

# **Matrixkollektoren in Doppelfassaden**

Stefan Heuß

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik  
2003



Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik  
Technische Universität München

## **Matrixkollektoren in Doppelfassaden**

Stefan Heuß

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur  
der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Richard Junge

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hausladen

2. Univ.-Prof. Dr./Univ. Rom Thomas Herzog

Die Dissertation wurde am 02.10.2002 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Architektur am 25.02.2003 angenommen.



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeiten am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik (vormals Lehrstuhl für Haustechnik und Bauphysik) der Technischen Universität München. Mein herzlichster Dank gilt meinem sehr geschätzten Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Gerhard Hausladen, der – kurz nach Antritt seiner Professur in München – durch seine unkomplizierte Übernahme des Erstberichts der bereits laufenden Arbeit und die großzügige Gewährung entsprechender Freiräume deren zügige Fertigstellung ermöglichte.

Bei Herrn Professor Dr./Univ. Rom Thomas Herzog bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferats und wertvolle fachliche Hinweise.

Herrn Professor Richard Junge danke ich für die Bereitschaft, den Vorsitz der Prüfungskommission zu übernehmen.

Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Dieter Ostertag, an dessen Lehrstuhl für Haustechnik und Bauphysik ich als wissenschaftlicher Assistent beschäftigt war, bedanke ich mich für die mir eingeräumten Entfaltungsmöglichkeiten und das große Vertrauen, das er mir entgegengebracht hat.

Zu großem Dank bin ich Herrn Professor Dr. rer. nat. Edgar R.F. Winter (†) verpflichtet, der mir die Durchführung der experimentellen Arbeiten auf dem Solaren Forschungsfeld ermöglicht hat.

Mein besonderer Dank gilt darüberhinaus den Verantwortlichen und Kollegen auf dem Solaren Forschungsfeld, insbesondere dessen Leiter Herrn Dr.-Ing. Jürgen Blumenberg, der meine Arbeit dort sehr gefördert hat und seinem Nachfolger Herrn Dr.-Ing. Markus Spinnler. Sie ließen die Zeit der experimentellen Arbeiten in Garching zu einer schönen Erfahrung werden, was in ganz besonderem Maß für Herrn Dr.-Ing. Andreas Zöllner gilt, der nicht nur durch sein freundschaftliches Engagement, sondern auch in zahllosen fruchtbaren Gesprächen entscheidend zum erfolgreichen Abschluß der Arbeit beigetragen hat. Herrn Klaus Specht danke ich für den aufopferungsvollen Einsatz bei der Fertigstellung der Versuchseinrichtungen, sowie Herrn Georg Kojro für die Unterstützung in EDV-Fragen.

Die von mir betreuten StudentInnen trugen durch ihre in einigen Fällen außerordentlich engagierte Mitarbeit ebenfalls zum Gelingen des Projektes bei, wofür ich mich an dieser Stelle ganz herzlich bedanken möchte. Allen nicht namentlich genannten Angehörigen des Lehrstuhls danke ich für jedwede Unterstützung bei der Verwirklichung meiner Arbeit.

Den Partnern aus der Industrie gilt mein Dank für die Unterstützung der experimentellen Arbeiten, allen voran der Firma Alu-Sommer, mit deren Unterstützung die Testfassade aufgebaut wurde. Bei den Firmen ENTHONE und MICROTHERM bedanke ich mich für die kostenlose Bereitstellung von Chemikalien für die Beschichtung der Kupfergewebe bzw. mikroporösen Dämmplatten, weiters bei den Firmen Evers, Grammer und Seidemann (Solarwall) für das großzügige Überlassen von Bildmaterial.

Meinen Eltern sage ich ein besonders herzliches „Vergelt's Gott“. Sie haben mir durch ihre in jeder Hinsicht großzügige Unterstützung immer wieder Rückhalt und die notwendige Motivation zur Erstellung dieser Arbeit gegeben. Nicht zuletzt gilt mein liebevoller Dank meiner Freundin Birgit.

München, im März 2003

Stefan Heuß

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemeines und Ausgangssituation . . . . .	1
1.2 Aufgabenstellung . . . . .	5
<b>2 Literaturübersicht</b>	<b>9</b>
2.1 Doppelschalige Fassaden . . . . .	11
2.1.1 Anwendungsfälle . . . . .	12
2.1.2 Vorteile . . . . .	13
2.1.3 Nachteile . . . . .	14
2.1.4 Fassadenregelungskonzepte bei natürlicher Durchlüftung . .	16
2.1.5 Zwangsdurchströmte Doppelfassaden . . . . .	17
2.1.6 Abluftfassade . . . . .	22
2.1.7 Zuluftfassade . . . . .	24
2.1.8 Kombination von Abluft- und Zuluftfassade . . . . .	27
2.2 Fassadenintegrierte Luftkollektoren . . . . .	30
2.2.1 Bauformen solarer Luftkollektoren . . . . .	30
2.2.2 Einsatzgebiete solarer Luftkollektoren . . . . .	33
2.2.3 Fassadenintegration . . . . .	36
2.2.4 Beispielobjekte . . . . .	44
2.3 Fassadenintegrierte Gebäudetechnik . . . . .	56
2.3.1 Allgemeine Aspekte dezentraler Gebäudetechnik . . . . .	56

2.3.2	Fassadenintegrierte Heiz- und Lüftungskomponenten . . . . .	58
<b>3</b>	<b>Matrixkollektor für Doppelfassaden</b>	<b>63</b>
3.1	Konzept einer Matrixkollektor-Doppelfassade . . . . .	64
3.1.1	Physikalisches Grundprinzip . . . . .	66
3.1.2	Aufbau und Segmentierung . . . . .	68
3.2	Grundlagen und Definitionen . . . . .	72
3.2.1	Eigenschaften des Matrixabsorbers . . . . .	72
3.2.2	Geometrische Verhältnisse . . . . .	76
3.2.3	Lichttechnische Bewertung . . . . .	80
3.2.4	Berechnung der richtungsabhängigen Transmissionsgrade . . . . .	83
3.2.5	Tagesverläufe des direkten Transmissionsgrades . . . . .	87
3.2.6	Optische Effekte bei der Durchsicht von Matrixabsorbern . . . . .	90
3.3	Betriebsparameter und Konfigurationen . . . . .	92
3.3.1	Betriebsparameter des Matrixkollektors in Doppelfassaden . . . . .	93
3.3.2	Matrixkonfigurationen . . . . .	96
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>99</b>
4.1	Doppelfassaden-Versuchsstand . . . . .	100
4.2	Matrixabsorber im Luftzwischenraum . . . . .	103
4.2.1	Variable Matrixbefestigung . . . . .	104
4.2.2	Einstellbare geometrische Parameter der Matrixabsorber . . . . .	106
4.2.3	Verwendete Gewebe und Beschichtungen . . . . .	107
4.3	Meßtechnik . . . . .	110
4.3.1	Meßgeräte und Meßgrößen . . . . .	110
4.3.2	Meßstellen . . . . .	111
4.3.3	Meßwerterfassungsanlage . . . . .	113
4.4	Versuchsdurchführung . . . . .	114
4.4.1	Randbedingungen und Vereinfachungen . . . . .	114
4.4.2	Übersicht der vermessenen Konfigurationen . . . . .	116
4.4.3	Versuchsablauf . . . . .	117

<b>5</b>	<b>Versuchsauswertung und Ergebnisse</b>	<b>121</b>
5.1	Thermische und strömungstechnische Ergebnisse . . . . .	121
5.1.1	Herleitung und Darstellungsweisen . . . . .	122
5.1.2	Temperaturhub und Wirkungsgrad . . . . .	128
5.1.3	Temperaturverteilung und Strömungsverhältnisse . . . . .	137
5.1.4	Mittlere Wärmeübergangskoeffizienten . . . . .	147
5.1.5	Vergleich mit kommerziellen Luftkollektoren . . . . .	149
5.2	Lichttechnische Ergebnisse . . . . .	151
5.2.1	Optische Wirkung der Matrixabsorber . . . . .	151
5.2.2	Sonnenschutz – Transmissionsgrad der Matrixgewebe . . . . .	156
5.2.3	Leuchtdichten . . . . .	158
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>165</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>171</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Mercedes-Benz Niederlassung und Fraunhofer-Haus, München . . . .	3
1.2	Teiltransparente Matrixabsorber in einer Doppelfassade . . . . .	5
1.3	Schematischer Schnitt der Versuchsfassade . . . . .	7
2.1	Schematischer Vertikalschnitt einer Doppelfassade . . . . .	11
2.2	Sanierung eines Bürohauses . . . . .	15
2.3	Neubau Generaldirektion Deutsche Post AG . . . . .	17
2.4	Bürohaus am Halensee, Berlin . . . . .	18
2.5	Verwaltungsgebäude der Götz GmbH, Würzburg . . . . .	19
2.6	Towerprojekt Trendpark, Neckarsulm . . . . .	20
2.7	Sektionalrotor für Doppelfassaden . . . . .	20
2.8	Lloyds Building, London . . . . .	23
2.9	Museum für Kunsthandwerk, Frankfurt am Main . . . . .	23
2.10	Hauptverwaltung der GSW, Berlin . . . . .	24
2.11	Briarcliff House, Farnborough . . . . .	26
2.12	Modulare Hybridfassade . . . . .	27
2.13	Luftkollektoren mit einfachem Plattenabsorber . . . . .	31
2.14	Luftkollektoren mit geometrisch modifiziertem Plattenabsorber . . .	31
2.15	Luftkollektoren mit volumetrischem Absorber . . . . .	32
2.16	Sonderbauformen von Luftkollektoren . . . . .	34
2.17	Fassaden-Luftkollektor nach MORSE . . . . .	38
2.18	Funktionsschema des Fassadenkollektors nach MORSE . . . . .	39
2.19	Kollektorfassaden . . . . .	39
2.20	Märkischer Polstermarkt, Falkensee . . . . .	42

2.21	Hochregallager Leister, Sarnen . . . . .	43
2.22	Opaker Fassadenkollektor und transparenter Fensterkollektor . . . . .	43
2.23	Fensterkollektor mit verstellbarem Rafflamellenstore . . . . .	44
2.24	Niedrigenergiehaus Baumgartner-/Ganghoferstraße in München . . . . .	45
2.25	Mehrfamilienhaus Lützowstraße, Berlin . . . . .	46
2.26	Umweltinformationszentrum Gaytal Park . . . . .	47
2.27	Luftkollektorfassade, Gründerzentrum Hamm . . . . .	48
2.28	Unverglaste Luftkollektorfassade SOLARWALL . . . . .	49
2.29	Institutsgebäude, Frankfurt an der Oder . . . . .	50
2.30	Produktions- und Verwaltungsgebäude WASAG, Oberentfelden . . . . .	51
2.31	Bibliothek Pompeu Fabra, Mataro . . . . .	51
2.32	Wandintegrierte Kollektoren . . . . .	53
2.33	Fassadenintegrierte Lüftungsgeräte . . . . .	59
2.34	Doppelfassade mit integrierter Medienversorgung . . . . .	61
2.35	Concept-Fassade . . . . .	62
3.1	Strahlungsbilanzen an einer Doppelfassade . . . . .	67
3.2	Funktionsprinzip des Matrixkollektors in einer Doppelfassade . . . . .	69
3.3	Isometrische Darstellung des Fassadenkonzeptes . . . . .	70
3.4	Geometrie eines Drahtgewebes mit Quadratmaschen in Leinenbin- dung . . . . .	73
3.5	Spektraler Reflexionsgrad von EBONOL C-Beschichtungen . . . . .	76
3.6	Azimutwinkel bzw. auf Horizont projizierter Einstellwinkel der Matrix . . . . .	77
3.7	Elevationswinkel bzw. vertikaler Einstellwinkel der Matrix . . . . .	77
3.8	Winkelkonventionen am Doppelfassaden-Matrixkollektor . . . . .	78
3.9	Infeld und Umfeld . . . . .	81
3.10	Verhältnisse von Umfeld- zu Infeldleuchtdichte . . . . .	82
3.11	Gewebedetail in der Aufsicht . . . . .	83
3.12	Abhängigkeit des direkten Transmissionsgrades vom Einfallwinkel . . . . .	84
3.13	Geometrie eines Drahtgitters mit Quadratmaschen . . . . .	84
3.14	Geometrie der auf die Ebene $\Pi_0$ projizierten Matrix . . . . .	85

3.15	Gültigkeitsbereich der Formel $\tau_{dir} = f(\psi, \alpha_T, \gamma_T)$ . . . . .	87
3.16	Tagesverläufe des Transmissionsgrades einer südorientierten Matrix ( $\psi = 0.3$ ) bei einem Neigungswinkel von $\gamma_M = 20^\circ$ . . . . .	88
3.17	Tagesverläufe des Transmissionsgrades einer südorientierten Matrix ( $\psi = 0.3$ ) bei einem Neigungswinkel von $\gamma_M = -20^\circ$ . . . . .	89
3.18	Tagesverläufe des Transmissionsgrades einer westorientierten Matrix ( $\psi = 0.3$ ) bei einem Neigungswinkel von $\gamma_M = -20^\circ$ . . . . .	90
3.19	Interferenzerscheinungen - Moiré-Effekt . . . . .	92
3.20	Matrixpositionen im Fassaden-Luftkollektor . . . . .	96
3.21	Sonderkonfigurationen Blendschutz . . . . .	97
4.1	Ansicht des doppelschaligen Versuchsstands mit Matrixkollektoren .	100
4.2	Lage der Versuchsfassaden auf dem Solaren Forschungsfeld . . . . .	102
4.3	Dreidimensionale Ansicht der Versuchs-Fensterkollektoren . . . . .	103
4.4	Zusammenstellung der Versuchs-Fensterkollektoren . . . . .	104
4.5	Spiralfeder als Spannvorrichtung . . . . .	105
4.6	Neigungswinkel bei unterschiedlicher Absenkeposition . . . . .	108
4.7	Richtungsabhängiger Transmissionsgrad, Labormessung . . . . .	109
4.8	Spektraler Reflexionsgrad der Absorbergewebe . . . . .	110
4.9	Lage der Meßstellen an der Versuchsfassade und im Meßraum . . . . .	112
4.10	Schematisches Fließbild der Datenerfassung . . . . .	114
4.11	Standardkonfigurationen mit einem Matrixabsorber . . . . .	116
4.12	Standardkonfigurationen mit zwei Matrixabsorbern . . . . .	117
4.13	Sonderkonfigurationen . . . . .	117
5.1	Wirkungsgradverlauf verschiedener Luftkollektoren in Abhängigkeit von der Austrittstemperatur . . . . .	125
5.2	Temperaturhub in Abhängigkeit von der Gesamtstrahlung aller Experimente . . . . .	129
5.3	Massenstromabhängiger Temperaturhub aller Experimente . . . . .	130
5.4	Temperaturhub und Wirkungsgrad aller Experimente . . . . .	131
5.5	Temperaturhub im Vergleich mit und ohne Matrixabsorber . . . . .	136
5.6	Temperaturverlauf im Doppelfassaden-Matrixkollektor . . . . .	139

5.7	Temperaturhub und Matrixtemperaturen mit einer Matrix in unterschiedlichen Positionen, Übergangszeit . . . . .	142
5.8	Mittlere örtliche Strömungsgeschwindigkeiten im Fensterkollektor mit einer Matrix in unterschiedlichen Positionen, Übergangszeit . . .	143
5.9	Strömungsvisualisierung bei positivem Neigungswinkel . . . . .	146
5.10	Strömungsvisualisierung bei vertikaler Matrixposition . . . . .	146
5.11	Strömungsvisualisierung bei negativem Neigungswinkel . . . . .	147
5.12	Verhältnis des Wärmeübergangs an Glas und Matrix . . . . .	148
5.13	Wirkungsgradverlauf kommerzieller Luftkollektoren in Abhängigkeit vom Massenstrom . . . . .	150
5.14	Innenansicht eines Fensterkastens mit unterschiedlichen Durchsichtbereichen . . . . .	152
5.15	Innenansicht eines Fensterkastens ohne und mit Matrix . . . . .	153
5.16	Innenansicht eines Fensterkastens mit einzelner Matrix . . . . .	153
5.17	Moiré-Muster bei unterschiedlicher Matrixgeometrie . . . . .	154
5.18	Außenansicht der Testfassade bei unterschiedlicher Matrixkonfiguration . . . . .	156
5.19	Winkelabhängiger Transmissionsgrad der Matrixabsorber im Versuchsstand . . . . .	157
5.20	Leuchtdichten am Arbeitsplatz im Versuchsraum . . . . .	159
5.21	Leuchtdichtereduktion in Abhängigkeit von Matrixgeometrie und -anzahl . . . . .	160
5.22	Wirkung des Matrixgewebes als Blendschutz . . . . .	161
5.23	Typische Leuchtdichten bei Einsatz als Blendschutz . . . . .	162
5.24	Blendschutz-Konfiguration unter verschiedenen Blickwinkeln . . . .	163
5.25	Leuchtdichtevergleich unterschiedlicher Blendschutz-Konfigurationen . . . . .	164

