterstation Gebäude) und den mittleren Fassadentemperaturen dargestellt. Insgesamt konnte für die Auswertung auf ein Datenspektrum von über 2.250.000 Daten zurückgegriffen werden. Die Meßwertabfrage erfolgte hierbei aller 15 min, so daß pro Tag und Fühler 96 Meßwerte aufgenommen wurden.

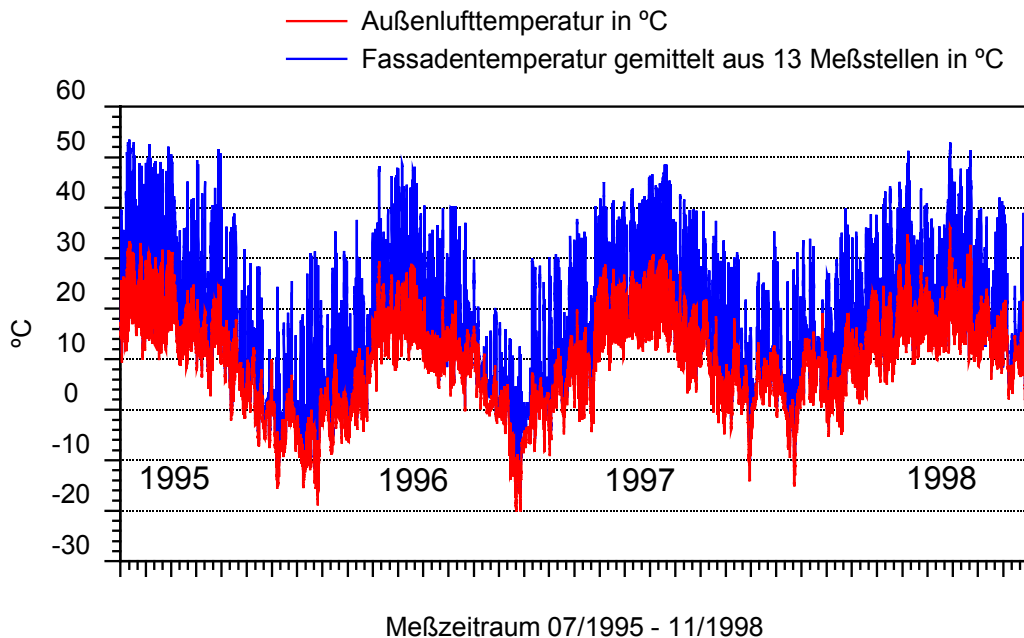


Abb. 19: Darstellung Außentemperatur und mittlere Fassadentemperatur im Meßzeitraum.

Die ermittelte maximale mittlere Fassadentemperatur lag bei  $53,5^{\circ}\text{C}$ , das Minimum bei  $-16,4^{\circ}\text{C}$ . Die Erfassung und anschließende Mittelwertbildung der mittleren Fassadentemperatur erfolgte über zwölf in der Doppelfassade verteilte Temperaturmeßfühler (s. Abb. 17). Einzelne Meßfühlerwerte lagen bei einer Temperatur von über  $68^{\circ}\text{C}$  (z. B. am 11.8.1998, 16.15Uhr), die tiefsten Temperaturen lagen bei  $-19^{\circ}\text{C}$ . Dies entspricht einer gemessenen Temperaturspreizung in der Fassade von 87,7 K. Die an der Wetterstation gemessenen Außentemperaturen im Meßzeitraum lagen bei Tiefstwerten von  $-20,1^{\circ}\text{C}$  und Höchstwerten von  $36,1^{\circ}\text{C}$  (Spreizung: 56,3 K) (s. Abb. 20).



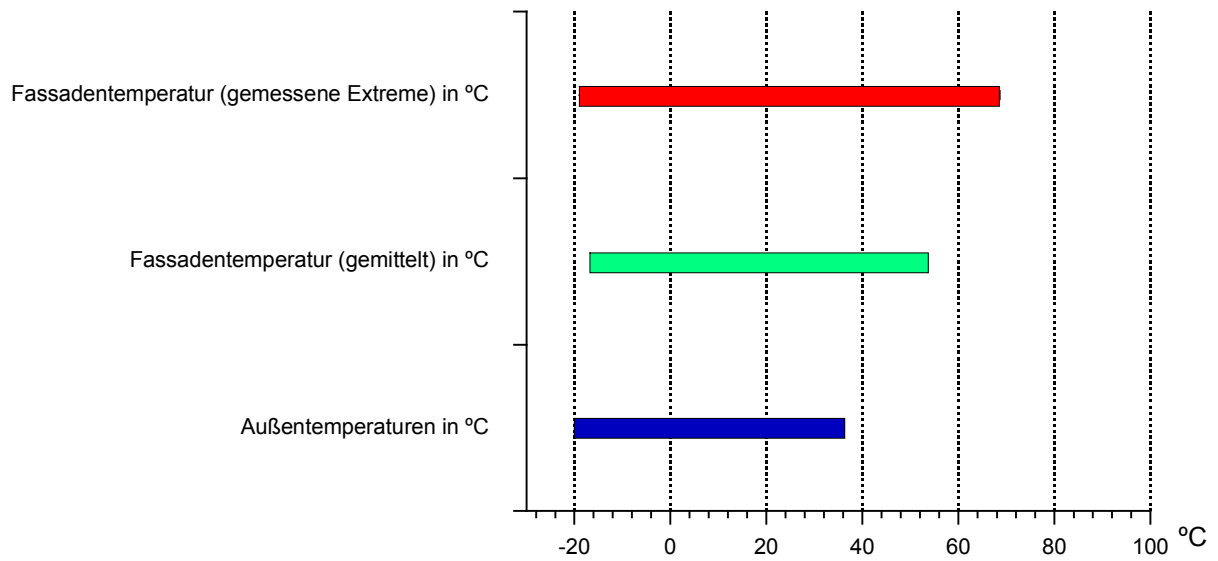


Abb. 20: Temperaturbereiche im Meßzeitraum.

Die absolut gemessenen mittleren Fassadentemperaturen im Meßzeitraum sind in Abb. 21, die prozentualen Anteile sind in Abb. 22 dargestellt. 77% der gemessenen Werte liegen unter 20°C, 11% zwischen 20 und 26°C und 12% liegen über 26°C.

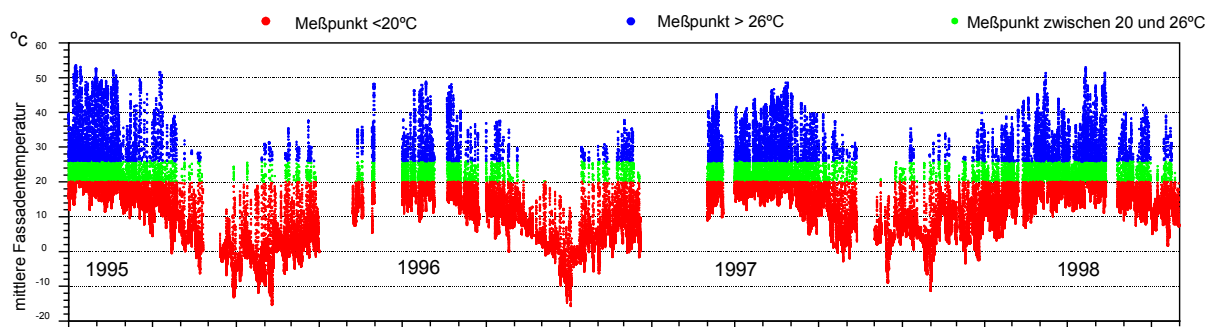


Abb. 21: Darstellung der mittleren Fassadentemperaturen in den Bereichen  $>26^{\circ}\text{C}$ ,  $\leq 26^{\circ}\text{C}$  und  $\geq 20^{\circ}\text{C}$  sowie  $< 20^{\circ}\text{C}$ .

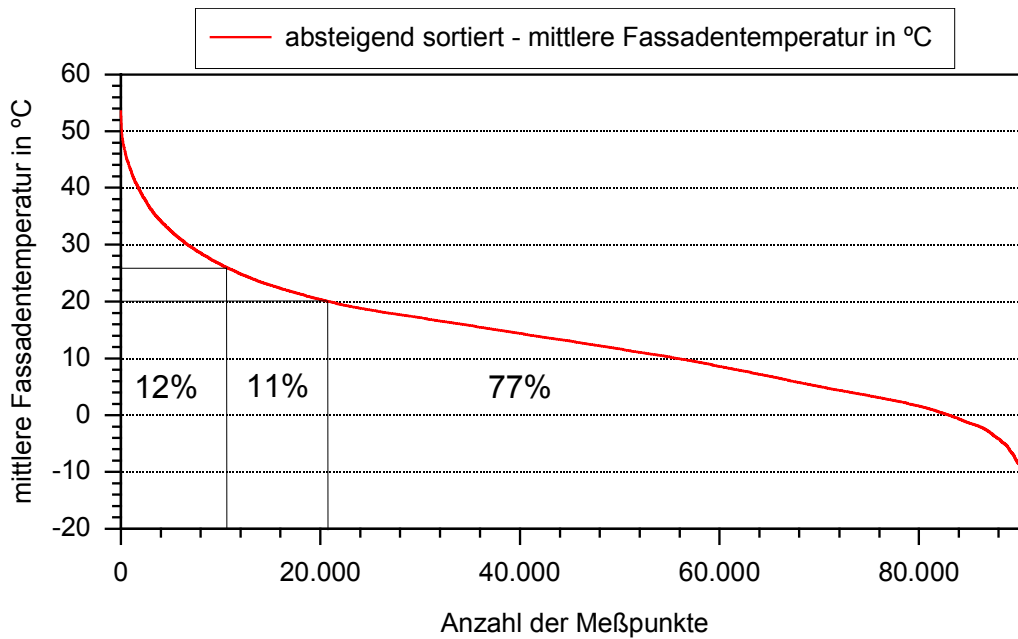


Abb. 22: Darstellung der mittleren Fassadentemperaturen – Meßwerte absteigend sortiert.

In Abb. 23 werden die Über- bzw. Untertemperaturen (Temperaturdifferenzen zwischen mittlerer Fassadentemperatur und der jeweiligen Außentemperatur) dargestellt. Sowohl innerhalb als auch außerhalb der Heizperiode sind Temperaturspreizungen im positiven bzw. im negativen Bereich zu finden. Übertemperaturen über 25 K wurden u. a. auch in den Wintermonaten in der Fassade gemessen.

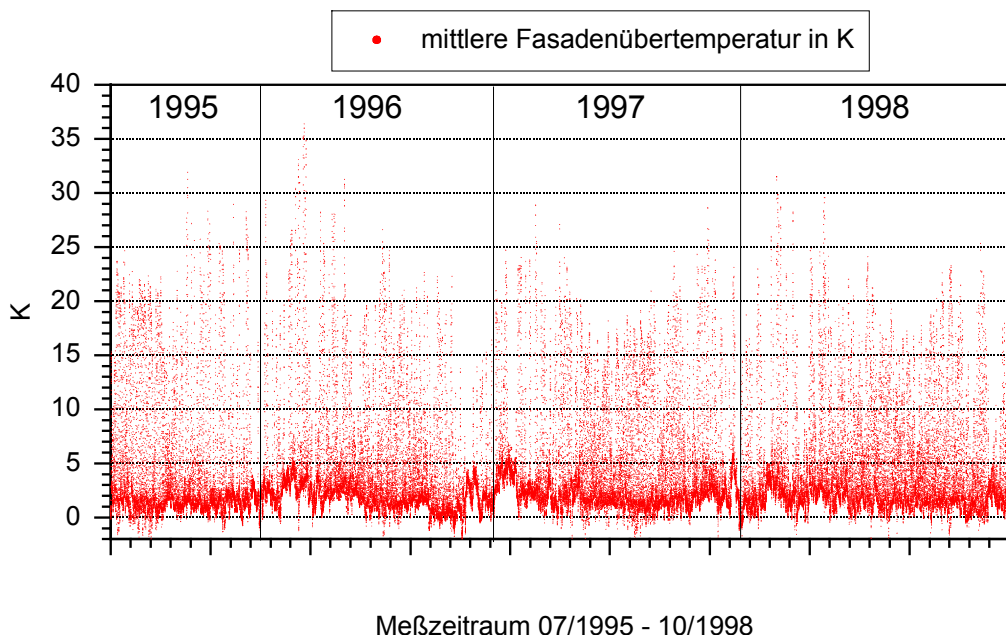


Abb. 23: Temperaturdifferenzen im Meßzeitraum – Über- bzw. Untertemperaturdarstellung.

Die Darstellung zeigt weiter, daß auch bei tieferen Außentemperaturen große Temperaturspreizungen im Fassadenzwischenraum auftreten, die eine Nutzung der Fassade zum Zwecke der Zuluftvorerwärmung für lüftungstechnische Einrichtungen ganzjährig

rechtfertigen können. Zur weiteren Darstellung der Häufigkeiten der gemessenen Übertemperaturen dient Abb. 24.

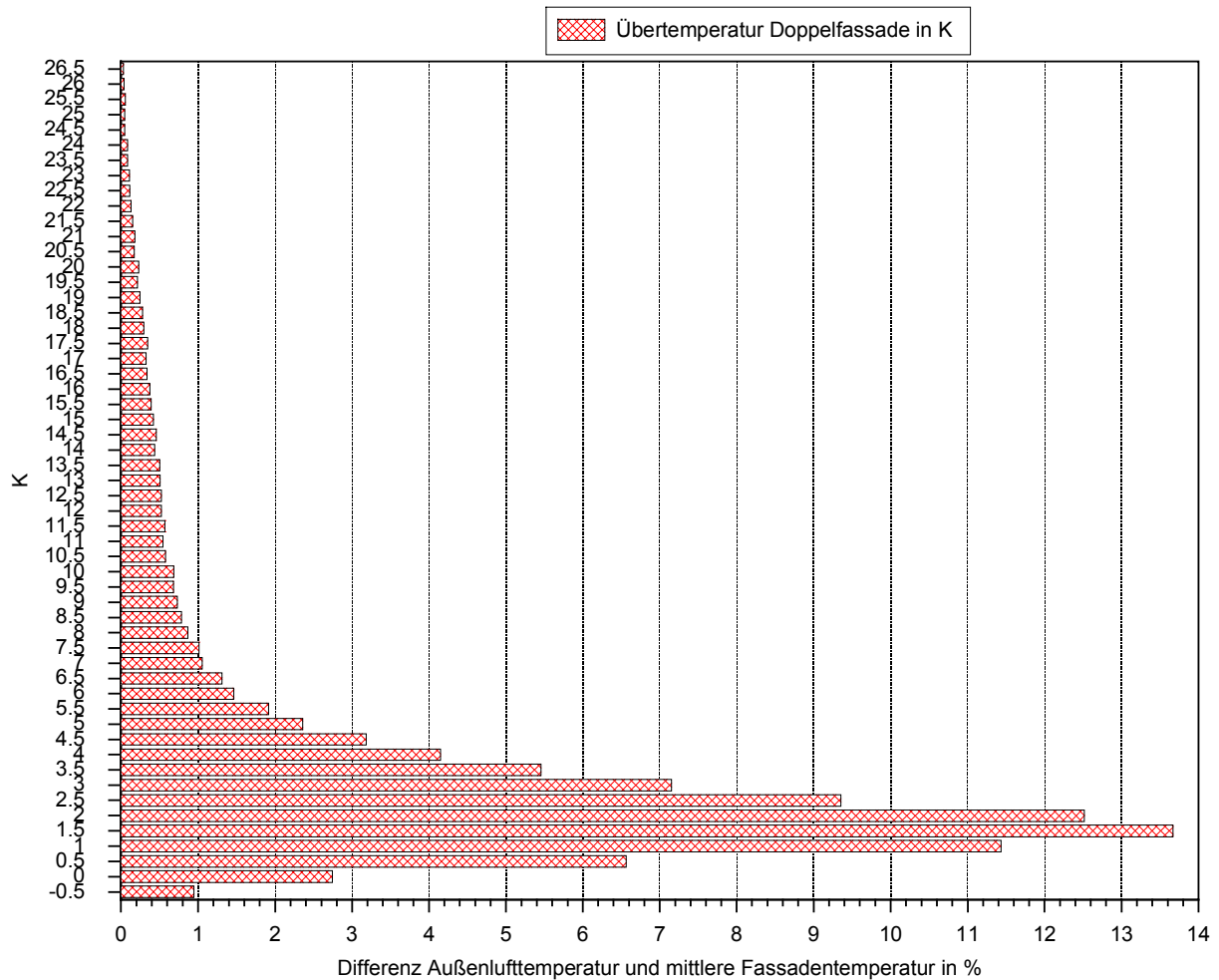


Abb. 24: Übertemperaturhäufigkeitsdarstellung in der Doppelfassade.

Innerhalb der Meßperiode liegen die erfaßten mittleren Fassadenübertemperaturen zu 84% unter 5 K, die am häufigsten erfaßten Übertemperaturen liegen zwischen ein und zwei Kelvin. Fassadenübertemperaturen über 5 K traten zu 16% des Meßzeitraumes auf. Diese Anteile geben hiermit eine Aussage zur zeitlichen Darstellung der Erwärmung der Doppelfassade in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Der Aufnahmezeitraum der Meßwerte betrug hierbei ca. 945 Tage. Gegenüber den Zeiträumen zur Außentemperatur kommt es besonders im Sommer zu zeitlich länger anhaltenden Übertemperaturen in der Doppelfassade (s. Abb. 25).

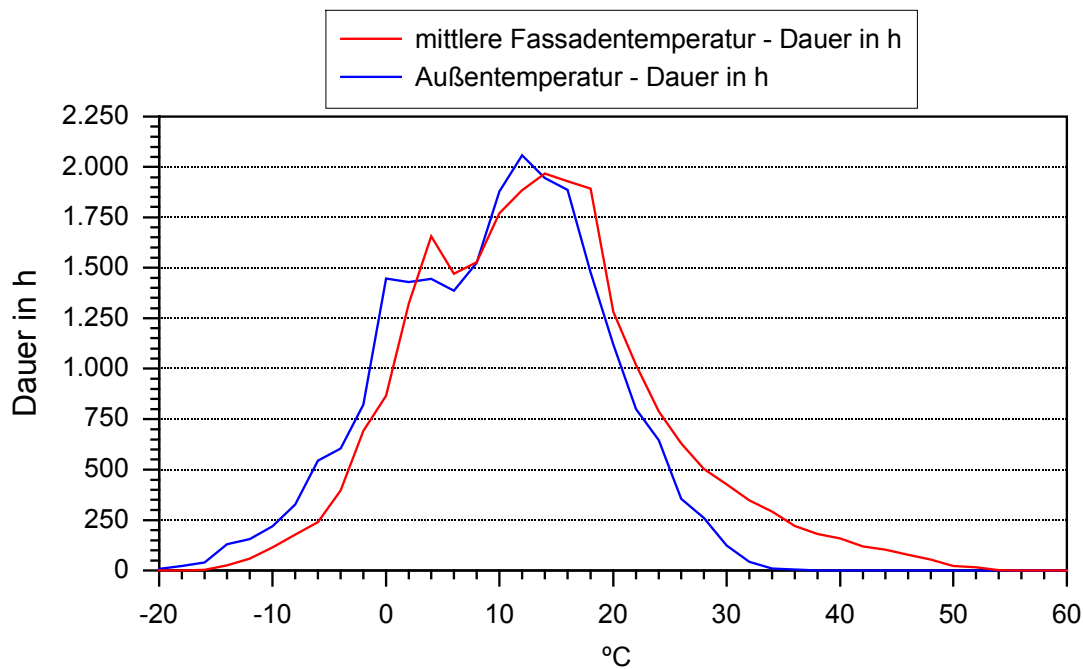


Abb. 25: Dauer der Außen- bzw. mittleren Fassadentemperatur im Meßzeitraum.

Die mittleren Übertemperaturen im Fassadenzwischenraum sind kumuliert in ihrer Dauer in Abb. 26 dargestellt. Übertemperaturen  $> 20$  K treten nur zu einem geringen Prozentsatz auf.

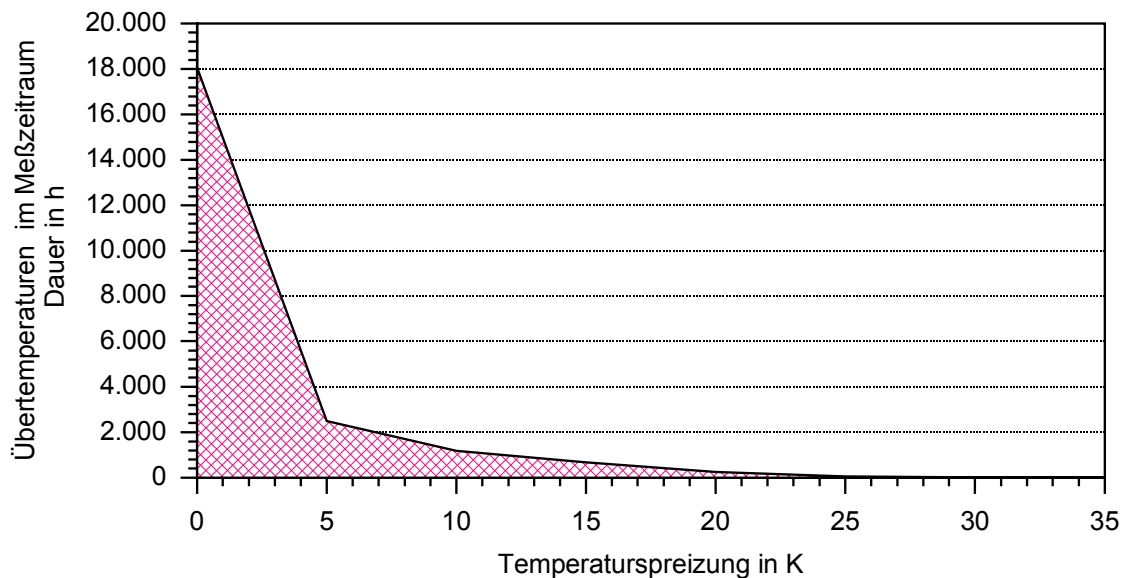


Abb. 26: Dauer der mittleren Übertemperaturen ( $> 0$  K) im Meßzeitraum.

Von den über 90.895 Meßzeitpunkten liegen 72.270 (ca. 80%) zwischen 0 und 5 K Übertemperatur, weitere 11% zwischen 5 und 10 K. In weniger als 10% des Meßzeitraums lagen die Temperaturen der Doppelfassade über 10 K gegenüber der Außentemperatur, aber wie in Abb. 25 ersichtlich, auch innerhalb der Heizperiode.

Zur Darstellung der prozentualen Übertemperaturhäufigkeiten innerhalb bzw. außerhalb der

Heizperiode dient Abb. 27, eine Aufteilung der Häufigkeiten Tag/Nacht während der Heizperiode ist aus Abb. 28 ersichtlich.

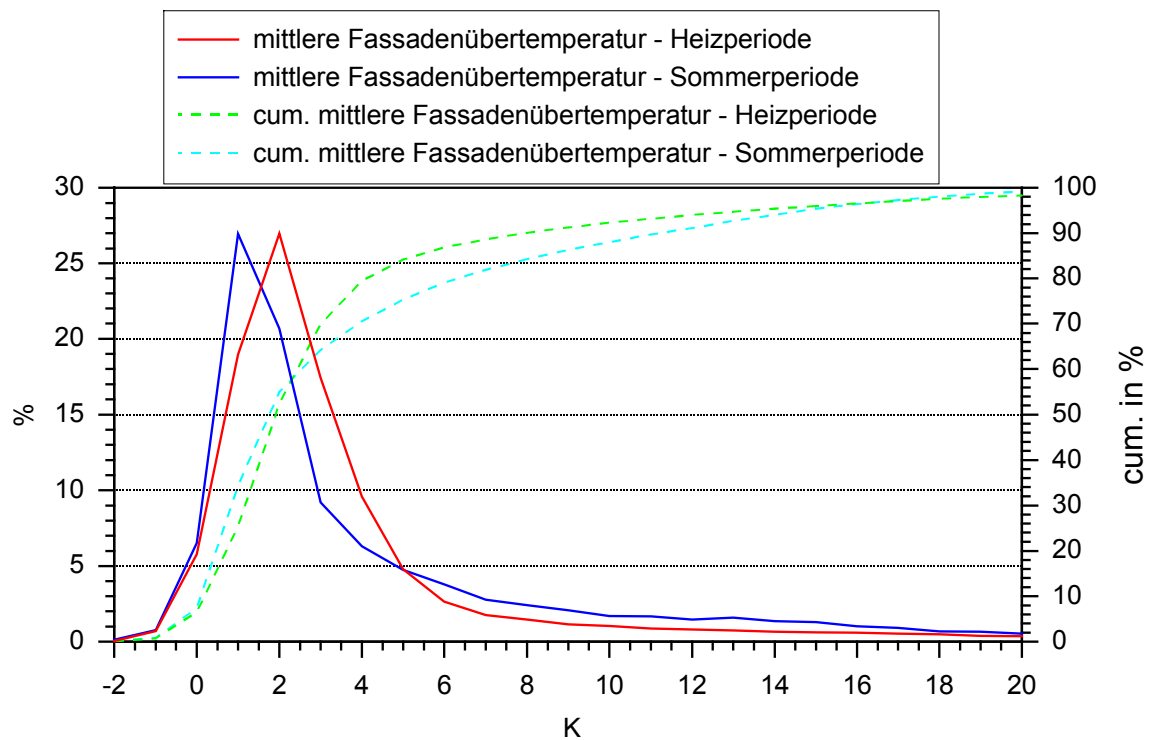


Abb. 27: Darstellung der mittleren Fassadenübertemperaturen innerhalb und außerhalb der Heizperiode im Meßzeitraum.

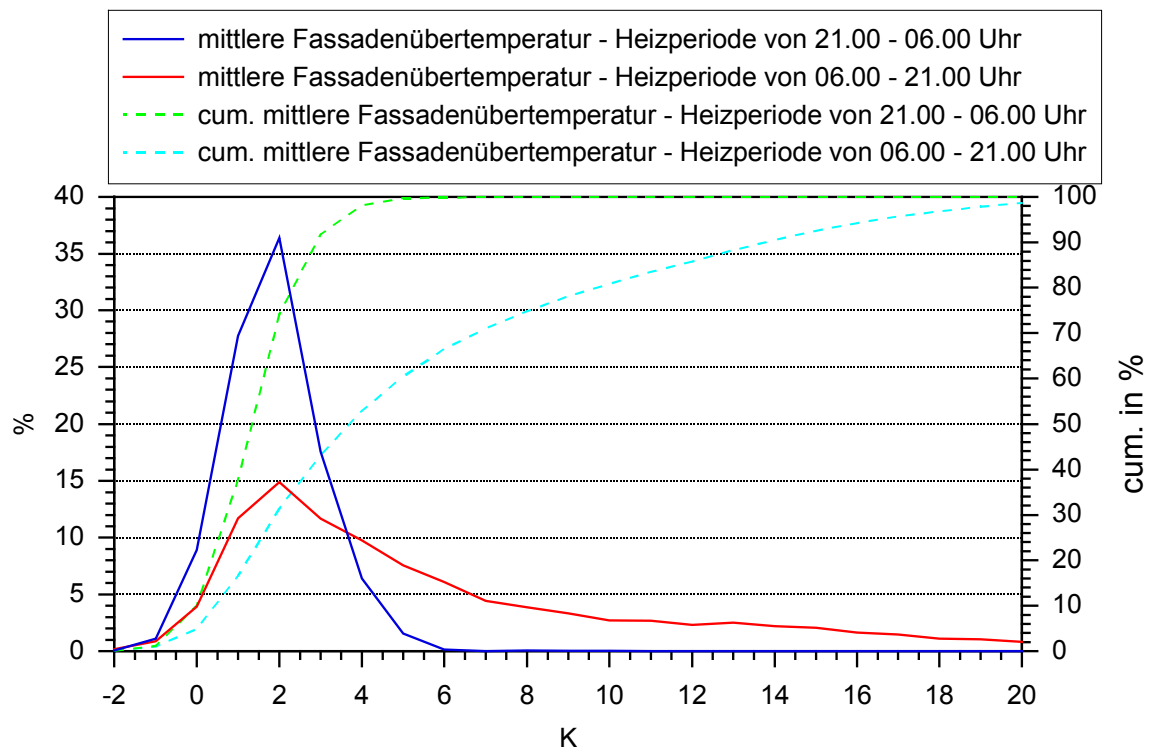


Abb. 28: Darstellung der mittleren Fassadenübertemperaturen innerhalb der Heizperiode Tag/Nacht im Meßzeitraum.

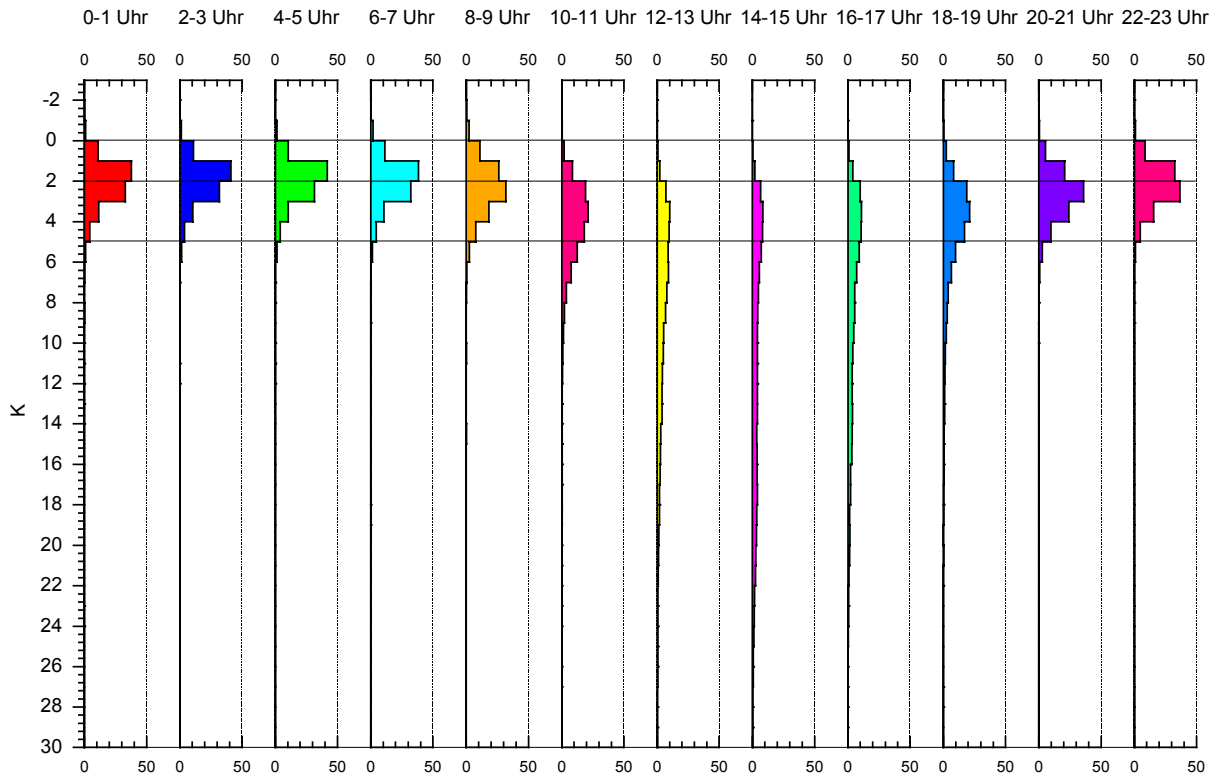


Abb. 29. Darstellung der mittleren Fassadenübertemperaturen in Abhängigkeit von der Tageszeit im Meßzeitraum.

In Abb. 29 wird die Tagesabhängigkeit der Übertemperaturen im Meßzeitraum und in Abb. 30 deren in absteigend sortierter Reihenfolge dargestellt.