# Verzeichnis der Symbole

## Formelgrößen, lateinische Buchstaben

$a$	Temperaturleitfähigkeit	$[\text{m}^2/\text{s}]$
$a_M$	volumenspezifische Oberfläche der Matrix	$[\text{m}^2/\text{m}^3]$
$A$	Fläche	$[\text{m}^2]$
$B$	Breite eines Fassadenabschnitts (Achismaß)	$[\text{m}]$
$c_p$	massenspezifische Wärmekapazität bei konst. Druck	$[\text{J}/\text{kg K}]$
$d$	Drahtdurchmesser des Matrixgewebes	$[\text{mm}]$
$D$	Durchmesser	$[\text{m}]$
$D_h$	hydraulischer Durchmesser	$[\text{m}]$
$g$	Gesamtenergiedurchlaßgrad einer Verglasung	$[-]$
$G$	Flächengewicht der Matrix	$[\text{kg}/\text{m}^2]$
$\dot{G}$	Globalstrahlung auf die betrachtete geneigte Ebene	$[\text{W}/\text{m}^2]$
$\dot{G}_{Fas}$	Gesamtstrahlung auf die vertikale Fassadenebene	$[\text{W}/\text{m}^2]$
$H$	Höhe des Fensterkastens bzw. Fensterkollektors	$[\text{m}]$
$l$	Mittelfaserlänge des gewellten Drahtes	$[\text{mm}]$
$L$	charakteristische Länge	$[\text{m}]$
$\dot{m}$	Luftmassenstromdichte	$[\text{kg}/\text{s m}^2]$
$\dot{M}$	Luftmassenstrom	$[\text{kg}/\text{s}]$
$n$	Luftwechsel	$[\text{h}^{-1}]$
$n_i$	Anzahl	$[-]$
$p$	Druck	$[\text{Pa}]$
$\dot{q}$	Wärmestromdichte	$[\text{W}/\text{m}^2]$
$\dot{Q}$	Wärmestrom	$[\text{W}]$
$R$	Radius	$[\text{m}]$
$S$	Tiefe, horizontaler Abstand	$[\text{m}]$
$t$	Teilung der Matrixgewebe bzw. Lochbleche	$[-]$
$T$	Temperatur	$[\text{°C}]$
$U$	Wärmedurchgangskoeffizient	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
$v$	Geschwindigkeit	$[\text{m}/\text{s}]$
$\dot{V}$	Volumenstrom	$[\text{m}^3/\text{s}]$

$w$	Maschenweite des Drahtgewebes	[mm]
$x$	horizontale Koordinatenrichtung	[m]
$y$	vertikale Koordinatenrichtung	[m]

### Formelgrößen, griechische Buchstaben

$\alpha$	Absorptionskoeffizient (total hemisphärisch)	[-]
$\alpha'$	Absorptionskoeffizient (total gerichtet)	[-]
$\alpha_i$	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha_M$	horizontaler Einstellwinkel der Matrix	[°]
$\alpha_S$	Azimutwinkel	[°]
$\alpha_T$	totaler Azimutwinkel	[°]
$\beta$	isobarer Längenausdehnungskoeffizient	[1/K]
$\gamma_M$	vertikaler Einstellwinkel der Matrix	[°]
$\gamma_S$	Elevationswinkel (Sonnenhöhe)	[°]
$\gamma_T$	totaler Elevationswinkel	[°]
$\delta$	Deklination	[°]
$\Delta$	Differenz	[-]
$\epsilon$	Emissionskoeffizient	[-]
$\eta$	Wirkungsgrad	[-]
$\varphi$	volumetrische Porosität	[-]
$\lambda$	Wellenlänge	[ $\mu$ m]
$\lambda_i$	Wärmeleitfähigkeit	[W/m K]
$\nu$	kinematische Viskosität	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Reflexionsgrad	[-]
$\rho_M$	Dichte des (Matrix-)Materials	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau$	Transmissionsgrad	[-]
$\psi$	relative freie Lochfläche der Matrix	[-]

### Indizes und Abkürzungen, lateinische Buchstaben

<i>aus</i>	Austritt
<i>A</i>	Auge
<i>Abs</i>	Absorber
<i>AL</i>	Außenluft
<i>char</i>	charakteristisch
<i>dir</i>	direkt
<i>ein</i>	Eintritt
<i>eff</i>	effektiv

<i>erzw</i>	erzwungene Konvektion
<i>ESG</i>	Einscheibensicherheitsglas
<i>F</i>	Fenster (Rahmen + Verglasung)
<i>Fas</i>	Fassade
<i>FK</i>	Fensterkasten bzw. -kollektor
<i>G</i>	Glas(-oberfläche)
<i>Gr</i>	Grenze
<i>H</i>	Heiz-
<i>i</i>	Variable
<i>ISO</i>	Isolierverglasung
<i>K</i>	Kühl-
<i>Koll</i>	Kollektor
<i>L</i>	Luft
<i>LZR</i>	Luftzwischenraum
<i>m</i>	mittel
<i>M</i>	Matrix
<i>M1</i>	obere bzw. der Sonne zugewandte Matrix
<i>M2</i>	untere bzw. der Sonne abgewandte Matrix
<i>O</i>	Oberfläche
<i>OK</i>	Oberkante
<i>m</i>	mittel
<i>P</i>	Punkt
<i>PF</i>	Primärfassade
<i>R</i>	Raum
<i>RL</i>	Raumluft
<i>SF</i>	Sekundärfassade
<i>sol</i>	solares Strahlungsspektrum
<i>th</i>	thermisch
<i>UK</i>	Unterkante
<i>vis</i>	sichtbares Strahlungsspektrum
<i>V</i>	Volumen, volumetrisch
<i>W</i>	Wand
<i>WSV</i>	Wärmeschutzverglasung

### Indizes, griechische Buchstaben, sonstige

$\alpha$	Konvektion
$\lambda$	Wärmeleitung
$\sigma$	Strahlung
$\infty$	Umgebung



# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Allgemeines und Ausgangssituation

Der menschliche Körper ist ein präziser Thermostat, der eine fast konstante Temperatur von 37°C zu halten vermag. Er bedient sich dazu verschiedener Mechanismen wie zum Beispiel der Wärmeabfuhr durch Schwitzen oder der Gefäßverengung und -erweiterung. Dennoch suchen wir seit jeher zur **Minimierung des Regelaufwands des Körpers** – was gleichbedeutend mit physiologischer Behaglichkeit ist – Räume auf, die uns vor den direkten Auswirkungen des Klimas schützen. Nach dem Verlassen der massiven Steinhöhlen hat die Menschheit auf der Suche nach komfortablen Lebens- und Arbeitsbedingungen ihre Behausungen bis heute zu leichten (Glas-)Hochbauten „weiterentwickelt“. Was während der dazwischen liegenden Entwicklungsperioden gleich blieb, ist das Bestreben, uns von den negativen Einflüssen des Außenklimas abzuschotten und positive Auswirkungen auszunutzen. Den unterschiedlichen **Klimaregionen** der Erde entsprechend sind dazu bestimmte **Gebäudetypen** und **-merkmale** mehr oder weniger geeignet. Während in strahlungsreichen Klimazonen die Reduzierung der Wärmegewinne (äußere Kühllasten) als thermisches Planungskriterium dominiert, kommt in kühleren und strahlungsärmeren Klimazonen mitunter der Wärmeverlust durch die Gebäudehülle als Kriterium hinzu. Im vergangenen Jahrhundert hat man sich unter hohem energetischen und technischen Aufwand jedoch zunehmend darauf verlassen, Defizite des Gebäudekörpers (z.B. in punkto Speichermassen) und der Gebäudefassade mit den Mitteln der **Klimatechnik** auszugleichen.

Aber nicht nur die Entwicklungen der Klimatechnik und deren Voraussetzungen, wie die Verfügbarkeit von Pumpen und Ventilatoren, sondern auch viele weitere technische Errungenschaften, wie die elektrische Beleuchtung oder das vertikale Aufzugsystem, erlaubten es den Architekten des 20. Jahrhunderts einerseits sehr stark nach künstlerischen und formalen Gesichtspunkten zu entwerfen. Anderer-

seits ermöglichten sie der Architektur aber auch gerade erst, zu neuen Lösungen zu kommen. Dennoch glaubte man nun, viele aus dem Gebäudeentwurf erwachsene Probleme durch Technik lösen zu können, und war so vermeintlich befreit von den negativen – allerdings auch den positiven – Auswirkungen der Umwelt. Dadurch, daß man „gelernt“ hat, sich der Klimatechnik zu bedienen, wurden sicherlich die Fähigkeiten der Baumeister der Vergangenheit ein Stück weit „verlernt“. Diese stützten sich noch auf ihr umfassendes Wissen über die Zusammenhänge zwischen Umwelt und Gebäude, um negative Auswirkungen des Klimas zu minimieren und gleichzeitig die positiven Einflüsse von Sonne, Wärme und Wind bestmöglich auszunutzen.

In den letzten beiden Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts wurde dieses Bewußtsein unter dem Eindruck des **Energie- und Umweltproblems**, aber auch des Abgeschnittenseins von der natürlichen Umwelt von vielen Architekten wieder aufgegriffen. Ausgehend von zahllosen Beispielen sich an lokalen Bedingungen orientierender Architektur – vom Iglu in der Arktis bis zu den Windtürmen im Iran – werden „wahrhaft ganzheitliche architektonische Lösungen“ angemahnt. BATTLE und MCCARTHY [18] erklären in diesem Kontext:

„Gebäude, die vor diesem Hintergrund geplant werden, haben keine gemeinsame internationale Ästhetik. Sie sind einzigartig, da sie regional geprägt sind und kulturellen und klimatischen Bedürfnissen Rechnung tragen. Zwei Faktoren sind kennzeichnend für diese Entwürfe. Erstens die Tatsache, daß diese Gebäude mit mehr als nur ihrer Außenhülle auf die Umwelt reagieren, und zweitens, daß sie von Anfang an durch ein Team aus Ingenieuren und Architekten entworfen wurden, die auf ein gemeinsames Ziel hinarbeiteten.“

Büro- und Verwaltungsbauten waren in den letzten einhundert Jahren einem Wandel unterworfen, wie kaum eine andere Gebäudeart. Bürogebäude sind heute mehr denn je weithin sichtbare Tempel der modernen Industriegesellschaft. Sie sollen nicht selten die unverwechselbare *Corporate Identity* der – das Gebäude nutzenden – Firma widerspiegeln, und sind von daher immer einem besonderen Entwicklungs- und Innovationsdruck ausgesetzt. Der technische Fortschritt erst hat die Realisierung von Hochhäusern ermöglicht, und die Architektur hoher Häuser steht seither in besonderer Wechselwirkung mit der technischen Machbarkeit. So wie die sich verändernde Arbeitswelt im Inneren der Bürohäuser Wirkung zeigt, manifestiert die Gebäudefassade den Wandel der Zeit nach außen. Neben der Repräsentation unterschiedlicher Facetten des Zeitgeistes ist die Fassade heute eben auch ganz deutlich Ausdruck für das Bemühen, den in den Gebäuden arbeitenden Menschen die bestmöglichen raumklimatischen Bedingungen bei vertretbarem Energieaufwand zu bieten. Dabei spielt die Gebäudehülle als integraler

Bestandteil des „Gesamtsystems Gebäude“ eine wichtigere Rolle denn je und übernimmt dabei zunehmend **aktive Aufgaben**. Nebenbei sind die Anforderungen an Gebäude in der heutigen Welt komplexer geworden, neben Ökonomie und Ökologie sind Veränderungen in Gesellschaft und Arbeitswelt zu berücksichtigen, an die Flexibilität der Gebäude werden immer höhere Ansprüche gestellt. Eine diesen Anforderungen genügende *variable* Gebäudehülle muß daher noch mehr leisten als die Anpassung an die momentanen Witterungsverhältnisse und Bedürfnisse der Nutzer. Sie sollte für die Gebäudefunktion notwendige Energie- und Stoffströme aufnehmen, verteilen und speichern können. Die moderne transparente Architektur bietet die Chance, auf die neuen Anforderungen unter Einsatz neuartiger Fassadenmaterialien und -konstruktionen mit bauphysikalisch sinnvollen neuen Konzepten jenseits der althergebrachten Lochfassade zu antworten.



Abbildung 1.1: In München im Bau befindliche Gebäude mit Doppelfassade. Links: Westansicht (31.05.2002) der Mercedes-Benz Niederlassung am Mittleren Ring (LAI Lanz Architekten + Ingenieure); rechts: Südostansicht (05.07.02) des Fraunhofer-Hauses an der Hansastrasse (HENN Architekten Ingenieure)

Ein Versuch, diesen neuen Anforderungen gerecht zu werden, war die Entwicklung **doppelschaliger Fassadenkonstruktionen**, zunächst mit folgenden Intentionen: Ermöglichung einer natürlichen Lüftung (auch Querlüftung) bei gleichzeitiger Wahrung des Schallschutzes, gegebenenfalls die witterungsgeschützte Montage eines außenliegenden Sonnenschutzes zur Minderung der einstrahlungsbedingten Kühllast. Weitere Aspekte waren erweiterte Möglichkeiten der Nachtauskühlung bei bestehendem Schutz gegen Einbruch und – last but not least – der Realisierung von Ganzglas-Außenfassaden, was auch Möglichkeiten bei der Altbausanierung eröffnet. Insgesamt läßt sich dennoch feststellen: Die **zweite vorgesezte Schale** wird primär als Schutz für Räume in lärm- (laute Straße) bzw. windexponierten (große Höhe) Lagen verstanden. So entstehen momentan beispielsweise in München am Mittleren Ring mehrere Hochhäuser mit Doppelfassade (siehe Abbildung 1.1). Bei allen Vorzügen dieser Fassadenbauart ist aber immer zu berücksichtigen, daß die Problematik der möglichen einstrahlungsbedingten Überhitzung des Luftzwischenraumes zwischen den beiden Schalen, und damit der dahinterliegenden Räume, beherrscht werden muß. Um insbesondere die sommerlichen Verhältnisse in den Innenräumen durch eine transparente, doppelschalige Fassade nicht zu verschlechtern, ist die genaue Kenntnis der thermischen und strömungstechnischen Verhältnisse in diesem Luftzwischenraum unabdingbare Voraussetzung. Mit Hilfe dieser Grundlagenkenntnisse wird es erst möglich, eine Doppelfassade im Einzelfall richtig zu dimensionieren [122].

Ein großes, zukünftiges Potential doppelschaliger Fassaden liegt darin, gebäude-technische Funktionen und dazugehörige dezentrale Komponenten in die Fassadenkonstruktion zu integrieren. Einen vielversprechenden Ansatzpunkt stellt die aktive Nutzung der Sonnenenergie mit Hilfe von thermischen Kollektoren dar, die in Frage kommenden Fassadenflächen für die **solare Niedertemperaturwärmegewinnung** ergeben ein erhebliches energetisches Potential [99]. Teiltransparente – und damit auch vor verglasten Fassaden einsetzbare – Sonnenkollektoren erschließen ein zusätzliches **Flächenpotential** zur Gewinnung thermischer Sonnenenergie. Will man die gesamte Fassade eines Hochhauses – oder zumindest größere, über den Brüstungsbereich hinausgehende Teile von ihr – als Sonnenkollektor ausbilden, müssen bestimmte planerische Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Es versteht sich fast von selbst, daß der Einsatz von Kollektoren in transparenten Fassadenbereichen nicht dazu führen darf, daß zu wenig Tageslicht in die dahinterliegenden Räume gelangt und in der Folge künstliche Beleuchtung nötig wird. Durch geeignetes Absorbermaterial mit ausreichender Transparenz oder Kombination mit Tageslichtlenkung kann dafür Sorge getragen werden. Darüber hinaus darf die großflächige Ausbildung als Sonnenkollektor und die damit einhergehende Erwärmung der Fassade zu keiner Verschlechterung der sommerlichen thermischen Verhältnisse in den dahinterliegenden Räumen führen.

## 1.2 Aufgabenstellung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der **Integration** eines luftdurchströmten, porösen Solarabsorbers – eines sogenannten **Matrixabsorbers** – im Luftzwischenraum von Doppelfassaden. Während konventionelle solare Luftkollektoren als Absorber eine opake geschwärzte Metallplatte besitzen und demzufolge nur in opaken Fassadenabschnitten (z.B. im Brüstungsbereich) eingesetzt werden können, ist die Verwendung von solaren Matrixabsorbern aufgrund ihres teiltransparenten Erscheinungsbildes eine vielversprechende Möglichkeit der aktiven Solarenergienutzung in beliebigen Bereichen von Gebäudefassaden. Aufgrund ihrer Lichtdurchlässigkeit und damit des Erhalts der Durchsicht von innen nach außen ist der Einsatz von Matrixabsorbern prinzipiell auch in transparenten Fassadenbauteilen möglich, wie dies in Abbildung 1.2 angedeutet ist.

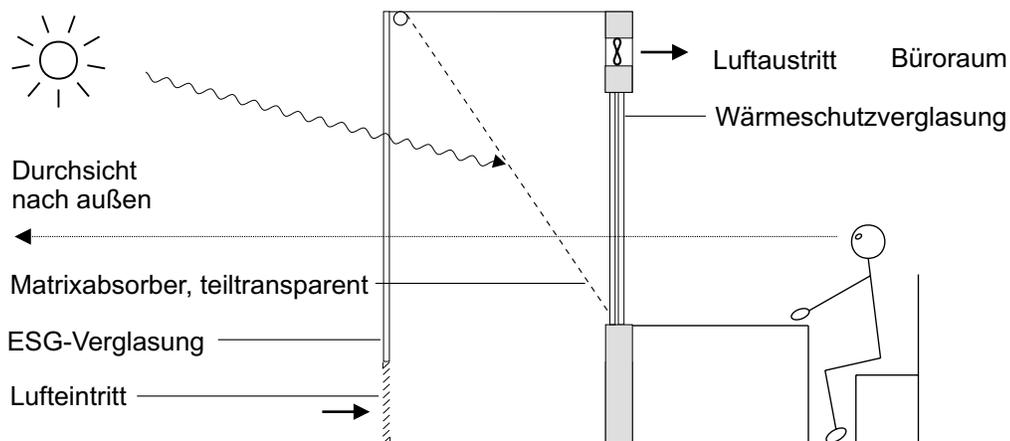


Abbildung 1.2: Integration eines teiltransparenten Matrixabsorbers in eine Doppelfassade: Der Großteil der solaren Einstrahlung wird am Matrixgewebe absorbiert und gleichzeitig bleibt die Durchsicht von innen nach außen erhalten

Somit kann die Tagesbelichtung unter Berücksichtigung des Sonnen- und Blendeschutzes und die Gewinnung thermischer Sonnenenergie in Kollektoren mit durchströmten Absorbern verbunden werden. Matrixabsorber haben aufgrund ihrer großen Oberfläche zusätzlich den Vorteil, hohe konvektive Wärmeübertragungsraten bei geringem Druckverlust [70] zu ermöglichen. Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, einen Beitrag zur Entwicklung von **fassadenintegrierten Matrix-Luftkollektoren** mit **teiltransparenten Absorbern** zu leisten. Der von KOLB [70] vorgestellte und in **Indoor-Versuchen** vermessene Matrixkollektor soll an einem bereits existierenden **Outdoor-Versuchsstand** für die Integration in doppelschalige Fassaden angepaßt, weiterentwickelt und unter energetischen und lichttechnischen Gesichtspunkten analysiert werden.

In einer **Literaturübersicht** sollen in Kapitel 2 zunächst bestehende Ansätze und Lösungen zur thermischen Nutzung der Sonnenenergie mit Luftkollektoren in oder an Gebäudefassaden zusammengetragen werden. Ausgangspunkt sind dabei Gebäudefassaden unter besonderer Berücksichtigung doppelschaliger Konstruktionen und deren Potential zur Integration solarer Einbauten. Wie die in Kapitel 2 dargestellte Literaturrecherche ergab, sind zahlreiche Ansätze zur Fassadenintegration von Luftkollektoren zur gezielten Lufterwärmung vorhanden. Da es sich aber dort grundsätzlich um opake Solarabsorber handelt, erübrigt sich die Frage nach ihrer optischen Wirkung im dahinterliegenden Raum. Es besteht also durchaus eine Lücke, was die gezielte thermische Nutzung der Sonnenenergie an transparenten Gebäudefassaden anbelangt, um das eingangs erwähnte Potential [99] in größerem Maße nutzbar zu machen. Im Luftzwischenraum einer Doppelfassade abrollbar eingebaute Matrixabsorber könnten diese Lücke schließen.

Auf der Grundlage der Literaturrecherche und unter Berücksichtigung und Darstellung der relevanten physikalischen Grundlagen soll in Kapitel 3 ein **Konzept** entwickelt werden, wie Matrixabsorber in Doppelfassaden integriert werden können. Ausgehend vom einzusetzenden Material des Absorbers, dessen Geometrie und Oberflächenbehandlung, müssen sinnvolle Anordnungen der Matrix im Luftzwischenraum vorgeschlagen werden. Dazu wiederum sind Berechnungen zum Transmissionsgrad von Matrixabsorbern in Abhängigkeit von Geometrie, Anstellwinkel und Fassadenorientierung notwendig. Es soll aber jenseits eines einzelnen Fassadenkollektors auch ein neues Konzept zu Aufbau und Segmentierung einer mit Matrixabsorbern ausgestatteten Doppelfassade vorgeschlagen werden. Für die Funktion des Konzeptes sind außerdem bestimmte Betriebsparameter und Konfigurationen abzuschätzen und anzugeben.

Die **experimentelle Untersuchung** der sinnvoll erscheinenden Konfigurationen soll an einem in Kapitel 4 beschriebenen, bereits vorhandenen doppelschaligen Outdoor-Versuchsstand durchgeführt werden, um praxisrelevante thermische Daten zu generieren und gleichzeitig die optische Wirkung der Matrixabsorber im Innenraum unter realen Bedingungen zu dokumentieren.

Die in Abbildung 1.3 schematisch dargestellte Befestigung und der Antrieb der abrollbar einzusetzenden Matrixabsorber muß unter Berücksichtigung der versuchsstandspezifischen Fassadenkonstruktion konzipiert und dimensioniert werden. Dabei muß gewährleistet sein, daß die notwendige Vorspannung der Gewebe in jeder Position gegeben und eine Abdichtung zu den begrenzenden Seitenflächen möglich ist. Nicht zuletzt sollten kurze Umrüstzeiten zwischen den einzelnen Konfigurationen erreicht werden, um geeignete Wetterbedingungen für Experiment-Variationen ausnutzen zu können.

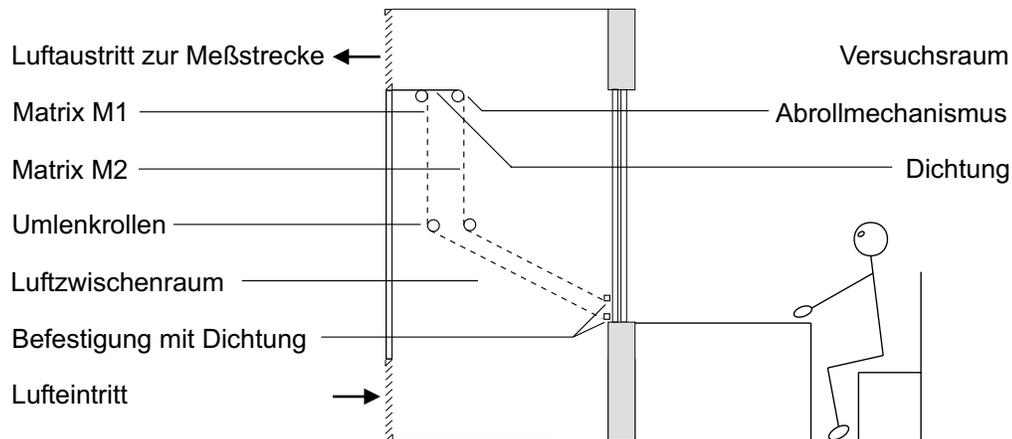


Abbildung 1.3: Schematischer Schnitt der Versuchsfassade mit den im Luftzwischenraum zu installierenden Matrixgeweben M1 und M2, sowie den dazu prinzipiell benötigten Befestigungs-, Umlenk- und Dichtelementen

Der Luftaustritt erfolgt am Versuchsstand nach vorne in eine Meßstrecke hinein, da eine Absaugung nach hinten in den Versuchsraum aus baulichen Gründen nicht realisierbar ist. Die Fassadentiefe und die Ein- bzw. Austrittsöffnungen der Testfassade sind dem Betrieb als Fensterkollektor entsprechend auszuwählen, um die geometrischen Parameter der zu untersuchenden Matrixkonfigurationen umsetzen zu können:

- Gleichzeitige Einsetzbarkeit zweier absorbierender Matrixgewebe
- Abrollbarkeit (von oben nach unten) in verschiedenen Positionen und Einbauwinkeln
- Möglichkeit der Umlenkung des Gewebes im Fensterkasten

Inhalt des Kapitels 5 ist eine systematische Untersuchung verschiedener Konfigurationen unter thermischen und lichttechnischen Aspekten bei unterschiedlichen äußeren Betriebsbedingungen wie Einstrahlung und Umgebungstemperatur. In Abhängigkeit vom jeweils einzustellenden Luftmassenstrom sollen dabei im Einzelnen folgende thermische und strömungstechnische Daten für den Winter-, Sommer- und Übergangsfall ermittelt werden:

- Differenz der Lufttemperaturen zwischen Kollektoreintritt und -austritt
- thermischer Wirkungsgrad
- Temperaturverteilung im Kollektor

- Durchströmungsbilder und örtliche mittlere Luftgeschwindigkeiten im Kollektor
- Abschätzung mittlerer Wärmeübergangskoeffizienten
- Vergleich der erreichten Wirkungsgrade mit denen kommerzieller Luftkollektoren

Aus lichttechnischer und strahlungstechnischer Sicht sollen folgende Aspekte untersucht werden:

- Optische Innen- und Außenwirkung in Abhängigkeit von der Matrixanzahl, -geometrie und -position
- Berechnung und meßtechnische Validierung der richtungsabhängigen Transmissionsgrade von Matrixabsorbern
- Leuchtdichten im Versuchsraum und am mit Matrixabsorbern bespannten Fensterkasten
- Nachweis der Blendschutzwirkung

Aus der Versuchsdurchführung und den Ergebnissen sollen jenseits der Meßdaten Planungsgrundlagen und -hinweise für eine praxisnahe Umsetzung des Matrixkollektors in Doppelfassaden abgeleitet werden.

# Kapitel 2

## Literaturübersicht

Die vorliegende Arbeit hat die neuartige Integration eines durchströmten Matrix-Luftkollektors in eine Doppelfassade zum Inhalt. Deshalb soll in diesem Kapitel eine Übersicht über die beiden Teilbereiche **Doppelfassaden** und **Luftkollektoren** gegeben werden. Im ersten Teil werden doppelschalige Fassaden für Bürogebäude besprochen. Der zweite Teil beschäftigt sich mit Luftkollektoren, und hier insbesondere mit deren Integration in die Fassade. In einem letzten Teilkapitel werden ferner heute vorhandene Ansätze und Beispiele für die Integration heiz- und lüftungstechnischer Komponenten in Fassaden mit dem Ziel einer zumindest teilweise dezentralen Gebäudetechnik angesprochen.

**Doppelfassaden** waren in den letzten Jahren permanent Gegenstand von Veröffentlichungen und wurden anhand einer mittlerweile großen Anzahl von Beispielen – kaum ein Hochhausprojekt wird derzeit ohne Doppelfassade realisiert – sehr eindeutig klassifiziert. Vertiefte Untersuchungen bezüglich der grundlegenden physikalischen Zusammenhänge blieben dabei die Ausnahme. **Luftkollektoren** hingegen fristen insgesamt weltweit nach wie vor ein Schattendasein bei der Entwicklung und Realisierung von Gebäudekonzepten, wenn man von bestimmten Sondernutzungen sowie Anwendungen im Einfamilienhaus einmal absieht. Ihre geringe Bedeutung wird durch die kleine Zahl der Hersteller von Luftkollektorelementen – weltweit kaum ein Dutzend – verdeutlicht. Obwohl die Physik von Luftkollektoren erschöpfend behandelt ist, existieren jedoch auch hier kaum verlässliche Planungsgrundlagen und Richtlinien. Gleichwohl ist die solarthermische Nutzung mit Luftkollektoren an Gebäudefassaden durchaus sinnvoll, da nicht nur die Nachfrage nach Warmluft für Heizung und Lüftung vorhanden ist, sondern auch ein großes Flächenpotential an Gebäudefassaden zu deren solarer Erzeugung zur Verfügung steht. Dieses Potential könnte durch die Entwicklung und den Einsatz möglichst vielfältig einsetzbarer Kollektorsysteme für Fassaden umfangreicher genutzt werden, als dies heute der Fall ist.

In der Literatur über Fassadensysteme spielt in den letzten Jahren der Begriff „**Klimafassade**“ eine Rolle, die nicht immer ganz eindeutig interpretierbar ist. Meist sind Gebäudefassaden gemeint, bei denen durch die aktive Veränderung der Luftführung und durch variable optische Elemente die Durchlässigkeit für Sonneneinstrahlung, Wärme, Luft und Schall reguliert werden kann. OSWALT [86] beispielsweise sieht „(...) unter dem Stichwort Klimafassade eine Synthese beider Konzepte (...)“ Kollektor- und Abluftfassade. Weiter schreibt er direkt im Anschluß: „Dies ermöglicht, natürliche Lüftungskonzepte und Energiesparkonzepte für große Büro- und Gewerbebauten zu entwickeln. Je nach Standortbedingungen und Anforderungen an Lüftung, Wärme- und Schallschutz können hierbei unterschiedliche Systeme zur Anwendung kommen.“ Selbst wenn man unter „Klimafassade“ nur den Oberbegriff für unterschiedliche Systeme versteht, kann der Terminus „**Klimafassade**“ suggerieren, es handele sich bei diesen Fassaden um eine Art Ersatz für eine „**Klimaanlage**“, was aus naheliegenden Gründen nie der Fall sein kann. Selbst wenn es gelänge, alle Funktionen einer Klimaanlage nach altem Verständnis – die vermutlich so gar nicht mehr wünschenswert sind – in die Fassade zu integrieren, müßten diese Systeme mit den sich ständig ändernden Randbedingungen (solare Einstrahlung, Temperaturverteilung, Winddruck usw.) zurechtkommen und daraus das jeweils benötigte Innenraumklima konditionieren. Der neben der „Klimafassade“ ebenfalls sehr inflationär gebrauchte Begriff „Intelligente Fassade“ träfe dann wohl wirklich zu.

Die Grenze zwischen **Fassaden-** oder **Fensterkollektoren** und dem, was in der Literatur mit Begriffen wie „**solarthermische Zuluftfassade**“, „**solare Pufferfassade**“, „**Klimafassade**“ und anderen bezeichnet wird, ist demnach nicht immer eindeutig zu ziehen. Zielführend im Sinne eines unmißverständlichen Sprachgebrauchs ist sicherlich, die heute mitunter komplexen und in direktem Zusammenhang mit dem angeschlossenen Gebäude und dessen Technik nicht mehr mit nur **einem** eingeführten oder neu kreierten – oft zu weiterer Verwirrung beitragenden – Begriff zu beschreiben. Was die Lüftungsfunktion angeht, wird ein und dieselbe Doppelfassade, ein Fassadenkollektorsystem heute meist aus den oben erläuterten Gründen heraus in **unterschiedlichen** Variationen betrieben, je nach den momentan herrschenden Randbedingungen. Eine Einteilung kann dann an der spezifischen, jeweils zu beschreibenden Eigenschaft des Fassadensystems festgemacht werden.

In der vorliegenden Arbeit wird ferner dahingehend unterschieden, daß die in den folgenden Unterkapiteln behandelten Kollektorfassaden als Basis immer auf einer „Kollektoreinheit“ aufbauen. In die Fassade integriert oder appliziert, kann damit auch durch eine Verbindung und Verschaltung der einzelnen Einheiten eine flächige „Solarfassade“ realisiert werden. Demgegenüber wird bei solaraktiven Doppelfassaden die **Zweischaligkeit** als **übergeordnetes Prinzip** verstanden,

wenngleich auch hier einzelne Kollektoreinheiten integriert sein können. Gemein ist den im Rahmen dieser Arbeit diskutierten **Kollektorfassaden** wie den **Doppelfassaden**, daß sie mit Hilfe eines mechanischen Lüftungssystems **zwangsdurchströmt** werden. Bei der am weitesten segmentierten **Kasten-Kasten-Fassade** nach ZÖLLNER [122] oder LANG [73] würde es sich demnach um einen „Grenzfall“ zwischen Solarfassade (bestehend aus einzelnen Fensterkollektoren) und Doppelfassade handeln: Werden die einzelnen Kästen dieser Doppelfassade mit Absorbern und einer mechanischen Durchlüftung ausgestattet, entsteht aus jedem einzelnen Fensterkasten ein **solarer Luftkollektor**, wie es in der vorliegenden Arbeit beabsichtigt wird. Der luftdurchströmte Zwischenraum eines solchen Fensterkollektors wird im Folgenden *grundsätzlich* als **Luftzwischenraum** bezeichnet. Damit identisch wäre im vorliegenden Fall der in der doppelfassadenspezifischen Literatur auch verwendete Begriff **Fassadenzwischenraum**.

## 2.1 Doppelschalige Fassaden

Wesentliches Merkmal einer Doppelfassade ist die Anordnung einer zusätzlichen Verglasungsebene (**Sekundärfassade**), die nach Abbildung 2.1 in der Regel vor die thermisch trennende Innenfassade (**Primärfassade**) gehängt wird.

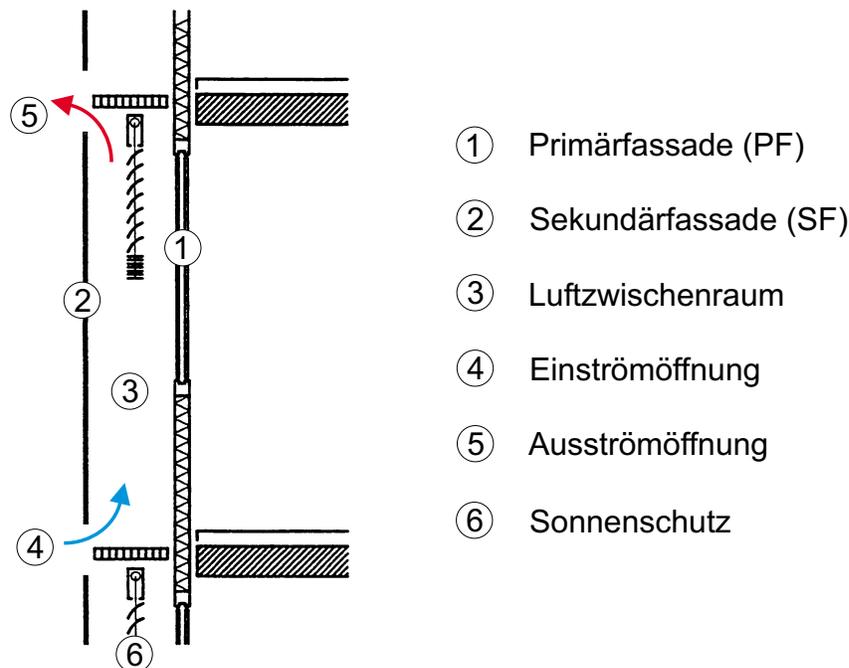


Abbildung 2.1: Schematischer Vertikalschnitt einer Doppelfassade, nach [33]

Eine **Klassifizierung** und differenzierte Betrachtung der unterschiedlichen doppelschaligen Fassadensysteme unter energetischen und strömungstechnischen Aspekten ist bei ZÖLLNER [122] zu finden, LANG [72][73] erstellte eine Typologie unter primär architektonischen und funktional-konstruktiven Gesichtspunkten. Diese und weitere wissenschaftliche Arbeiten der letzten Jahre hatten daneben **experimentelle Untersuchungen** von Doppelfassaden zum Inhalt. ZÖLLNER [122] untersuchte als Erster systematisch energetische und strömungstechnische Zusammenhänge im Luftzwischenraum bei unterschiedlicher Geometrie an einem Outdoor-Versuchsstand im Maßstab 1:1. Vorher waren von ZILLER [121] bereits Modellversuche (Maßstab 1:7, 1:10) und Berechnungen zur natürlichen Lüftung von Räumen durch Doppelfassaden durchgeführt worden. Auch NOLTE [84] untersuchte deren Lüftungsverhalten, am Beispiel zweier unterschiedlich großer realer Räume in einem mit einer Doppelfassade sanierten Hochhaus nahm er Luftwechselfmessungen vor. Diese und viele weitere Untersuchungen fanden mittlerweile Eingang in erste **Fachbücher** über Doppelfassaden. Neben zahlreichen Buchveröffentlichungen über moderne Fassadenkonstruktionen unter Berücksichtigung von Doppelfassaden [18] [16] [100] sind mittlerweile einige Bücher erschienen, die ausschließlich doppelschalige Fassaden zum Thema haben [9] [85]. Damit stehen zunehmend Planungsgrundlagen zur Verfügung, die bis Anfang der neunziger Jahre noch völlig fehlten und demzufolge vielfach zu einem „Trial-and-Error“-Verfahren bei der Planung doppelschaliger Gebäude geführt hatten. Dabei ist der Gedanke, Gebäude mit doppelschaliger Fassade zu bauen nicht neu: Bereits seit den 1960er Jahren bis Mitte der 80er Jahre wurden Doppelfassaden vereinzelt realisiert [16]. Erste Versuche, Häuser mit einer doppelschaligen transparenten Hülle zu umgeben und dies für die Konditionierung der Innenräume nutzbar zu machen, stammen schon aus der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts („*mur neutralisant*“ von LE CORBUSIER [17]).