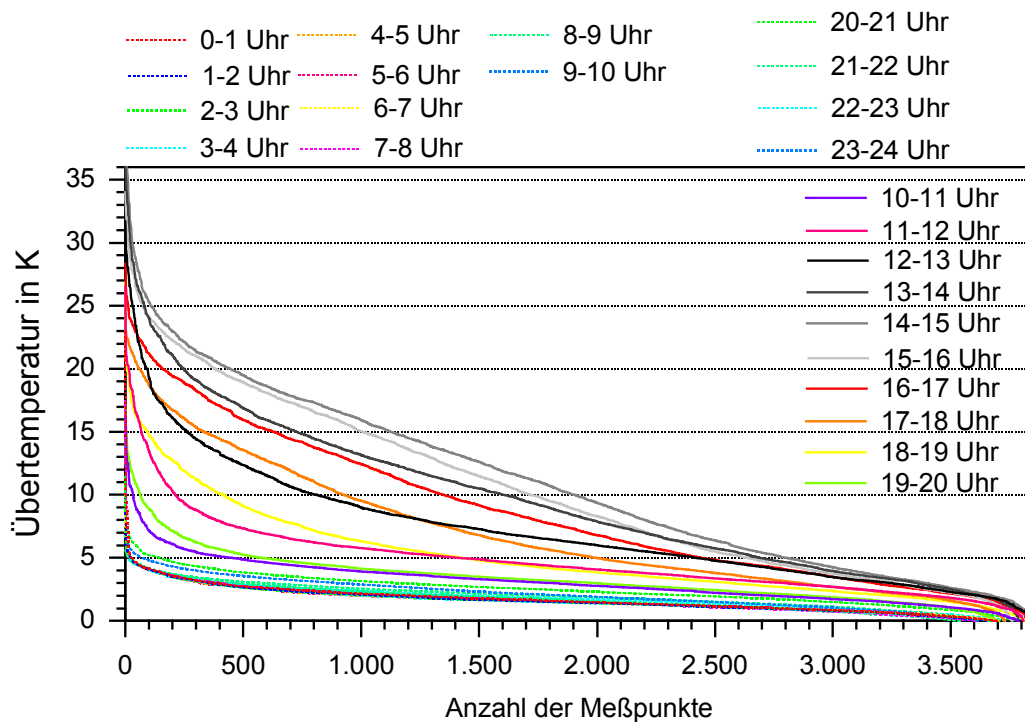


Abb. 30: Darstellung der absteigend sortierten Fassadenübertemperaturen in Abhängigkeit der Tageszeit.

In Abb. 31 und Abb. 32 werden die jahres- und tageszeitlichen Abhängigkeiten der Untertemperaturen über den Meßzeitraum (Erfassung der negativen Übertemperaturen) gezeigt. Der jahreszeitliche Verlauf gibt recht deutlich wieder, daß in der zweiten Jahreshälfte mit länger anhaltenden Fassadenuntertemperaturen zu rechnen ist. Im Tagesgang zeichnet sich ebenfalls eine Tendenz ab, die angibt, daß in den Morgenstunden häufiger Untertemperaturen auftreten. Als maximale mittlere Untertemperatur wurden  $-2,33\text{ K}$  gemessen.

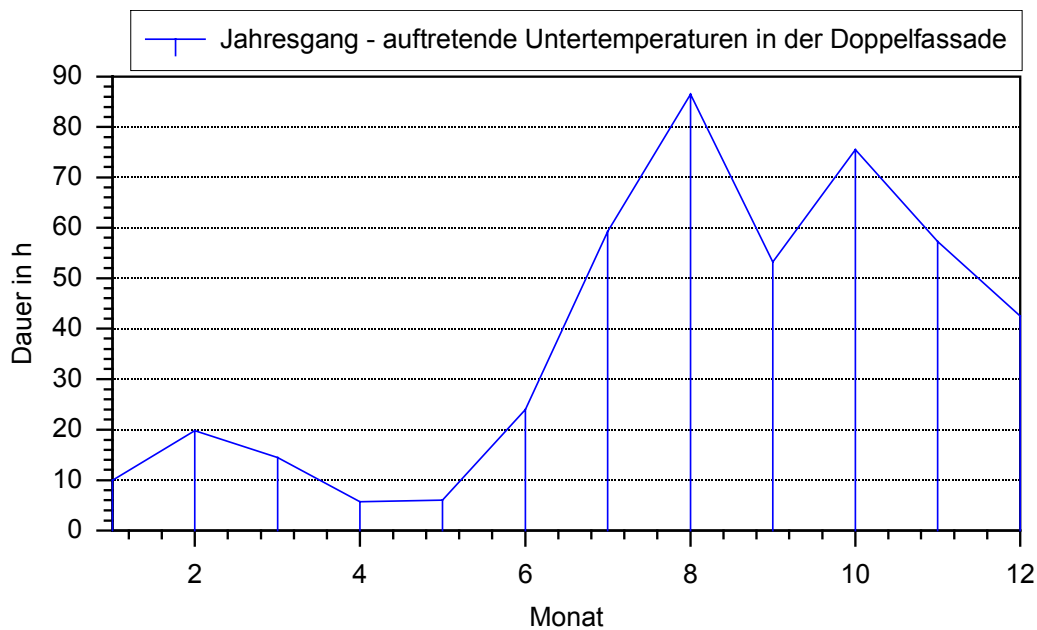


Abb. 31: Jahresgang – auftretende Untertemperaturen in der Doppelfassade im Meßzeitraum.

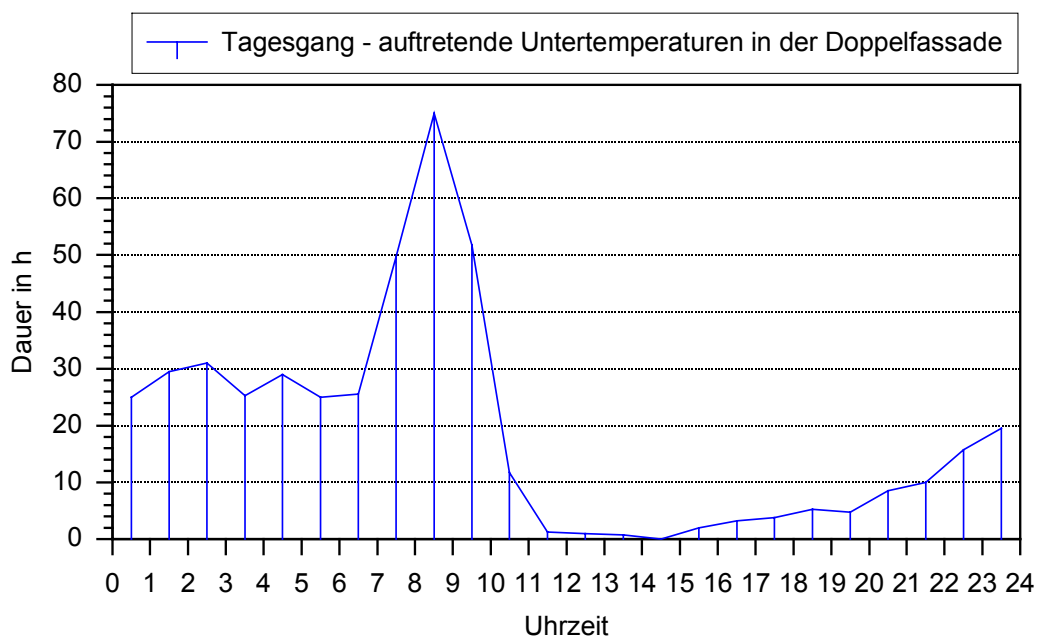


Abb. 32: Tagesgang – auftretende Untertemperaturen in der Doppelfassade im Meßzeitraum.

### 3.1.2 Strahlungsverhältnisse

Die Doppelfassade besteht wie in Abschnitt 2.4 bereits dargelegt, aus drei Teilhälften, die eine unterschiedliche Himmelsausrichtung haben (SSW, SW, WSW). Die Bestrahlungsstärke und –dauer verschiebt sich über den drei Teilflächen (s. Abb. 33), d. h., auf der SSW-Teilfläche sind mit zunehmender Strahlungsstärke zeitlich länger anhaltende Strahlungsleistungen gemessen worden als auf der WSW-Fassadenteilfläche.

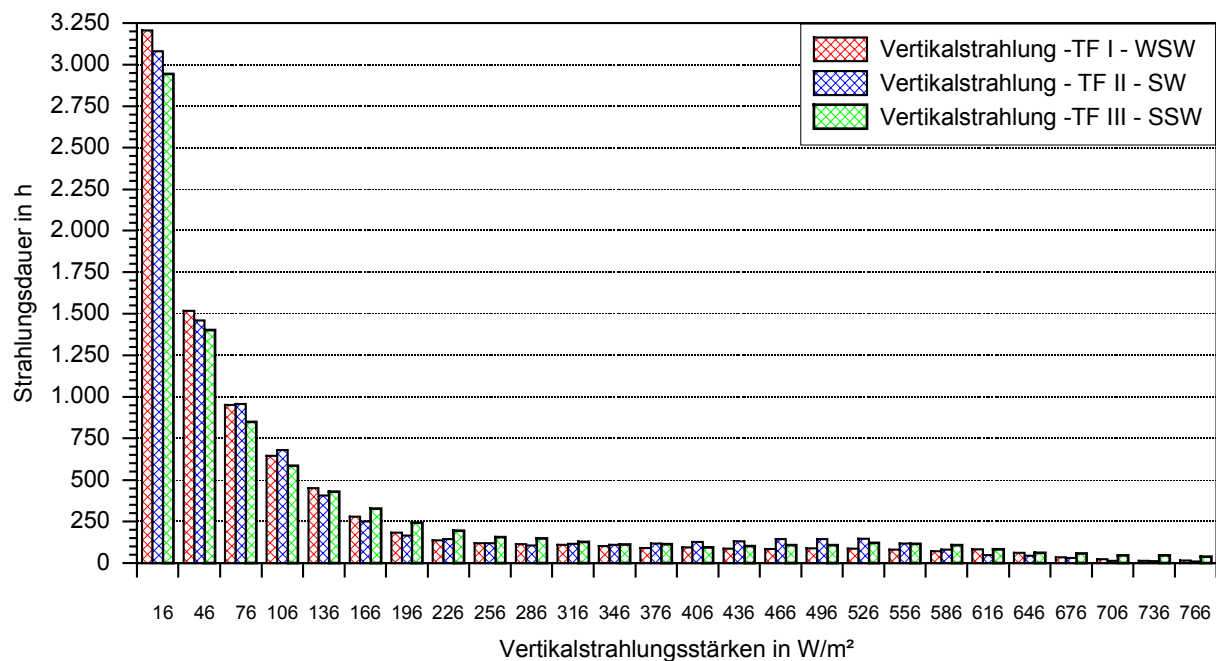


Abb. 33: Darstellung Strahlungsdauer und –stärken auf den drei Teilflächen der Doppelfassade im Meßzeitraum mit Einstrahlungsleistung  $>1\text{W/m}^2$ .

Wie in Abb. 34 erkennbar wird, werden die maximalen Einstrahlungsleistungen auf den Fassaden- Teilflächen (Vertikalstrahlung) im Frühjahr bzw. im Herbst erreicht, wobei in Richtung WSW eine Abnahme der Strahlungsspitzen festgestellt werden kann. In Betrachtung mit den Temperaturen in der Doppelfassade, die eine thermische Nutzung auch in den Heizübergangszeiten ermöglicht, wären SSW orientierte Fassadenflächen gegenüber WSW- orientierten Flächen sinnvoller.

Die maximale Globalstrahlungsstärke (Wetterstation auf dem Gebäude) wurde am 15.07.1996 mit über  $1226\text{ W/m}^2$  erfaßt. Das ist gegenüber der maximal gemessenen Vertikalstrahlungsstärke an den Teilflächen der Doppelfassade ein ca. 30% höherer Wert (s. Abb. 34).



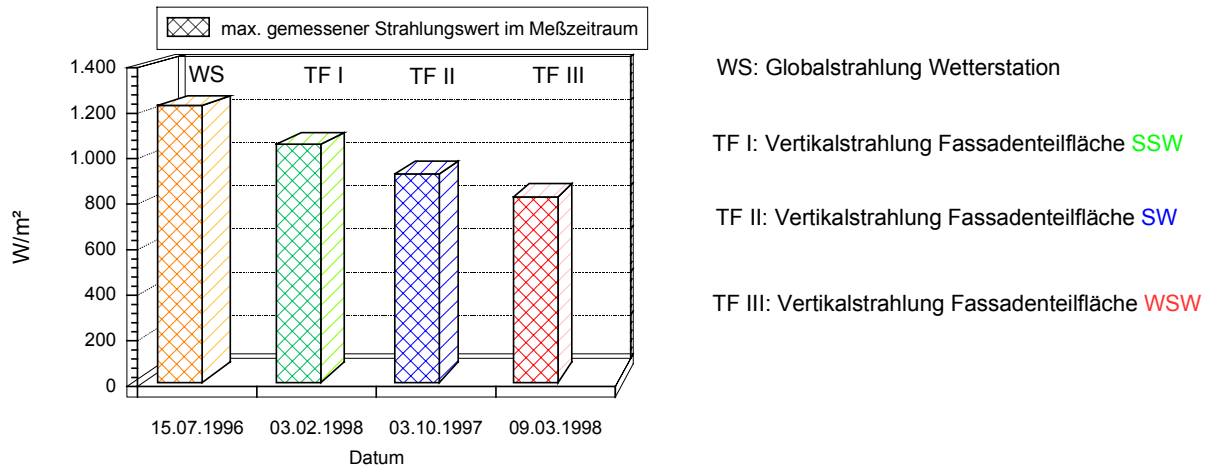


Abb. 34: Zeitliche Darstellung der Strahlungsmaxima auf den Fassaden- Teilflächen.

Eine Häufigkeitsdarstellung der Differenzen aus der Globalstrahlung abzüglich der mittleren Vertikalstrahlung werden in Abb. 35 aufgezeigt. Im Meßzeitraum kommt es zu stärkeren Vertikalstrahlungen auf die Doppelfassade in den Wintermonaten, in den Sommermonaten überwiegt dagegen erwartungsgemäß die Globalstrahlung. Eine direkte Abhängigkeit zu den Fassadenobertemperaturen (s. Abb. 23) kann nicht festgestellt werden.

Bei der prozentualen Darstellung der Verteilung der Strahlungsstärken (Global- bzw. Vertikalstrahlung auf den drei Teil- Fassadenflächen) im Meßzeitraum (s. Abb. 36) kommt es im Bereich ab 440 W/m<sup>2</sup> zu einer Annäherung der Meßwerte. Bezüglich einer von der Vertikalen abweichenden Orientierung der Fassadenfläche sollten die jahreszeitlichen Abhängigkeiten (s. auch Abb. 35) Berücksichtigung finden.

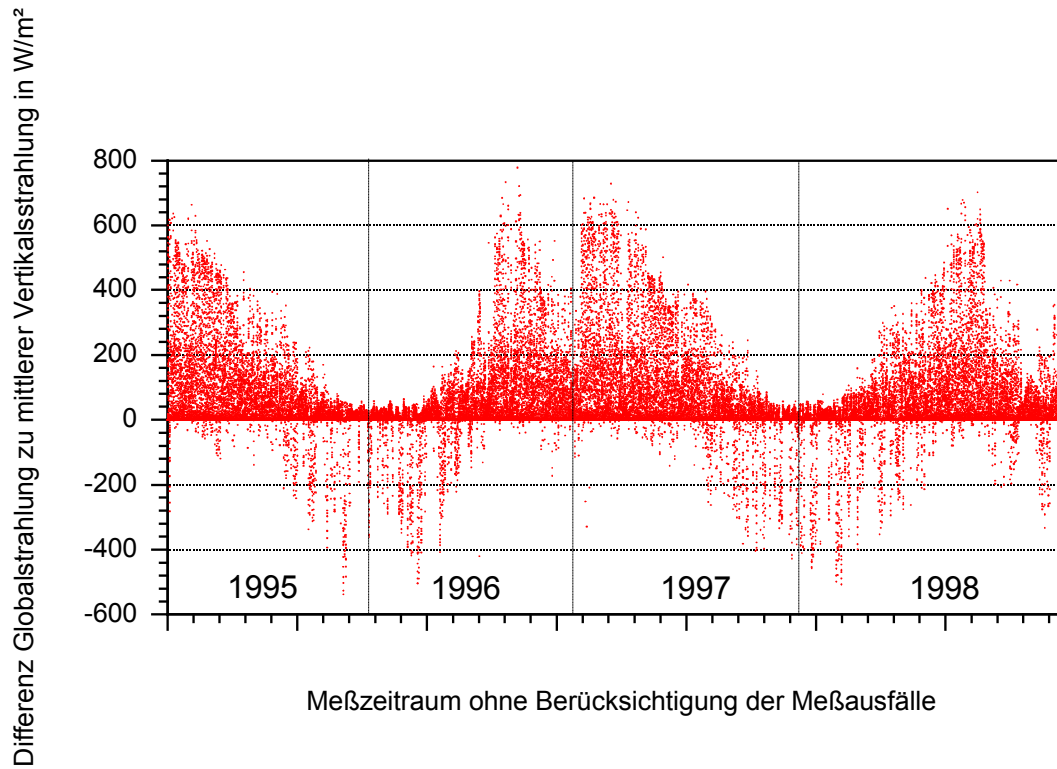


Abb. 35: Häufigkeitsdarstellung Differenzen der Globalstrahlung zur mittleren Vertikalstrahlung in  $W/m^2$ .

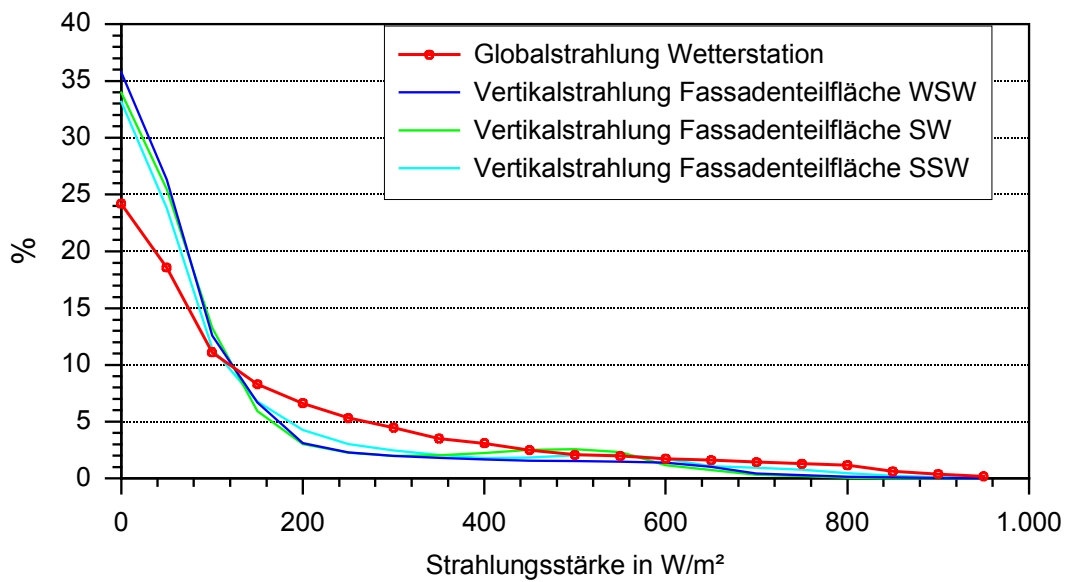


Abb. 36: Darstellung Verteilung der Strahlungsstärken im Meßzeitraum.

### 3.1.3 Luftvolumenströme

Zur Untersuchung der Volumenströme bzw. Strömungsverhältnisse in der Doppelfassade wurden wie in Abschnitt 2.7 beschrieben, sieben Thermo- Anemometer installiert. Über den eingebrachten Meßfühler im Kanal zur Ablüftung der Vertikalschächte und Zuluftzuführung in die Lüftungsanlage des Gebäudes (s. Abb. 17, Tab. 3) kann die Gesamtlaufzeit des Fassadenventilators über den Meßzeitraum ermittelt werden (s. Abb. 37). Aufgrund der vorgegebenen Randbedingungen aus der Gebäudeleittechnik (GLT) kam es im gesamten Erfassungszeitraum zu einer fast 18 % en Laufzeitdauer des Fassadenlüfters.

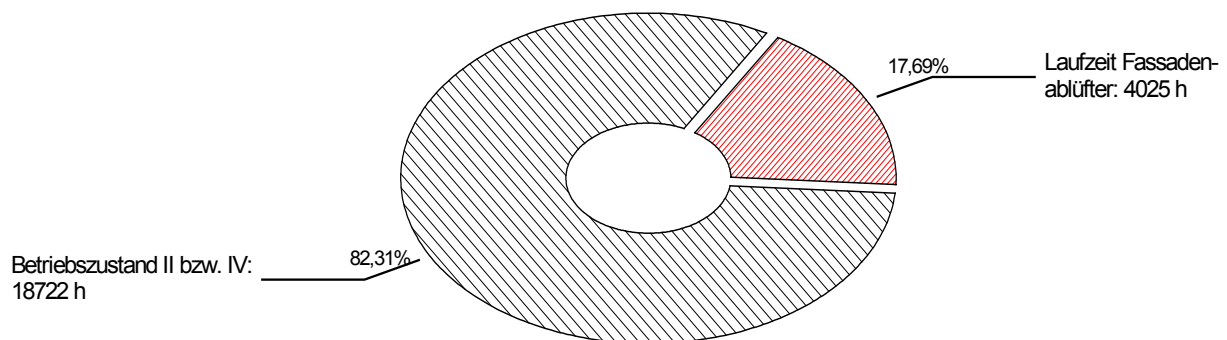


Abb. 37: Erfassung der Gesamtlaufzeit des Fassadenablüfters im Meßzeitraum.

Die gemessenen Volumenströme des Fassadenventilators lagen während des Betriebes zwischen ca. 500 und 1025 m<sup>3</sup>/h (s. Abb. 38). Als durchschnittliche Förderleistung wurden 763 m<sup>3</sup>/h ermittelt. Die geplante Gesamtförderleistung der Lüftungstechnischen Anlage von ca. 6170 m<sup>3</sup>/h konnte somit um 8-16% durch Fassadenluftanteile (Frischluftgewinnung) unterstützt werden. Die Gesamtförderrate über den Fassadenzwischenraum lag im Meßzeitraum (07/95-10/98) bei über 3,071 Millionen m<sup>3</sup>, dies entspricht einer durchschnittlichen täglichen Laufzeit des Fassadenlüfters von rund 4,25 h. Im Zusammenhang mit dem Überhitzungsschutz der Doppelfassade (s. Abschnitt 2.4, Tab. 2) kam es zu Beginn des Nutzungszeitraumes des Gebäudes bei einer mittleren Fassadentemperatur von über 45°C (Steuerung durch die GLT) zu einer unterstützend motorischen Zwangsentlüftung der Doppelfassade. Über eine entsprechende Klappensteuerung in der Lüftungsanlage wurde die Fassadenluft direkt als Fortluft abgeführt. Im Zeitraum wurden hierbei in mehr als 159,5 h ca. 145.000 m<sup>3</sup> (ca. 4,7% an der Gesamtförderleistung des Fassadenablüfters) ohne weitere Verwendung im Gebäude motorisch abgeführt.

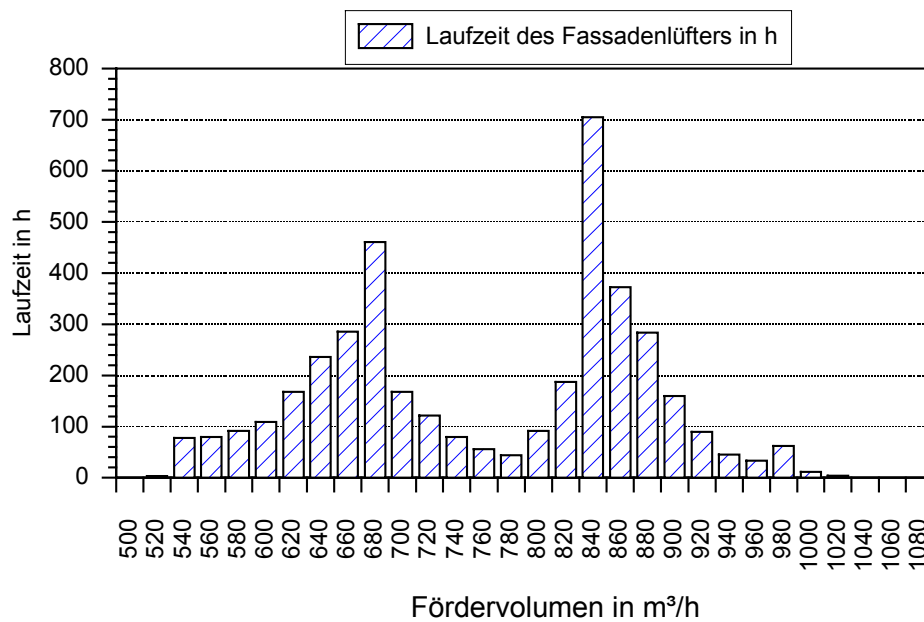


Abb. 38: Erfassung der Laufzeit des Fassadenablüfters im Meßzeitraum.

Die in Abb. 38 erkennbaren zwei Förderspitzen (bei 680 und 840 m³/h) resultieren u. a. auch aus einer nachträglichen Anpassung der Volumenstromregler in der Lüftungsanlage an die Nutzungsbedingungen des Gebäudes. Es konnten dadurch verbesserte Raumluftzustände im Gebäude erreicht werden.

In Abb. 39 werden die kumulierten Tageslaufzeiten des Ablufventilators dargestellt. Demnach gibt es zwei Förderspitzen: um ca. 12.00 Uhr bzw. um ca. 15.30 Uhr. Die Nutzung der Zuluftvorerwärmung durch die Doppelfassade korreliert mit den Hauptnutzungszeiten des Gebäudes, die in der Regel zwischen 8.00 Uhr und 22.00 Uhr liegen.

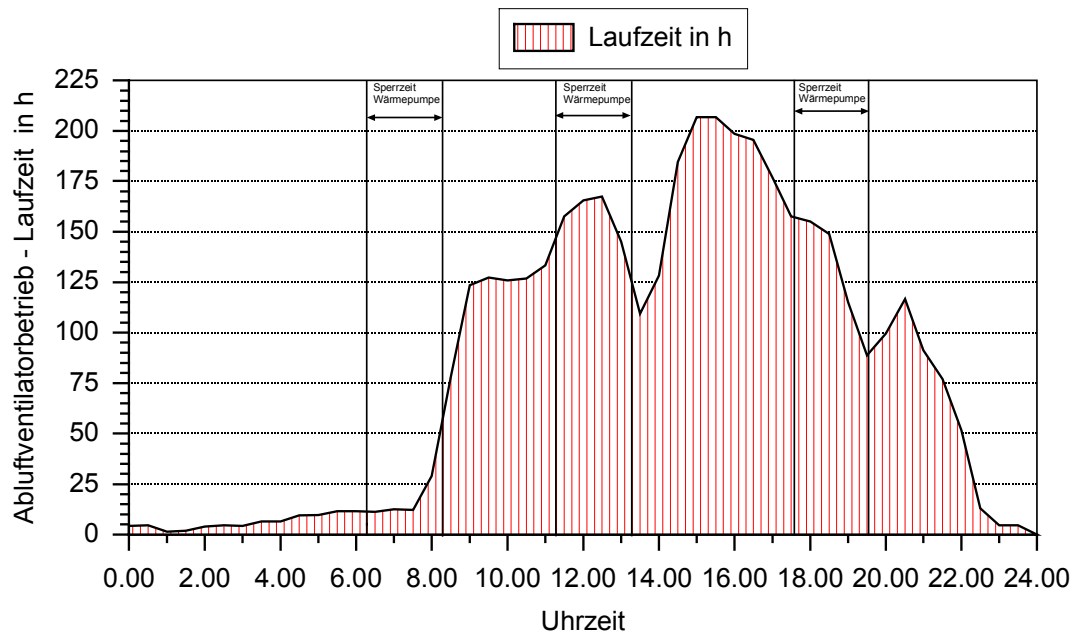


Abb. 39: Kumulierte Tageslaufzeiten Fassadenablüfter im Meßzeitraum.

Während des Abluftventilatorbetriebes treten in der Doppelfassade mittlere Luftwechselzahlen von 10-130 /h auf. Die dem Abluftventilator naheliegenden Fassadenteile (Südwestseite) weisen einen wesentlich höheren Luftwechsel auf (s. Abb. 40).

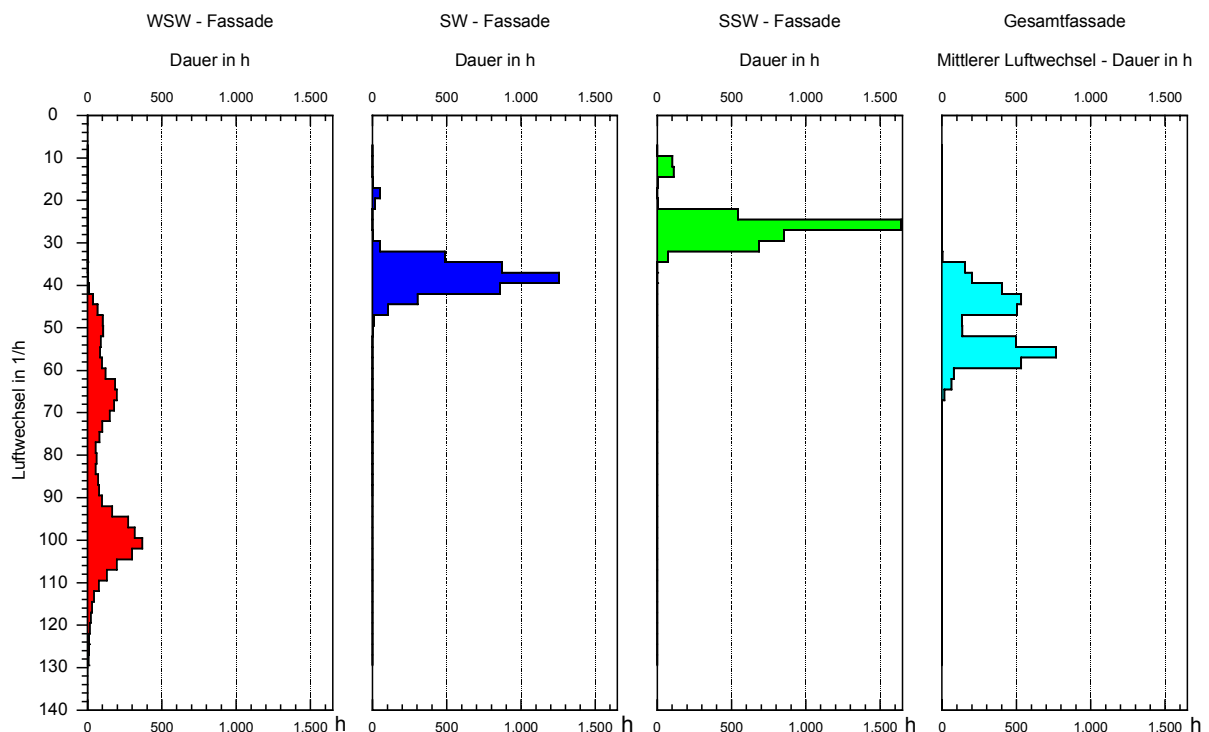


Abb. 40: Mittlere Luftwechselzahlen in 1/h während des Abluftventilatorbetriebes.

Bei der freien Hinterlüftung auf der Südfassade im Vertikalschacht 3 (VS 3) konnten maximale Luftwechselzahlen von ca. 450 – 600 /h meßtechnisch erfaßt werden (s. Abb. 41).

Diese Werte entsprechen einer Fassaden- Luftgeschwindigkeit von ca. 1,1 m/s. Die durchschnittliche Fassaden- Luftgeschwindigkeit lag im Meßzeitraum bei 0,16 m/s, der dazu entsprechende mittlere Luftwechsel bei rund 95 /h. Während des Abluftventilatorbetriebes (Betriebszustand I und III, vgl. auch Tab. 2) lagen die Luftwechselzahlen für den Vertikalschacht im Bereich zwischen 85 – 230 /h (dazugehörige Fassaden- Luftgeschwindigkeit: 0,14 – 0,38 m/s). Dies entspricht einer mittleren Fassaden- Luftgeschwindigkeit von 0,283 m/s und einem mittleren Luftwechsel von 170 /h während des Fassadenlüfterbetriebes.

Dagegen kommt es im Bereich des oberen Fensterkastenschachtes auf der Südfassadenseite zu Strömungsgeschwindigkeiten, die in der Regel unter 0,1 m/s liegen und damit an die Meßbereichsgrenze des eingebauten Meßfühlers (Thermo - Anemometer) stoßen.