### 2.1.1 Anwendungsfälle

**Anwendungsfälle** für Doppelfassaden sind heute in erster Linie **Hochhäuser** bzw. alle **Gebäude in schall- oder windexponierten Lagen**, bei denen dennoch eine natürlich empfundene Lüftung angestrebt wird. Die äußere Wetterschutzebene ermöglicht auch bei Gebäuden in exponierten Lagen oder mit extremen Gebäudehöhen prinzipiell ein Öffnen der Fenster zum Lüften. Gleichzeitig können im Unterschied zur konventionellen Fassade, bei der bei geöffneten Fenstern der Schallschutz nahezu zusammenbricht, bei Doppelfassaden immer noch hohe Schalldämmwerte erzielt werden, wenn die Sekundärfassade entsprechende Eigenschaften aufweist. Dabei muß dann zum Beispiel berücksichtigt werden, daß bei einem von Außenluft durchströmtem Luftzwischenraum die Lufteintritts-

und Luftaustrittsöffnungen so dimensioniert sind, daß ein möglichst hoher Schallschutz gegen Außenlärm erzielt wird. Gleichzeitig müssen die Öffnungen den aus thermischen Gründen notwendigen Luftwechsel im Luftzwischenraum ermöglichen, was letztendlich ein Optimierungsproblem ist.

Der zwischen der Primär- und Sekundärfassade entstehende Luftzwischenraum nimmt bei allen doppelschaligen Gebäuden die beweglichen Sonnenschutzvorrichtungen auf und wird in der Regel frei (d.h. durch thermischen Auftrieb) durchströmt (vgl. Abbildung 2.1). Es wurden aber auch bereits Lösungen realisiert, bei denen der Luftzwischenraum zwangskonvektiv durchströmt wird. Diese aufwendigere Methode wird angewandt, wenn die solar erwärmte Luft aus dem Luftzwischenraum noch – z.B. energetisch – genutzt werden soll (beispielsweise über sorptionsgestützte Klimatisierung oder Wärmepumpen) oder wenn sich aufgrund ungünstiger Thermik bzw. Druckverhältnissen keine ausreichende natürliche Auftriebsströmung einstellt.

### 2.1.2 Vorteile

Ein wesentlicher Vorteil doppelschaliger Fassaden liegt in der Verbesserung des sommerlichen Sonnenschutzes, wenn es gleichzeitig gelingt, die sich einstellenden Lufttemperaturen im Luftzwischenraum im Griff zu behalten. Die g-Werte sind bei abgesenktem Sonnenschutz dem eines außenliegenden Sonnenschutzes mindestens ebenbürtig. Im Hochhausbau, wo aufgrund der Windkräfte ab 8 bis 10 Geschossen kein außenliegender Sonnenschutz möglich ist, kann man daher auf die bisher üblichen Sonnenschutzverglasungen (Nachteil: fast alle Sonnenschutzgläser verändern die spektrale Zusammensetzung des Tageslichts, es kommt zu Farbverschiebungen im Innenraum und zu Kontrastverschiebungen bei der Durchsicht nach außen, „Schlechtwetterverhältnisse“ werden vorgetäuscht) und innenliegende Sonnenschutzanlagen (Nachteil: sekundäre Wärmeabgabe an den Innenraum) verzichten.

Die **Vorteile**, die grundsätzlich alle Doppelfassadensysteme in unterschiedlicher Ausprägung bieten, faßt ZÖLLNER [122] folgendermaßen zusammen:

- Verbesserung des Außenschallschutzes durch eine zweite Fassadenebene
- Verringerung der Transmissionswärmeverluste im Winter durch die solare Lufterwärmung im Luftzwischenraum
- Möglichkeit zur partiellen freien Fensterlüftung auch bei hohen Bürogebäuden infolge reduzierter Winddruckbelastung der Kernfassade

- Verringerung der Laufzeiten der raumluftechnischen Anlagen durch die Möglichkeit der freien Fensterlüftung
- Witterungsgeschützte Montage eines quasi-außenliegenden Sonnenschutzes im Luftzwischenraum zur Verringerung der einstrahlbedingten Kühllast im Vergleich zu Gebäuden mit innenliegendem Sonnenschutz
- Möglichkeit der Nachtauskühlung der Gebäudespeichermassen bei gleichzeitigem Einbruchschutz
- Möglichkeiten zur zentralen oder dezentralen Wärmerückgewinnung

An dieser Stelle soll kurz auf den möglichen Einsatz vorgehängter Verglasungen in der **Altbausanierung** hingewiesen werden, und hier insbesondere historisch erhaltenswerter Fassaden oder der aus den 50er bis 70er Jahren stammenden vollklimatisierten Gebäude mit innenliegendem Sonnenschutz und ohne Fensterlüftung. Die Sanierung von Nichtwohngebäuden, d.h. von Arbeitsstätten wie Büro-, Verwaltungs-, Schul- und Hochschul- sowie Gewerbebauten, fordert heute hochwertige Fassadenlösungen sowohl für den winterlichen und sommerlichen Wärmeschutz als auch für die Tageslichtbeleuchtung. Niedrige Energieverbräuche nicht nur für die Heizwärme, sondern vor allem für Beleuchtung und Raumklima sind schon aus einem wirtschaftlichen Gebäudebetrieb heraus geboten. Aus dieser Gesamtsicht heraus bekommen hier die transparenten Teile einer Fassade eine große Bedeutung für die Sanierung im Vergleich zu den geschlossenen (opaken) Teilen. Das verstärkt sich noch, wenn die geschlossenen Wandbereiche wegen des Denkmalschutzes oder aufgrund besonderer Ausformung nicht durch eine außenliegende Wärmedämmung verbessert werden können: Die zu dämmenden Flächen werden relativ groß und die Proportionen der Fassadenansicht verändern sich durch die Dämmschichtdicken in unakzeptabler Weise. Der Einsatz einer vorgehängten Glasfassade nach Abbildung 2.2 ist daher oft eine adäquate Lösung zur Fassadensanierung.

Weiteres Potential für den Einsatz von Doppelfassaden liegt in der Sanierung von Wohnhochhäusern und Bürogebäuden, die in den nächsten Jahren und Jahrzehnten ansteht. Nachträglich angebrachte Sekundärfassaden verbessern dort nicht nur den winterlichen Wärmeschutz, sondern könnten solche Gebäude aus den 1960er, 70er und 80er Jahren auch architektonisch aufwerten (Abbildung 2.2).

### 2.1.3 Nachteile

Beim Einsatz von Doppelfassadensystemen können aber auch gravierende **Nachteile** auftreten [122], die teilweise insbesondere beim Betrieb **ohne zusätzliche Lüftungstechnische Komponenten** von entscheidender Bedeutung sind:



Abbildung 2.2: Sanierung eines Bürohauses [31]: Das ursprüngliche Erscheinungsbild kann durch eine Glasvorhangsfassade positiv verändert werden.

- Zu hohe Temperaturen im Luftzwischenraum im Sommerfall bei solarer Einstrahlung, die über der Außentemperatur liegen und ein Öffnen der Fenster verhindern bzw. den Kühlbedarf im Vergleich zu einem einschaligen Gebäude mit außenliegendem Sonnenschutz erhöhen
- Zu geringe Temperaturen der Zuluft an kalten Wintertagen, die zu Kaltluftabfall und Zugerscheinungen im Innenraum führen
- Keine Reinigungsmöglichkeit der schadstoffbelasteten Zuluft in Ballungsräumen
- Erhöhter Aufwand zur Fassadenreinigung (Faktor 2 bis 3)
- Investiver Mehraufwand gegenüber einschaligen Fassaden (Faktor 1.5 bis 2)

Der erhöhte Investitions- und Wartungsaufwand gegenüber einschaligen Fassaden wird immer gegen den Einsatz von Doppelfassaden sprechen. Dagegen können andere Nachteile, die beim derzeit meist vorgesehenen freien Konvektionsbetrieb auftreten, durch entsprechende Weiterentwicklungen behoben werden, ja sogar in Vorteile verwandelt werden. Zur Lösung des wohl gravierendsten Problems der **Überhitzungsgefahr im Luftzwischenraum** und seinen Folgen für die benachbarten Räume verfolgt man bereits unterschiedliche Wege. Eine allen Maßnahmen gemeinsame Voraussetzung zur Vermeidung gegenüber der Außenlufttemperatur stark erhöhter Lufttemperaturen im Luftzwischenraum ist eine ausreichende Durchlüftung desselben. Es dürfen sich keine Strömungstotpunkte über der betrachteten, strömungstechnisch zusammenhängenden Fassadenhöhe ausbilden, die solaren Gewinne müssen in allen Bereichen des Luftzwischenraums zuverlässig abgeführt werden können.

### 2.1.4 Fassadenregelungskonzepte bei natürlicher Durchlüftung

Soll zur Vermeidung von Übertemperaturen eine **natürliche Durchlüftung** des Luftzwischenraums herangezogen werden, muß der thermische Auftrieb im relevanten Fassadenabschnitt ausreichen, um die für eine Durchlüftung notwendigen Luftmassen- bzw. -volumenströme zu bewegen. Der resultierende Luftwechsel im Luftzwischenraum muß also so hoch sein, daß die Lufttemperatur im Luftzwischenraum nur unwesentlich über die Außenlufttemperatur ansteigt. Die thermische Auftriebsströmung kann sich allerdings nur dann ausbilden, wenn sowohl die Zuström- als auch die Abströmöffnungen ausreichend dimensioniert sind und entsprechend wenig Strömungswiderstand aufweisen. Durch die Forderung nach einer hinreichend **großen Durchlässigkeit** der Außenhülle aus thermischer Sicht entsteht eine **Optimierungsaufgabe**: Für einen guten Außenschallschutz und den Abbau des Winddrucks sind möglichst **kleine Öffnungen** mit hohem Strömungswiderstand in der Sekundärfassade von Vorteil. Um beide Forderungen unter den jeweils herrschenden Umgebungsbedingungen zu erfüllen, ist daher eine einstellbare Durchlässigkeit der Sekundärfassade wünschenswert. **Fassadenregelungskonzepte** werden notwendig, die eine gezielte Abdämpfung der Windgeschwindigkeit und des Winddrucks ermöglichen: Während in einer Sturmsituation die Außenhülle weitestgehend luftundurchlässig sein sollte, ist bei hoher Einstrahlung und Windstille die maximale Öffnung einzustellen, um einen für die Durchlüftung des Luftzwischenraums ausreichenden thermischen Auftrieb zu ermöglichen.

Im Zuge des Neubaus der **Generaldirektion Deutsche Post AG („Post-Tower“)** in Bonn von *Murphy / Jahn* (Abbildung 2.3) wurden entsprechende aerophysikalische Konzepte in der Planungsphase untersucht, die Ergebnisse flossen im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung direkt in die Gestaltung des Gebäudes ein. Der Baukörper wurde beispielsweise aus Gründen der Winddruckverteilung mit seiner schmalen Seite in die Hauptwindrichtung positioniert.

Der Einsatz von „Computational Fluid Dynamics“-Simulationen bringt aber nicht nur Erkenntnisse für die Gestaltung und Ausrichtung des Baukörpers, sondern auch für die Umsetzung der Fassadenbauteile. Im Fall des Post-Tower ergaben solche Berechnungen für die Nord- und Südfassade unterschiedlich sinnvolle Öffnungsgrößen und -geometrien. In Kombination mit Modellversuchen im Windkanal zur Erfassung strömungstechnischer Kennwerte wurde daraus ein Fassadenregelungskonzept entwickelt, das es erlauben soll, die Fassade weitestgehend auf der Basis einer natürlichen Durchlüftung zu betreiben.



Abbildung 2.3: Neubau Generaldirektion Deutsche Post AG: Einsatz von CFD-Simulationen zur Entwicklung angepasster Fassadengeometrien und -konzepte (Architekten: Murphy / Jahn), 2001; Modellfoto: [113]

### 2.1.5 Zwangsdurchströmte Doppelfassaden

Bei den meisten bis heute realisierten Doppelfassaden soll die Durchströmung des Luftzwischenraums durch freie Konvektion bzw. thermischen Auftrieb erfolgen. Dieses Prinzip hat eine starke Abhängigkeit von den jeweiligen Umgebungsbedingungen zur Folge und ist insbesondere bei Umluft-, Korridor- und Kasten-Kasten-Fassaden in allen Betriebszuständen nur durch die oben angedeuteten Fassadenregelungskonzepte bzw. entsprechend dimensionierte Ein- und Ausströmöffnungen in den Griff zu bekommen. Demgegenüber wird bei einer **zwangsdurchströmten** Fassade der Luftwechsel im Fassadenzwischenraum durch Ventilatoren (**mechanische Durchlüftung**) aufrechterhalten. Eine eigens zur Begrenzung der sommerlichen Temperaturen im Fassadenzwischenraum eingebaute mechanische Belüftung wurde bei der Korridorfassade des in Abbildung 2.4 dargestellten **Bürohaus am Halensee** in Berlin (*Léon + Wohlhage, 1996*) realisiert.

Während der Übergangszeiten kann die im Luftzwischenraum aufgewärmte Frischluft über Schiebetüren dem Innenraum zugeführt werden. Dagegen bleibt die Innenfassade der hier primär aus Schallschutzgründen verwirklichten Doppelfassade im Winter (Luftzwischenraum als Wärmepolster) und im Sommer (Überhitzungsproblematik) geschlossen. Die Büroräume werden im Sommer über eine Quelllüftung versorgt, die Kühllasten werden durch die nächtliche mechanische Belüftung eines Teils der Speichermassen reduziert. Während der Luftzwischenraum hier also primär dergestalt behandelt und genutzt wird, daß Kühllastbei-

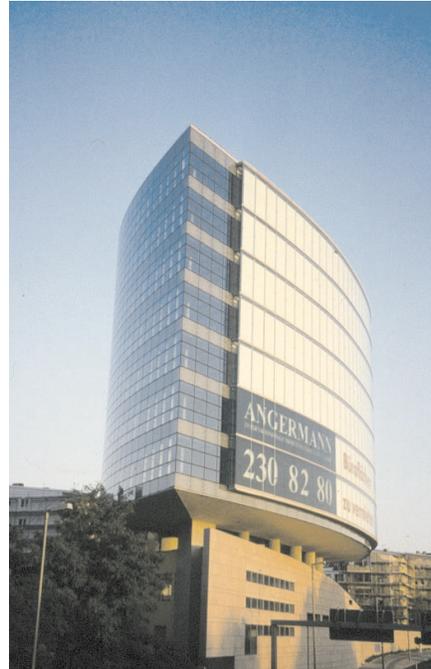
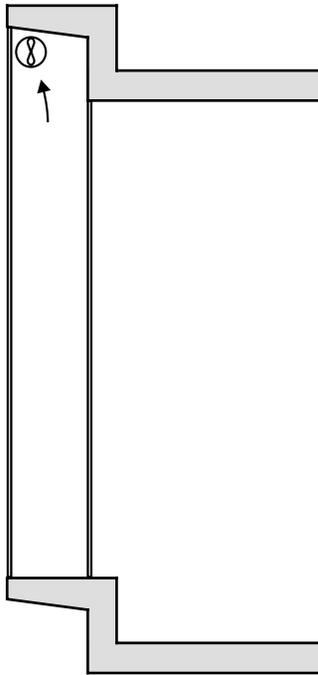


Abbildung 2.4: Bürohaus am Halensee in Berlin, 1996 (Architekten: Léon + Wohlhage): Mechanische Entlüftung des Luftzwischenraums

träge über diese Fassade verringert werden, gibt es Beispiele, wo versucht wird, darüber hinaus auch die solaren Gewinne besser auszunutzen. Das **Verwaltungsgebäude sol-skin** der Götz GmbH in Würzburg (Architekten: Webler + Geissler, 1996) weist neben der natürlichen Durchlüftung des Luftzwischenraums über steuerbare Fassadenklappen im Bodenbereich und im oberen Bereich der Außenfassade die Möglichkeit zum Umluftbetrieb auf (siehe Abbildung 2.5).

Die an den eingesetzten Absorptionsjalousien erwärmte Luft kann mit Hilfe von im Luftzwischenraum der Umluftfassade integrierten Axialventilatorleisten von der sonnenu- zur sonnenabgewandten Seite des Gebäudes „verschoben“ werden. Auf diese Weise ergibt sich eine Regelbarkeit der Lufttemperatur im Luftzwischenraum, die es ermöglicht, die Heizlast und das Solarstrahlungsangebot in verschiedenen Gebäudeteilen besser in Übereinstimmung zu bringen. Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste können insbesondere im Winterfall an der kälteren Nordseite des

Gebäudes verringert werden.

Beim Tower des **Trendpark Neckarsulm** (Architekten: Ziltz + Partner, 1999) wird zusätzlich zu Nachtauskühlung und einem Doppelboden mit Quelluftauslässen ein Zuluftschacht im Gebäudeinneren betrieben (siehe Abbildung 2.6). Vorher wird – unabhängig von Sommer- oder Winterbetrieb – die Außenluft durch einen

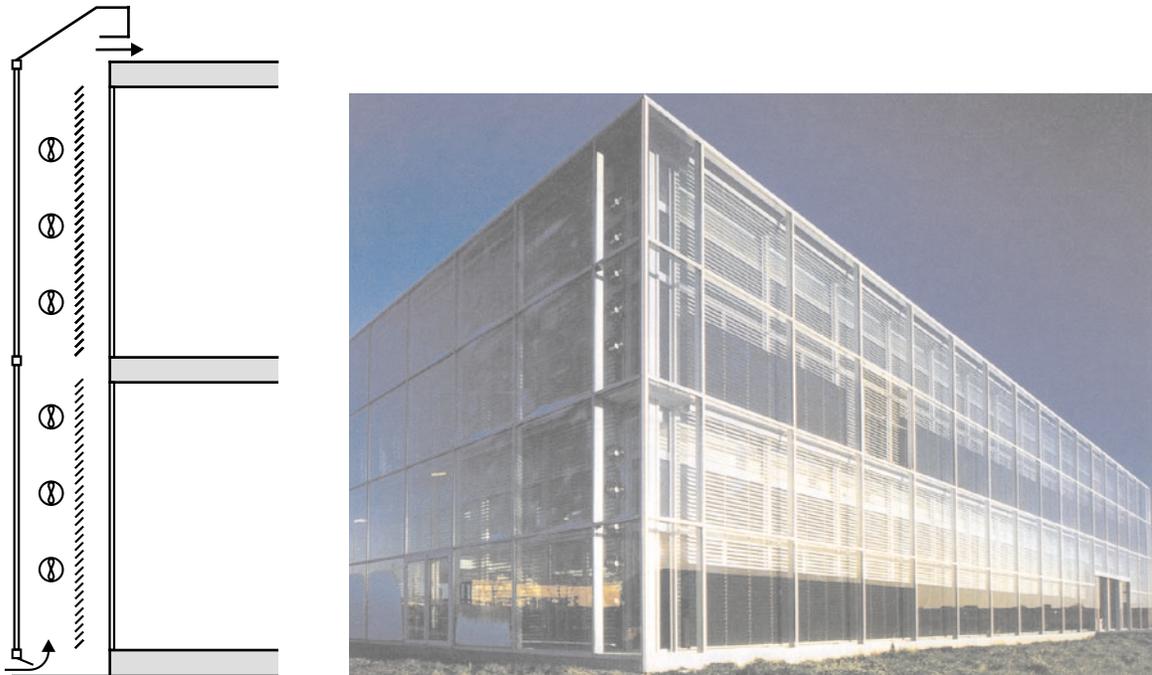


Abbildung 2.5: Verwaltungsgebäude sol-skin der Götz GmbH in Würzburg, 1996 (Architekten: Webler + Geissler): Umluft- oder Zuluftbetrieb im Luftzwischenraum; Foto: [82]

aus mehreren 150 m langen Stahlbetonrohren bestehenden Erdkanal angesaugt. Außer zur Nachtlüftung und temporär in der Übergangszeit wird aus dem Luftzwischenraum wegen der dortigen Erwärmung der Luft also wiederum keine Zuluft für die Büroräume entnommen. Ferner wird eine individuelle Öffnung der Fenster bei widrigen Außenbedingungen oder zu stark erwärmter Luft im Luftzwischenraum von der Gebäudeleittechnik automatisch unterbunden. Die Abluftentnahme aus den Büros ist über einen zweiten Schacht ohne zusätzliche Gebläse durch thermischen Auftrieb vorgesehen, die Bemessung der Abluftvolumenströme erfolgt durch im Schacht integrierte Jalousieklappen. Die Zuluft wird also unter den jeweiligen Bedingungen aus dem günstiger temperierten Reservoir (Außenluft direkt oder im Erdkanal vortemperiert) entnommen. Die Zuluftentnahme aus der Doppelfassade zur Nacht- und Übergangszeit geschieht über Fensterklappen im Oberlichtbereich (siehe Abbildung 2.6).

Wenn die direkte Zuluftentnahme aus dem Luftzwischenraum bei dort herrschenden zu hohen Lufttemperaturen nicht möglich ist, die Zuluft aber dennoch über die Außenhülle des Gebäudes zur Verfügung gestellt werden soll, muß der Luftzwischenraum in irgendeiner Form überbrückt werden. Die Außenluft wird dann über einen Luftkanal angesaugt, der eine direkte Verbindung zwischen Außen-

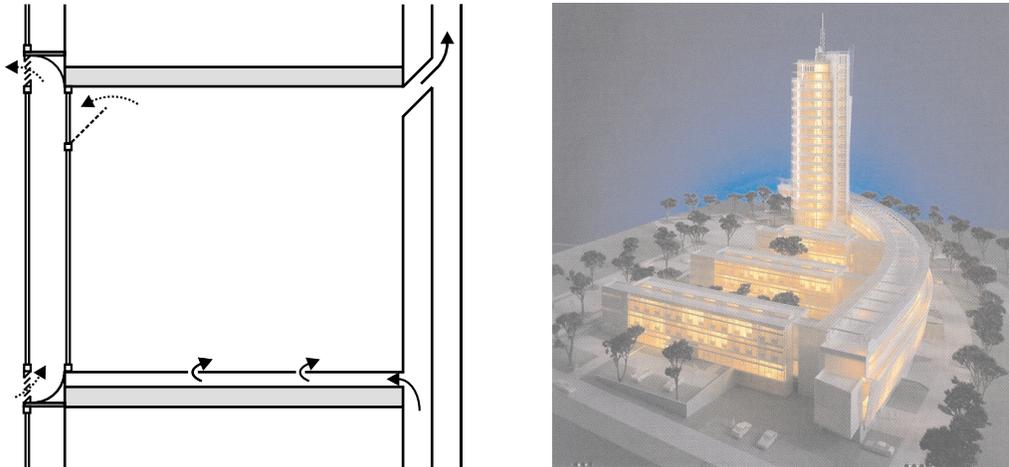


Abbildung 2.6: Towerprojekt Trendpark in Neckarsulm, 1999 (Architekten: Ziltz + Partner): Zusätzliche Zu- und Abluftschächte im Gebäudekern; Modellfoto: [105]

und Innenraum darstellt. Gleichzeitig ist es aber natürlich weiterhin wünschenswert, bei Bedarf auch erwärmte Luft aus dem Luftzwischenraum entnehmen zu können. Um dies zu bewerkstelligen, bedarf es eines steuerbaren Kanalelementes im Sinne eines Mehrwegeventils, wie es beispielsweise in Form des sogenannten **„Sektionalrotors“** [31][39] vorgeschlagen wurde. Abbildung 2.7 zeigt das Prinzip einer Doppelfassade mit einem solchen Bauteil.

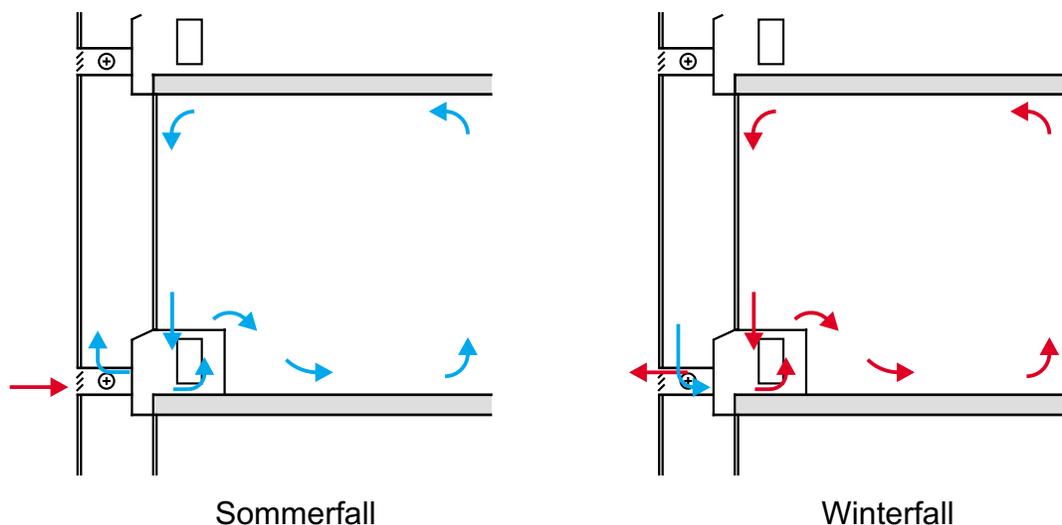


Abbildung 2.7: Sektionalrotor für Doppelfassaden nach [31] im Sommerfall (Zuluft-Bypass des Luftzwischenraums) und im Winterfall (Zuluft aus Luftzwischenraum)

Durch zwei gegeneinander verdrehbare geschlitzte Rohre ist es möglich, die Funktion eines Mehrwegeventils zu realisieren. Im Sommerfall bei hohen Lufttemperaturen im Luftzwischenraum wird die Luft direkt von außen angesaugt. Im Winterfall ist das Bauteil so eingestellt, daß die im Luftzwischenraum solar erwärmte Luft als Zuluft in den Innenraum bzw. ein gegebenenfalls dazwischengeschaltetes Lüftungsgerät angesaugt werden kann. In Abbildung 2.7 ist zusätzlich schematisch ein brüstungsintegriertes Lüftungsgerät dargestellt, das über Zuluft-, Fortluft- und Umluftanschlüsse und einen Wärmerückgewinner verfügt, sowie an einen ebenfalls brüstungsintegrierten Heiz- und Kühlkörper angeschlossen werden kann. Das damit verbundene Konzept sieht vor, im Sommer die angesaugte Außenluft im Wärmetausch mit der Raumabluft zu führen, um sie anschließend über einen Kühlkörper auf die gewünschte Zulufttemperatur zu bringen. Die Abluft gelangt weiter in den Luftzwischenraum. Im Winter wird vorgewärmte Luft aus dem Luftzwischenraum durch den Wärmetauscher und dann über einen Heizkörper geleitet. Die Abluft wird dann aufgrund der Einstellung des Sektionalrotors direkt nach außen abgeblasen.

Ein Fassadenkonzept, das die Vorteile von Doppelfassaden mit denen der Einfachfassade vereinen soll, stellt die für das **Langenscheidt-Hochhaus** in München im Rahmen eines Wettbewerbsbeitrags (*Architekten: Auer + Weber; Bauklimatik: IB Hausladen*) Anfang 2002 vorgeschlagene, sogenannte **Kombifassade** dar [55]. Dort wird jeder Büroraum mit beiden Fassadenarten bestückt, indem sich achsweise Doppel- und Einfachfassadenelemente abwechseln. Somit kann jeder Raum im Sommer über die Einfachfassade mit innenliegendem Sonnenschutz und Direktöffnungsflügel belüftet werden, wenn die Lufttemperatur im doppelschaligen Bereich zu hoch wird. Im Winter und im Übergangsfall dagegen kann die vorgewärmte Zuluft aus dem Luftzwischenraum des Kastenfensters in die Innenräume nachströmen, was über eine definierte, zentrale Absaugung aus den Sanitärbereichen gewährleistet wird.

All diese bis hierher beschriebenen **zwangsdurchströmten Fassadenkonzepte und -bauteile** sind letztlich aus der Einsicht entstanden, daß eine sommerliche Belüftung der Innenräume über den Luftzwischenraum aufgrund der dort herrschenden Lufttemperaturen die sommerlichen Verhältnisse eher verschlechtert. Dies hätte dementsprechend höhere Kühllasten und damit sogar mehr zu installierende Kühlleistung als bei Einfachfassaden zur Folge und würde dem Ziel der Energieeinsparung diametral widersprechen. Deshalb wird versucht, hohe Lufttemperaturen im Luftzwischenraum durch ausreichende Luftwechsel zu vermeiden oder, wenn sie temporär auftreten, die Zuluft für die Innenräume auf anderem Wege bereit zu stellen.

Dennoch werden heute möglichst **natürliche Lüftungskonzepte** bei Büro- und

Gewerbebauten angestrebt, und der Aspekt der **Energieeinsparung** durch weitestgehende Nutzung der Umwelt- und Solarenergie spielt eine immer wichtigere Rolle. Je nach Standortbedingungen und Anforderungen können dabei unterschiedliche Systeme angewendet werden, wie die oben genannten Beispiele bereits andeuten. Allgemein geht der Trend zu Systemen und Systemkombinationen, die möglichst hohe solare Energiegewinne nutzen können, die aber gleichzeitig – zumindest temporär – eine natürliche Lüftung der Innenräume erlauben. OSWALT [86] unterscheidet Fassaden, bei denen *Zu- und Abluft gleichermaßen durch die Fassade* – bzw. den Luftzwischenraum – geführt werden, von den sogenannten **Zu- bzw. Abluftfassaden**, bei denen *Be- und Entlüftung voneinander getrennt* organisiert sind. Während die bisher beschriebenen Fassaden Mischformen dieser Fassadentypen darstellen, werden im Folgenden einige Beispiele für reine Zu- bzw. Abluftfassaden besprochen.

### 2.1.6 Abluftfassade

Anfang der 70er Jahre wurde für vollklimatisierte Bürogebäude die **Abluftfassade** entwickelt und bis in die 80er Jahre häufig realisiert. Im Gegensatz zur klassischen Doppelfassade (siehe Abschnitt 2.1) wird bei der Abluftfassade eine einfache ESG-Scheibe *raumseitig* vor die thermisch trennende Hülle gesetzt, wodurch ein Luftzwischenraum entsteht, der den Sonnenschutz aufnimmt. Die Abluft aus dem Raum wird durch diesen Zwischenraum meist geschoßweise abgesaugt und nimmt dabei – in steigender oder fallender Luftführung – die am Sonnenschutz entstehende Wärmeenergie mit. Allerdings ist davon, neben einer Komfortverbesserung durch die höheren raumseitigen Oberflächentemperaturen der Fenster <sup>1</sup>, in der Regel kaum eine Energieeinsparung zu erwarten. Erst durch die Kombination mit Luftkollektoren und die Nutzung der solaren Wärmegevinne könnte mit der Abluftfassade nennenswert zu Heizung und Kühlung beigetragen werden.

Das **Lloyds Building** in London (*Architekten: Richard Rogers Partnership, 1986*) ist wohl eines der bekanntesten Beispiele für die Realisierung einer Abluftfassade. Es verfügt über geschoßhohe Abluftfenster mit fallender Luftführung, bei der zusätzlich die Wärmeabfuhr der Leuchten mit eingebunden wird. Die Einspeisung der Abluft von oben über ein speziell geformtes Anschlußstück ist nach Abbildung 2.8 von außen gut sichtbar. Die Abluftfassade hat eine Vorläuferrolle bezüglich der Integration von (zweischaligen) Fassaden und haustechnischen Komponenten, wie vor allem das *Lloyds Building* durch die Außenansicht seiner Fassade anschaulich zeigt, an der technische Funktionen bewußt nach außen gekehrt und damit gut

---

<sup>1</sup>Mit Hilfe der heute verfügbaren Zweifachverglasungen mit U-Werten  $\leq 1 \text{ W/m}^2\text{K}$  können angenehme Oberflächentemperaturen allerdings auch ohne Abluftfassade erreicht werden.

ablesbar sind.

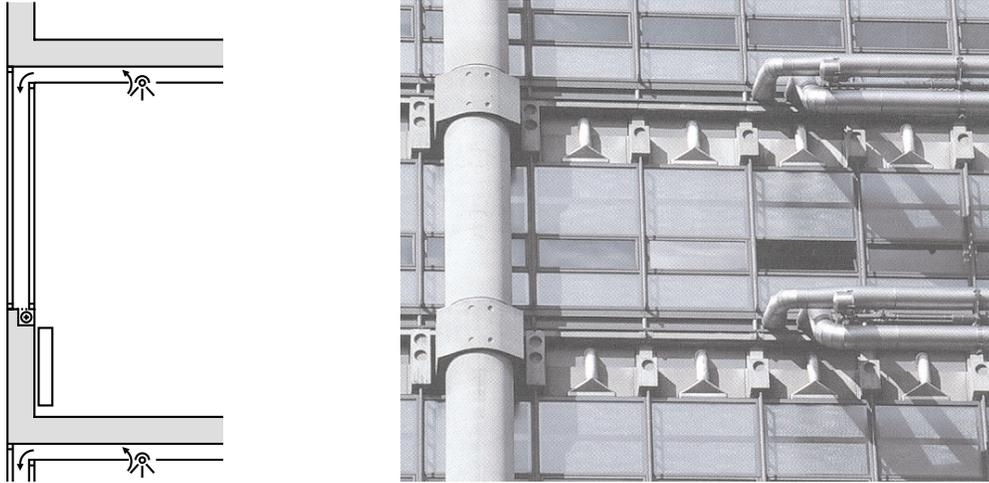


Abbildung 2.8: Lloyds Building in London, 1986 (Architekten: Richard Rogers Partnership): Abluftfassade mit fallender Luftführung und Leuchtenabsaugung; Foto: [16]



Abbildung 2.9: Museum für Kunsthandwerk in Frankfurt am Main, 1984 (Architekt: Richard Meier): Abluftfassade mit steigender Luftführung; Foto: [16]

Ein weiteres, eher unspektakuläreres Beispiel ist das **Museum für Kunsthandwerk** in Frankfurt am Main (Architekt: Richard Meier, 1984), das über Abluftfenster mit steigender Luftführung (siehe Abbildung 2.9) verfügt. Wie oben bereits angedeutet, bietet sich die Abluftfassade zur Kombination mit Luftkollektoren an, in denen die Abluft weiter erwärmt wird, und somit auf ein für die Beheizung interessantes Temperaturniveau gebracht werden könnte. Opake Brüstungen können bei-

spielsweise bei fallender Luftführung als Luftkollektoren ausgebildet und ebenfalls von Abluft durchströmt werden. Die solare Wärme kann anschließend über eine Wärmerückgewinnung für die Heizung des Gebäudes genutzt werden, wie es beim Verwaltungsgebäude der *Cristaleria Espanola* in Madrid realisiert wurde.