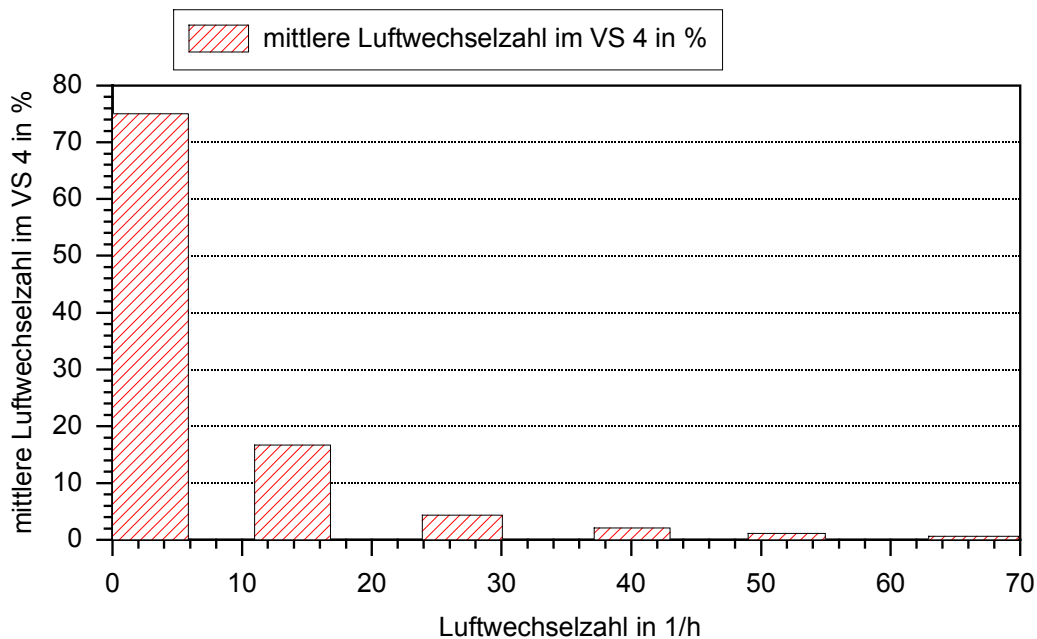


Abb. 41: Mittlere Luftwechselzahlen (Darstellung bis 70 /h) im Vertikalschacht auf der Südseite – Freie Hinterlüftung.

## 3.2 Auswertung der Meßdaten im Meßzeitraum 07/1995 - 10/1998 – maschinelle Ablüftung der Doppelfassade

### 3.2.1 Auswertung der Temperaturverhältnisse (Zuluftvorerwärmung) während des Abluftventilatorbetriebes

Die Frage nach der Zuluftvorerwärmung durch die hinterlüftete Doppelfassade muß je nach Fassadenbetriebszustand (s. Abschnitt 2.4) untersucht werden. In Abb. 42 sind für den Betriebszustand I und III die Temperaturdifferenzen zwischen der Außenlufttemperatur und der Fassadenablufthtemperatur über den Meßzeitraum sortiert nach ansteigender Förderleistung dargestellt.

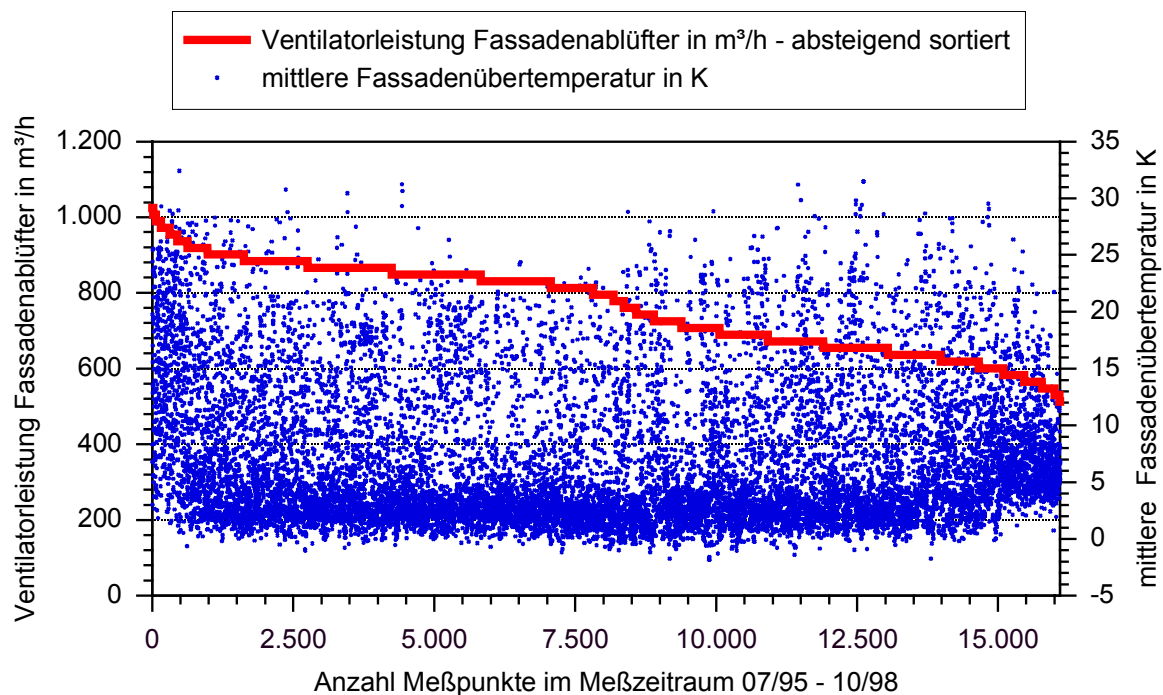


Abb. 42: Häufigkeitsverteilung der mittleren Fassadenübertemperaturen in Abhängigkeit der Ventilatorleistung des Fassadenablüfters im Meßzeitraum.

Beim Ansaugen von Frischluft durch die Doppelfassade kommt es auch zu Temperaturdifferenzen zur Außenlufttemperatur, die im negativen Bereich (Untertemperaturen) liegen. Sie resultieren u. a. aus den Anfahrprozessen des Abluftventilators (baukonstruktive Eigenschaften, Lage der Zuluftöffnung u. ä.) und den meteorologischen Randbedingungen. Insgesamt wurden in ca. 1% der Lüfterlaufzeit (ca. 40 h von ca. 4025 h Gesamtlaufzeit) Zustände meßtechnisch erfaßt, an denen die zugeführte Fassadenlufttemperatur unter der gemessenen Außentemperatur lag. Im folgenden werden die Häufigkeiten der mittleren Fassadenübertemperaturen während des Fassadenlüfterbetriebes dargestellt (Abb. 43).

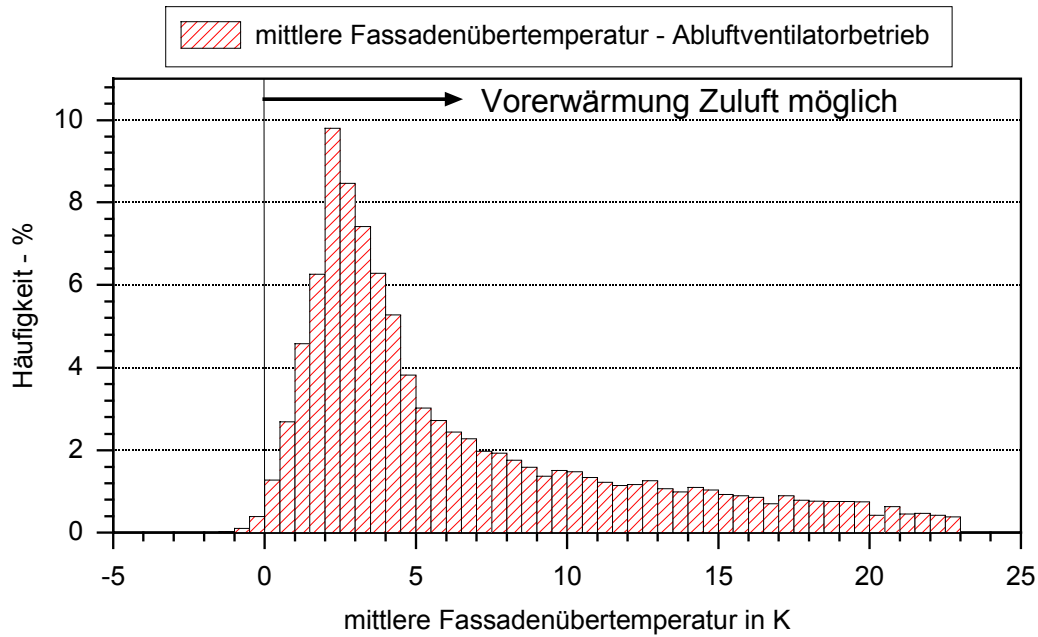


Abb. 43: Dauer mittlerer Fassadenübertemperaturen im Meßzeitraum bei Fassadenlüfterbetrieb.

Ähnlich wie bei der Darstellung der Übertemperaturhäufigkeit in der Doppelfassade (s. Abb. 24) erfolgte im Meßzeitraum die Zuluftvorerwärmung schwerpunktmäßig im Bereich zwischen 2 und 5 K. Übertemperaturen größer als 20 K treten parallel zu sehr hohen Vertikal- Strahlungen auch im Winterzeitraum auf.

### 3.2.2 Wärmeleistungen der Doppelfassade für die Zuluftvorerwärmung

In Abb. 44 werden die Häufigkeiten der gemessenen Wärmeleistungen der Fassadenablufte mit ansteigender Ventilatorleistung gegenüber Außenluftansaugung aufgezeigt. Die durchschnittliche Leistung der Doppelfassade lag bei 1736 W, wobei während der Heizperiode maximale Leistungen bis 10 kW erreicht wurden. Der lüftungstechnischen Anlage im Gebäude wurden im Meßzeitraum über die Fassadenluftansaugung ca. 6.989 kWh zugeführt. Der Deckungsbeitrag am Gesamtheizenergiebedarf des Gebäudes durch die Fassadenabluftnutzung liegt damit im Bereich unter 2 %.

In Abb. 45 werden mit fallender Außentemperatur die durch den Fassadenablüfter ins Gebäude geführten Wärmeleistungen dargestellt. Bei Außentemperaturen  $< 10^{\circ}\text{C}$  kommt es zur Verschiebung im Bereich zwischen 3 und 6 kW.



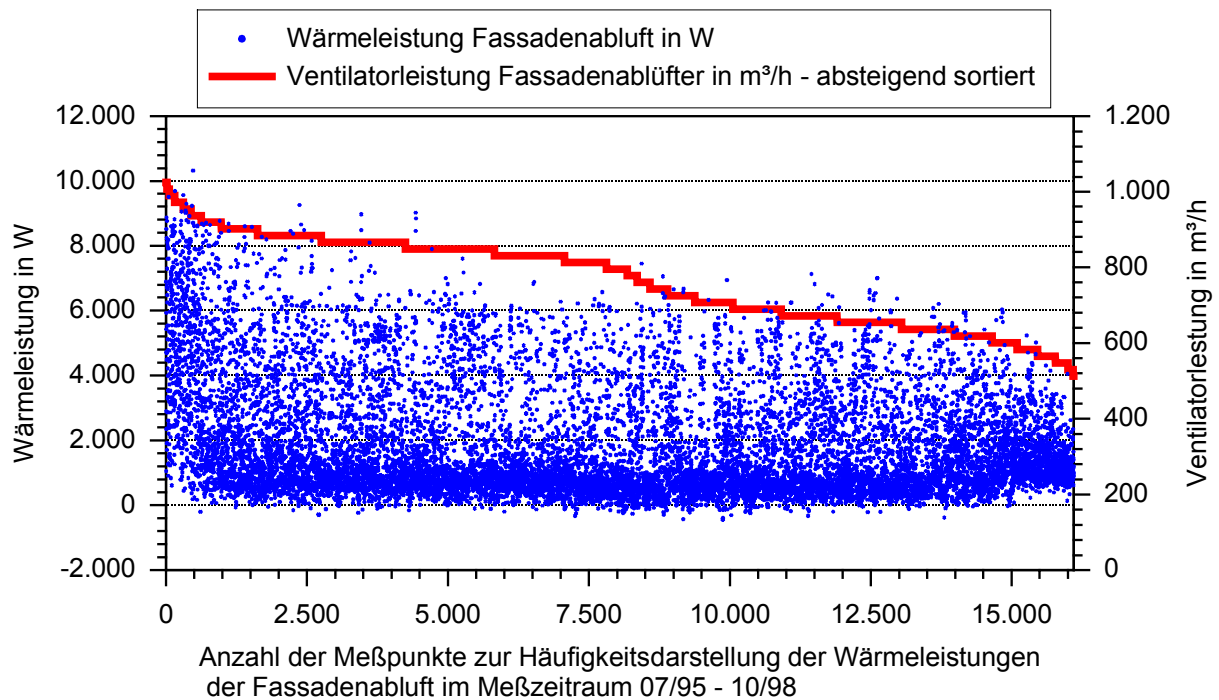


Abb. 44: Häufigkeitsdarstellung der Wärmeleistungen der Fassadenabluft in W in Abhängigkeit von der Fassadenventilatorleistung (absteigend sortiert) in m³/h.

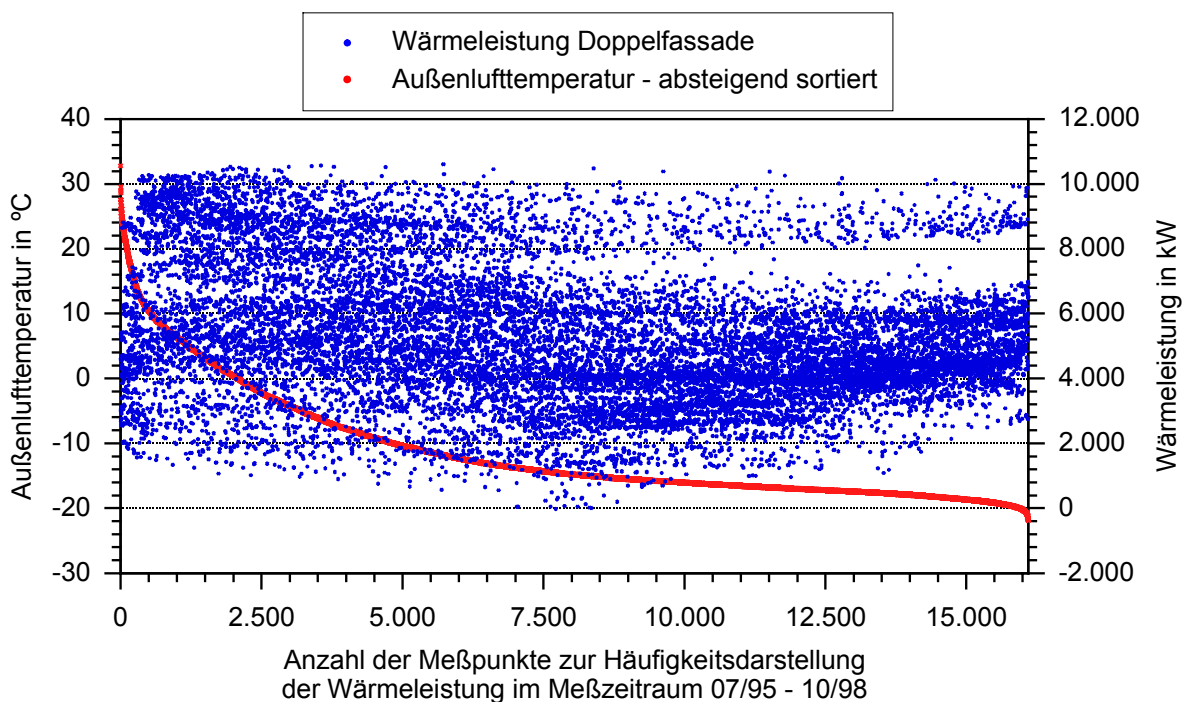


Abb. 45: Häufigkeitsdarstellung der Wärmeleistungen der Fassadenabluft in Abhängigkeit von der Außentemperatur während Abluftventilatorbetrieb.

Eine Häufigkeitsverteilung der durch den Fassadenabluftventilator in die Lüftungsanlage des Gebäudes zugeführten Wärmeleistungen ist in Abb. 46 ersichtlich. Ca. 14% der aufgeführten Meßwerte liegen bei 600 W. Hierbei wird aber auch das Leistungsspektrum der Doppelfassade offensichtlich. Im vorliegenden Untersuchungsfall sind lüftungs- und

steuerungstechnische Möglichkeiten zu finden, wie Wärmeleistungsbereiche von  $> 0$  bis 10 kW in die Lüftungs- und heiztechnischen Anforderungen effizient eingebunden werden können. Aufgrund der zeitlich sehr starken Leistungsschwankungen der Doppelfassade sollten An- und Abfahrprozesse der Wärmeerzeugungseinrichtungen mit den angekoppelten Wärmeverteilungssystemen im Gebäude rasch und flexibel reagieren können.

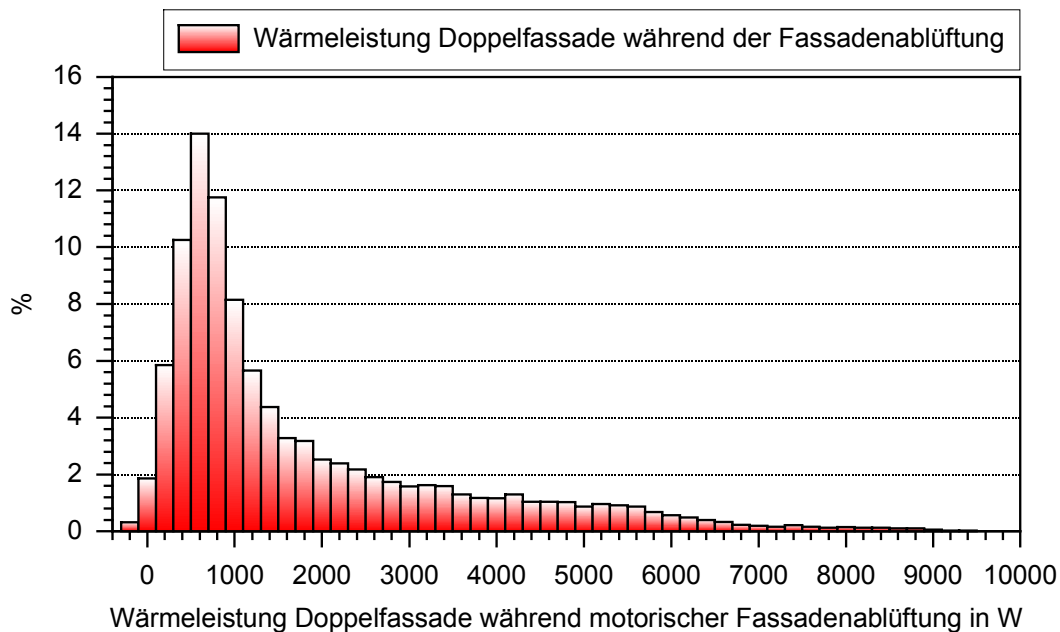


Abb. 46: Häufigkeitsdarstellung – zugeführte Wärmeleistung Fassadenabluft im Meßzeitraum.

In Abb. 47 wird die Heizperiodenabhängigkeit der Zuluftvorerwärmung durch die Doppelfassade dargestellt. Im aufgenommenen Zeitraum ist erkennbar, daß besonders während der Heizperiode die Zuluftvorerwärmung über die Doppelfassade durch den Fassadenablüfter realisiert wird. Außerhalb der Heizperiode spielt die Zuluftvorerwärmung hauptsächlich zu Entfeuchtungszwecken der Frischluftzuführung eine Rolle. Es stellt sich in der Heiz- als auch in der Sommerperiode eine fallende Tendenz der Nutzungsdauer der Fassadenabluft ein. Die Ursachen dafür konnten nicht umfassend geklärt werden. Einerseits trat mit Nutzungsbeginn des Gebäudes (Bundesgartenschau 1995) eine überdurchschnittliche Belastung durch einen sehr hohen Besucherstrom ein, andererseits wurden aber auch bis 1997 Verbesserungen an der Heizungs- und Lüftungstechnischen Steuerung und Regelung vorgenommen, die eine verbesserte anlagentechnische Fahrweise des Gebäudes zur Folge hatten. Nicht zuletzt tragen sicherlich auch die realisierten Auslastungskennzahlen des Gebäudes zu dieser sinkenden Tendenz bei.

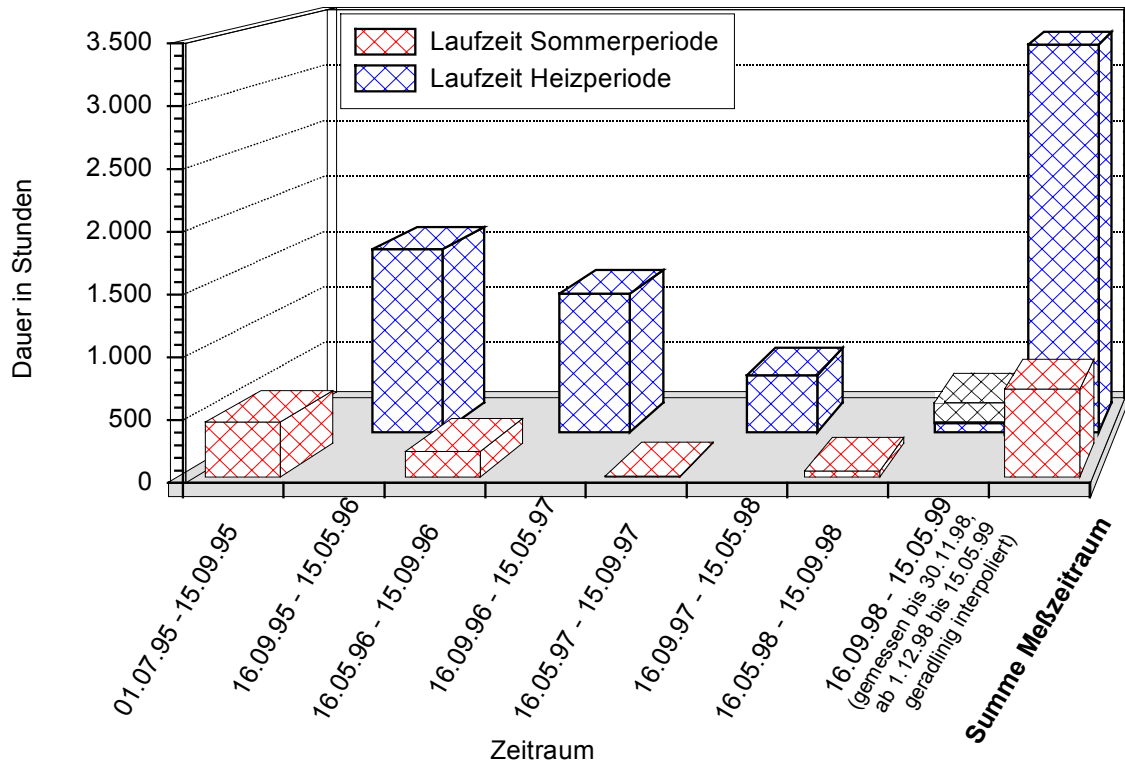


Abb. 47: Laufzeit Fassadenlüfter während Heizperiode und Sommerbetrieb im Meßzeitraum.

Die Dauer der Fassadenübertemperaturen während des Fassadenlüfterbetriebs im Vergleich zur Heiz- bzw. Sommerperiode im Meßzeitraum werden in Abb. 48 aufgezeigt. In beiden Perioden wird die Hauptnutzung bis ca. 5 K Übertemperatur realisiert. Zu einer Angleichung kommt es bei höheren Übertemperaturen ab 10 bis 22 K.

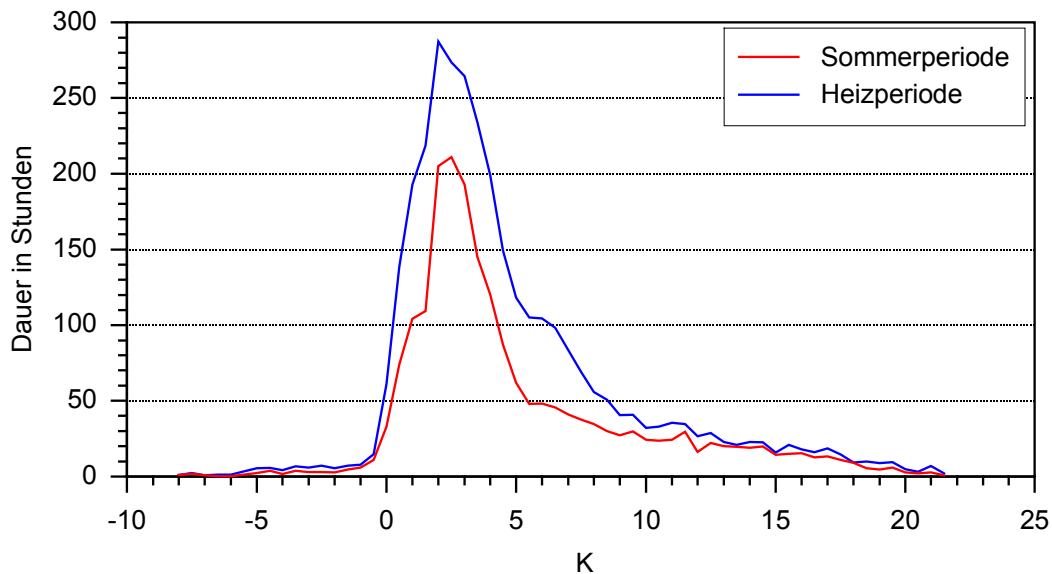


Abb. 48: Vergleich von Heiz- und Sommerperiode: Häufigkeiten Übertemperaturen in K während des Fassadenabluftbetriebes.

Im Zusammenhang mit Abb. 40 gibt es während des Abluftventilatorbetriebes eine auf alle Teilflächen verteilte Wärmeleistungserzeugung (s. Abb. 49). Entsprechend den Randbedingungen (Vertikalstrahlung, Hinterlüftung) kommt es zur Leistungsverschiebung in den Teilflächen.

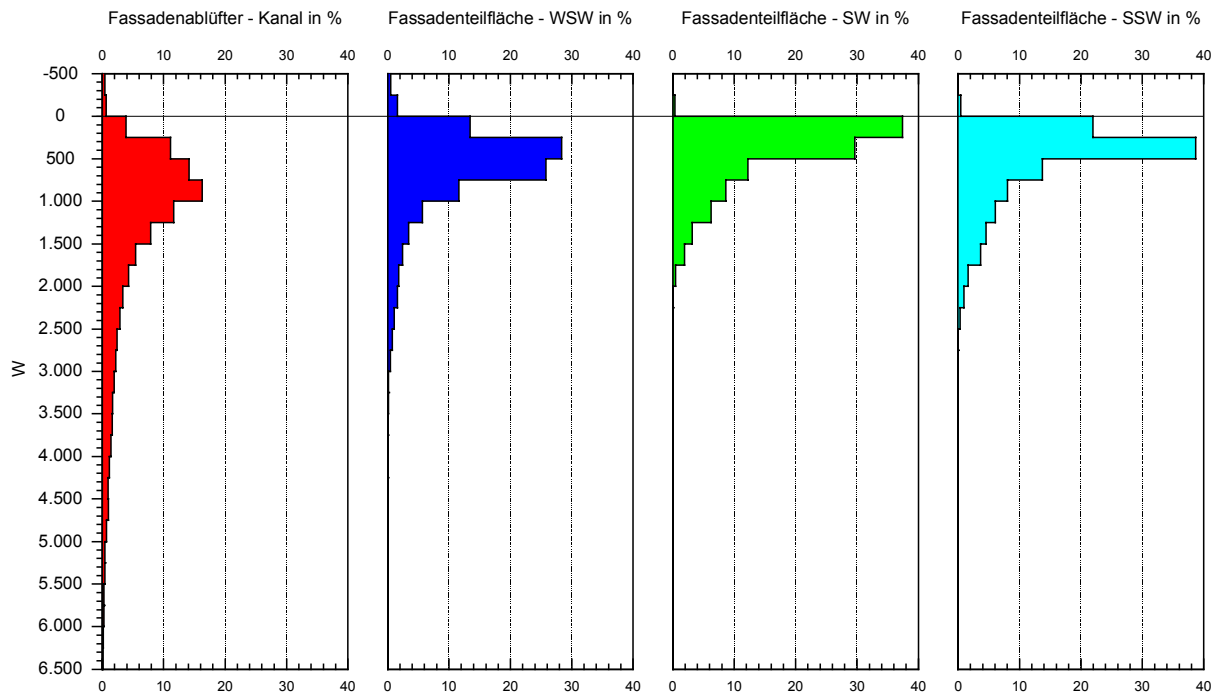


Abb. 49: Darstellung der Wärmeleistung der Doppelfassade – Teilfassadenflächen bei Abluftventilatorbetrieb.

In Abb. 50 werden die Fassadenübertemperaturhäufigkeiten während der motorischen Ablüftung dargestellt. Auch hier ist eine Verschiebung in Richtung SSW-Fassadenfläche erkennbar.

Durch die stärkere motorische Ablüftung der WSW- Teilfassadenfläche (s. Abb. 40) ist der prozentuale Anteil der sich einstellenden Fassaden- Untertemperaturen, wie in Abb. 49 ersichtlich, gegenüber den anderen Fassaden- Teilflächen größer. In Abb. 51 wird der monatliche Anteil an auftretenden Untertemperaturen gezeigt. In den Wintermonaten kommt es zu einem Anstieg der Fassaden- Untertemperaturhäufigkeiten, der bereits in den Sommermonaten beginnt.

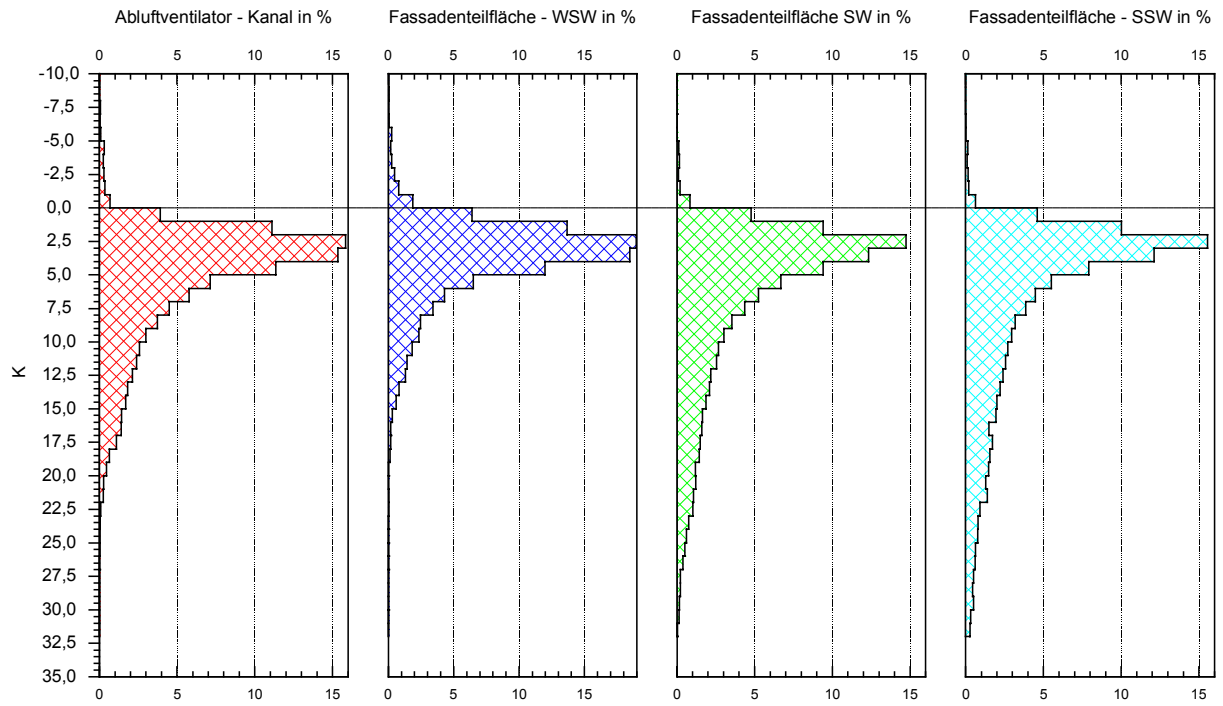


Abb. 50: Darstellung der Übertemperaturen der Doppelfassade – Teilfassadenflächen bei Abluftventilatorbetrieb.