Abbildung 2.10 zeigt eine **solarthermische Abluftfassade**, wie sie beim **Bürogebäude für die Berliner Wohnungsbaugesellschaft GSW** (Sauerbruch Hutton Architekten, 1999) gebaut wurde. Die bei der durch Strahlungsabsorption entstehende Wärme wird durch den Abluftstrom in der Fassade wie bei einer konventionellen Abluftfassade abgeführt. Die Fenster der Primärfassade werden dazu geöffnet. Durch die Einstrahlung erwärmt sich die Luft im Luftzwischenraum, steigt auf und saugt Luft aus den Innenräumen nach.

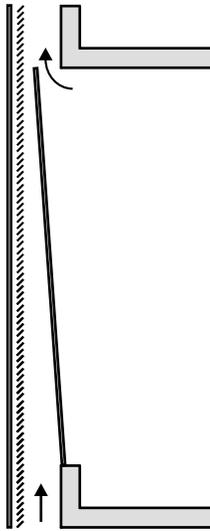


Abbildung 2.10: Hauptverwaltung der GSW in Berlin, 1999 (Sauerbruch Hutton Architekten): Die nach außen kippenden Fensterflügel ermöglichen ein Absaugen der Abluft durch den thermischen Auftrieb im Luftzwischenraum; Foto: [16]

Die Zuluft strömt über andere Fassadenbereiche in die Innenräume nach oder wird über eine mechanische Zuluftanlage bereitgestellt. Im Winter kann der Luftzwischenraum vollständig geschlossen werden, wodurch sich ein isolierendes Luftpolster bildet.

### 2.1.7 Zuluftfassade

Bei **Zuluftfassaden** wird die Außenluft über den Luftzwischenraum, wo sie sich solar erwärmt, mit Hilfe eines mechanischen Lüftungssystems angesaugt. Anschließend wird die erwärmte Luft den Räumen als Zuluft zugeführt. Dabei sind

im Wesentlichen zwei Systeme zu unterscheiden: Im einen Fall erstreckt sich die Zuluftfassade über die ganze Gebäudehöhe, die Luft wird am oberen Fassadende von einer **zentralen** Lüftungsanlage gesammelt und anschließend den einzelnen Räumen über ein Kanalsystem zugeführt. Im anderen Fall erfolgt die Versorgung der Büroräume mit temperierter Zuluft aus dem Luftzwischenraum direkt und **dezentral** nach individuellem Bedarf durch Öffnen der Fenster in der Primärfassade. Zuluftfassaden treten besonders häufig in Mischformen und Variationen auf, die nicht immer eindeutig zu klassifizieren sind, beziehungsweise nur temporär als solche betrieben werden. Im laufenden Unterkapitel werden ausschließlich *durchlüftete*, also *zwangsdurchströmte* Zuluftfassaden behandelt. Im Gegensatz dazu werden in der Literatur oft auch *hinterlüftete* Fassaden als Zuluftfassaden bezeichnet, die ausschließlich auf natürlichen Antriebskräften basieren.

Darüber hinaus ist eine durchlüftete Zuluftfassade in vielen Fällen funktional nicht eindeutig von einem Fassaden- oder Fensterkollektor zu differenzieren. Es ergeben sich diesbezüglich zwangsläufig gewisse Überschneidungen mit dem folgenden Teilkapitel 2.2, wenngleich eine möglichst klare Unterteilung angestrebt wurde.

Ein Beispiel für eine Zuluftfassade mit gebäudehohem Luftzwischenraum, bei der die Außenluft von einer zentralen Lüftungsanlage bis ins Dachgeschoß gesaugt wird, ist das **Briarcliff House** in Farnborough (*Architekten: Arup Associates, 1984*).

Beim in Abbildung 2.11 dargestellten Winterfall nimmt die nach oben steigende Luft Wärmeenergie auf und gibt diese über eine Wärmerückgewinnungsanlage wiederum an die Zuluft für die Büroräume ab. Die Verteilung dieser Zuluft erfolgt in diesem Fall über im Luftzwischenraum geführte Lüftungskanäle. Im Sommer wird die solare Wärmeenergie über Lüftungsklappen in der Sekundärfassade abgelüftet und nicht weiter genutzt. Die Schwierigkeit solcher sich über die gesamte Fassade vom Boden bis zum Dach erstreckenden Zwischenräume sind naturgemäß schwer lösbare Probleme beim Schall- und Brandschutz.

Die Zuluftfassade des Verwaltungsgebäudes der Firma *Glasbau Seele* in Gersthofen (*Architekten: Kauffmann und Theilig, 1992*) funktioniert nach dem gleichen Prinzip: Außenluft wird zentral von einem Ventilator auf dem Dachgeschoß über die gesamte Fassadenhöhe angesaugt. Allerdings wird in diesem Fall die so gewonnene Wärmeenergie teilweise indirekt an die Büroräume abgegeben, indem die erwärmte Zuluft durch die Speichermassen der vertikalen Tragkonstruktion im Inneren des Gebäudes geleitet wird. Anschließend strömt die Luft in den Luftzwischenraum der Nordfassade, deren Wärmeverluste auf diese Weise verringert werden sollen. Während die Sekundärfassade völlig geschlossen ist, besteht in der Primärfassade die Möglichkeit, Fenster zu öffnen und sich temperierte Zuluft aus dem Luftzwischenraum in die Räume zu holen.

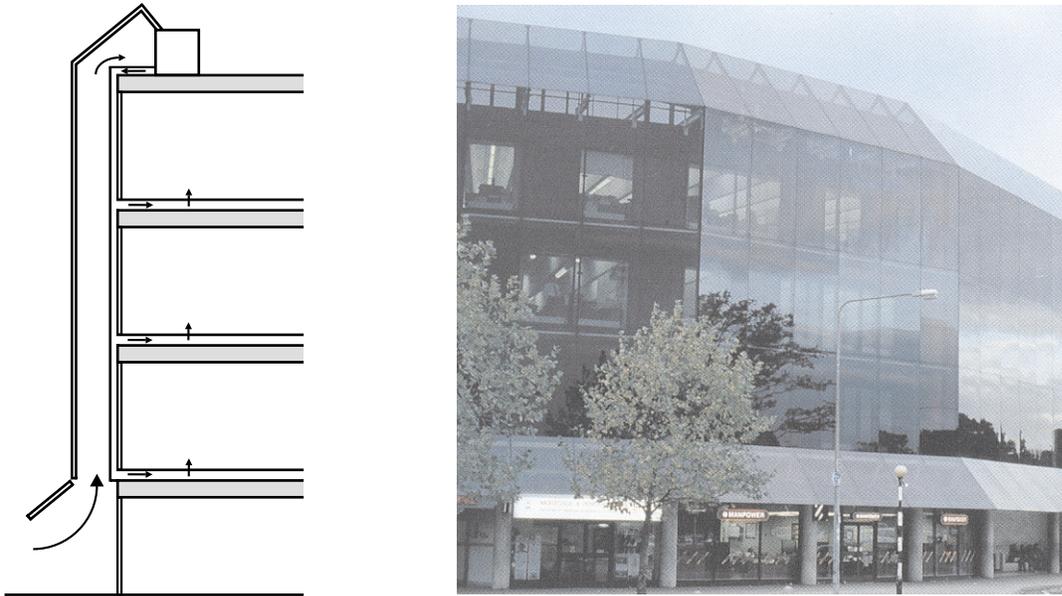


Abbildung 2.11: Briarcliff House in Farnborough, 1984 (Architekten: Arup Associates): Zentrales Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung saugt die Außenluft durch den Luftzwischenraum bis ins Dachgeschoß, von wo sie über ein Kanalsystem im Luftzwischenraum den einzelnen Räumen zugeführt wird; Foto: [16]

Ein dem *Briarcliff House* ähnliches Fassadensystem wurde etwa zeitgleich an einem **Verwaltungsgebäude in Dillenburg** (*Bauklimatik: Prof. Hauser*) [52] realisiert. Der Luftzwischenraum ist dort achsweise als vertikaler Luftkanal ausgeführt, durch den die solar erwärmte Luft einer Wärmepumpe auf dem Dach zugeführt wird. Zusätzlich ist an jeden Fassadenluftkanal ein Raum über ein Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung angeschlossen. An dieser Fassade wurden meßtechnische Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, den Einfluß eines stark absorbierenden und eines reflektierenden Jalousiesystems jeweils mit dem Fall ohne Sonnenschutz zu vergleichen. Das System mit Absorptionsjalousie erbrachte erwartungsgemäß die höchsten Wärmeerträge, und auch die Gesamtenergiebilanz der Fassade war mit Absorptionssystem am günstigsten. Solche Zuluftfassaden mit solarstrahlungsabsorbierenden Jalousien können durchaus bereits als Kollektorfassaden verstanden werden, wie sie im Teilkapitel 2.2 beschrieben werden.

Die zweite wesentliche Erscheinungsform der Zuluftfassade erlaubt das direkte, dezentrale Einbringen der Zuluft vom Luftzwischenraum in den dahinterliegenden Raum. Gegebenenfalls ist ein Lüftungsgerät zwischen Luftzwischenraum und Innenraum geschaltet, wie das schon im vorhergehend beschriebenen *Verwaltungsgebäude in Dillenburg* der Fall war. Mischformen von Fassadenkonzepten sind auch bereits bei oben vorgestellten Objekten feststellbar, die temporär als Zuluft-

fassaden betrieben werden können. Sowohl beim *Bürohaus am Halensee in Berlin* (Abbildung 2.4) als auch beim *Verwaltungsgebäude der Götz GmbH* (Abbildung 2.5) ist ein direktes Einbringen von Zuluft aus dem Luftzwischenraum möglich.

### 2.1.8 Kombination von Abluft- und Zuluftfassade

Ein Fassadenkonzept, das die solare Abluft- mit der Zuluftfassade kombiniert, also dem solaren Wärmegegewinn dient (Vorwärmung der Außenluft im Heizfall) und gleichzeitig als solarthermische Abluftfassade funktioniert, ist die „**Modulare Hybridfassade**“, die von RENZ et al. [95] vorgeschlagen wurde (siehe Abbildung 2.12).

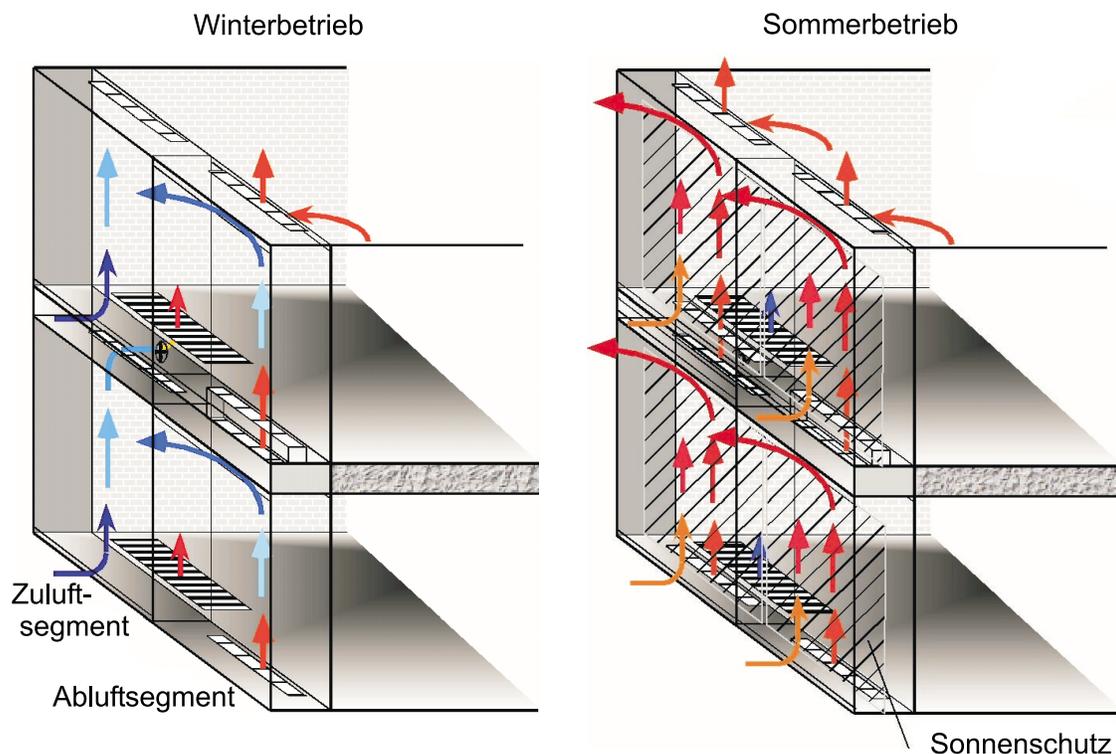


Abbildung 2.12: Schematische Funktionsweise der modularen Hybridfassade [95]

In den Wintermonaten wird die Außenluft mit kleinen Ventilatoren über einen Fensterkasten angesaugt, bei der Durchströmung desselben erwärmt und durch einen Bodenkonvektor in den darüberliegenden Büroraum eingebracht. Im angrenzenden Achsabschnitt des belüfteten Raumes strömt die Abluft in den Fensterkasten, den sie am oberen Ende durch eine Abluft-/Fortluftfuge verlässt. Durch eine Kopplung der beiden Bodenkonvektoren ist eine Wärmerückgewinnung möglich, die innerhalb dieses Moduls neben der Nutzung der Solarstrahlung zur

Erwärmung der Zuluft dienen kann. In den Sommermonaten wird die Zuluft aktiv gekühlt und durch kleine Ventilatoren gezielt auf der Rückseite des Sonnenschutzes über die Fensterkästen nach außen geleitet, wodurch die im Fensterkasten anfallende Wärme abgeführt werden kann. Die Hybridfassade dient als Basis zur Entwicklung des im folgenden Kapitel vorzustellenden Konzeptes eines in die Doppelfassade integrierten Matrixkollektors mit dem Ziel, solarthermische Nutzung und lichttechnische Aspekte zu verbinden. Motivation dafür ist die weitgehende **thermische Nutzung von Sonnenenergie** nicht nur in opaken, sondern auch in **transparenten Bereichen von Gebäudefassaden** – hier insbesondere Doppelfassaden – unter Einsatz von **teiltransparenten durchströmten Matrixabsorbieren**.

### Schlußbemerkung

Der Trend zur Doppelfassade bei hohen Bürogebäuden ist in den letzten Jahren ungebrochen. Da aufgrund der Überhitzungsproblematik (siehe Abschnitt 2.1.3) bald deutlich wurde, daß Gebäude mit Doppelfassade ohne jegliche Maßnahmen zur Raumkühlung in unseren Breiten im Sommer nicht vernünftig zu betreiben sind, wurden Wege gesucht, unter zunehmendem Einsatz von Umweltenergien die aktive Klimatisierung auf ein notwendiges Minimum zu beschränken. Dabei wurde die aufgrund der Temperaturen der Außenluft und des Luftzwischenraums nur temporär mögliche natürliche Fensterlüftung um „sanfte“ Komponenten, wie die Betonkernaktivierung oder die direkte Temperierung der Zuluft über das Erdreich, ergänzt. Wenn dann darüber hinaus noch aktiver Kühlbedarf besteht, werden heute oftmals sorptionsgestützte Verfahren den herkömmlichen Kompressionskältemaschinen vorgezogen.

Ansätze und Lösungen in der Literatur zur gezielten **aktiven thermischen Nutzung der solaren Einstrahlung** auf Gebäudefassaden mit Hilfe von Luftkollektoren sind Inhalt des nachfolgenden Unterkapitels.