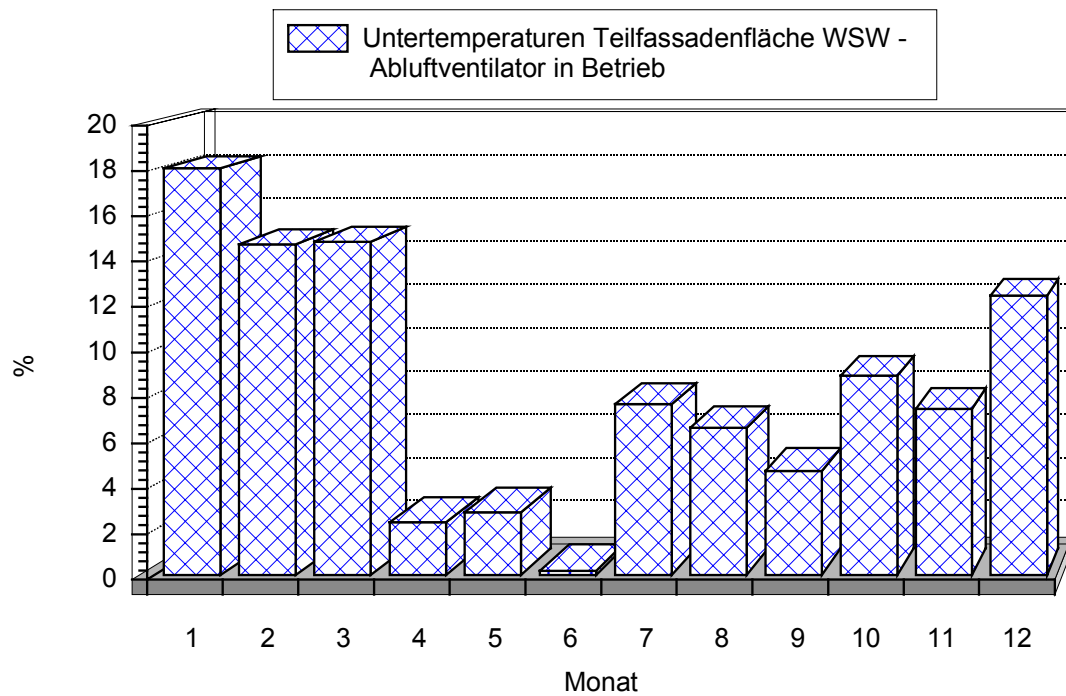


Abb. 51: Untertemperaturen der Teilfassadenfläche-WSW – Abluftventilator in Betrieb.

### 3.3 Untersuchung zu Temperaturschichtungen in der Doppelfassade

#### 3.3.1 Vertikale Temperaturschichtung

Entsprechend der eingebauten Temperaturfühler (s. Abb. 17) auf der Südseite der Doppelfassade können sowohl horizontale als auch vertikale Temperaturprofile erstellt werden. Die Häufigkeiten der vertikalen Spreizungen der Temperaturverhältnisse über den erfaßten Meßzeitraum sind in Abb. 52 gezeigt. Es tritt deutlich hervor, daß mehr als dreiviertel der im Meßzeitraum erfaßten Temperaturspreizungen zwischen 0 und 6 K liegen.

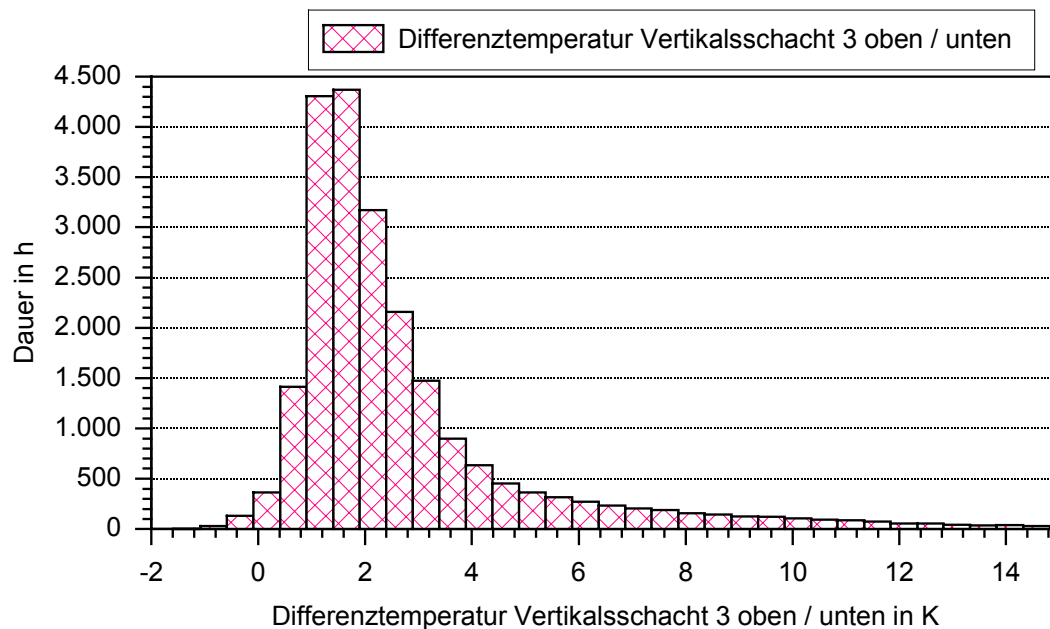


Abb. 52: Differenztemperatur Vertikalsschacht 3 oben/unten – Dauer im Meßzeitraum.

Die Untersuchung der Temperaturspreizungen der vertikalen Schichtung im Vertikalsschacht 3 der Doppelfassade in Abhängigkeit Tag/Nacht (s. Abb. 53) ergibt erwartungsgemäß eine Verschiebung beider Kurven. Im Nachtbereich liegt der Bereich zwischen 0 und 3 Kelvin, im Tagbereich dagegen zwischen 0 und 6 Kelvin. Der Zusammenhang zwischen Heiz- bzw. Sommerperiode wird in Abb. 54 aufgezeigt. Bemerkenswert ist der in der Heizperiode länger als in der Sommerperiode anhaltende Temperaturunterschied.

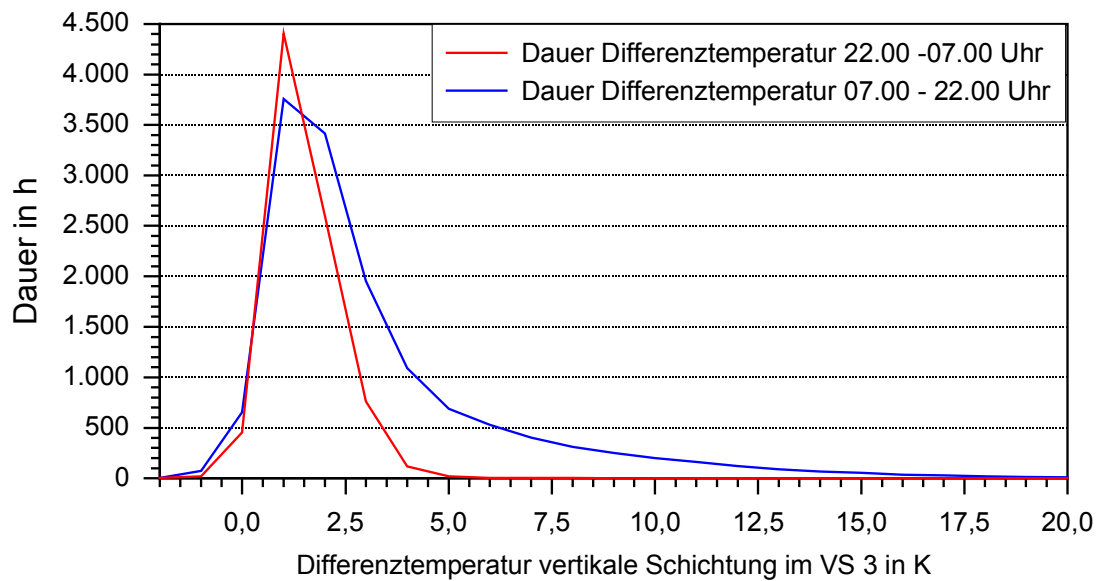


Abb. 53: Differenztemperatur Vertikalschacht 3 oben/unten – Tag/Nacht.

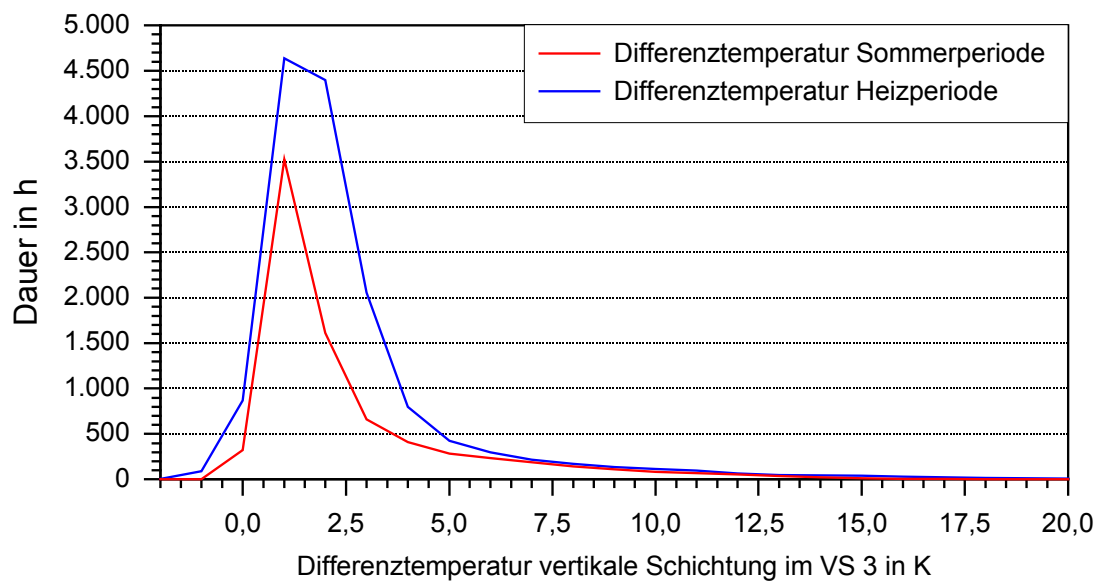


Abb. 54: Differenztemperatur Vertikalschacht 3 oben/unten – Heizperiode/Sommerperiode.

In Abb. 55 wird die vertikale Temperaturschichtung in Abhängigkeit der Vertikalstrahlung auf die Süd- Teilfassadenfläche dargestellt. Mit dem geringen Anstieg der Strahlungsleistung kommt es parallel zum Ansteigen der Differenztemperatur über die Höhe im Vertikalschacht 3. Der Zusammenhang zwischen motorischer Ablüftung und Differenztemperatur wird in Abb. 56 gezeigt. Auch bei nicht mehr meßbaren Volumenströmen treten größere Temperaturdifferenzen in vertikaler Richtung auf.

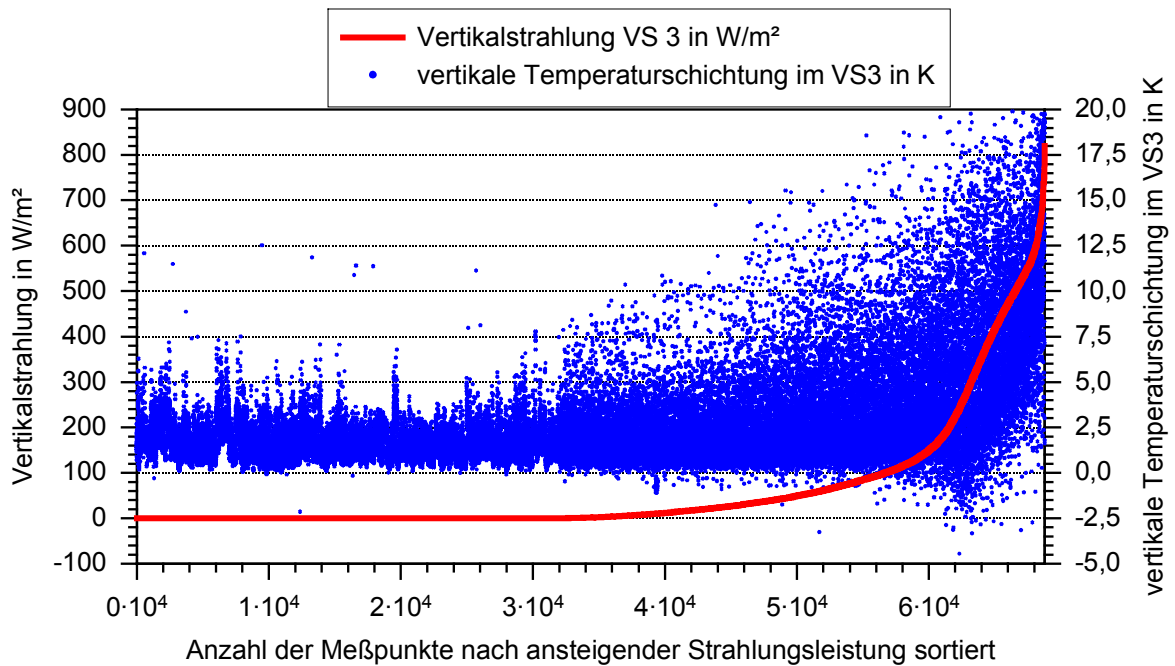


Abb. 55: Häufigkeitsdarstellung der vertikalen Temperaturschichtung im Vertikalschacht 3 in Abhängigkeit zur Einstrahlung.

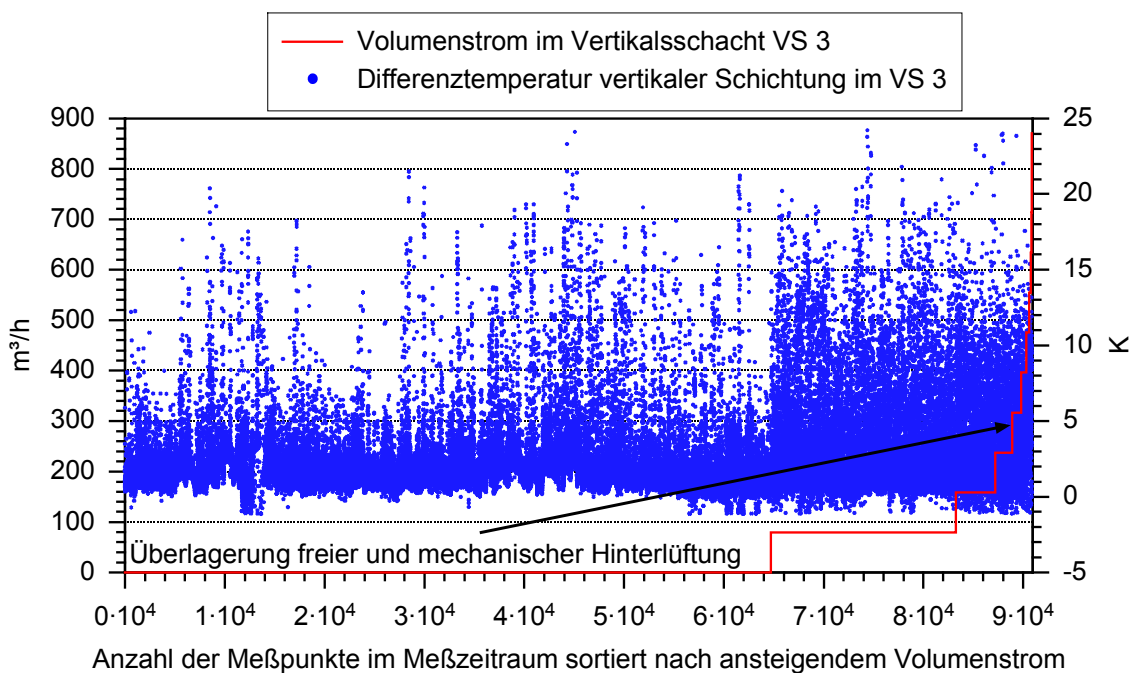


Abb. 56: Häufigkeitsdarstellung der vertikalen Temperaturschichtung im Vertikalsschacht VS 3 in Abhängigkeit der Hinterlüftung.

Eine Unterscheidung der Dauer der Differenztemperaturen in Abhängigkeit des Fassadenlüfterbetriebes wird in Abb. 57 gegeben. Auch hier kann festgestellt werden, daß der Fassadenlüfter im Bereich höherer Differenztemperaturen in Betrieb war.



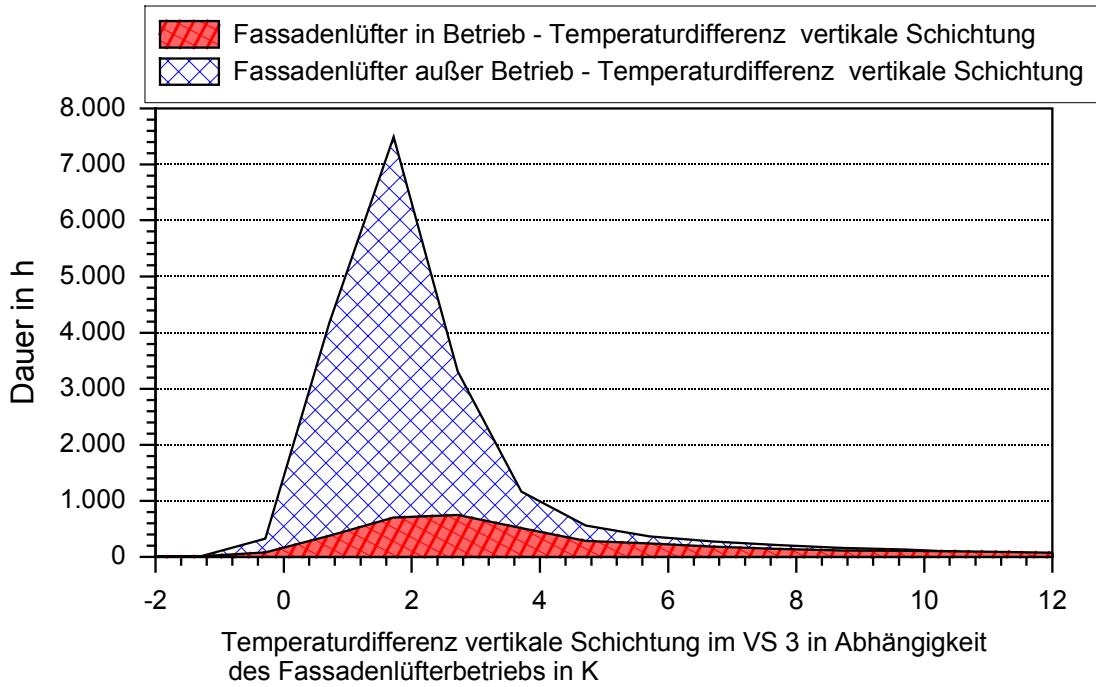


Abb. 57: Differenztemperatur vertikale Schichtung im Vertikalschacht 3 in Abhängigkeit der Betriebsart des Abluftventilators.

### 3.3.2 Horizontale Temperaturschichtung

Die horizontale Temperaturschichtung des Fassadenraumes wird im Vertikalschacht 3 (VS 3) und im Fensterkastenschacht (FK) erfasst (s. Tab. 3). In Abb. 58 werden beispielhaft für einen Sommertag die horizontale Erwärmungsphase (vormittags) und anschließende Abkühlungsphase (nachmittags) aufgezeigt. Über den gesamten horizontalen Fassadenquerschnitt tritt kein linearer Temperaturverlauf in der Außenwandkonstruktion auf (Indiz für ständige Hinterströmung der Doppelfassade).

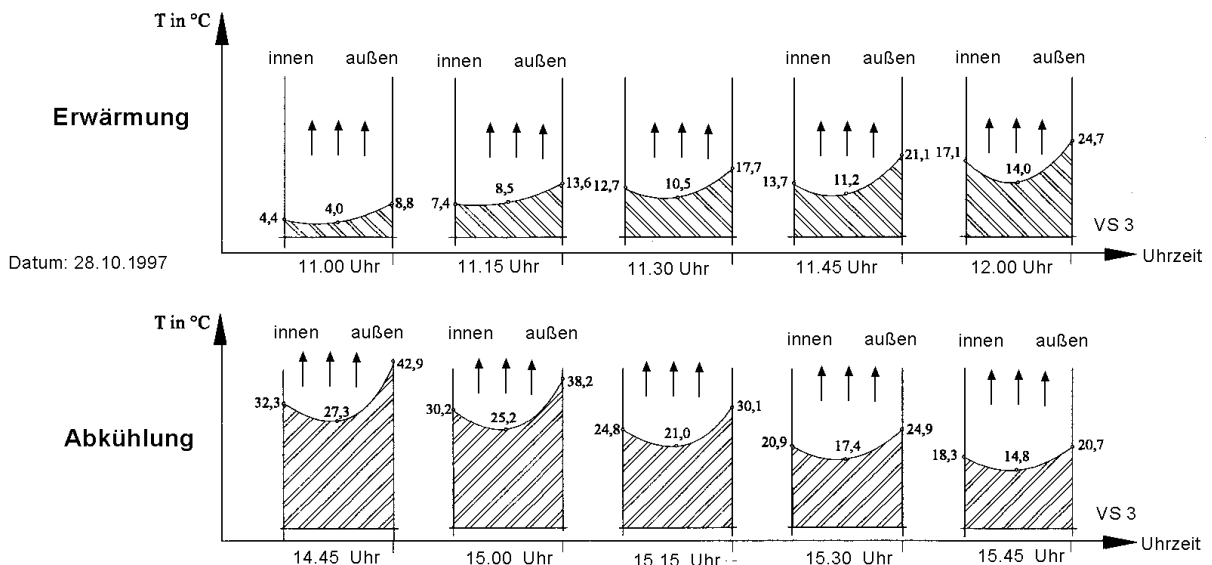


Abb. 58: Horizontales Temperaturprofil an einem Sommertag (Erwärmungsphase/Abkühlungsphase).

Die Vermutung, daß es eine Beeinflussung der nach außen liegenden Randströmung und damit der Temperatur durch die horizontal verlaufenden Riegelprofile gibt, wird hier bestätigt. Die Oberflächentemperaturen der Außenwandfühler liegen nicht mehr im Kernströmungsbereich. Hier findet man die höchsten Temperaturen im horizontalen Fassadenquerschnitt.

Die Häufigkeiten der Abweichungen zur Außentemperatur werden kumuliert in Abb. 59 dargestellt. Im Vertikalschacht treten zur äußeren Fassadenseite höhere Temperaturspreizungen auf, wogegen im Bereich des Fensterkastenschachtes die Innenseite höhere Werte aufweist. Ab ca. 8 K Übertemperatur im Fensterkastenschacht kommt es zu einer Angleichung der horizontalen Schicht- Temperaturhäufigkeiten. Deutlich erkennbar wird auch, daß im Vertikalschacht höhere Temperaturgradienten in horizontaler Richtung als im Fensterkastenschacht gemessen wurden.

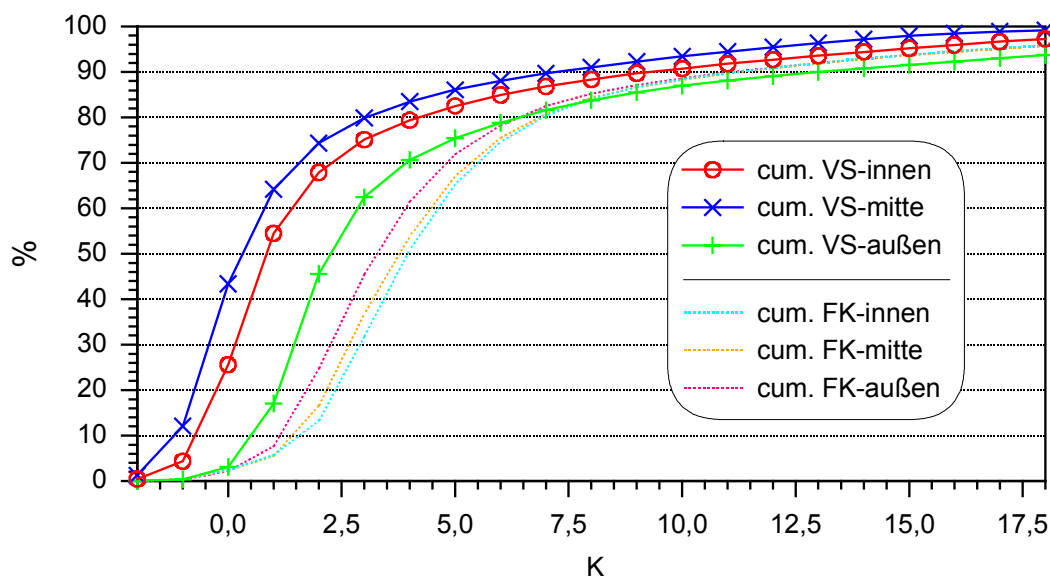


Abb. 59: Häufigkeitsdarstellung der Übertemperaturen im Fassadenzwischenraum kumuliert (Vertikalschacht/Fensterkastenschacht).

Typische Beispiele horizontaler Temperaturschichtung für einen Winter- und Sommertag im Vertikalschacht sind in Abb. 60, Abb. 61 und in Abb. 62, Abb. 63 dargestellt.

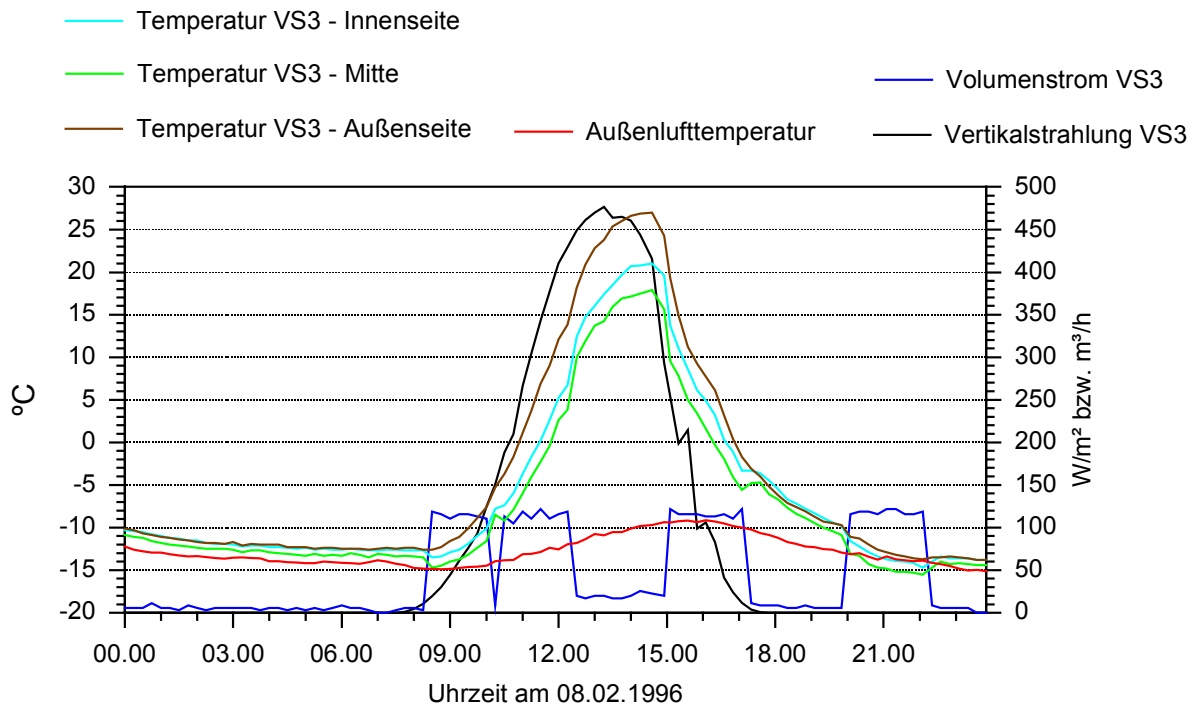


Abb. 60: Tagesverlauf Wintertag im Vertikalschacht 3 mit Volumenstromangabe.

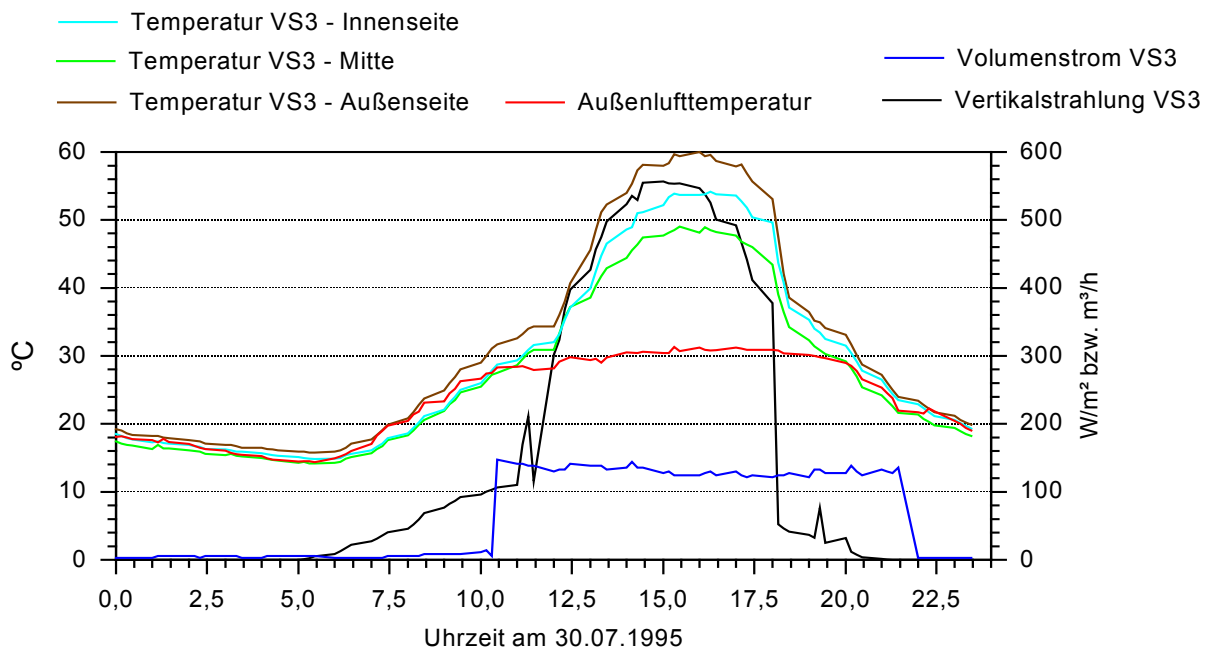


Abb. 61: Tagesverlauf Sommertag im Vertikalschacht 3 mit Volumenstromangabe.

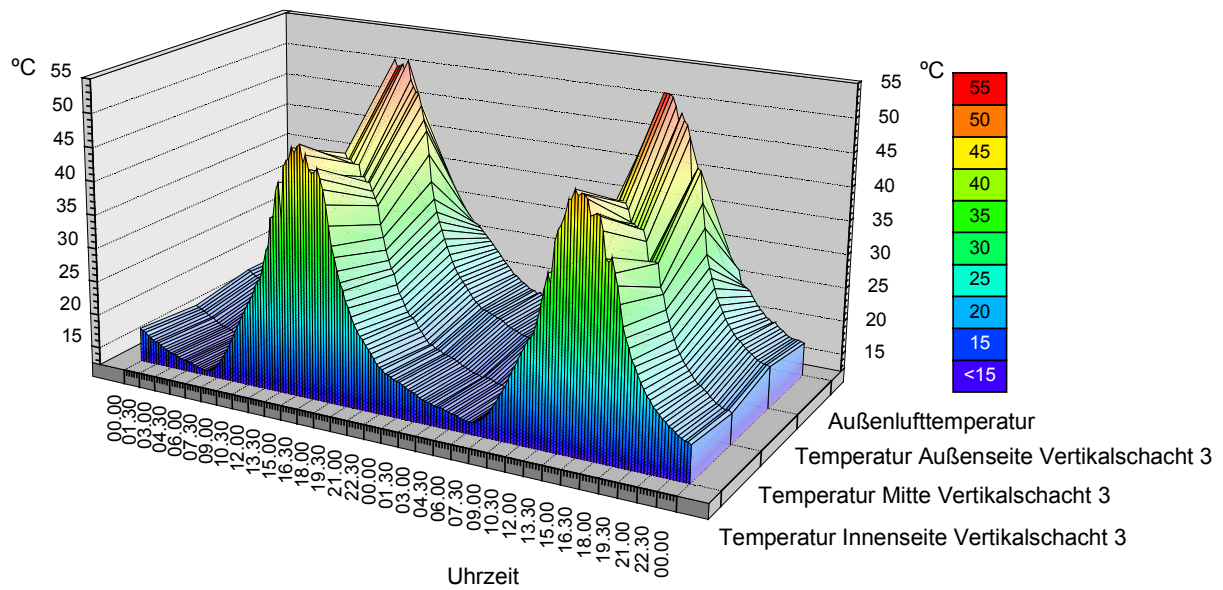


Abb. 62: Temperaturverhältnisse horizontale Schichtung im VS 3 vom 21.08. –22.08.1996 in Abhängigkeit zur Außentemperatur.