Projekt / Jahr der Fertigstellung	Architekten	Fassade	Fassaden- zwischen- raum FZR	Lüftungs- konzept
Generaldirektion der Deutschen Post AG, Bonn, 2001	Murphy / Jahn	Transsolar Energietechnik GmbH	1.30 m	Fensterlüftung über Fassaden- zwischenraum
Bürohaus am Halensee, Berlin, 1996	Léon + Wohlhage	IBS Ing.-büro Schalm, J. Gartner & Co.	0.85 m	mechanisch entlüfteter FZR, Zuluftmöglichkeit
Götz sol-skin Verwaltungsgebäude Würzburg, 1996	Webler + Geissler	Götz GmbH	0.6 m	Umluftfassade/ Zuluftfassade
Trendpark Neckarsulm, 1999	Ziltz + Partner	Ziltz + Partner, Transsolar	ca. 0.6 m	Zu- und Abluft- schacht im Gebäudeinneren
Lloyds Building, London, 1986	Richard Rogers Partnership		0.12 m	Abluftfassade
Museum für Kunsth Handwerk, Frankfurt am Main 1984	Richard Meier			Abluftfassade
Hauptverwaltung der GSW, Berlin, 1999	Sauerbruch Hutton Architekten	Götz GmbH	ca. 1.0 m	Solare Abluftfassade
Briarcliff House, Farnborough, 1984	Arup Associates	Arup Associates	1.20 m	Zuluftfassade

Tabelle 2.1: Beispielprojekte für Doppelfassaden mit Konzept zur zuverlässigen Durchlüftung des Fassadenzwischenraumes

## 2.2 Fassadenintegrierte Luftkollektoren

Im vorangegangenen Unterkapitel wurden Doppelfassaden behandelt, bei denen versucht wird, die aufgrund der auftreffenden solaren Einstrahlung entstehende Wärmeenergie durch einen ausreichend hohen Luftwechsel im Luftzwischenraum abzuführen. Im laufenden Abschnitt gilt das Interesse ausschließlich Fassadenkollektoren, die die Sonneneinstrahlung durch bewußt eingesetzte Absorption **aktiv** nutzbar machen sollen. Doppelschalige Fassaden sind in ihrer Mehrzahl – wenn man von wenigen Ansätzen aus der jüngsten Vergangenheit absieht – bisher im obigen Sinne meist als solarthermisch **passive** Fassadensysteme ausgeführt worden.

Gegenstand der vorliegenden Betrachtung sind ausschließlich Fassadensysteme, die die **Sonnenenergie thermisch** umsetzen und die gewonnene Wärme **konvektiv** auf **Luft** übertragen. In der Regel handelt es sich dabei um **zweischalige Konstruktionen**, in die Fassade **integrierte** oder an die Fassade **applizierte** luftführende Systeme. Obwohl Fassadenkollektoren weltweit eher noch ein Schattendasein führen, soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, daß aufgrund der Anzahl gebauter Einzelbeispiele und Veröffentlichungen in der nachfolgenden Literaturübersicht nur eine Auswahl wichtiger Entwicklungen aufgegriffen werden kann. Nicht näher betrachtet werden die in der Literatur auch oft als „Solarfassaden“ bezeichneten, gegebenenfalls mit transparenter Wärmedämmung (TWD) versehenen, wärmespeichernden Außenwände, bei denen der Wärmetransport zum dahinterliegenden Raum ausschließlich durch Wärmeleitung über ebendiese Außenwände möglich ist.

### 2.2.1 Bauformen solarer Luftkollektoren

Zunächst soll anhand einiger in der Literatur vorgeschlagener Bauformen das Prinzip solarer Luftkollektoren erklärt werden. Das Kernstück des klassischen Luftkollektors ist wie beim Wasserkollektor der aus einer geschwärzten Metallplatte bestehende **Solarabsorber**. Die kurzwellige Solarstrahlung durchdringt die äußere Glasscheibe und trifft auf den Solarabsorber, wo sie in Wärme umgewandelt wird. Während die Wärmestrahlung des Absorbers die Kollektorfassade durch das für langwellige Strahlung undurchlässige Glas nicht wieder verlassen kann, wird die gewonnene Wärme an die Luft im Luftzwischenraum konvektiv übertragen. Im Gegensatz zum flüssigkeitsbefüllten Kollektor, bei dem aus naheliegenden Gründen das Wärmeträgerfluid im hermetisch abgedichteten Absorber selbst strömt, wird der Absorber von der angesaugten Luft über-, unter- oder durchströmt. Der Unterschied zwischen den Luftkollektoren liegt bis auf einige

Sonderbauarten im Wesentlichen in der Form des Absorbers. Die einfachste Form ist die **Absorberplatte**, die nach Abbildung 2.13 über- bzw. unterströmt oder beidseitig umströmt wird.

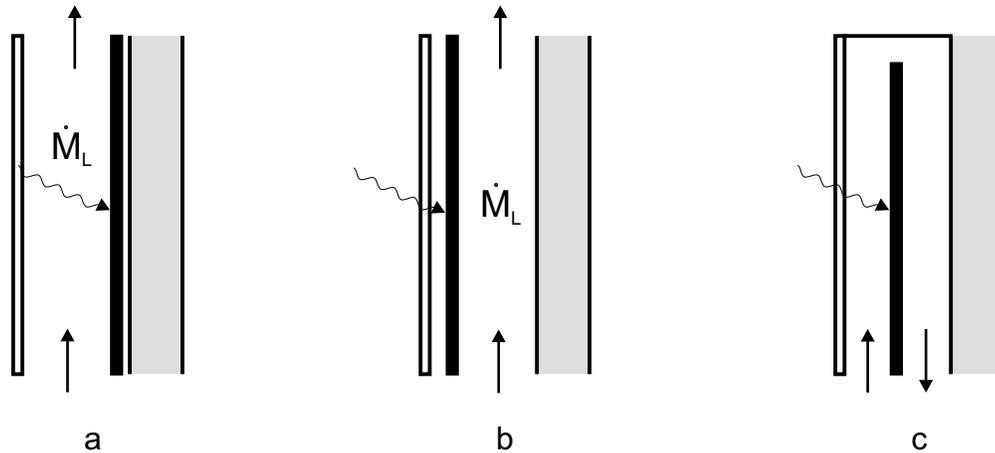


Abbildung 2.13: Luftkollektoren mit einfachem Plattenabsorber, der überströmt (a), unterströmt (b) oder beidseitig umströmt (c) wird

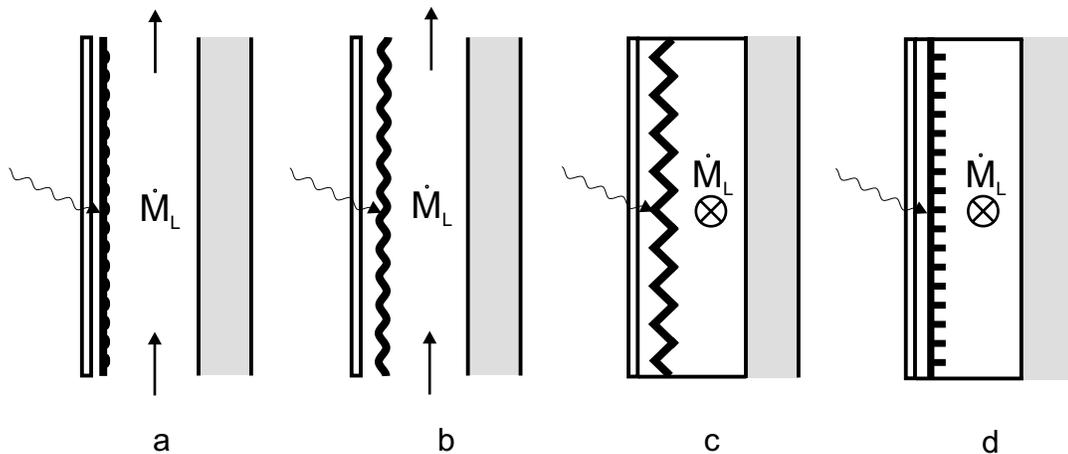


Abbildung 2.14: Luftkollektoren mit geometrisch modifiziertem Plattenabsorber: Querrippen (a) oder Wellen (b) senkrecht zur Strömungsrichtung bzw. Rippen (c) oder Zick-Zack-Form (d) in Strömungsrichtung

Zur Verbesserung der Wärmeübertragung vom Absorber an die Luft wird neben der in Abbildung 2.13c dargestellten mehrfachen Umströmung des Absorbers [117] die wärmeübertragende Oberfläche häufig durch eine besondere geometrische Bauform des Absorbers vergrößert. Bei **senkrecht zur Strömungsrichtung** angebrachten Rauigkeiten [45][94] oder gewellten Absorbern [91] (Abbildung 2.14a und 2.14b) wird zusätzlich der Turbulenzgrad der Luftströmung und

damit der Wärmeübergangskoeffizient vom Absorber an die Luft gesteigert. Eine weitergehende Vergrößerung der wärmeübertragenden Oberfläche ist durch einen **in Strömungsrichtung** gewellten (Zick-Zack-) Absorber [66] oder durch eine ebenfalls in Strömungsrichtung angebrachte Berippung [19] (gegebenenfalls quer zur Strömungsrichtung zueinander versetzte Abschnitte [93]) möglich (Abbildung 2.14c und 2.14d).

Eine weitere Vergrößerung der wärmeübertragenden Oberflächen und Wärmeübergangszahlen wird durch den Einsatz von durchströmten und damit volumetrisch wirksamen Absorbern erreicht. Nach Abbildung 2.15a kann dies durch das Auflösen einer Platte in einzelne, sich überlappende Absorberstreifen erreicht werden [65]. Es wurden aber auch gänzlich andere Absorbermaterialien und -geometrien wie Kapillaren aus Kunststoff oder Glas [20] (Abbildung 2.15b) und verschiedene poröse, durchströmbare volumetrische Absorber (Abbildung 2.15c) vorgeschlagen.

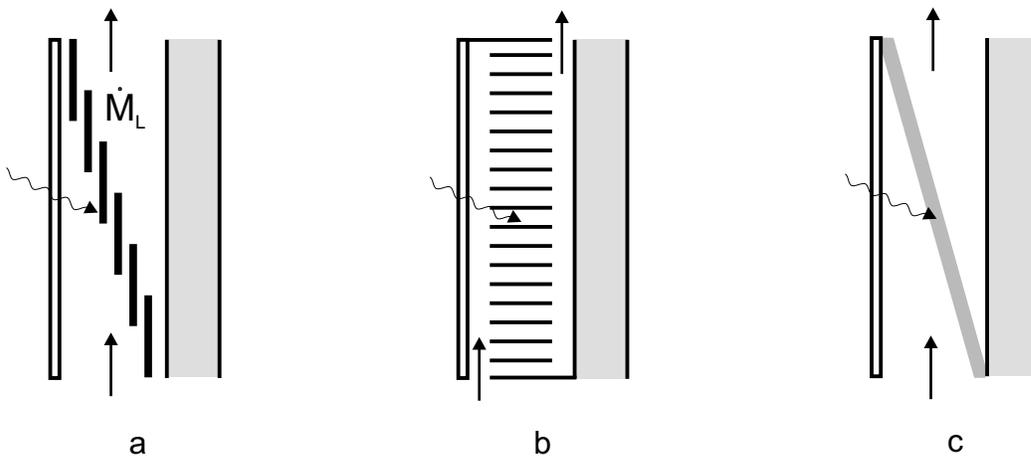


Abbildung 2.15: Luftkollektoren mit volumetrischem, durchströmtem Absorber in Form von sich überlappenden Absorberstreifen (a), Kapillaren (b) und porösem Matrixabsorber (c)

Die grundsätzliche Idee, ein durchlässiges Gewebe als Solarabsorber zu verwenden, wurde erstmals von BLISS [8] im Jahre 1955 vorgestellt. In der Literatur sprechen im Jahr 1965 CHIOU, EL-WAKIL und DUFFIE [14] bei Sonnenkollektoren mit einem porösen durchströmten Absorber erstmals von **Matrixkollektoren**. Das Trägergerüst des heterogenen Absorbers wird hierbei als Matrix bezeichnet, deren Hohlräume von Luft durchströmt werden, die dabei konvektiv erwärmt wird. Die in der Literatur beschriebenen Matrix-Luftkollektoren besitzen meist Absorber aus einem vliesartigen, fasrigen, optisch recht dichten Material weniger Zentimeter Dicke. Abweichend von diesen Matrix-Absorbern ungeordneter Struktur kommt für den Einsatz an transparenten Fassadenbereichen aber nur ein geome-

trisch definierbares Gewebe in Frage, das eine Einzeldicke von deutlich unter 1 Millimeter aufweisen sollte. Diese dünnen Gewebe werden dann in zwei, maximal drei Einzellagen mit im Vergleich zur Einzeldicke großem Abstand übereinander gespannt und bilden so den Absorber. Durch die Verwendung von Matrixabsorbern aus feinen Drahtgeweben sind folgende Eigenschaften eines Luftkollektors zu erwarten [70]:

- Hohe volumenbezogene Wärmeübergangsfläche des Absorbers
- Hohe Wärmeübergangskoeffizienten
- Höhere Wärmeübergangsraten als bei Plattenabsorbern
- Verminderte Betriebstemperatur gegenüber Plattenabsorbern
- Kollektor mit geringen Temperaturdifferenzen
- Weniger Wärmeverluste
- Höhere Wirkungsgrade

Am Schluß dieser Einführung in Absorberbauarten sollen einige Sonderformen erwähnt werden, die unter Abwandlung der oben dargestellten Grundformen über-, unter- sowie durchströmter Absorber untersucht wurden. Eine Variante des durchströmten Absorbers stellt der Luftkollektor ohne transparente Abdeckung [71] dar, bei dem die Außenluft direkt durch den perforierten Absorber angesaugt wird (Abbildung 2.16a).

Jenseits des Absorbers selbst kann seine Anströmung auch durch zusätzliche Einbauten, wie eine in Abbildung 2.16b dargestellte, perforierte Platte gegenüber dem nur unterströmten Fall verbessert werden [15]. Abbildung 2.16c schließlich zeigt einen vakuumisolierten durchströmten Luftkollektor, bei dem das gesamte Volumen zwischen Abdeckung und Gehäuse mit einem porösen Absorbermaterial gefüllt ist [58].

### **2.2.2 Einsatzgebiete solarer Luftkollektoren**

Die große Zahl an Forschungsarbeiten über Luftkollektoren bis in allerjüngste Vergangenheit führte zu einer im vorangegangenen Abschnitt bereits angedeuteten Vielfalt an Bauformen und verwendeten Materialien. Dennoch hat dies trotz oft hoher Leistungsfähigkeit und ausführlicher physikalischer Beschreibung der Luftkollektoren kaum zu deren Verbreitung im Gebäudesektor beigetragen. Weltweit gibt es insgesamt nur wenige Hersteller, die sich mit der Entwicklung, Herstellung

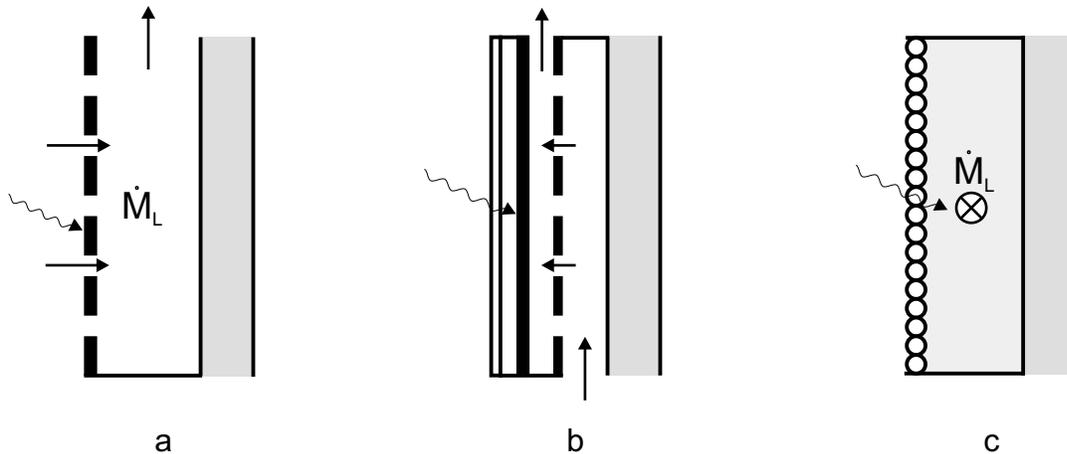


Abbildung 2.16: Sonderbauformen von Luftkollektoren: Perforierter Absorber ohne Abdeckung (a), Jet-Plate-Luftkollektor (b) und poröser Matrixabsorber mit Abdeckung aus evakuierten Glasrohren (c)

und Planung von Luftkollektorsystemen beschäftigen. International einheitliche Prüfstandards für Luftkollektoren sind bis heute nicht vorhanden. 1999 wurden von der Internationalen Energieagentur IEA erstmals Grundlagen standardisierter Testabläufe und Bewertungsmethoden für solare Luftsysteme vorgestellt [34]. Ein Grund für das Schattendasein von Luftkollektoren in der Architektur ist neben der mangelnden kommerziellen Verfügbarkeit sicherlich, daß viele wissenschaftliche Veröffentlichungen zwar die Optimierung von Luftkollektoren zum Inhalt haben, aber oft keinen Bezug zu einer möglichen Gebäudeintegration herstellen. Wenn dort Einsatzgebiete genannt bzw. vorgeschlagen werden, liegen diese oft nicht im Bereich der Raumluftkonditionierung in Büro- oder Wohnräumen. Vielmehr werden Luftkollektoren häufig zur Warmluftkonditionierung beispielsweise für industrielle oder landwirtschaftliche Trocknungsprozesse eingesetzt. Bis heute findet man nur ein paar wenige in Serie gebaute Typen von Luftkollektoren, die an Gebäuden eingesetzt werden (siehe Abschnitt 2.2.4).