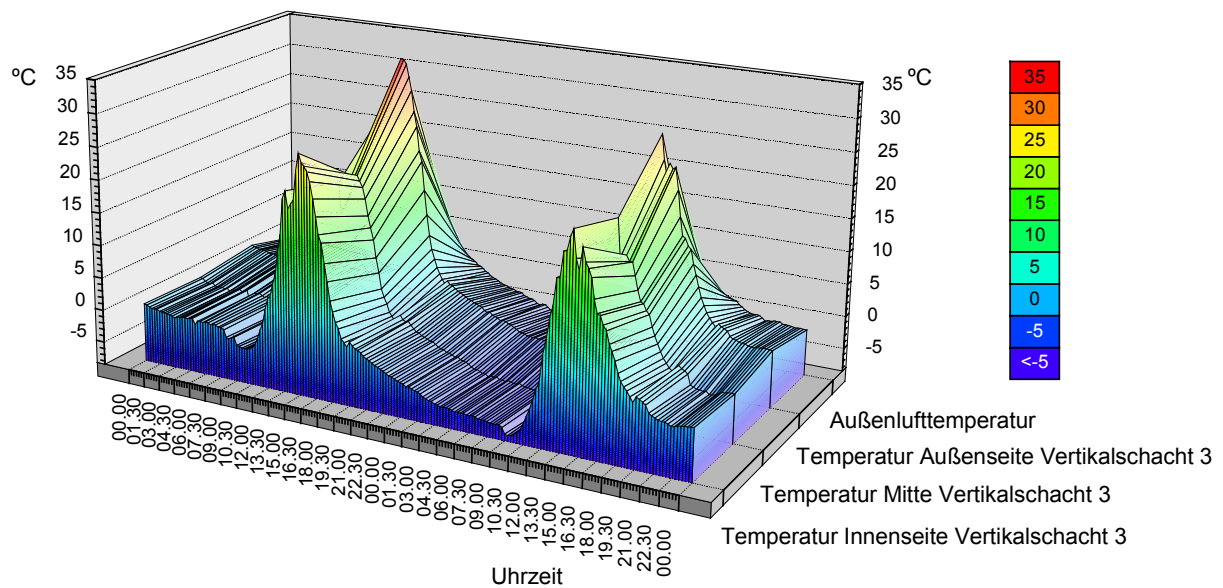


Abb. 63: Temperaturverhältnisse horizontale Schichtung im VS 3 vom 26.01. –27.01.1997 in Abhängigkeit zur Außentemperatur.

Eine Häufigkeitsdarstellung der horizontalen Temperaturschichtung über den Meßzeitraum findet sich in Abb. 64. Erkennbar wird, daß die Temperaturen im Vertikalschachtbereich gegenüber den Außentemperaturen im höheren Niveau verharren. Die größte Annäherung der horizontalen Temperaturverteilung zur Außentemperatur ist im Kernströmungsbereich zu finden.

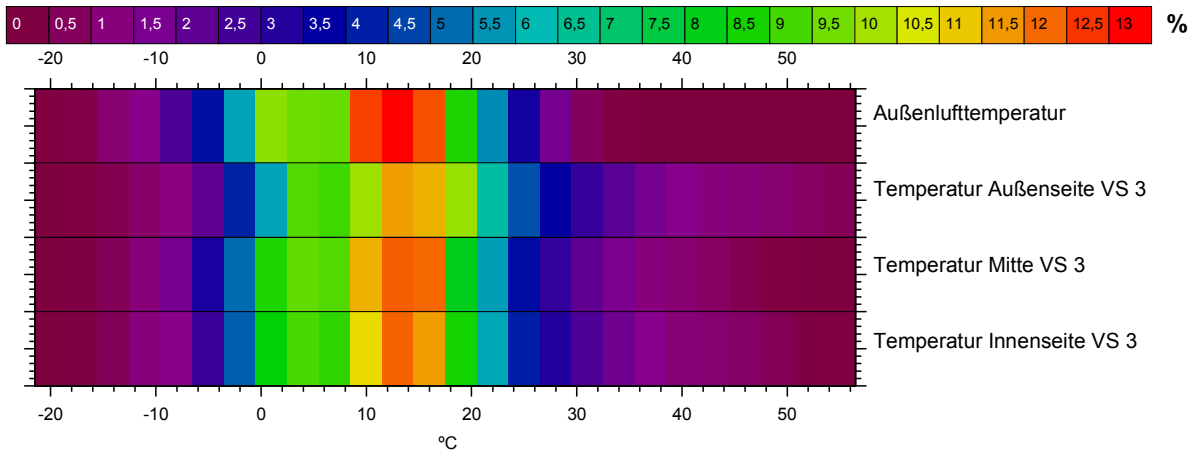


Abb. 64: Häufigkeitsdarstellung horizontale Temperaturschichtung im VS 3 in %.

Die Untersuchung der horizontalen Übertemperaturschichtung bezüglich Laufaktivität des Fassadenablüfters wird für den Vertikalschacht 3 in Abb. 65 und für den Fensterkastenschacht in Abb. 66 dargestellt. Es kommt hierbei zur Verschiebung der Temperaturen und damit zur Senkung des Temperaturniveaus innerhalb der Fassade.

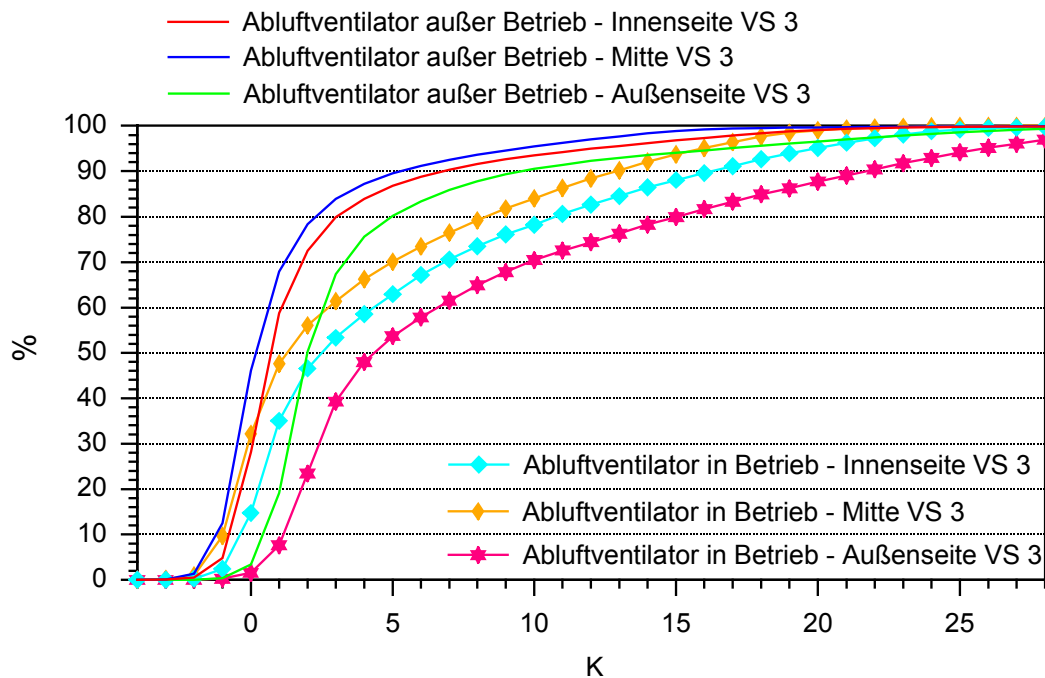


Abb. 65: Horizontale Übertemperaturschichtung kumuliert in Abhängigkeit Fassadenlüfterbetrieb im Meßzeitraum im VS 3.

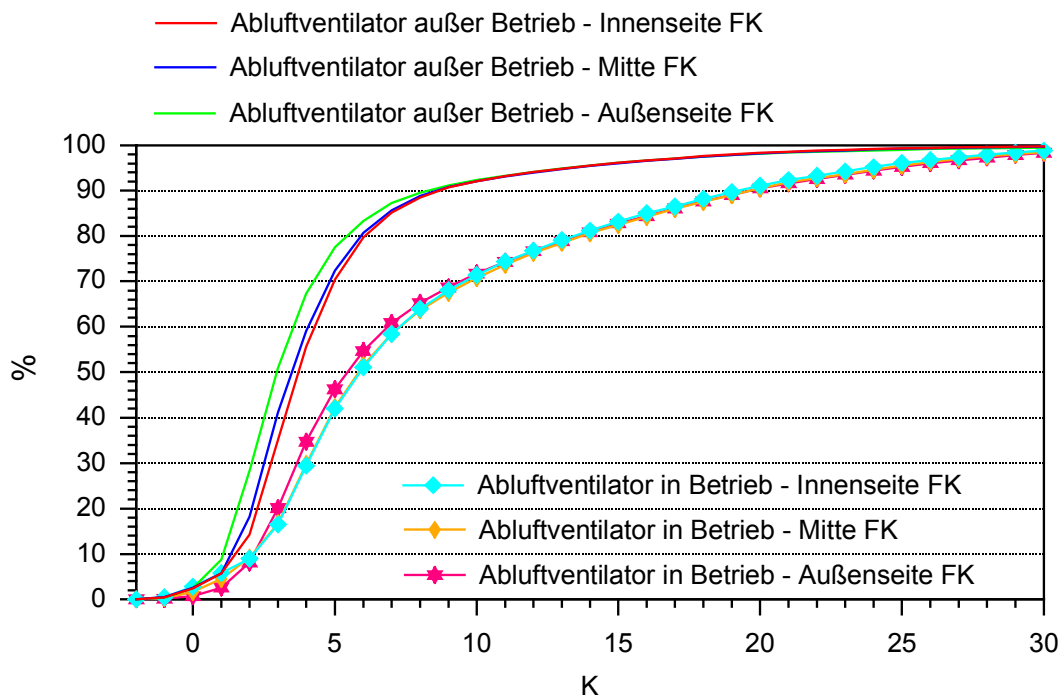


Abb. 66: Horizontale Übertemperaturschichtung kumuliert in Abhängigkeit vom Fassadenlüfterbetrieb im Meßzeitraum im FK.

### 3.4 Zusammenfassung der Meßergebnisse

#### 3.4.1 Betrachtungen zur Arbeitsweise des Fassadenablüfters

Am Beispiel der Doppelfassade sollen Lösungsansätze zur lüftungstechnischen Einbindung in das Regelsystem eines Gebäudes dargelegt werden. So sind z. B. in Abb. 67 die Übertemperaturen (mittlere Fassadentemperatur abzüglich der Außenlufttemperatur) als Meßpunkte in Abhängigkeit der Tageszeit im Meßzeitraum dargestellt. Zwischen ca. 9.30 Uhr und ca. 20.30 Uhr kommt es zur deutlichen Verschiebung und Erweiterung des Übertemperaturbereichs, gegen 14.00 Uhr werden die Maxima von über 36 K gemessen.

Es wurde eine Trennung in zwei Bereiche in der Abb. 67 vorgenommen und eine Übertemperaturhäufigkeitsdarstellung erarbeitet. Im Bereich II kommt es im Mittel zu Übertemperaturen zwischen -1 und 5 K, wogegen im Bereich I bis 20 K vorkommen (s. Abb. 68). Die Darstellung spricht dafür, daß bei nicht ausreichender Vorerwärmung der Frischluftzufuhr durch die Fassade (Untertemperaturen) der Abluftventilator außer Betrieb bleiben sollte.

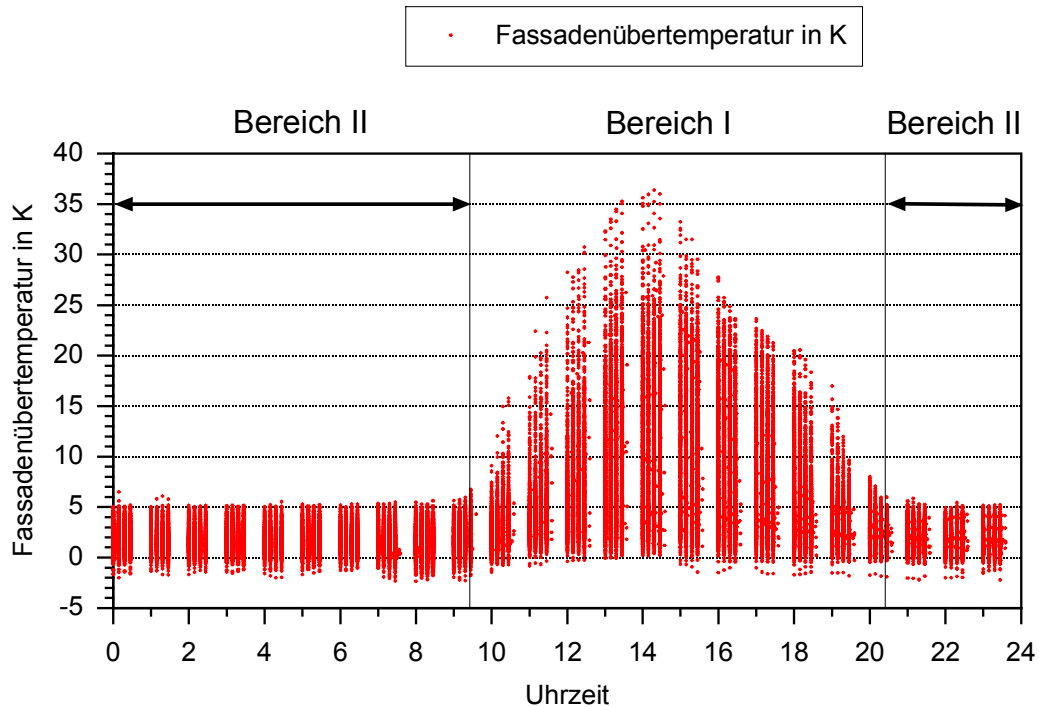


Abb. 67: Häufigkeitsverteilung der Fassadenübertemperaturen im Meßzeitraum in Abhängigkeit von der Tageszeit.

Dies erfordert im allgemeinen eine Auswertung der anliegenden Temperaturen zur Freischaltung der Zuluftgewinnung durch die Doppelfassade. Die Abb. 69 zeigt die Übertemperaturen  $> 5$  K in der Doppelfassade in Abhängigkeit der Tageszeit und des Monats im Meßzeitraum. Unabhängig von der Jahreszeit treten Übertemperaturen  $> 5$  K sowohl inner- als auch außerhalb der Heizperiode zwischen ca. 9.30 Uhr und ca. 21.30 Uhr auf, wobei in den Monaten Dezember und Januar auch außerhalb dieser Tageszeit geringfügige Anteile  $> 5$  K Übertemperatur auftreten.

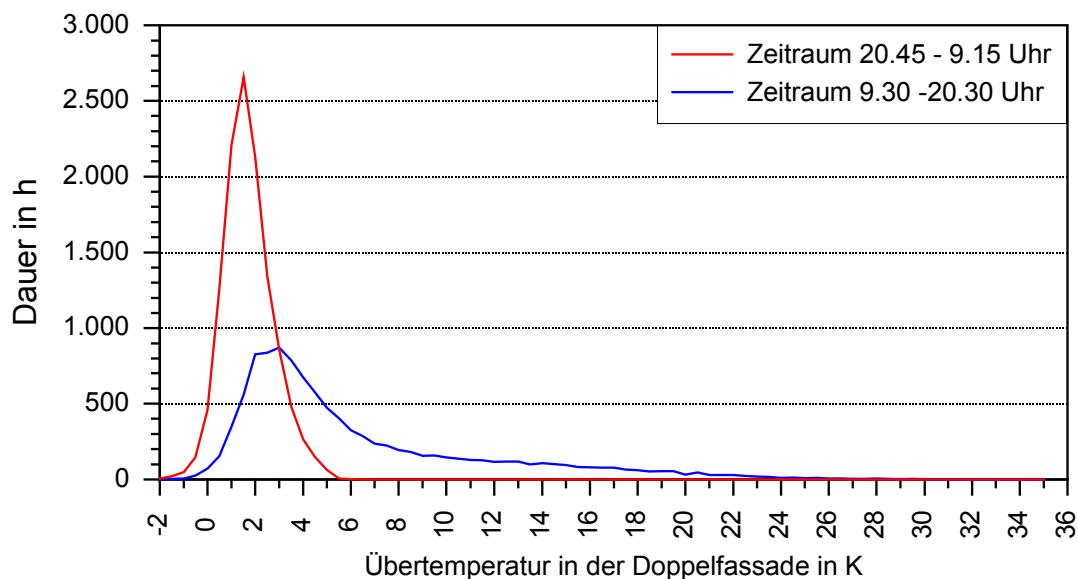


Abb. 68: Dauer der Übertemperaturen aus mittlerer Fassadentemperatur und Außenlufttemperatur im Meßzeitraum.

In den Sommermonaten ist die Übertemperaturhäufigkeit ausgeprägter als in den Wintermonaten. Hier werden noch gegen 21.00 Uhr Übertemperaturen  $> 5$  K erfaßt, in den Wintermonaten nur bis ca. 18.00 Uhr.

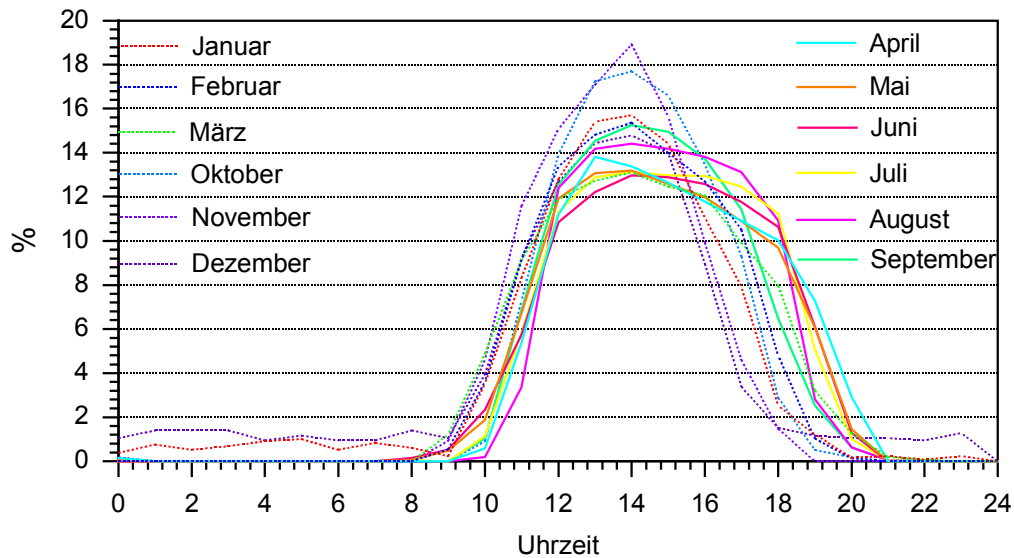


Abb. 69: Übertemperaturen  $>5$ K aus mittlerer Fassadentemperatur und Außenlufttemperatur in Abhängigkeit der Tageszeit und den Monaten.

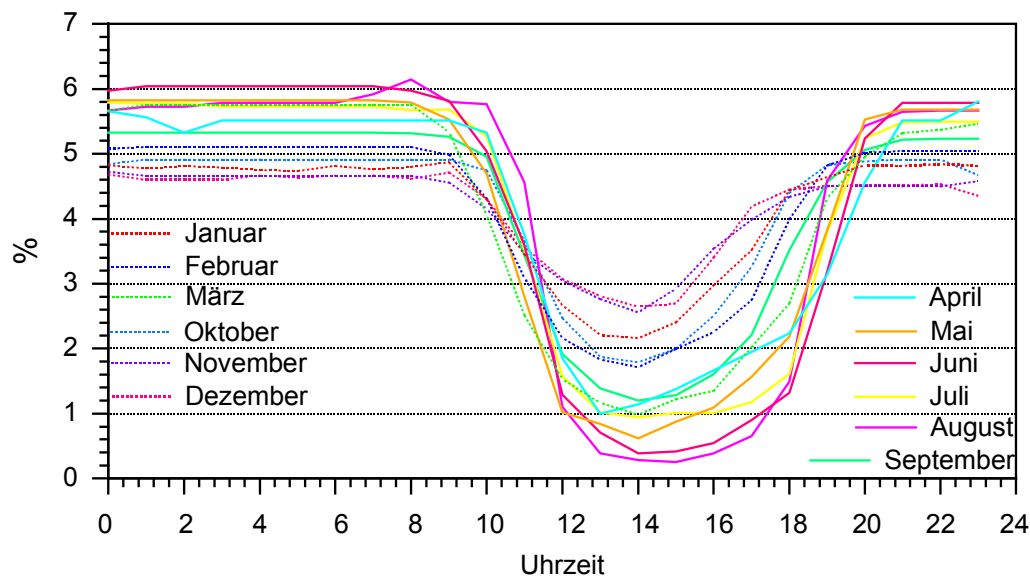


Abb. 70: Übertemperaturen  $<5$ K aus mittlerer Fassadentemperatur und Außenlufttemperatur in Abhängigkeit der Tageszeit und den Monaten.

Während der Lüftungstechnischen Nutzung der Doppelfassade kam es im Meßzeitraum auch zum Ansaugen kälterer Außenluft durch die Fassade als bei direkter Außenluftansaugung (s. auch Abb. 43). Die Dauer wird über den Jahres- und Tagesgang in Abb. 71 und in Abb. 72 aufgezeigt. Es ist eine Übereinstimmung mit den vorangegangenen Darstellungen nachweisbar.



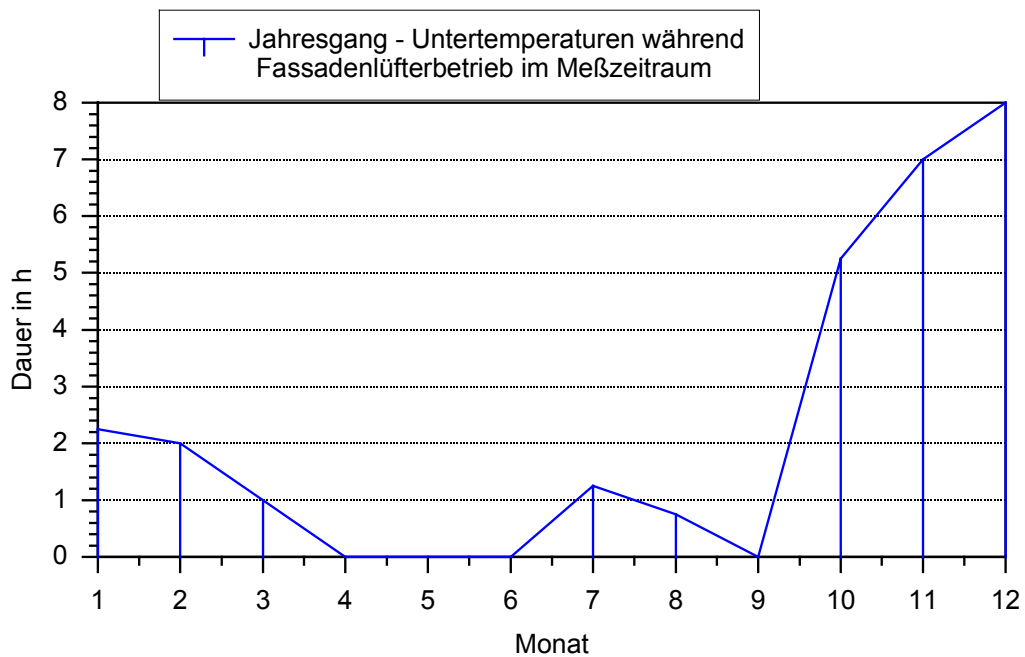


Abb. 71: Jahresgang – auftretende Untertemperaturen in der Doppelfassade während Fassadenlüfterbetrieb im Meßzeitraum.

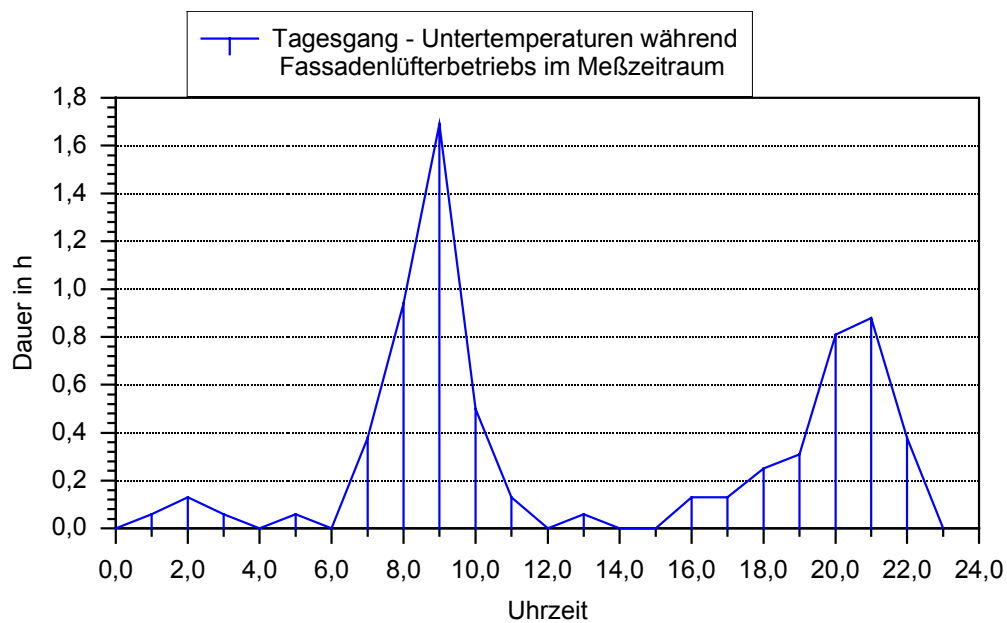


Abb. 72: Tagesgang – auftretende Untertemperaturen in der Doppelfassade während Fassadenlüfterbetrieb im Meßzeitraum.

Die Nutzung der Fassadenabluft gem. Abb. 67 für die Lüftungstechnische Anlage zwischen 9.30 und 20.30 Uhr beträgt 11 h pro Tag, das sind auf 1 Jahr bezogen ca. 45,8%. Im Meßzeitraum wurden zu dieser Tageszeit ca. 18.900 Meßwerte erfaßt (44,9%), in denen die Fassadenübertemperatur  $> 5$  K betrug. Die jeweilige monatliche Abhängigkeit der Meßwerte  $> 5$  K ist in Abb. 73 dargestellt.

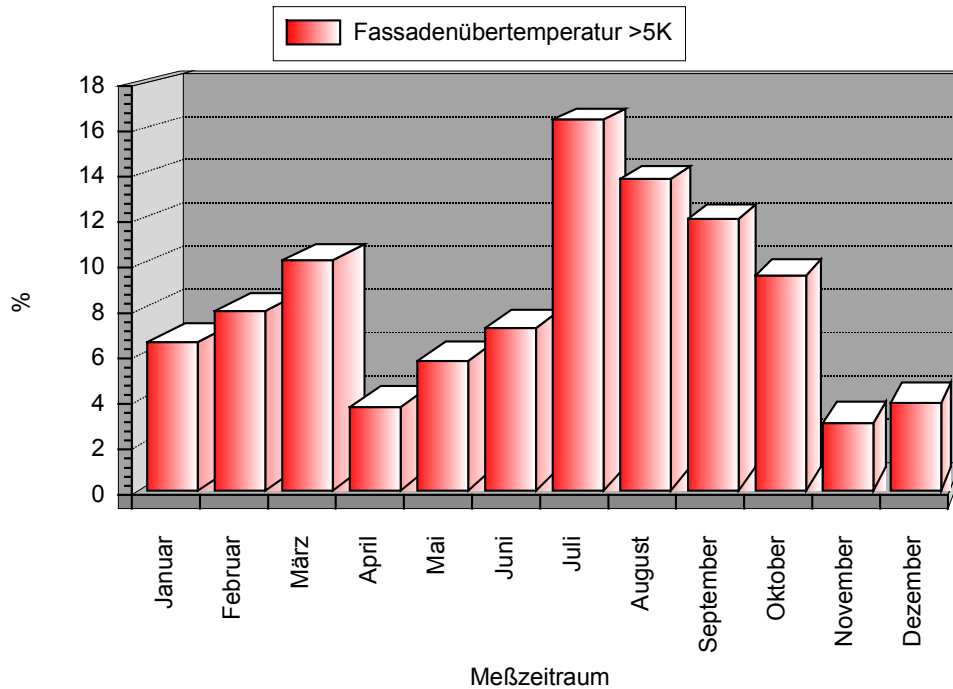


Abb. 73: Häufigkeiten der Fassadenübertemperaturen > 5 K in Abhängigkeit des Monats über den Meßzeitraum

In allen Monaten treten Fassadenübertemperaturen > 5 K auf, wobei die Monate Juli bis September 42,25% der Meßwerte darstellen. Innerhalb der Heizperiode liegen demnach ca. 51% der Meßwerte bei > 5 K Fassadenübertemperatur. Diese Feststellung berechtigt nicht zur Annahme, daß für diesen Zeitraum eine ständige Verwendung der Fassadenabluft zur Zuluftvorerwärmung gegeben ist. Vielmehr treten unter Berücksichtigung der Abb. 67 und Abb. 69 größere tageszeitliche Einschränkungen auf. Eine weitere Begrenzung der Nutzungsmöglichkeiten der Doppelfassade wird durch die in diesen Zeiträumen vorhandenen Übertemperaturen < 5 K (s. Abb. 70) hervorgerufen.

Bezieht man die nun erfaßten Übertemperaturen >5K auf ein Jahr, so wären eine 20,6% ige jährliche Nutzungsdauer (ca. 36,8 Tage) der Fassadenabluft als Zuluftvorerwärmung gegeben (s. Abb. 74).

Zeitraum Fassadenübertemperatur <5K

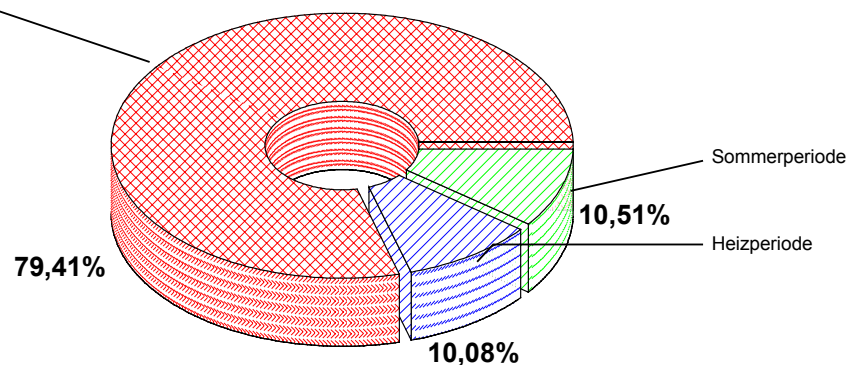


Abb. 74: Häufigkeit der Fassadenübertemperaturen > 5 K in Abhängigkeit eines Jahres.

### 3.4.2 Schlußfolgerungen aus der Meßwertdarstellung

Aus den vorangegangenen Abbildungen lassen sich folgende Feststellungen und Empfehlungen zur Nutzung der Fassadenabluft für die Frischluftvorerwärmung ableiten:

- Es können Zustände in der Fassade auftreten, in denen die mittlere Fassadentemperatur unter der Außentemperatur liegt (u. a. jahres- und tageszeitliche Abhängigkeit, Abhängigkeit Betriebszustand Fassadenlüfter).
- Die Nutzung der Fassadenabluft zur Frischluftvorerwärmung von einer gewissen Fassadenübertemperatur an ist von einer Vielzahl von Parametern abhängig; im vorliegenden Untersuchungsfall sollte bedarfsabhängig bei einer mittleren Fassadenübertemperatur  $> 5$  K mit der Nutzung begonnen werden (s. Abb. 67).
- Die Nutzung der Fassadenabluft (im vorliegenden Untersuchungsfall wurde die Nutzungsabhängigkeit von der mittleren Fassadenübertemperatur erstellt) zur Vorerwärmung der Frischluft ist ganzjährig, wenn auch tageszeitlich eingeschränkt (s. Abb. 73), möglich.
- Aufgrund des breiten und zeitlich schwankenden Leistungsspektrums der maschinell abgelüfteten Doppelfassade kann unter bestimmten Voraussetzungen (z. B. zur notwendigen Volumenstromanpassung an die GLT) eine modulierende Ablüftung realisiert werden, es sollten steuerungs- und regelungstechnische Einrichtungen in den weiterführenden Wärmeversorgungs- und -verteilungssystemen des Gebäudes realisiert werden, damit auf Laständerungen der Doppelfassade effizient reagiert werden kann.
- In Abhängigkeit der Orientierung der Fassade ist der Tageszeitraum zur Nutzung eingegrenzt, im vorliegenden Untersuchungsfall (SSW, SW, WSW –Orientierung) liegt er zwischen ca. 9.30 Uhr bis 20.30 Uhr, wobei hier eine weitere Differenzierung in Abhängigkeit von den Monaten erfolgen sollte (im vorliegenden Untersuchungsfall innerhalb der Heizperiode von ca. 9.30 Uhr – 19.30 Uhr – außerhalb der Heizperiode von ca. 10.00 – 20.30 Uhr).
- Die am Untersuchungsgegenstand konstruktiv realisierte freie Ablüftung sowie die motorische Unterstützung können u. U. keinen ausreichenden Überhitzungsschutz der Fassade gewährleisten. Am Untersuchungsgegenstand wurden  $> 36$  K (02/96) gegenüber der Außentemperatur gemessen, in den Sommermonaten sind es  $> 26$  K.

- Wird die Doppelfassade zur Frischluftvorerwärmung maschinell abgelüftet, so ist eine vorherige strömungstechnische Untersuchung sinnvoll (Volumenstromabgleich s. Abb. 40).
- Die Erfassung der tatsächlichen mittleren Fassadentemperaturen zur Abluftsteuerung sollte nicht nur lokal in der Fassade, sondern im Bedarfsfall parallel im Bereich des Hauptabsaugkanals mit durchgeführt werden.
- Hinsichtlich vertikaler Temperaturschichtungen in der Doppelfassade konnte im Untersuchungsfall mit Hilfe der Meßdaten gezeigt werden, daß diese Schichtungen sowohl im Tag- als auch im Nachtzeitraum auftreten, die Extreme mit  $> 2 \text{ K/lf. m}$  Fassadenhöhe wurden tagsüber erfaßt.

## **4 Zu untersuchende Transportvorgänge in der Doppelfassade**

### **4.1 Wärme- und strömungstechnische Mechanismen**

Bei der energetischen Betrachtung von durchströmten Doppelfassaden mit verschiedenen Vorsatzschalen treten in der Regel alle bekannten Wärmeübertragungsmechanismen gleichzeitig auf. Beeinflusst werden diese Wärmeübertragungen von den Strömungsverhältnissen, den Kanalformen, den strahlungs- und bauphysikalischen Eigenschaften der einzelnen Fassadenelemente und der Außenwandkonstruktion sowie dem Betriebsregime der Fassade (z. B. Verschattungseinrichtungen, Steuerungen von Zu- und Abluftöffnungen). Die Erfassung dieser Transportvorgänge wird u. a. durch die physikalischen Größen Temperatur, Wärme, Wärmestrom und Wärmestromdichte beschrieben.

Je nach vorhandenem Strömungszustand in der Fassade (freie, erzwungene bzw. sich überlagernde Konvektion) wird sich der Anteil der Konvektion am gesamten Energietransport durch die Außenwandkonstruktion einstellen. Dies führt gerade im vorliegenden Untersuchungsobjekt zu einer schwierigen Klassifizierung der Strömungsformen, denn bei einer aufwärts gerichteten Strömung in einem senkrecht gerichteten Kanal kommt es zu einer Überlagerung der Auftriebskräfte in Wandnähe. Man spricht in der Literatur auch von einer „schleichenden Bewegung“. Will man aber einen Einblick in die konvektiven Transportvorgänge in der Fassadenkonstruktion erhalten, so muß man die hydrodynamischen Vorgänge des strömenden Mediums Luft und der damit verbundenen Wärmeübergangsprozesse an der festen Umhüllungskonstruktion untersuchen.

### **4.2 Grundlegende Größen zur Beschreibung des konvektiven Wärmeübergangs**

Bei der energetischen Betrachtung der durchströmten Doppelfassade wird durch das strömende Fluid nicht nur Energie durch Wärmeleitung, sondern auch durch makroskopische Bewegung des Fluids transportiert. Zwischen fester Wand und Fluid kommt es zur Überlagerung des Energietransports durch das strömende Fluid und der klassischen Wärmeleitung aufgrund eines Temperaturgradienten. Gerade in Wandnähe ist die Dicke der Grenzschicht maßgebend für die Größe des konvektiven Wärmeübergangs (vgl. [27]).

In der Grenzschicht wird sich die parallel zur Wand gerichtete Komponente der Strömungsgeschwindigkeit vom absoluten Stillstand direkt an der Wand über eine kurze Entfernung bis zum annähernden Wert der Kern- oder Außenströmung ändern. In Abb. 75 wird die zeitliche Entwicklung der Grenzschicht an einer beheizten Wand mit Hilfe eines Rauchgasversuches dargestellt. Diese Untersuchungen dienen u. a. zur Überprüfung und Bewertung der analytischen Turbulenzmodelle. In diesem Fall erkennt man, daß durch die beheizte Wand die größte Geschwindigkeit in der Wandnähe auftritt. Eine Durchmischung mit der Kernströmung tritt erst in viel größerer Höhe auf. Dagegen kommt es im Grenzschichtbereich zur guten turbulenten Durchmischung.

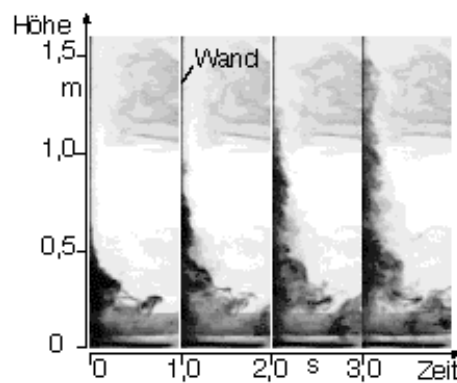


Abb. 75: Sichtbarmachung der Grenzschicht durch Rauchversuch [28].

Die Änderung des Geschwindigkeitsgradienten hängt eng mit der dynamischen Viskosität  $\eta$  des Fluids zusammen (Tab. 44). Die Viskosität von Gasen ist im allgemeinen eine Funktion von Temperatur und Druck, mit wachsender Temperatur nimmt die Viskosität von Gasen zu, die von Flüssigkeiten ab.

Tab. 4: Viskosität<sup>3</sup> von Gasen bei Drücken unter 100 Pa nach [5].

lfd. Nr.:	Name	Formel	Bezugstemperatur $T_b$ K	$\eta (T_b)$ $10^{-6} \text{ Ns/m}^2$
01	Wasserstoff	H <sub>2</sub>	293,15	8,821
02	Luft	-	293,15	18,24
03	Stickstoff	N <sub>2</sub>	293,15	17,58
04	Sauerstoff	O <sub>2</sub>	293,15	20,38
05	Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	293,15	14,87

<sup>3</sup> Die Einheit für Viskosität: Ns/m<sup>2</sup>, auch Poise P = 0,1 Ns/m<sup>2</sup>. Die kinematische Viskosität wird in m<sup>2</sup>/s oder auch in Stokes = 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s angegeben.

Da Luft dem Newtonschen Fluid zugeordnet wird, gilt hier das Newtonsche Reibungsgesetz für die Schubspannung  $\tau$  [30]:

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}. \quad \text{Gl. 1}$$

Es liegt folglich zwischen der Schubspannung und der Deformationsgeschwindigkeit Proportionalität vor [40].

Dies bietet bei der Berechnung den Vorteil, daß die Übertragungsvorgänge an einer Wand nur im Grenzschichtbereich betrachtet werden müssen [8]. Die Ausbildung der hydrodynamischen Grenzschicht wird durch die dimensionslose *Reynolds-Zahl*

$$Re = u \cdot \frac{L}{\nu} \quad \text{Gl. 2}$$

beschrieben.

Gase können nach [16], [37] bis zu Geschwindigkeiten von etwa 50 - 100 m/s näherungsweise als inkompressibel angesehen werden (Unterschallströmung/subsonisch). Erst bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten, in denen Dichteunterschiede zu erwarten sind (Überschallströmung/supersonisch), muß die Kompressibilität berücksichtigt werden.

Die bei der freien Auf- und Abtriebsströmung eines Fluides entstehenden Dichteunterschiede bei konstantem Druck werden maßgeblich durch die Berührung des Mediums mit einer wärmeren oder kälteren Berandungsoberfläche hervorgerufen. Als Kenngröße benutzt man im allgemeinen die Grashof-Zahl  $Gr$

$$Gr = \left( \frac{l^3 \cdot g}{\nu^2} \right) \cdot \left( \frac{\rho_\infty - \rho_0}{\rho_0} \right) \quad \text{Gl. 3}$$

Die an der Wand auftretende Wärmestromdichte  $q_w$  hängt in komplizierter Weise vom Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld im Fluid ab. Man ersetzt die konvektive Wärmestromdichte durch die Beziehung

$$q_w = \alpha (\vartheta_w - \vartheta_\infty) \quad \text{Gl. 4}$$

Der Proportionalitätsfaktor  $\alpha$  ist somit eine entscheidende Größe zur Bestimmung des sich einstellenden Wärmestroms, dessen Größe sowohl experimentell als auch theoretisch durch analytische oder auch numerische Integration der das Problem beschreibenden Differentialgleichungen erfolgen kann [21]. Eine Lösung dieser Gleichungen zur exakten Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  ist bisher nur für relativ einfache Fälle

gelingen (z. B. Wärmeübertragung bei laminar ausgebildeter Rohrströmung). Alle Ansätze zur Berechnung des Wärmeübergangs bei turbulenten Strömungsvorgängen greifen auf weitgehend vereinfachte Modellvorstellungen zurück [6]. Dies führte in der Vergangenheit zu einer großen Anzahl experimenteller Bestimmungen (vgl. [10]), bei denen aus gemessenen Wärmeströmen oder Wärmestromdichten an gemessenen Wand- bzw. Fluidtemperaturen ein örtlicher und mittlerer Wärmeübergangskoeffizient bestimmt wurde. Aufgrund der sehr verschiedenartigen Versuchsaufbauten, in denen die Einflüsse Temperatur, Druck, Geschwindigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Dichte, spezifische Wärmekapazität und Viskosität des Fluids sowie Gestalt und Oberfläche des an-, durch- oder umströmten Körpers mit berücksichtigt werden mußten, finden sich in der Literatur breite Streuungen je nach Anwendungsfall ([20], [29], [17], [33], [38]).

Die dimensionslose Kenngröße des Wärmeübergangs ist nach Nusselt

$$Nu = \alpha \cdot \frac{L}{\lambda} \quad \text{Gl. 5}$$

für auftriebsbestimmte Strömungen allein eine Funktion der Grashof- und Prandtl-Zahl

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad \text{Gl. 6}$$

Bei sehr kleinen Geschwindigkeiten (Eliminierung der Beschleunigungsglieder aus der Bewegungsgleichung) ergibt sich die dimensionslose *Rayleigh-Zahl*

$$Ra = g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot \frac{L^3}{a \cdot \eta} \quad \text{Gl. 7}$$

Es gibt für die freie Konvektion bei schleichender Bewegung nur noch zwei Ähnlichkeitskriterien, so daß

$$Nu = f(Ra) \quad \text{Gl. 8}$$

ist.

Zwischen der Grashof-Zahl und der Rayleigh-Zahl besteht der Zusammenhang

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad \text{Gl. 9}$$



## 5 Modellbildung

### 5.1 Einführung

Die Zielstellung der analytischen Modellbildung liegt in der Erfassung thermodynamischer Vorgänge in der Doppelfassade (s. Abschnitt 1). Zur analytischen Ermittlung des Wärme- und Stofftransportes in hinterlüfteten Konstruktionen soll die Strömungsmechanik mit ihren Erhaltungssätzen für Masse, Impuls und Energie zur Anwendung kommen. Sie bilden gleichzeitig die Grundlagen für die Anwendung numerischer Lösungsmethoden. Voraussetzung dabei ist, daß die sich im Zwischenraum befindliche Luft als Kontinuum betrachtet wird, deren Stoffwerte und Zustandsgrößen kontinuierliche Funktionen im dreidimensionalen Raum übernehmen. Die kontinuumsmechanischen Erhaltungssätze werden in ihrer Gesamtheit auch als Navier-Stokes Gleichungen bezeichnet, deren Herleitung durch Momentenbildung aus der gaskinetischen Boltzmann-Gleichung, die das strömende Medium als eine Ansammlung von sich bewegenden und miteinander kollidierenden Partikeln auffaßt, erfolgen kann [23].

Am Untersuchungsgegenstand durchgeführte Betrachtungen zur Luftführung in der Doppelfassade sind in [39] aufgezeigt. Ein Modell zur Beschreibung von Transportvorgängen in vertikalen Luftspalten wird in [19] beschrieben.

Zur Berechnungsdurchführung kommt u. a. ein kommerzielles Programmsystem (FLUENT 5.5) zur Anwendung. Es können damit komplexe strömungsmechanische Probleme behandelt werden, die schnell einer Parameterstudie unterzogen werden können und so alle strömungsmechanisch relevanten Größen (z. B. Geschwindigkeitsfelder, Druckfelder, Temperaturverteilungen, Wandschubspannungsverteilungen, Turbulenzdarstellungen) liefern. Im Gegensatz zur experimentellen Strömungsmechanik sind aufwendige Skalierungen, die sich aus der Anwendung mehrerer dimensionsloser Kennzahlen ergeben, nicht erforderlich [32].

Grundvoraussetzung für die Anwendung sind Rechnerkapazitäten, die eine erforderliche Verfeinerung des numerischen Gitters zulassen. Die Vorgabe der zur numerischen Lösung notwendigen Anfangs- und Randbedingungen soll hier an Hand von Messungen am Untersuchungsgegenstand (vgl. Abschnitt 2.4 ff) erfolgen.

Im folgenden werden Vorgehensweisen zur Modellbildung erläutert, wobei nicht alle Methoden und Gemeinsamkeiten der Strömungsmechanik diskutiert und heraus gearbeitet werden können. Es wird vom Autor aber angestrebt, gedanklich die von ihm getroffene Modellbildung nachvollziehen zu können, ohne die gesamte Fachliteratur zum Komplex „Numerische Strömungsmechanik“ zu kennen.

## 5.2 Grundgleichungen der Strömungsmechanik

Die Lösungen der partiellen Differentialgleichungen sollen für das vorgegebene Gebiet der Doppelfassade bestimmt werden. Notwendig wird dabei eine Abgrenzung des Strömungsfeldes sowie die Diskretisierung des Lösungsgebietes als wesentliches Element der Anwendung numerischer Lösungsmethoden. Schon an dieser Stelle können erhebliche Modellvereinfachungen zur besseren numerischen Anwendbarkeit und Lösungsdarstellung führen.

Bei der numerischen Diskretisierung der Grundgleichungen (partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung mit kontinuierlicher Änderung der Zustandsgrößen in allen räumlichen Richtungen und in der Zeit) ersetzt man z. B. beim Differenzenverfahren (neben dem Finite Elemente Verfahren (FEM) bzw. Finite Volumen Verfahren (FVM)) die Gleichungen durch Differenzgleichungen (Erhalt eines Systems algebraischer Differenzgleichungen mit näherungsweise numerischer Lösung des Systems), die auf verschiedenem Wege erzeugt werden können.

Zur Auswahl der Grundgleichungen müssen dem Problem Auswahlkriterien und Festlegungen zu folgenden Punkten getroffen werden:

- ob bei dem Strömungsprozeß Reibung eine Rolle spielt,
- ob Verdichtungsstöße im Strömungsfeld vorhanden sind,
- ob die Struktur der Strömung laminar, transitionell oder turbulent ist,
- ob die Strömung kompressibel oder inkompressibel ist,
- ob hydrostatischer Auftrieb vorhanden ist,
- ob chemische Reaktionen im untersuchten Strömungsgebiet ablaufen und
- ob der Rechenaufwand im angemessenen Zeitraum realisiert werden kann.

Des weiteren müssen die Randbedingungen des definierten Strömungsfeldes während des Modellierungsprozesses nach

- Gleit- oder Haftbedingung,
- isothermer oder adiabater Wand bzw.
- der Festlegung der Ein- und Ausströmränder (Über- und Unterschallströmung)

konkretisiert werden. Erst dann kann eine Überführung der kontinuierlichen Beschreibung des Strömungsvorgangs in die diskrete erfolgen.

### 5.3 Erhaltungsgleichungen

#### 5.3.1 Impulserhaltungsgleichung

Der Impuls ist im physikalischen Sinne eine vektorielle Größe und stellt das Produkt aus Masse und Geschwindigkeit dar. Ein Volumenelement  $dV$ , das mit der Geschwindigkeit  $\vec{u}_i$  strömt, transportiert den Impuls  $\vec{u}_i \cdot \rho$ . Der von einem Massenelement mit dem Volumen  $V(t)$  insgesamt transportierte Impuls  $I_i$  ist somit nach [3]:

$$I_i = \int_{V(t)} \rho u_i dV . \quad \text{Gl. 10}$$

Es sei  $\rho = \rho(\vec{r}, t)$  die Dichte des Fluids an der Stelle  $\vec{r}$  zur Zeit  $t$ . Aus dem Gesamtfliuid denkt man sich zur Zeit  $t$  ein beliebiges Teilvolumen  $V$  herausgegriffen. Dann ist offenbar nach dem Newtonschen Grundgesetz

$$-\int_V \vec{r} dV = -\int_V \rho \left\{ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u}, \nabla) \vec{u} \right\} dV \quad \text{Gl. 11}$$

die Trägheitskraft dieses Fluidvolumens zur Zeit  $t$ . Bezeichnet man mit  $F = \partial V$  die Oberfläche des Volumens  $V$  (s. Abb. 76), so ist  $\Delta F$  ein kleines Oberflächenelement an der Stelle  $\vec{r}(t)$  zur Zeit  $t$  mit dem nach außen weisenden Normaleneinheitsvektor  $\vec{n}$ . Herrscht an der Stelle  $\vec{r}(t)$  zur Zeit  $t$  der Druck  $p = p(\vec{r}, t)$ , so übt das außerhalb von  $V$  liegende Fluid auf der Oberfläche von  $V$  an der Stelle  $\vec{r}$  die Druckkraft  $-p\vec{n}\Delta F$  aus.

Verfeinert man die Einteilung der Oberfläche  $F$  in kleine Flächenelemente  $\Delta F$ , und somit über alle Teilkräfte, so folgt, daß das umgebende Fluid auf das Volumen  $V$  die Kraft  $-\int_F p\vec{n}dF$  ausübt. Dieses Oberflächenintegral läßt sich mittels des Gaußschen Integralsatzes,

angewendet auf jede Komponente, umformen zu

$$-\int_F p \vec{n} dF = -\int_V \nabla p dV, \quad \text{Gl. 12}$$

wobei  $\nabla p(\vec{r}, t) = \begin{pmatrix} \partial p / \partial x \\ \partial p / \partial y \\ \partial p / \partial z \end{pmatrix} =: \text{grad}^T p$  als Gradienten(vektor) des Drucks  $p$  bezeichnet

wird.

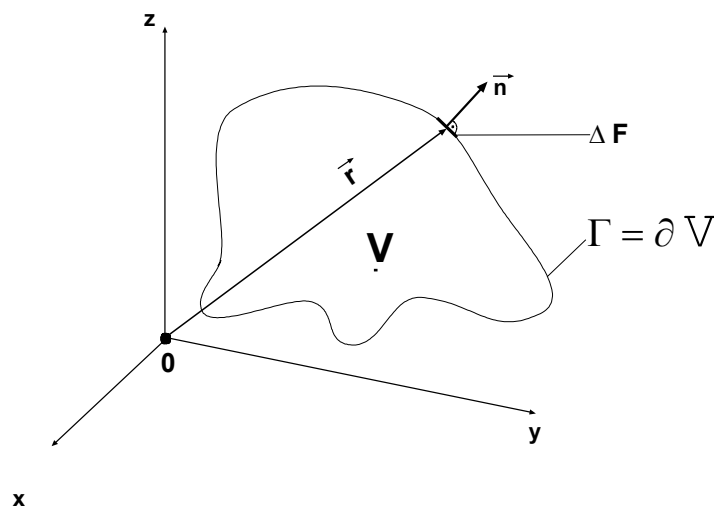


Abb. 76: Darstellung Flächenelement zur Herleitung der Impulserhaltungsgleichung / Oberflächenintegral.

Bei realen strömenden Fluiden treten als weitere innere Kräfte noch Reibungsphänomene zwischen strömenden Fluidteilchen auf. Man nennt dies die „Viskosität“ des Fluids. Betrachtet wird außerdem als äußere Kraft die Massenkraft, welche durch die Volumendichte  $\vec{k} = \rho \cdot \vec{g}$  beschrieben wird. Im gegebenen Fall ist diese Massenkraft die thermische Auftriebskraft, d. h.  $\vec{F}_A = \int_V \rho(T) \vec{g} dV$ . Es gilt nach dem Impulserhaltungssatz [2]:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \vec{u} dV = \int_V \rho(T) \vec{g} dV - \int_V \nabla p dV \Leftrightarrow \int_V \left\{ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + \rho (\vec{u}, \nabla) \vec{u} + \rho \vec{u} (\nabla, \vec{u}) - \rho(T) \vec{g} + \nabla p \right\} dV = 0$$

Gl. 13

Da diese Gleichung für jedes beliebige Volumen  $V$  gilt, muß der Integrand und damit der

Ausdruck in den geschweiften Klammern verschwinden<sup>4</sup>. Man erhält:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \langle \vec{u}, \nabla \rangle \rho \vec{u} + \rho \vec{u} \operatorname{div} \vec{u} = \rho(T) \vec{g} - \nabla p. \quad \text{Gl. 14}$$

Bemerkung:

In der Impulsgleichung spielt die Dichteabhängigkeit  $\rho(T)$  in vertikaler Richtung für den hydrostatischen Auftrieb eine wichtige Rolle, d. h. die Dichte wird in allen Erhaltungsgleichungen außer dem Auftriebsterm als konstant bezüglich der Temperatur angesetzt. Die Temperaturabhängigkeit der Dichte geht in dieser Modellierung lediglich in den Auftriebsterm ein, in allen anderen Termen ist  $\rho = \rho(x, y, z, t)$ .

### 5.3.2 Kontinuitätsgleichung (Erhaltung der Masse)

Bei der Betrachtung eines strömenden Fluides sollen an einem infinitesimalen Volumenelement  $V$  an der Stelle  $(x, y, z)^T$  zur Zeit  $t$  die Geschwindigkeit

$$\vec{u}(x, y, z, t) = \begin{pmatrix} u_x(x, y, z, t) \\ u_y(x, y, z, t) \\ u_z(x, y, z, t) \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 15}$$

und die Dichte  $\rho = \rho(x, y, z, t)$  herrschen. Treten während der Strömung keine Quellen oder Senken auf, so bleibt die Masse des Elementes erhalten, d. h., daß die zeitliche Änderung der Masse im Volumen gleich der Differenz zwischen dem eintretenden und austretenden Massestrom ist. Die Massenbilanz ergibt sich aus der zeitlichen Änderung der in dem Volumenelement enthaltenen Masse:

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV = - \int_A \rho (\vec{u} \cdot d\vec{A}), \quad \text{Gl. 16}$$

wobei  $A = \partial V$  die Oberfläche des betrachteten Volumens  $V$  ist. Die differentielle Darstellung der Erhaltungsgleichung läßt sich aus der integralen Form der Massenbilanz in vektorieller Form wie folgt darstellen [32]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0. \quad \text{Gl. 17}$$

---

<sup>4</sup> Ist der Integrand stetig und wäre er irgendwo von Null verschieden, so wäre er auch in einer Umgebung  $U$  dieser Stelle verschieden und einheitlichen Vorzeichens. Wählt man  $V = U$ , so erhält man einen Widerspruch.

Es gilt:

$$\frac{d}{dt} \left( \int_{V(t)} \rho(x, y, z, t) dV \right) = \int_V \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} u_x + \frac{\partial \rho}{\partial y} u_y + \frac{\partial \rho}{\partial z} u_z \right) dV = 0. \quad \text{Gl. 18}$$

Ebenso wie oben schließt man hier, daß der Integrand verschwinden muß, d. h.

$$\left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x} u_x + \frac{\partial \rho}{\partial y} u_y + \frac{\partial \rho}{\partial z} u_z \right) = 0 \quad \text{Gl. 19}$$

Diese Gleichung heißt Kontinuitätsgleichung, sie wird mit den Vektoroperatoren auch oft umgeschrieben in die Form  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0$  oder  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \text{div} \vec{u} + (\nabla \rho) \vec{u} = 0$ .

Im 2 - dimensionalen Fall mit der Dichte  $\rho(x, y, t)$  und dem Geschwindigkeitsvektor

$$\vec{u}(x, y, t) = \begin{pmatrix} u_x(x, y, t) \\ u_y(x, y, t) \end{pmatrix}$$

lautet die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \rho(x, y, t)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho(x, y, t) \cdot u_x(x, y, t))}{\partial x} + \frac{\partial (\rho(x, y, t) \cdot u_y(x, y, t))}{\partial y} = 0.$$

### 5.3.3 Energieerhaltungsgleichung

Der Energieerhaltungssatz oder auch 1. Hauptsatz der Thermodynamik genannt, besagt, daß die zeitliche Änderung der totalen Energie einer in einem (mit der Strömung wandernden) Volumen eingeschlossenen Masse gleich der gegen die einwirkenden äußeren Kräfte aufgebrauchten Leistung ist. Man erhält folgende Bilanzgleichung:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho E(x, y, z, t) dV = - \int_{\Gamma = \partial V} (p \vec{n}) \vec{u} dF \quad \text{Gl. 20}$$

und analog zu den vorherigen Umformungen ergibt sich daraus die Forderung

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} ((\rho E + p) u_x) + \frac{\partial}{\partial y} ((\rho E + p) u_y) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} ((\rho E + p) u_z) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0. \end{aligned} \quad \text{Gl. 21}$$

Diese Gleichung läßt sich auch in kurzer Vektoroperatorenschreibweise darstellen:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}((\rho E + p)\vec{u}) - \nabla \lambda \nabla T = 0. \quad \text{Gl. 22}$$

#### 5.4 Zusammenfassung zu den Navier-Stokes Gleichungen, Zustandsgleichung und Anfangs- und Randwertbedingungen

Aus den drei Erhaltungsprinzipien hat man die folgenden Gleichungen unter Berücksichtigung der Auftriebskräfte generiert:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) &= 0 \\ \frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \langle \vec{u}, \nabla \rangle \rho \vec{u} + \rho \vec{u} \operatorname{div} \vec{u} + \nabla p - \rho(T) \vec{g} &= 0 \\ \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}((\rho E + p)\vec{u}) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{Gl. 23}$$

Das ist ein Gleichungssystem, bestehend aus fünf Gleichungen mit den Unbekannten

Funktionen  $\rho(\vec{r}, t), \vec{u}(\vec{r}, t) = \begin{pmatrix} u_x(\vec{r}, t) \\ u_y(\vec{r}, t) \\ u_z(\vec{r}, t) \end{pmatrix}, E(\vec{r}, t), T(\vec{r}, t)$  und  $p(\vec{r}, t)$ . Der Geltungsbereich dieser

Gleichungen ist das betrachtete Strömungsgebiet  $G$  (auch als  $V$  in der Herleitung bezeichnet).

Um eine Lösung zu berechnen, benötigen wir mithin noch weitere Gleichungen, welche einen Zusammenhang der gesuchten Größen beschreiben, die Zustandsgleichungen sowie die Vorgabe der Anfangsbedingungen, d. h.  $\vec{u}(\vec{r}, t), \dots$ , zum Zeitpunkt  $t = 0$  und Randbedingungen, d. h.  $\vec{u}, \rho, E, p, T$  auf dem Rand  $\Gamma$  des Gebietes  $V$ .

Eine Zustandsgleichung für das ideale Gas wäre beispielsweise

$$p(\vec{r}, t) = (\gamma - 1)\rho\varepsilon = (\gamma - 1) \left( E(\vec{r}, t) - \rho \frac{\|\vec{u}\|^2}{2} \right) \quad \text{mit} \quad \gamma = \text{const.} > 1, \quad \text{wobei}$$

$\|\vec{u}\| := (u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)^{0.5}$  die Euklidische Norm des Vektors  $\vec{u} = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix}$  bezeichnet.

Zustandsgrößen eines Gases sind die Temperatur  $T$ , der Druck  $p$ , das Volumen  $V$ , die Dichte  $\rho$ , die Energie  $E$  und die Entropie  $S$ , wobei jede Zustandsgröße über die Zustandsgleichungen berechnet werden kann, sofern zwei der andere Zustandsgrößen bekannt sind [31], [2].

### **5.5 Numerische Berechnungsmethoden zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen als Anfangs-Randwertproblem**

Einige numerische Berechnungsmethoden sind z. B. das Finite- Differenzen-Verfahren, das Finite-Volumen-Verfahren oder das Finite-Elemente-Verfahren. Dabei sollten bei der Auswahl des Verfahrens immer die mathematischen Eigenschaften der Energieerhaltungsgleichungen berücksichtigt werden, die auf dem gewählten physikalischen Raum gelöst werden sollen.

Zur Lösung der Differenzgleichungen wird eine Bestimmung von Punkten im physikalischen Raum sowie deren Einteilung und Zuordnung zu Zellen erforderlich. Dieser Netzgenerierungsprozeß (auch Diskretisierung genannt) erzeugt ein Rechnetz, bestehend aus einer Verteilung von Punkten bzw. Zellen im definierten physikalischen Raum. Aufgabe des Netzgenerierungsverfahrens ist es, ein Netz zu erzeugen, das sicherstellt, daß die numerische Lösung des diskreten Problems gegen die Lösung der partiellen Differentialgleichung konvergiert. Ein feineres Gitter sollte i. a. dann eine genauere Lösung liefern, andererseits erhöht sich die Dimension und damit der numerische Aufwand für die Lösung des diskreten Problems.

Ein adaptives Netz vermeidet, daß in weniger kritischen Bereichen unnötige Knotenvariablen den numerischen Aufwand erhöhen, aber durch eine feinere Vernetzung in den durch Geometrie und Randbedingugn entscheidenden Bereichen die Konvergenz gesichert wird. Über das Verhalten der Lösungen zwischen den diskreten Punkten im Raum zu bestimmten Zeitpunkten können nur Annahmen getroffen werden. Einen besonderen Punkt stellen dabei Berandungen (typisch bei durchströmten Körpern) dar, wo durch die Verteilung der Punkte eine adäquate Beschreibung der Geometrie erreicht werden soll. Entscheidend ist nun bei der Diskretisierung, die Gebiete, in denen starke Gradienten der Strömungsgrößen auftreten, eine enge Vernetzung zu erreichen, damit der Gradient möglichst genau durch die numerische Lösung wiedergegeben werden kann.

Die numerische und die räumliche Diskretisierung bedingen einander; die angewendeten



Netzgeneratoren haben einen entscheidenden Einfluß auf die Anwendung der numerischen Strömungssimulation. Zur Anwendung kommen in der Regel strukturierte bzw. unstrukturierte Netze [11], wobei die Art und Weise der Punktverteilungen im Raum und deren Verbindungen zur Netzzellenerzeugung den Unterschied zwischen beiden darlegt. In Abb. 77 wird ein Beispiel für eine unstrukturierte Netzgenerierung gezeigt.

Die numerische Strömungssimulation ist mathematisch ein Anfangs- Randwertproblem, d. h., zur Lösung müssen Anfangsbedingungen zum Anfangszustand der Simulation vorgegeben sein. In der vorliegenden Arbeit wird von einer zweidimensionalen Modellierung ausgegangen. Durch diese Dimensionsreduzierung des Problems werden der Modellierungs- und Rechenaufwand beträchtlich vereinfacht. Bei der Herleitung der Lösungsgleichungen wird die dritte Komponente (räumliches System) mit aufgeführt.

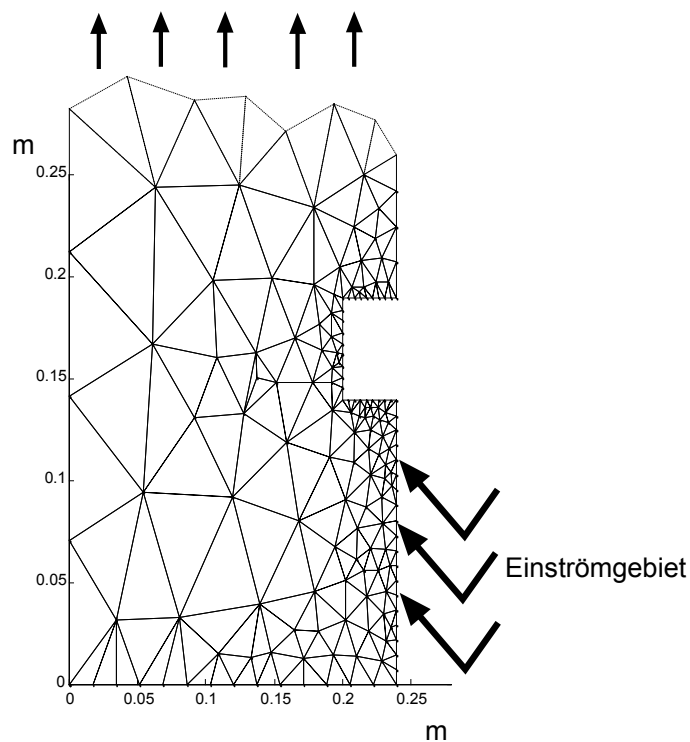


Abb. 77: Beispiel unstrukturierte Netzgenerierung: Fußpunkt Doppelfassade.

### 5.5.1 Methode der Finiten Differenzen (FDM)

Ziel ist es, ein diskretes Modell aus einer gegebenen Differentialgleichung zu erzeugen. Am einfachsten ist es, alle in der Gleichung vorkommenden Ableitungen direkt durch Differenzenquotienten zu ersetzen, wobei die Methode der Finiten Differenzen (FDM) sehr verschiedenartige Varianten hierfür umfaßt.

Im Kern wird das Raum-Zeit-Lösungsgebiet  $G = V \times [t_0, T]$  in ein Gitter zerlegt, in dessen Punkten  $(\vec{r}_i, t_j)$  Näherungswerte  $\bar{u}_i^j \approx \bar{u}(\vec{r}_i, t_j)$  ermittelt werden sollen. Dann ersetzt man in

der Differentialgleichung  $\frac{\partial \bar{u}(\vec{r}, t)}{\partial t} \approx \frac{\bar{u}(\vec{r}, t + \tau) - \bar{u}(\vec{r}, t)}{\tau}$ ,

$$\frac{\partial^2 \bar{u}}{(\partial x)^2}(\vec{r}, t) \approx \delta \frac{\bar{u}(x+h, y, t+\tau) - 2\bar{u}(x, y, t+\tau) + \bar{u}(x-h, y, t+\tau)}{h^2} + (1-\delta) \frac{\bar{u}(x+h, y, t) - 2\bar{u}(x, y, t) + \bar{u}(x-h, y, t)}{h^2}$$

mit  $0 \leq \delta \leq 1$  als festen Parameter. Man erhält ein System von Differenzgleichungen in den Gitterpunkten  $(\vec{r}_i, t_j)$ .

Nimmt man nun an, daß zum Zeitpunkt  $t_j$  alle Werte  $\bar{u}_i^j$  vorliegen – aus den Anfangsbedingungen ist dies sicher für  $j=0$  der Fall – lassen sich aus dem erhaltenen Gleichungssystem der Differenzgleichungen nun die Lösungen  $\bar{u}_i^{j+1}$  berechnen. Anschließend wird die Rechnung in entsprechender Weise auf die nächst folgende Zeitschicht fortgesetzt. Es lassen sich von Zeitschicht zu Zeitschicht fortschreitend – unter Benutzung der Anfangs- und Randbedingungen – die gesuchten Näherungen  $\bar{u}_i^j$  berechnen.

### 5.5.2 Methode der Finiten Elemente (FEM)

Bei dieser Methode geht man von der schwachen (auch Variationsformulierung genannt) Formulierung der Aufgabenstellung aus. Man setzt voraus, daß die Problemstellung in folgende Aufgabenstellung umformuliert werden kann:

Gesucht ist eine Funktion  $u$  aus einem geeigneten Funktionsraum  $H$ , die die Variationsgleichung  $a(u, v) = b(v)$  für alle  $v \in H$  erfüllt,  $u$  heißt dann verallgemeinerte (oder auch schwache) Lösung der Randwertaufgabe.

Die FEM löst nun die Variationsgleichung nicht über  $H$ , sondern nun über einen geeignet gewählten, endlich dimensional linearen Teilraum  $H_h \subset H$ .

Sei  $N_i(\vec{r}, t)$   $i = 0, \dots, n$  Basis von  $H_h$ , dann berechnet man eine FEM-Näherung

$$\bar{U}(\vec{r}, t) := \sum_{i=0}^n u_i N_i(\vec{r}, t) \approx \bar{u}(\vec{r}, t), \quad u_i \text{ reelle Zahlen mit } \bar{U}(\vec{r}, t) \in H_h \quad \text{Gl. 24}$$

durch Lösung des linearen Gleichungssystems in der Variationsgleichung

$$\sum_{i=0}^n a(N_i, N_j) u_i = b(N_j) \quad j=0, \dots, n \quad \text{Gl. 25}$$

zur Bestimmung der  $u_i$  gemäß vorigen Ansatzes. Hat man die Formfunktionen  $N_i(\vec{r}, t)$  ausgewählt, dann lassen sich die Elemente  $a(N_i, N_j)$  der Koeffizientenmatrix bzw. die Komponenten der rechten Seite  $b(N_j)$  des Systems (Gl. 24) berechnen.

Danach wird diese Gleichung (Gl. 24) gelöst und die so bestimmten  $u_i$  in Gleichung 23 eingesetzt, dies ergibt die gesuchte FEM-Näherung  $\bar{U} \approx \vec{u}$ .

Es ist zweckmäßig, die Formfunktion  $N_j$  so zu wählen, daß sie nur auf kleinen Teilstücken  $V_j \subset V$  von Null verschieden sind. Hierzu wird  $V$  in (finite) Elemente  $T_k, k=1, \dots, k$  zerlegt. Jede zulässige Zerlegung eines Gebietes  $V$  entspricht der Festlegung eines Gitters  $V_h = \{(x_i, y_j) : i=0, \dots, I; j=0, \dots, J\}$ . Zu  $V_j$  gehören alle Elemente, die den Gitterpunkt  $(x_i, y_j)$  enthalten. Auf  $V_j$  sei  $N_j$  verschieden von Null, sonst Null. Details zur Methode werden ausführlich in [34] beschrieben.

### 5.5.3 Methode der Finiten Volumen (FVM)

Das Strömungsgebiet wird hierzu in Zellen zerlegt, den sogenannten finiten Volumen. Diese sind nicht überlappend und besitzen die Form von Dreiecks- oder Viereckszellen (2-dimensional) oder Tetraeder, Hexaeder (3-dimensional). Auch sind hybride Netze möglich. Eine Transformationsvorschrift ist nicht notwendig.

Abb. 78 zeigt für den 2-dimensionalen Fall die Dreieckszelle  $i, j$  mit den nach außen weisenden Normalen und Indizes der jeweiligen Nachbarzellen.

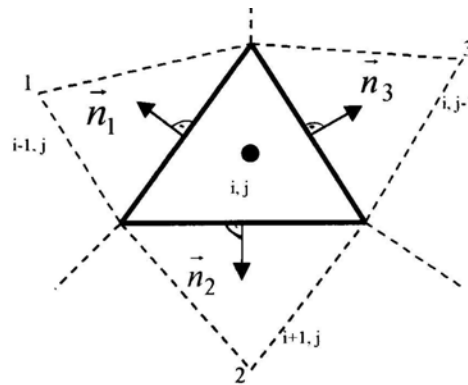


Abb. 78: Beispiel Dreieckszelle für Finite-Volumen Methode.

Zunächst werden die Grundgleichungen über das Volumen des gesamten Integrationsgebietes  $V$  integriert. Dieser Integrand wird dann in die Summe über die finiten Volumina, den sogenannten Kontrollvolumen aufgespalten. Für jede einzelne Volumenzelle wird die Grundgleichung approximiert. Der Gauß'sche Integralsatz liefert hierzu den Zusammenhang zwischen der Divergenz  $\text{div } \vec{f}$  einer Vektorfunktion  $\vec{f}$  im Inneren eines Kontrollvolumens und der Flüsse von  $\vec{f}$  durch die Oberfläche in Richtung der äußeren Normalen  $\vec{n}_j$ .

Die finite Volumenmethode approximiert den Fluß im Mittelpunkt der Fläche (bzw. Seite) aus dem Mittelwert der Zustandsgrößen der beiden angrenzenden Zellen. Die Zustandswerte in den Zellen (bzw. in den Mittelpunkten der Zellen) seien konstant. Die Diskretisierung erfolgt also in den Zellmittelpunkten (cell-centered scheme). Verbreitet sind auch Formulierungen der Gleichungen in den Variablen an den Eckpunkten der Zellen (cell-vertex scheme).

Finite Volumen Verfahren machen somit direkt von den Erhaltungseigenschaft der Gleichungen Gebrauch (d. h. die zeitliche Änderung der Erhaltungsgrößen in jedem Volumen ist gleich der über die Ränder ein- bzw. ausströmenden Flüsse).

Zweite Ableitungen werden durch den Gauß'schen Satz in erste umgewandelt und durch Differenzenverfahren approximiert (Navier-Stokes Gleichungen). Man erhält gekoppelte gewöhnliche Differenzialgleichungen in der Zeit für die diskrete Zustandsgrößen in jeder Volumenzelle, welche z. B. mit dem Runge-Kutta Verfahren gelöst werden können.

## 5.6 Diskretisierung der Gleichungen

### 5.6.1 Allgemeine Anforderungen an ein numerisches Gittergenerierungs-Verfahren

Die Anforderungen für die Auswahl eines Gittergenerierungsprogramms werden hauptsächlich durch die Eigenschaften des numerischen Verfahrens bestimmt, die zur Lösung der strömungsmechanischen Grundgleichungen angewendet werden sollen. Eine Unterteilung der Anforderungen wird in [32] gegeben:

- Das generierte Gitter muß nicht-überschneidende Gitterlinien besitzen, d. h., durch das Verfahren muß eine eindeutige Abbildung zwischen der physikalischen Ebene und der Rechenebene gewährleistet werden.
- Es sollte möglich sein, Gitterpunkte und Gitterlinien in beliebig wählbaren Bereichen zu konzentrieren, in denen steile Gradienten zur Lösung der strömungsmechanischen Grundgleichungen und damit große Lösungsfehler erwartet werden.
- Die Lage der Punkte auf der Berandung sollte vorgebar sein, um eine möglichst genaue Wiedergabe der Geometrie zu gewährleisten.
- Starke Gitterverzerrungen sollten vermieden werden, d. h., möglichst orthogonale Gitter sind wünschenswert.
- Die Schnittwinkel entlang der Berandung sollte vorgegeben werden können. Dadurch ist zum einen die Erzeugung randorthogonaler Gitter möglich, mit denen z.B. Wandgrenzschichten genau aufgelöst werden können, zum anderen können glatte Übergänge (auch mit Randwinkeln verschieden von  $90^\circ$ ) bei blockstrukturierten Gittern erreicht werden.
- Das Gittergenerierungsverfahren sollte auch bei dreidimensionalen Problemen eingesetzt werden können.
- Wünschenswert sind kurze Rechenzeiten bei der Gittergenerierung, um einerseits ein interaktives Arbeiten zu ermöglichen oder andererseits Verfahren zur Generierung adaptiver Gitter einsetzen zu können.
- Es sollte möglichst nur eine geringe Zahl von Spezifikationen notwendig sein, damit das Verfahren auch von weniger erfahrenen Anwendern genutzt werden kann.

Zur Diskretisierung der Transportgleichungen sind unterschiedliche Verfahren bekannt. Alle Methoden haben die Gemeinsamkeit, daß im interessierenden Strömungsbereich ein Rechengitter gelegt wird. Die dabei entstehenden Netzpunkte werden zur besseren graphischen Darstellung miteinander verbunden. Man kann die Knotenpunkte des

Rechengitters als Rechenpunkte festlegen, wobei die Netzknoten nicht unbedingt mit der Geometriedefinition übereinstimmen müssen (vgl. Abb. 79).

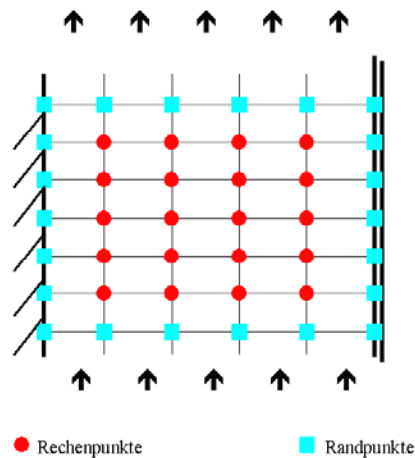


Abb. 79: Rechengitterdarstellung.

Nach [32] werden hinsichtlich der räumlichen Komplexität drei Netzarten unterschieden:

- Oberflächennetze, die nur Punkte auf der dreidimensionalen Geometrie des Körpers oder sonstiger Berandungen des Strömungsfeldes beinhalten.
- zweidimensionale Netze, deren Punkte in einer Ebene liegen.
- dreidimensionale Netze, deren Punkte im gesamten dreidimensionalen Strömungsgebiet liegen.

Ausgehend von dem baukonstruktiven Schnittmodell der Fassade (Größenangaben, Aspektverhältnisse), der Lage der Zu- und Abluftöffnungen und der damit verbundenen wesentlichen Ausbildung der Strömungsrichtung wurde im Rahmen dieser Arbeit das zweidimensionale Netz zur Anwendung gebracht [15]. Mit einem 2-dimensionalen Fassadenschnitt sollen die Darstellung von beschreibenden Zustandsgrößen eines ausgewählten Fassadenbetriebszustandes erfolgen. Bei einem 2-dimensionalen Netz liegen alle Netzknoten in einer durch den Körper und die Ein- und Ausströmränder gebildeten Ebene. Mögliche Strömungsabhängigkeiten in einer dritten Ebene werden vernachlässigt. In Abb. 80 wird ein Beispiel eines strukturierten Netzes dargestellt.

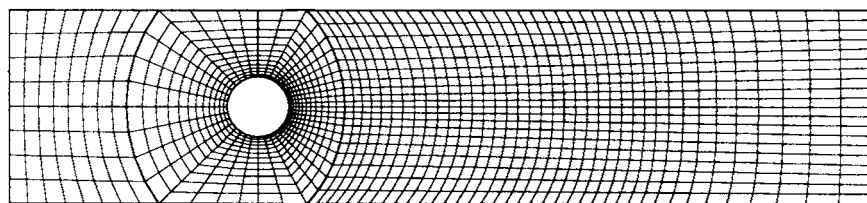


Abb. 80: Beispiel eines zweidimensionalen Block-Strukturierten Netzes [11].

Nach [23] werden zur Diskretisierung folgende Schritte erforderlich:

- Geometriedefinition

Die räumliche Geometrie des umströmten oder durchströmten Körpers sowie die sonstigen Berandungen des Berechnungsgebiets werden definiert.

- Netzgenerierung

Im Innern des Berechnungsgebietes sowie auf den Berandungen werden die räumlichen Stützstellen (Diskretisierungspunkte, Knoten, Netzpunkte) der Diskretisierung festgelegt. Zieht man Geraden zwischen benachbarten Punkten, so ergibt sich ein Netz (oder auch ein Gitter). Die Zustandsgrößen werden an den Netzpunkten abgespeichert.

- Diskretisierung im Raum

Die Verteilung der Zustandsgrößen zwischen den Netzpunkten wird durch das jeweilige numerische Verfahren festgelegt. Diese Festlegung hat Einfluß auf die Darstellung der Ableitungen in den Gitterpunkten und an den Positionen zwischen den Gitterpunkten. In jedem Falle entsteht eine Abweichung vom tatsächlichen Verlauf (Ungenauigkeit, Fehler).

- Zeitdiskretisierung

Die Zustandsgrößen werden nur zu bestimmten Zeitpunkten berechnet und abgespeichert. Der zeitliche Verlauf der Zustandsgrößen an den Gitterpunkten zwischen diesen Zeitpunkten sowie die Zeitableitung werden approximiert.

### **5.6.2 Realisierung der Diskretisierung im Raum**

Nach der Definition eines zweidimensionalen Netzes erfolgt die Diskretisierung der Strömungsgrößen und ihrer Ableitungen bezüglich ihrer Koordinaten  $x$  und  $y$  zu einem konstanten Zeitpunkt  $t$ . Als Verfahren wurde u. a. unter Berücksichtigung der Analytik des aufgestellten Modells das Finite-Volumen Modell (FVM) angewendet.

Bei diesem Verfahren wird das gesamte Rechenfeld in einzelne Kontrollvolumen (Rechenzellen) eingeteilt. Die Differentialgleichung wird über das gesamte Strömungsgebiet integriert, und es erfolgt für jede Zelle eine Umwandlung des Volumenintegrals in sechs Oberflächenintegrale, wobei sich die Ordnung aller Differentialquotienten um eins reduziert. Die Lage der zu jeweils einem bestimmten Kontrollvolumen gehörenden Rechenpunkte wird auf den Mittelpunkt der einzelnen Volumen festgelegt. Bei der Überführung der Differentialgleichungen in algebraische Gleichungen wird über die einzelnen Kontrollvolumen integriert.

## 6 Berechnung eines Fassadenbetriebszustandes

### 6.1 Festlegung des Fassadenzustandes und der Randbedingungen für die Berechnungsdurchführung

Aus den verschiedenen Regelzuständen der Doppelfassade wurde der Betriebszustand I (s. Kap. 2.4, Tb. 2), die motorische Ablüftung des Fassadenspalts zur Wärmegegewinnung für die Lüftungstechnische Anlage, gewählt. Dieser Betriebszustand bildete die Grundlage für die vorhergehenden Betrachtungen im Kapitel 5 bis 7. Aus dem Ausschnitt des Anlagenschaltschemas des Gebäudes (s. Abb. 81) ist zu entnehmen, daß über Steuer- und Regelungselemente (Volumenstromregler, Stellventile, Drosselklappen) die Abluft der Doppelfassade gezielt für die Wärmegegewinnung eingesetzt werden kann. Führungsgrößen für die Lüftungstechnische Anlage sind u. a. die Außenlufttemperatur und -feuchte, für die Ablüftung der Doppelfassade ein Fassadentemperaturfühler.

Darüber hinaus existieren weitere Fassadenzustände, die ganz gleich welcher Belastungen, Hauptbetriebszustände sein können, in denen rein natürliche Konvektionen bzw. auch gemischt erzwungene Konvektionen stattfinden.

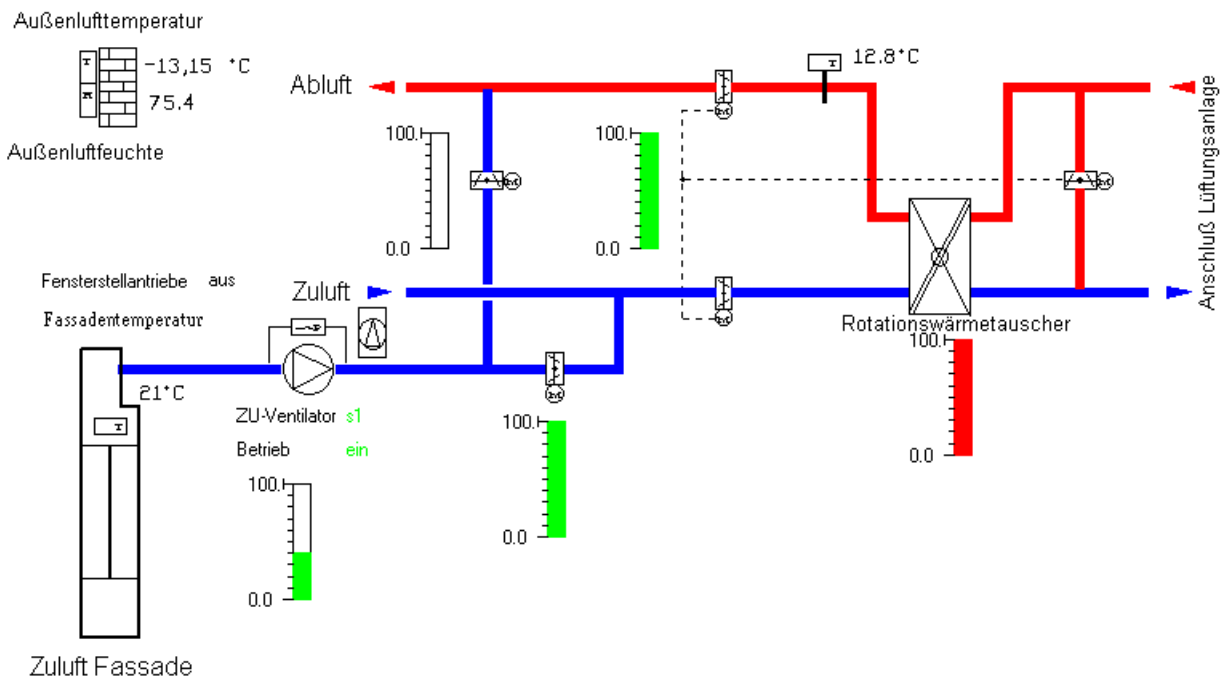


Abb. 81: Ausschnitt Zustand aus dem realisierten Anlagenschaltschema des Untersuchungsgegenstandes zur lüftungstechnischen Einbindung der Doppelfassade am 09.02.1996.



Zur Berechnungsdurchführung wurden ein Einströmrand und ein Ausströmrand definiert. Folgende Randbedingungen wurden für die Berechnungsdurchführung (auch aus den vorhergehenden Untersuchungen) angenommen:

- 2-dimensionale Behandlung
- Einströmtemperatur: 266 K
- Einströmgeschwindigkeit: 0,56 m/s
- Temperatur der festen Begrenzungsflächen: 303 K
- Anzahl der Iterationen: 600/1800
- Druckverhältnis  $p_{out}/p_{in}$ : 1
- Berechnungsart: turbulent, instationär

## 6.2 Verwendetes Rechenprogramm

Um zuverlässige Ergebnisse bzgl. des Gesamtverhaltens dieser hybriden Doppelfassade zu erhalten, wurde ein kommerzielles Programm (FLUENT 5.5) für die numerische Strömungssimulation herangezogen.

Das kommerzielle Programm FLUENT 5.5 ist eine Weiterentwicklung der bisherigen CFD-Programmfamilie der FLUENT Inc., die aus verschiedenen Modulen besteht. Das Programm beinhaltet Modellierungsansätze zu komplexen physikalischen und chemischen Vorgängen in stationären und instationären Strömungen, beispielweise Turbulenz, Strahlungswärme, chemische Reaktionen und Verbrennung, Mehrphasigkeit. Als ein Finite-Volumen-Programm zur Berechnung von Strömungsproblemen aller Art, mit den Unterscheidungsmerkmalen wie

- stationär, instationär
- inkompressibel, kompressibel
- laminar, turbulent
- Mehrphasenströmung (Fluid-Fluid, Fluid-Solid)
- newtonsche und nicht-newtonsche Fluide
- freie Oberflächen
- gekoppelte Wärmeleitung und -konvektion
- bewegte Gitter
- chem. Reaktionen, Verbrennungen

soll in Teilbereichen eine Anwendung bzgl. der Fassadeninnenströmungsuntersuchung erfolgen.

Die Geometriebeschreibung bei der Anwendung von FLUENT erfolgt durch das koppelbare Preprocessor- Programm GAMBIT, mit dessen Hilfe sich Geometrien, auch komplexere, erzeugen und vernetzen lassen. Dabei können verschiedene Vernetzungsstrategien, je nach Topologie und bereits eine Spezifikation der Ränder für die spätere Zuordnung von Randbedingungen in FLUENT vorgenommen werden. Das Programm FLUENT unterstützt adaptive Netzverfeinerung, konforme und nicht- konforme Gitterübergänge und Datenimport aus unterschiedlichen Vernetzungsprogrammen.

Für das Postprocessing stehen in FLUENT leistungsfähige Programmpakete parallel zum Rechenprozeß zur Visualisierung und Analyse zur Verfügung. Damit wird eine bedeutend komfortablere Überprüfung bereits schon bei den erzeugten Zwischenergebnissen möglich. Als Ergebnis werden bedeutend verbesserte Aussagen über das thermodynamische und Strömungsverhalten der Fassadenkonstruktion erwartet.

### **6.3 Hardware**

Für die Installation des Programmsystems FLUENT 5.5 und der Durchführung der Berechnungen wurde ein Dual Prozessor PC verwendet, der als Betriebssystem Linux RedHat 6.2 (Kernel: 2.2x) verwendet. Ausgestattet mit zwei Intel - PIII 800 MHz/133, 256 KB Prozessoren besitzt er für die Rechenprozesse einen Hauptspeicher von 1024 MB ECC SDRAM. Mit entsprechenden peripheren Geräten (wie USV, Festplatten, Drucker, Netzwerkanbindung, etc.) konnten zügige und stabile Berechnungen durchgeführt werden.

### **6.4 Gittergenerierung**

Zur anschließenden Untersuchung erfolgt eine geometrisch gleiche Abbildung des 2-dimensionalen Fassadenquerschnitts mittels GAMBIT. Mögliche Volumenelemente sind Tetraeder, Hexaeder, Prismen oder Pyramiden, im hier betrachteten 2-dimensionalen Fall Dreiecks- bzw. Viereckselemente. Die Vernetzung kann strukturiert, unstrukturiert oder hybrid erfolgen. GAMBIT besitzt den besonderen Vorteil, vorhandene Geometriedaten aus CAD/CAE - Dateien zu importieren und zu modifizieren. Nach erfolgter Geometriebeschreibung (ausschließliche Betrachtung des Aspektverhältnisses der Fassade von Höhe/Breite: 1/25) und Erfassung der Berandungsgrenzen erfolgte eine Vernetzung, u. a. unter Anwendung des *pave*- Algorithmus (s. Abb. 82).

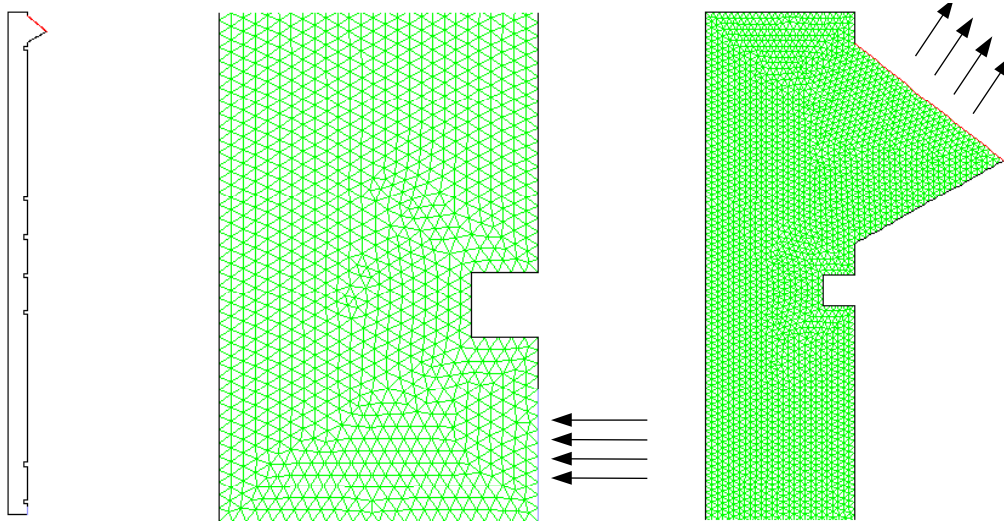


Abb. 82: Fassadengeometrie und Ansicht der Dreieckszellenvernetzung am Ein- und Ausströmrand des Fassadenmodells.

Bei der Vernetzung wurde auf eine besonders gleichmäßige Struktur geachtet, so daß kein bevorzugtes Vernetzungsgebiet bzw. lokal verfeinerte Bereiche entstanden. Kritische Bereiche wie Strömungsprofileinengungen durch Querriegel oder die Einström- bzw. Ausströmränder konnten aufgrund der 2-dimensionalen Behandlung des Problems mit ausreichenden Zellen belegt werden. Insgesamt wurden 34.646 Dreieckszellen generiert.

## 6.5 Berechnungsdurchführung

Fast alle in der Praxis auftretenden Strömungsformen haben turbulenten Charakter. Dabei wird durch die großen Turbulenzballen der Hauptströmung Energie entzogen, die beim Zerfall der Turbulenz in der sogenannten Energiekaskade zu immer kleineren Einheiten transferiert wird, bis sie schließlich in Wärme dissipiert [32]. Dies erfordert für die numerische Behandlung eine genügend feine Diskretisierung des Strömungsgebietes, um auch die kleinsten in der turbulenten Strömung auftretenden Wirbel noch aufzulösen und richtig darzustellen. Nach [[12]] bedarf die sogenannte direkte numerische Simulation (DNS) zur Auflösung der kleinsten Wirbel (im dreidimensionalen Raum) eine Rechnerleistung, die die bisherigen und auch in näherer Zukunft vorhandenen Parallelrechner bzw. Computer nicht bieten können. Um diese Schwierigkeiten zu lösen, wurden entsprechende Turbulenzmodelle entwickelt, wie z. B. das hier verwendete Zweigleichungsmodell ( $k-\epsilon$ ).

### 6.5.1 K-epsilon - Modell

Bei Anwendung des k-ε-Modells (nach B. E. Launder und D. B. Spalding 1974) werden zur Modellierung der Reynoldsspannungen zwei zusätzliche Variablen benutzt, wobei k die turbulente kinetische Energie und ε die Dissipationsrate darstellen. Es beruht auf einen Ansatz für die turbulente Viskosität, auch als Wirbelviskosität bezeichnet. Sie beschreibt den diffusen Impulstransport, der durch die turbulenten Wirbelbewegungen hervorgerufen wird. Es gilt:

$$\mu = \rho \cdot c_{\mu} \cdot \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad \text{Gl. 26}$$

Unter Vernachlässigung der Auftriebsterme ergeben sich nach [23] folgende Gleichungen für k:

$$\varepsilon \frac{\partial k}{\partial t} + (u^T \cdot \nabla)k = \frac{\mu_T}{\rho} \left\{ \left[ (\nabla \cdot u^T)^T + (\nabla \cdot u^T) \right] \cdot \nabla \right\}^T \cdot u - \varepsilon + \nabla \left( \frac{\mu + \mu_T}{\rho} \nabla k \right) \quad \text{Gl. 27}$$

und ε:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (u^T \cdot \nabla)\varepsilon = c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \frac{\mu_T}{\rho} \left\{ \left[ (\nabla \cdot u^T)^T + (\nabla \cdot u^T) \right] \cdot \nabla \right\}^T \cdot u - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \nabla \left( \frac{\mu_T}{\rho \delta} \nabla \varepsilon \right), \quad \text{Gl. 28}$$

mit  $c_{\varepsilon 1} = 1.44$ ,  $c_{\varepsilon 2} = 1.92$ .

Dieses Modell ist ein Zwei-Gleichungsmodell, zu deren Lösung von k und ε zwei zusätzliche Differentialgleichungen benutzt werden. Durch diese empirische Darstellung des Verhaltens von turbulenten Strömungen erhofft man sich eine ausreichende Beschreibung des turbulenten Verhaltens der Strömung.

In den letzten Jahren sind Versuche im Bereich der Grundlagenforschung unternommen worden, das k-ε-Modell u. a. durch Berücksichtigung der Auftriebsterme zu erweitern. Diese Modellerweiterung steht in dem verwendeten Programmpaket Fluent 5.5 derzeit noch nicht zur Verfügung.

## 6.6 Parameter für die Berechnung

Die Ergebnisse aus der meßtechnischen Erfassung dienen als Datenbasis für die numerische Simulation (CFD - Computational Fluid Dynamics) des Strömungsfeldes. Unter Verwendung des Programmsystems FLUENT 5.5 wurden beispielhaft für die Darstellung folgende Schalterstellungen im Programm gesetzt [Tab. 5]:

Tab. 5: Eingabeparameter für berechnete Fallbeispiele 1 und 2 mit FLUENT 5.5.

Lfd. Nr.	Beschreibung
allg. für Fall 1 und Fall 2	Solver: Segregated, Formulation: Implicit, Space: 2D, Time: Unsteady Velocity Formulation: Absolute, Unsteady Formulation: 2 <sup>nd</sup> -Order Implicit Solution Initialization: x-velocity, y-velocity: 0 m/s, Temperature: 302,729 K (mittlere Temperatur über alle Zellen aus den gesetzten Randbedingungen ermittelt), k: 1 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> , ε: 1 m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> , Gauge Pressure: 0 Pa
Fall 1	Energy: Enable Energy, Operating Conditions: Gravity (-9.81 m/s <sup>2</sup> ) Boussinesq- Parameter: Operating Temperature: 284,5 K Viscous Model: Model: k-epsilon (2 eqn) Standard Options: Full Buoyancy Effects Model Constants, Cmu: 0.009, C1-Epsilon: 1.44, C2- Epsilon: 1.92 TKE Prandtl- Number: 1, TDR Prandtl- Number: 1.3, Energy Prandtl- Number: 0.85 Near-Wall Treatment: Standard Wall Functions Convergence Criterion: continuity: 1e-06, x-velocity, y-velocity: 1e-06, energy: 1e-07, k, ε: 1e-06, Time: Time Step Size: 1 s, Number of Time Steps: 600 Iteration: Max Iteration per Time Step:60
Fall 2	Energy: Enable Energy, Operating Conditions: Gravity (-9.81 m/s <sup>2</sup> ) Boussinesq- Parameter: Operating Temperature: 284,5 K Viscous Model: Model: Large Eddy Simulation Model Constants: Crng: 0.157, Subgrid-Scale Model: RNG Convergence Criterion: continuity: 0.001, x-velocity, y-velocity: 0.001, energy: 1e-06, k, ε: 0.001, Time: Time Step Size: 1 s, Number of Time Steps: 600 Iteration: Max Iteration per Time Step:60

## 6.7 Ergebnisdarstellung/Diskussion des betrachteten Betriebszustandes

Aufgrund der anlagentechnischen Ausbildung und Konfiguration der Steuerung und Regelung des hier untersuchten Fassadenausschnittes wurde der Zielstellung folgend mit einem instationären Löser gearbeitet. Unter diesen Annahmen / Bedingungen ist zu erwarten, daß -vorausgesetzt, die Randbedingungen bleiben zeitlich konstant– die Lösung des instationären Problems sich bei hinreichend genügender Zeit einem stationären Zustand annähert bzw. entspricht.

Ausgehend von einem gesetzten Ruhezustand werden für dieses zu erwartende Strömungsverhalten in der Fassade eine Auswahl von Momentaufnahmen bzgl. der Temperatur- und Geschwindigkeitsverhältnisse nach 10 min. unter Anwendung der in Kap. 6.6 genannten Fallbeispiele und gesetzten Parameter dargestellt (s. Tab. 5, Abb. 83–86). Dabei sollen die Zeitdauer  $t = 10$  min. die Mindestlaufzeit des gewählten Fassadenbetriebszustandes beschreiben. Die Betrachtung des Strömungsprofils nach 10 min. kann somit auch als Eingabezustand (Input) für die Modellierung weiterer Betriebszustände dienen.

Mit den in Tab. 5 Kap. 6.6 gesetzten Konvergenzkriterien wurden unter Verwendung des  $k$ ,  $\epsilon$ -Turbulenzmodells (Fallbeispiel 1) bzw. Large Eddy Modells (Fallbeispiel 2) keine stationären Felder/Grenzzustände erzeugt. Das hier angewandten Turbulenzmodelle blieben mit den gewählten Parametern durchgehend instationär.

Abb. 83 liefert eine zu erwartende vertikale Temperaturschichtung, die sich auch aus den Meßwerten (s. Kap. 3) ablesen läßt. Hier kann man über den gesamten Höhenverlauf die durch konvektiven Wärmeübertrag sich ändernde Energie und der damit verbundenen Geschwindigkeitserhöhung (s. Abb. 84) erkennen. Letztendlich haben diese Antriebskräfte (Volumenkräfte bzw. Auftriebskräfte) einen erkennbaren Einfluß auf die Fassadeninnenströmung.

Dagegen gibt das Large Eddy Verfahren scheinbar die horizontale Temperaturschichtung besser wieder. Diese Methode war mit einer bedeutend höheren Rechenzeit verbunden, läßt aber eine sehr gute Ausbreitung der Wirbelstruktur im Fassadeninnenbereich erkennen. Im vertikalen Kernströmungsbereich kommt es bei dieser Methode gegenüber den Meßwerten zu einer zu starken Abkühlung.

Mit den hier gewählten Fallbeispielen lassen sich qualitative Aussagen zum Strömungsverlauf je nach den verwendeten Berechnungsmethoden treffen. Bei allen Berechnungen sind deutlich die Auswirkungen der horizontalen Querprofile auf den Strömungsverlauf zu erkennen. Jedoch liefern die hier beispielhaft verwendeten Turbulenzmodelle verschiedene Ergebnisse bzgl. des untersuchten Temperatur- bzw. Geschwindigkeitsverlaufes, die in dieser Form nicht befriedigen können. Wie bereits in Kapitel 6.5.1 angemerkt, finden z. B. in der Herleitung der  $k$ - $\varepsilon$ -Gleichungen die Auftriebsterme keine Berücksichtigung. Für die hier vorliegende Strömungsform sind die Auftriebskräfte eine entscheidende Größe, so daß davon ausgegangen werden kann, daß die numerische Simulation auftriebsbedingter Strömungen mit dem hier verwendeten  $k$ - $\varepsilon$ -Turbulenzmodell noch nicht Stand der Technik ist. Möglicherweise ist das hier verwendete stärker filternde Large Eddy Modell bei der Lösung der örtlich gemittelten Navier-Stokes Gleichungen realitätsnäher als die Anwendung des Standard- $k$ - $\varepsilon$ -Modells. Dies zwingt sicherlich u. a. zu einer Erweiterung bzw. Modifizierung der Turbulenzmodelle, um die wesentlichen strömungsbeeinflussenden Größen besser erfassen zu können.

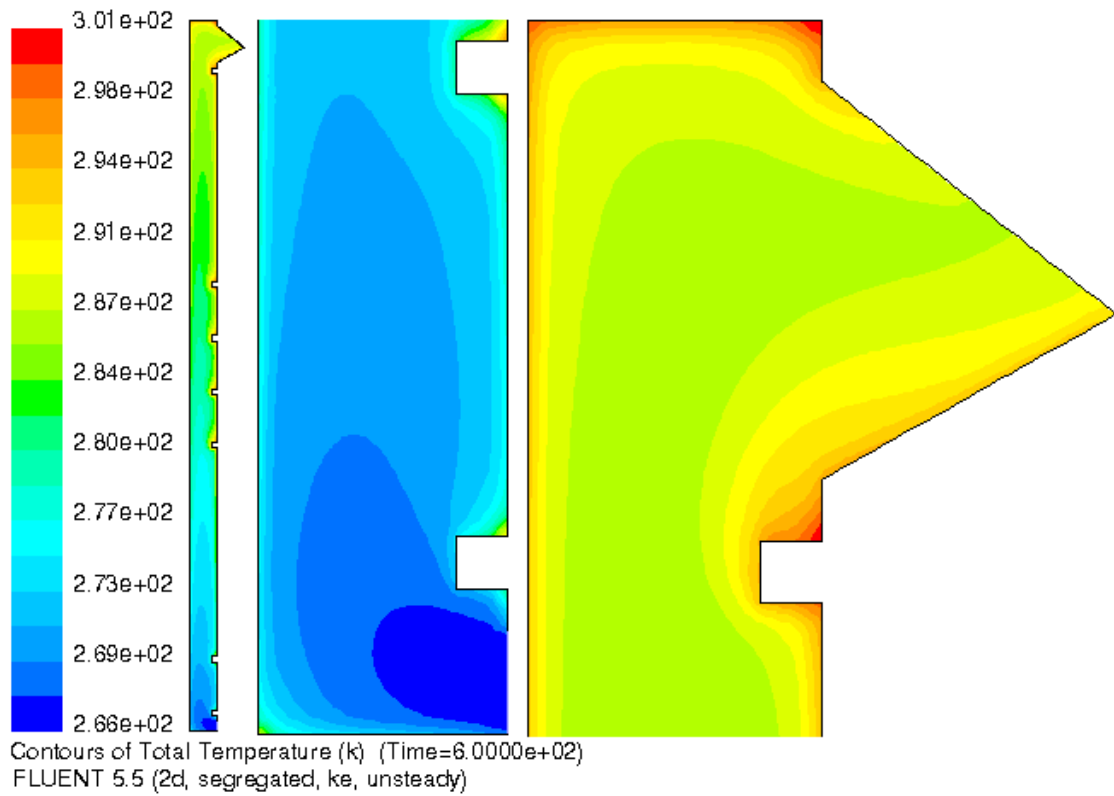


Abb. 83: Darstellung Temperaturprofil am gelösten Fallbeispiel 1 mit Detailansicht Einström- bzw. Ausströmbereich.

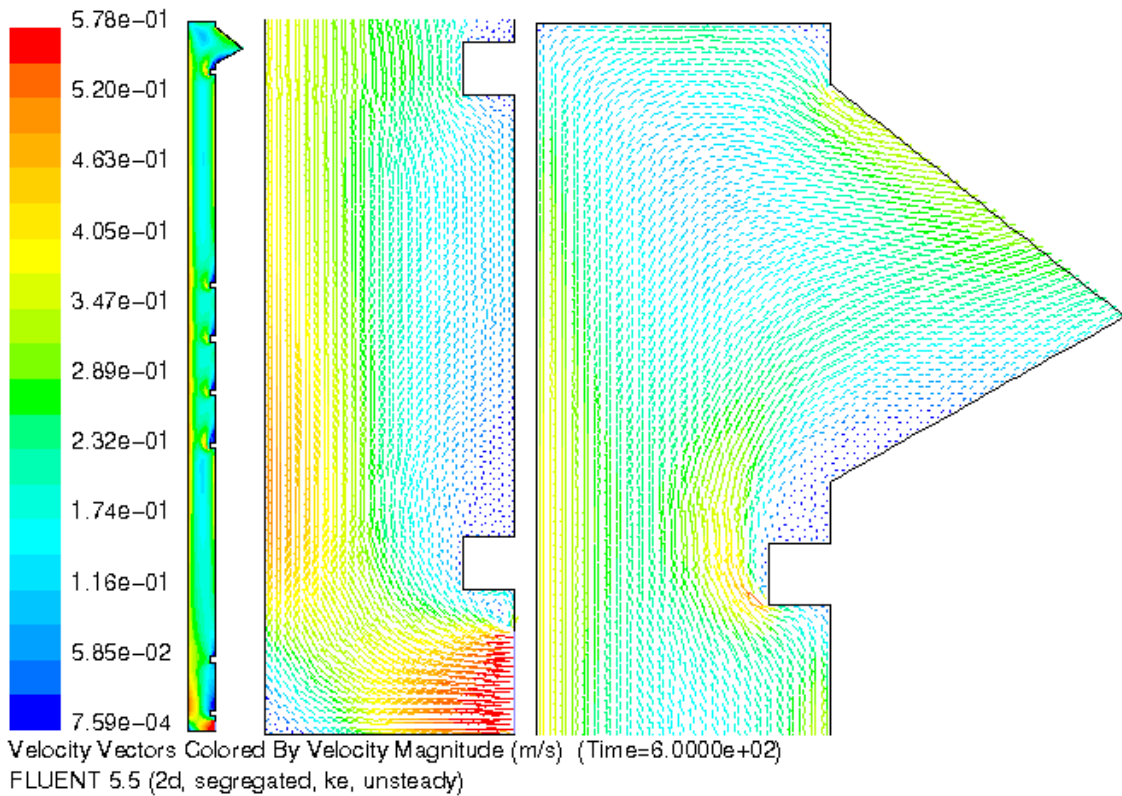


Abb. 84: Darstellung Geschwindigkeitsprofil am gelösten Fallbeispiel 1 mit Detailansicht Einström- bzw. Ausströmbereich.



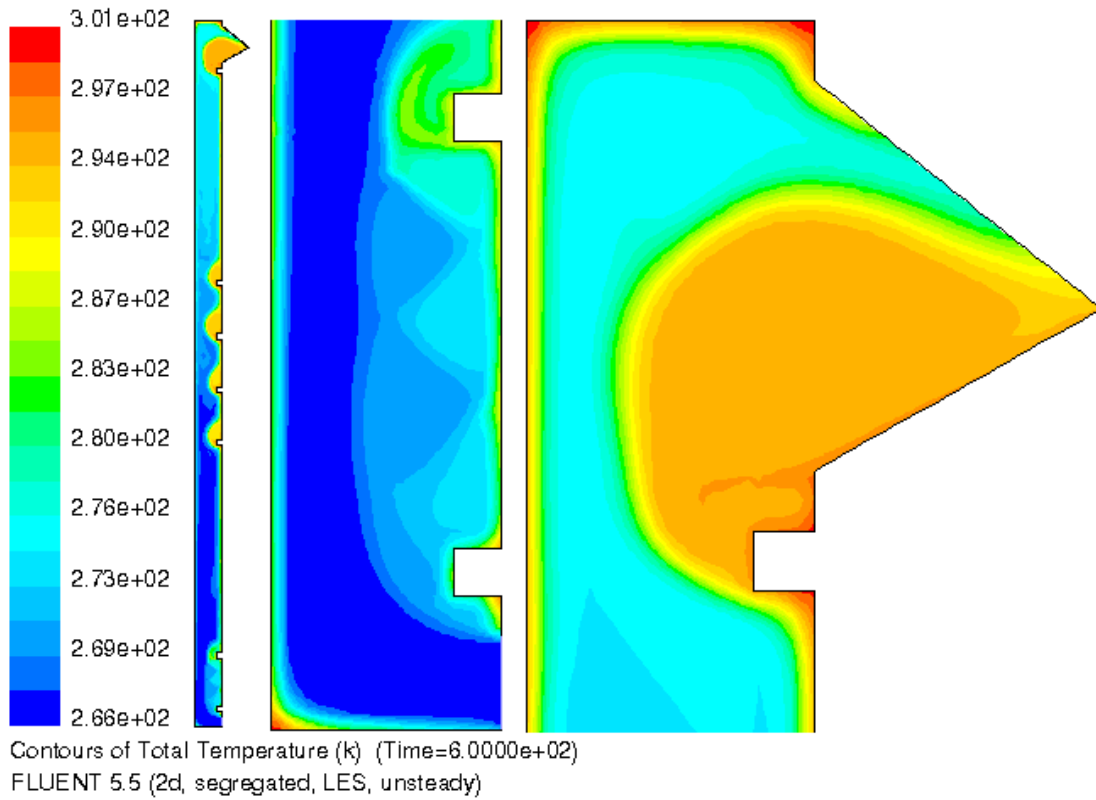


Abb. 85: Darstellung Temperaturprofil am gelösten Fallbeispiel 2 mit Detailansicht Einström- bzw. Ausströmbereich.

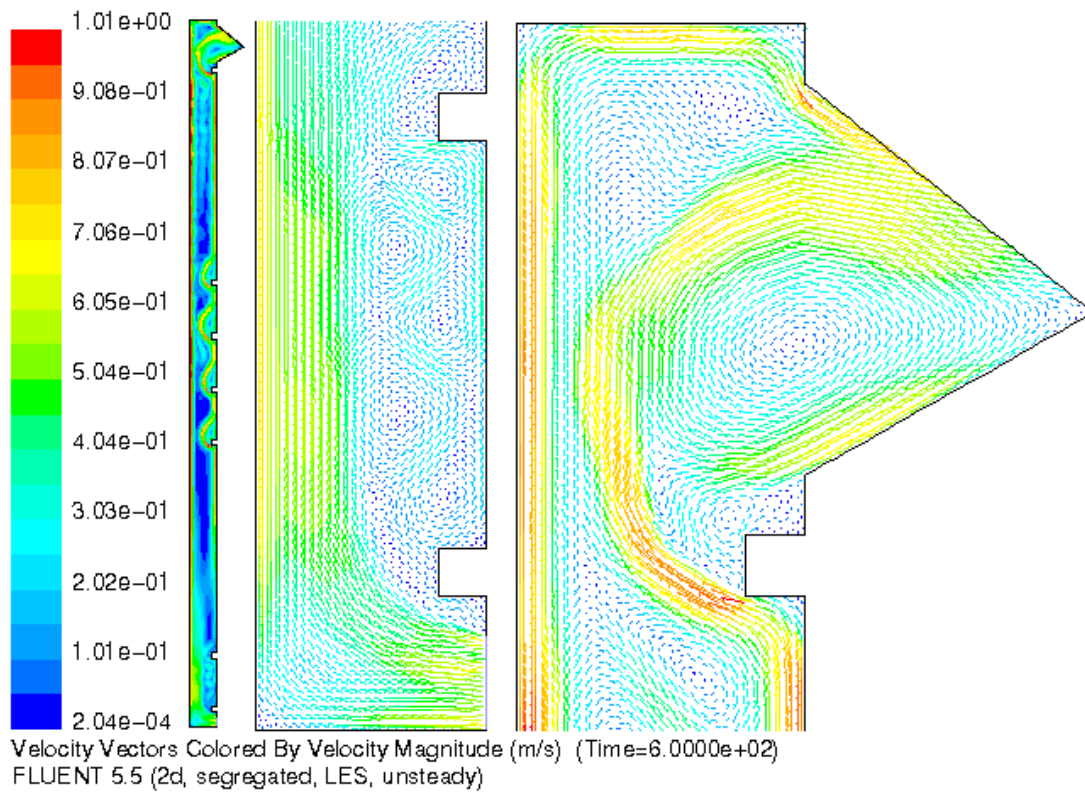


Abb. 86: Darstellung Geschwindigkeitsprofil am gelösten Fallbeispiel 2 mit Detailansicht Einström- bzw. Ausströmbereich.

## 7 **Schlußfolgerungen und Ausblick**

Neuentwickelte Fassadentechniken, wie die der Glas- Doppelfassadentechnik erobern in den letzten Jahren in einer großen Vielfalt die „neuzeitliche Architektur“. Unumstritten ist ihre Wirksamkeit hinsichtlich des Schallschutzes gegenüber Außenlärm, jedoch werden thermisches und strömungstechnisches Verhalten von Glas- Doppelfassaden sehr differenziert und unterschiedlich beurteilt.

In der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen zu einer an die Lüftungsanlage des Gebäudes eingebundenen hinterlüfteten Doppelfassade durchgeführt, um möglichst allgemeingültige Aussagen zur Anwendung dieser alternativen Energieanwendung zu erhalten. Eine entscheidende Grundlage bildete dabei die seit Nutzungsbeginn des Gebäudes sehr umfangreiche, praktische Meßwertaufnahme im Fassadeninnenströmungsbereich.

Die Schwerpunkte der Arbeit lagen bei:

- der Ausstattung, Planung, Einbau der Meßtechnik am Untersuchungsgegenstand einschließlich der Meßwertaufnahme,
- der Datendarstellung und -auswertung in Abhängigkeit der verschiedenen Betriebszustände in der GLT und
- der 2-dimensionalen Simulation und Visualisierung eines ausgewählten Fassadenbetriebszustandes mit Hilfe der Lösung der Navier-Stokesschen Bewegungsgleichungen.

Innerhalb des Meßzeitraumes von über 22.500 Stunden (>940 Tage) konnten am Untersuchungsgegenstand rund 4.025 Betriebsstunden erfaßt werden, in denen der Fassadenablüfter der Doppelfassade zur Zuluftvorerwärmung (3.825 Stunden) bzw. Zuluftgewinnung (40 Stunden - Fassadenuntertemperaturen) für die lüftungstechnischen Anlage des Gebäudes und aus Gründen des Überhitzungsschutzes der Doppelfassade (ca. 160 Stunden) arbeitete. Die durchschnittliche Förderrate des Fassadenventilators lag dabei bei ca. 762 m<sup>3</sup>/h. Bei einer durchschnittlich angenommenen Wirkleistung des Ventilators (ohne vor- bzw. nachgeschalteten Betriebseinrichtungen wie z. B. Frequenzumformer, Stellklappenantriebe, Rotationswärmetauscher u. ä.) von ca. 370 W lag die notwendige Stromaufnahme für den Fassadenventilator bei mehr als 1.500 kWh. Demgegenüber steht ein Deckungsbeitrag am Gesamtheizenergiebedarf des Gebäudes durch die Zuluftvorerwärmung der Außenluft über die Doppelfassade von rund 7.000 kWh, das sind gemessen am Gesamtenergiebedarf des Gebäudes von über 400.000 kWh weniger als 2%. Bei Erzeugung

der über die Doppelfassade gewonnenen Wärmemenge von ca. 7.000 kWh über die im Gebäude installierte Wärmepumpe würden rund 2.500 kWh elektrischer Energie benötigt werden; abzüglich der Antriebsenergie des Fassadenventilators von 1.500 kWh verbleibt über den Meßzeitraum am Untersuchungsgegenstand ein Überschuß von rund 1.000 kWh. Damit wird ein Beitrag zur Reduzierung der spezifischen Kohlendioxid- Emission geleistet, jedoch kann eine wirtschaftliche Anwendung allein über die Lüftungstechnische Nutzung am Untersuchungsgegenstand nicht eintreten.

Es können weiter folgende Ergebnisse zusammengefaßt dargestellt werden:

1. mit der Realisierung des meßtechnischen Programms im Fassadenbereich und der Auswertung wurden Erkenntnisse über die praktischen thermodynamischen Vorgänge im vorliegenden Fassadentyp gewonnen,
  - durch die Analyse können Aussagen zu Temperatur- und Strömungsgrößen im Fassadensystem getroffen werden, Häufigkeitscharakteristiken lassen verallgemeinerungsfähige Aussagen für vergleichbare Objekte zu,
  - eine ständig gegebene und gewünschte Übertemperatur während des Ansaugprozesses für die Zuluftvorerwärmung ist nicht immer gegeben. Zur gegenwärtigen Nutzung der Doppelfassade kann hier eine Anpassung im GLT-Programm des Gebäudes erfolgen,
  - die maschinelle Ablüftung und damit Nutzung der Fassadenabluft zur Zulufttemperaturerhöhung sollte erst ab ca. 5 K mittlerer Fassadenübertemperatur beginnen, ein strömungstechnischer Abgleich (Volumenstromregelung) sollte für Teilfassadenbereiche realisierbar sein,
  - eine Nutzung der Fassadenabluft am Untersuchungsgegenstand zur Zuluftvorerwärmung ist zeitlich eingegrenzt; die thermischen Leistungen sind u. a. in Abhängigkeit der Einstrahlung stark schwankend, dies sollte im Anlagenkonzept mit berücksichtigt werden,
  - die am Untersuchungsgegenstand gewonnenen Erkenntnisse über die Energiebeiträge im Zusammenhang mit der Nutzung der Doppelfassade zur Zuluftvorerwärmung für die Lüftungsanlage im Gebäude lassen eine wirtschaftliche Darstellung des Fassadenkonzeptes nicht erkennbar werden,
  - eine numerische Darstellungsmöglichkeit der Transportvorgänge in der Doppelfassade ist durch die Anwendung des vorgeschlagenen Modells möglich, Einschränkungen aufgrund verschiedener Ergebnisse müssen bezüglich der Wirkung der beispielhaft angewendeten Turbulenzmodelle getroffen werden.

Bei der Bearbeitung der Thematik konnten jedoch die auftretenden Probleme nicht in jedem

Fälle vollständig gelöst werden. Für eine thematische Weiterbearbeitung gibt es eine Reihe von Ansatzpunkten:

Für theoretische Arbeiten:

- die Erfassung weiterer Betriebszustände des Fassadensystems,
- die Untersuchung der Strahlungseinflüsse am Modell,
- die Untersuchung an 3-dimensionalen Geometrien der Doppelfassade.
- die Veränderung der Seitenverhältnisse der Doppelfassade und deren Auswirkungen auf die Berechnungsdurchführung und
- die Untersuchung zu verschiedenen numerischen Lösungsverfahren unter Variation der Randbedingungen.

Für experimentelle Arbeiten an Glas-Doppelfassaden:

- die Änderungen der Einströmverhältnisse (Lage, Form, Regulierbarkeit, ....),
- die Verfeinerung der Meßmethoden im Fassadeninnenströmungsbereich (v. a. Temperatur- und Geschwindigkeitsmessung),
- die Ermittlung der thermodynamischen Zustandsänderungen in geeigneten Glas-Doppelfassaden,
- die Variation der Volumenströme in den Teilfassadenflächen in Abhängigkeit der Einstrahlungsleistung und
- die verbesserten anlagentechnische Einbindemöglichkeiten der Fassadenabluft unter Berücksichtigung des Gesamtenergiekonzeptes des Gebäudes.

Die weiterführenden Untersuchungen können einen Beitrag für ein komplettes Planungsinstrumentarium für Gebäude mit luftdurchströmten Glas-Doppelfassaden leisten. Erst zuverlässige Zustandsbeschreibungen der Vorgänge in der Doppelfassade liefern u. a. verlässliche Angaben für die Lüftungstechnische Einbindung der Fassadenabluft. Daraus können gesicherte Aussagen über das Energieeinsparpotential dieser neuartigen Fassadensysteme abgeleitet werden.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Ache, R.: Inbetriebnahme und Testphase der Sondermeßtechnik am UCC. Diplomarbeit: Lehrstuhl Technischer Ausbau der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, 1997
- [2] Ansoerge, R. und Oberle, Hans J.: Mathematik für Ingenieure. Band 2: Differential- und Integralrechnung mehrerer Variabler, Gewöhnliche Differentialgleichungen, Partielle Differentialgleichungen, Integraltransformationen, Funktionen einer komplexen Variablen – Akademie Verlag GmbH Berlin 1994 – ISBN 3-05-501614-9
- [3] Baehr, H. D. und Stephan, K. : Wärme- und Stoffübertragung. Zweite Auflage – Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1996 – ISBN 33-540-60374-3
- [4] Biran, A.: Matlab für Ingenieure: Systematische und praktische Einführung. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage – An imprint of Addison Wesley Longman, Inc. – 1997
- [5] Blanke, W. (Herausgeber): Thermophysikalische Stoffgrößen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1989 – ISBN 3-540-18495-3
- [6] Bosnjakovic, F.: Technische Thermodynamik Teil II. 6., vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage von Professor Dr.-Ing. K.F. Knoche, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen - 1997 by Dr. Dietrich Steinkopf Verlag, GmbH & Co. KG Darmstadt – ISBN 3-7985-1030-X
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft (Hrsg.): Energiedaten. Bonn - 1997, verschiedene Jahrgänge bis einschließlich 1997
- [8] Elsner, N., Fischer, S., Huhn, J.: Grundlagen der Technischen Thermodynamik. Band 2 Wärmeübertragung, 8., grundlegend überarbeitete und ergänzte Auflage - Akademie Verlag GmbH Berlin 1993 – ISBN 3-05-501389-1
- [9] Enquete Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“ des 12. Deutschen Bundestages (Hrsg.) : Mehr Zukunft für die Erde. Bonn : Economica Verlag; 1995
- [10] Feist, Wolfgang: Thermische Gebäudesimulation. Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze / Wolfgang Feist. - 1. Aufl. – Heidelberg:Müller, 1994
- [11] Ferziger, Joel H. und Peric, M.: Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1996. ISBN 3540-59434-5
- [12] Griebel, M., Dornseifer, T., Neunhoeffler, T.: Numerische Simulation in der Strömungsmechanik: eine praxisorientierte Einführung. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1995 - ISBN 3-528-06761-6
- [13] Hager, A.: Umweltzentrum Cottbus - Beitrag zu einer komplexen Wirtschaftlichkeitsanalyse. Diplomarbeit: Lehrstuhl Technischer Ausbau der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, 1995

- [14] Hänel, K.: Bericht über die Aufgabenstellung, Planung und Ausführung der Sondermeßtechnik am Umweltzentrum Cottbus auf der Grundlage der funktionellen, baukonstruktiven und ausrüstungstechnischen Gegebenheiten dieses Gebäudes. – Cottbus, Juli 1995
- [15] Hecht, F.: Gittererzeugung & Datenstrukturen. Script zu „Hamburger Sommerschulen“ vom 8.-12. September 1997 – Technische Universität Hamburg – Harburg, Arbeitsbereich Mathematik
- [16] Jischa, M.: Konvektiver Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig 1982 – ISBN 3-528-08144-9
- [17] Keller, B.: Klimagerechtes Bauen. Grundlagen – Dimensionierung – Beispiele – B.G. Teubner Stuttgart 1997 – ISBN 3-519-05080-3
- [18] Lang, W.: Zur Topologie mehrschaliger Gebäudehüllen aus Glas. Unveröffentlichtes Manuskript – aus Gertis, K.: Sind neuere Fassadenentwicklungen bauphysikalisch sinnvoll? Teil 2: Glas-Doppelfassaden (GDF)
- [19] Liersch, G.: Untersuchung des Energietransportes in einer konvektiv hinterlüfteten transparenten Wärmedämmfassade. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 4 Nr. 120. Düsseldorf: VDI - Verlag 1993 – ISBN 3-18-142004-2
- [20] Liersch, Klaus W.: Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen. Band 1: Vorhangfassaden – 1. Auflage 1981. Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin - ISBN 3-7625-1426-7
- [21] Merker, G.: Konvektive Wärmeübertragung. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokio 1987 – ISBN 3-540-16995-4
- [22] Nickel, U.: Lehrbuch der Thermodynamik. Eine verständliche Einführung – Carl Hanser Verlag München Wien 1995 – ISBN 3-446-18000-1
- [23] Oertel, H. Jr. und Laurien, E.: Numerische Strömungsmechanik. Berlin; Heidelberg; New York;: Springer, 1995 – ISBN 3-540-58569-9
- [24] Oesterle, E. und Lieb, Rolf-D., Heusler: Doppelschalige Fassaden. Ganzheitliche Planung: Konstruktion, Bauphysik, Aerophysik, Raumkonditionierung, Wirtschaftlichkeit. Callwey-Verlag, München 1999
- [25] Öko-Institut e.V. : Das Energiewende-Szenario 2020. Freiburg : Öko-Institut e.V., 1996
- [26] Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme . Technologie – Berechnung – Simulation, Carl Hanser Verlag München Wien 1998 – ISBN 3-446-19369-3
- [27] Reif, F.: Statistische Physik und Theorie der Wärme. Bearbeitung und wissenschaftliche Redaktion der deutschsprachigen Ausgabe W. Muschik – 3. Durchgesehene Auflage – Walter de Gruyter Berlin New York 1987 – ISBN 3-11-011383-X

- [28] Renz, U. und Zeller, M.: Numerische Simulation von auftriebsbestimmten Raumluftströmungen. Bearbeitung von Norbert Vogl, Lehrstuhl für Wärmeübertragung und Klimatechnik der RWTH Aachen, 1996
- [29] Rietschel: Raumklimatetechnik. Herausgegeben von Horst Esdorn, 16. Auflage – Springer Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Barcelona Budapest 1994 – ISBN 3-540-54466-6
- [30] Schlichting, H. und Gersten, K.: Grenzschicht-Theorie. Unter Mitarbeit von Egon Krause und Herbert Oertel Jr., 9., völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage. Springer Verlag Berlin Heidelberg 1997 – ISBN 3-540-55744-X
- [31] Schneider, W.: Mathematische Methoden der Strömungsmechanik. 1. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig 1978 – ISBN 3-528-03573-0
- [32] Schönung, Bernhard E.: Numerische Strömungsmechanik. Inkompressible Strömungen mit komplexen Berandungen Springer Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong Barcelona 1990 – ISBN 3-540-53137-8
- [33] Schwab, Armin J.: Wärmeübertragung bei Mischkonvektion in luftdurchströmten Fassaden. Dissertation am Lehrstuhl C für Thermodynamik (Kältetechnik) der Technischen Universität München 1993
- [34] Schwetlick/Kretzschmar: Numerische Verfahren für Naturwissenschaftler und Ingenieure. 1. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig (Mathematik für Ingenieure) 1991 – ISBN 3-343-00580-0
- [35] Sharpe, G.J.: Solving Problems in Fluid Dynamics. Longman Scientific & Technical UK, 1994 – ISBN 0-582-03374-8
- [36] Thiel, D.: Doppelfassaden – Bestandteil energetisch optimierter Bürogebäude. Bertelsmann Fachzeitschriften Facility Management 1995
- [37] Unger, J.: Konvektionsströmungen. Von Jochem Unger – Stuttgart: B. G. Teubner Stuttgart 1988 – ISBN 3-519-03033-0
- [38] VDI - Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 4. Auflage 1984
- [39] Weise, J.: Homogenitätsuntersuchung der Luftströmungen am ausgewählten Doppelfassadenbereich des Umweltzentrums Cottbus. Diplomarbeit: Lehrstuhl Technischer Ausbau der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, 1994
- [40] Zierep, J. : Grundzüge der Strömungslehre. Institut für Strömungslehre und Strömungsmaschinen, Universität (TH) Karlsruhe 3. überarbeitete Auflage – Karlsruhe: Braun (vorm. G. Braunsche Hofbuchdruckerei und Verlag ) GmbH 1987 – ISBN 3-7650-2038-9