### Hallenbauten

Meist sind es Sonderbauten wie Werk-, Lager- oder Produktionshallen, bei denen die Kollektoren direkt die für die Deckung des Heizwärmebedarfs herangezogene Warmluft liefern. In aller Regel werden die Kollektoren aber nicht in die Gebäudehülle integriert, sondern lediglich auf Flachdächern – meist mit der klassischen Kollektorneigung von  $45^\circ$  nach Süden ausgerichtet – aufgeständert. Europas größte Luftkollektoranlage ( $1175 \text{ m}^2$  Kollektorfläche) beheizt die Produktions- und Lagerhalle eines Baustoffwerks in Oschatz bei Leipzig. Der häufigste Einsatz-

fall für solare Luftsysteme ist heute also die Beheizung und Belüftung großvolumiger Hallenbauten, bei denen ohnehin Lüftungs- oder Luftheizungsanlagen vorgesehen sind und wo bereits solar erzeugte Temperaturen ab 20°C genutzt werden können:

- Produktions-, Werk-, Montagehallen: Solare Luftwärmeversorgung
- Gewerbe-, Verkaufs- und Lagerhallen: Solare Luftheizung und Frischluftherwärmung
- Sport-, Mehrzweck- und kommunale Hallen: Solar unterstützte Beheizung, Belüftung und Warmwasserbereitung
- Schwimmhallen: Solare Außenluftherwärmung

### **Schwimmhallen**

Da es sich um einen besonders geeigneten Einsatzfall für Luftkollektoren handelt, soll auf das Anwendungsbeispiel Schwimmhalle gesondert eingegangen werden. Die solare Erwärmung der Schwimmhallenluft stellt gerade bei ganzjährig betriebenen Hallenbädern einen Idealfall dar: 70% des Wärmebedarfes eines Hallenbades entfallen auf die Erwärmung und Entfeuchtung des Hallenbades und es müssen ganzjährig Zuluft-Temperaturen von 32 - 38°C bereitgestellt werden.

Das sind Temperaturen, die auch im Sommer von der Außenluft nur höchst selten erreicht werden, was wiederum bedeutet, daß die Hallenzuluft eigentlich immer erwärmt werden muß. Eine sommerliche Regulierung ist mit einem solarluftunterstützten System auch in sofern realisierbar, als bei hohen Strahlungskühllasten der solar erwärmte Zuluftstrom erhöht werden kann (evtl. Photovoltaik für erhöhte Last der Ventilatoren). Das zusätzlich verfügbare Verdunstungspotential trägt in solchen Fällen entsprechend zur Kühlung der Schwimmhalle bei.

### **Wohngebäude**

Solar-Luft-Systeme werden aber auch immer wieder in Wohnhäusern eingesetzt, die über eine kontrollierte mechanische Wohnungslüftung zumindest teilweise beheizt werden. Zwar waren Luftheizsysteme in der Vergangenheit in Mitteleuropa anders als z.B. in Teilen der USA eher unüblich. Die seit Ende der 1970er Jahre sukzessive verschärften Bemühungen des Gesetzgebers um Energieeinsparung bei Gebäuden (zuletzt durch die seit Februar 2002 gültige Energieeinsparverordnung) haben zu einer starken Reduzierung der Transmissionswärmeverluste über die

wärme gedämmte Gebäudehülle geführt. Die verbliebenen Heizlasten sind heute zum größten Teil durch den notwendigen Luftaustausch im Gebäude bedingt. Deshalb wird die Luftheizung auch bei Wohngebäuden in Europa wieder häufiger eingesetzt, meist bei hocheffizienten Gebäudekonzepten unter Ausnutzung regenerativer Energiequellen wie Umweltwärme und Sonnenstrahlung. Neben der solar unterstützten Wohnungslüftung werden in der Literatur auch Systeme zur Anbindung an eine Hypokaustenheizung und Gesamtsysteme zur Frischluftherwärmung, Heizungsunterstützung und Warmwasserbereitung [36], oft in Kombination mit Wärmepumpe [119][120] beschrieben. Wenngleich einzelne größere Projekte im Mehrfamilienhausbereich oder für Reihenhaussiedlungen bekannt sind, so kommt die Mehrzahl der Solar-Luft-Systeme im Wohnungsbau doch traditionell im Bereich von Einfamilienhäusern einschließlich Wochenend- und Ferienhäusern zum Einsatz. In den allermeisten Fällen besteht wiederum keine wirkliche **Integration** in die Gebäudehülle, sondern, wie es auch bei Warmwasserkollektoren noch häufig der Fall ist, eine architektonisch unbefriedigende **Applikation** auf die bestehende bzw. konventionelle Dachfläche.

### 2.2.3 Fassadenintegration

Dennoch ist die Integration von Luftkollektorsystemen in die Gebäudehülle und insbesondere in die Fassade ein Thema, dem sich Architekten und Bauingenieure seit langem widmen. Auch die wenigen Hersteller solarer Luftkollektoren können seit den 1990er Jahren auf eine zunehmende Zahl an Referenzprojekten mit fassadenintegrierten Solar-Luft-Systemen verweisen, von denen einige Beispiele in einem folgenden Unterkapitel (Abschnitt 2.2.4) gezeigt werden.

#### 2.2.3.1 Begriffe

Zu den Begriffen sei an dieser Stelle Folgendes angemerkt: Der bisher in der vorliegenden Arbeit schon verwendete Begriff **Fassadenkollektor** bezeichnet ganz allgemein einen *Kollektor*, der an einen Fassadenbereich appliziert oder in die Fassade integriert wird, oder aber einen Fassadenbereich komplett ersetzt. Ein Fassadenkollektor kann, muß aber nicht zwingend außenwand-substituierenden Charakter haben. Der von OSWALT [86] benutzte Begriff **Kollektorfassade** bedeutet zunächst nichts anderes als die begriffliche Vertauschung von Subjekt und Objekt: Es geht bei der Kollektorfassade um eine *Fassade*, die einen Fassadenkollektor im oben genannten Sinn *beinhaltet*, egal ob dieser addiert, integriert wird oder selbst einen Teil der Fassade substituiert. Der Begriff Kollektorfassade kann allerdings umfassender verstanden werden, nämlich als Fassade, die nicht nur einen Kollektor in irgendeiner Form beinhaltet, sondern von ihrer Bauart her sozusagen selbst einen

Kollektor darstellt oder ausschließlich aus miteinander verschalteten Kollektoren besteht. Letzteres ist beispielsweise denkbar, wenn Kollektoren großflächig in eine Pfosten-Riegel-Konstruktion integriert werden oder die einzelnen Module einer Elementfassade jeweils einen Luftkollektor darstellen. Wenn die gesamte Fassade einen zusammenhängenden Luftkollektor darstellt, handelt es sich um vorgehängte Konstruktionen, die wie unsegmentierte Doppelfassaden vor der eigentlichen Primärfassade eine zweite Haut aus Glas oder hier einem absorbierenden Material aufweisen. Den entstandenen Luftzwischenraum durchströmt die angesaugte Luft und erwärmt sich dabei.

Während **Fassadenkollektoren** auch einzeln, also **dezentral** an die dahinterliegenden Räume angebunden werden können, wird die Luft bei großflächigen **Kollektorfassaden** – sei es eine aus einzelnen Kollektoren zusammengesetzte Kollektorfassade oder ein zusammenhängender Großkollektor – immer **zentral** über eine Lüftungsanlage angesaugt. Allen Systemen gemein ist, daß die über einen Fassadenkollektor oder eine Kollektorfassade zentral oder dezentral angesaugte **Warmluft** anschließend entweder **direkt** durch eine mechanische Lüftung bzw. Lüftung oder **indirekt** über die Durchströmung wärmespeichernder Bauteile und zeitverzögerter Wärmeabgabe zur Raumluftkonditionierung an die Innenräume abgegeben wird.

An dieser Stelle soll schließlich auf den Begriff **Hybrid-Systeme** im Zusammenhang mit Luftkollektoren eingegangen werden. Teilweise werden unter hybriden Solarsystemen Heizsysteme verstanden, die die Sonnenenergie sowohl *aktiv* (mit Komponenten wie Kollektoren oder Ventilatoren) als auch *passiv* (durch die wärmespeichernde Gebäudemasse) nutzen. In der vorliegenden Arbeit werden darunter Solarsysteme verstanden, bei denen die synergetische Nutzung von Solarthermie und Photovoltaik angestrebt wird.

### 2.2.3.2 Luftkollektor-Fassadenelement

Die Idee eines Luftkollektor-Fassadenelements geht bereits auf das 19. Jahrhundert zurück: Im Jahr 1881 ließ sich E. S. MORSE [81] einen Fassadenluftkollektor patentieren, der an der Außenwand von Gebäuden befestigt werden konnte (Abbildung 2.17) und über Lüftungsöffnungen bzw. -klappen mit dem dahinterliegenden Raum in Verbindung stand.

In der Abbildung 2.17 ist eine Seitenwand offen dargestellt, um das Innenleben des Kollektors zu zeigen. Der Absorber bestand aus einem gewellten, geschwärzten Blech, dessen Geometrie eine möglichst große, der Sonne zugewandte Absorberfläche bereitstellen sollte. Die Glasabdeckung des Kollektors war aus mehreren, parallel zum Absorber ausgerichteten Platten zusammengesetzt. Der Einfallwin-

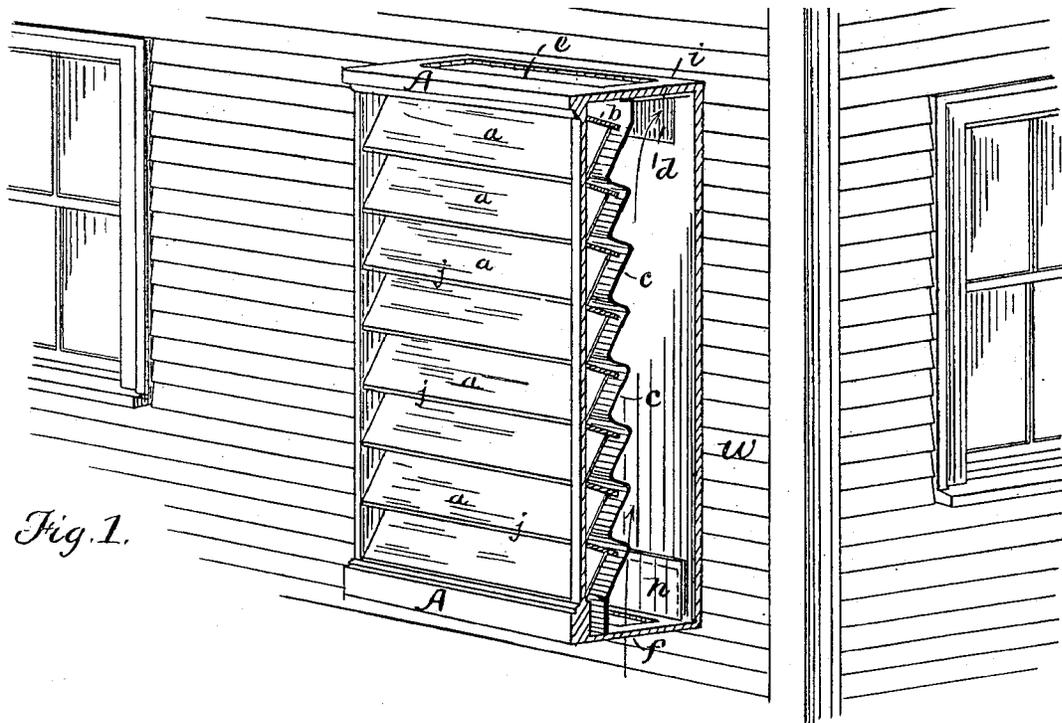


Abbildung 2.17: Perspektivische Ansicht des Fassadenkollektors nach MORSE [81] an einem Gebäude

kel der direkten Solarstrahlung auf die Glasabdeckung sollte so über einen weiten Zeitraum möglichst nahe an der Flächennormalen gehalten werden, um Reflexionsverluste an der Abdeckung zu minimieren. Der Fassadenkollektor ermöglichte neben dem **Umluftbetrieb** über zwei Öffnungen zum Innenraum durch zwei weitere steuerbare Öffnungen zum Außenraum auch einen **Zuluft-** und **Abluftbetrieb**. Nach Abbildung 2.18 trat im Zuluft- oder Frischluftbetrieb Außenluft durch die untere Öffnung in den Luftzwischenraum, wurde dort erwärmt und strömte über die obere Innenöffnung dem Raum zu. Öffnete man die Klappen genau umgekehrt, wurde der Raum im Abluftbetrieb entlüftet.

### 2.2.3.3 Trombewand, Fassadenkollektor und Fensterkollektor

Im Sinne von OSWALT [86] können Kollektorfassaden nach Abbildung 2.19 in **Trombewand**, **Fassadenluftkollektor** und **Fensterkollektor** (Luftkollektoren mit transparenter Rückwand) unterschieden werden. Wenngleich die **Trombewand** (Abbildung 2.19a) in der Literatur meist zu den Methoden der *passiven* Solarenergienutzung gezählt wird, kann man sie dennoch als einfachste Form eines Fassadenluftkollektors mit wärmespeicherndem Absorber betrachten.

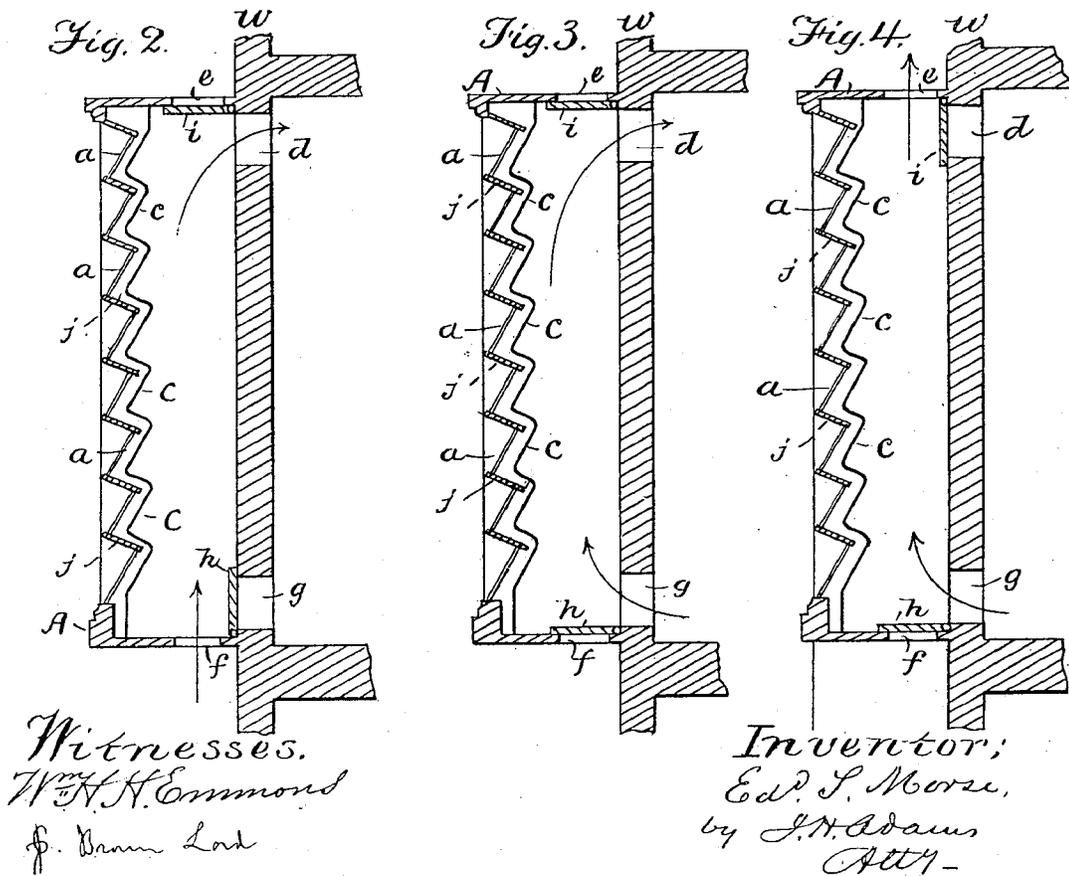


Abbildung 2.18: Funktionsschema des Fassaden-Luftkollektors nach MORSE [81]. Vier Öffnungen und zwei Klappen ermöglichen drei Betriebsarten: Zuluftbetrieb (links), Umluftbetrieb (mitte) und Abluftbetrieb (rechts)

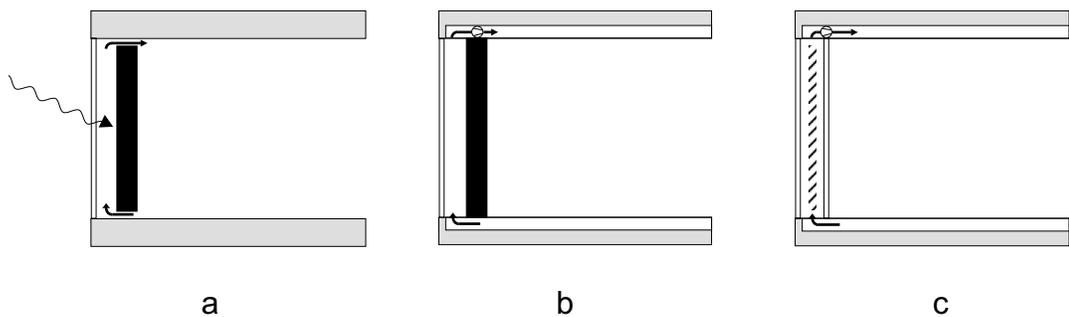


Abbildung 2.19: Drei grundsätzliche Arten von Kollektorfassaden: Trombewand (a), Fassadenluftkollektor (b) und Fensterkollektor (c)

Die von TROMBE [110] beschriebene Kollektor-Speicherwand zeichnet sich durch eine besonders massive Absorberwand (Dicke: 0.4 - 0.6 m) aus, die nach außen

(in einem Abstand von 5 - 15 cm) von einer Zweifachverglasung abgedeckt wird, und über Zirkulationsöffnungen zum Innenraum im Decken- und Bodenbereich verfügt. Aus der oberen dieser Öffnungen strömt die im Luftzwischenraum (überströmter Solarabsorber) konvektiv erwärmte Luft thermisch bedingt in den Innenraum und zieht dabei kühlere Raumluft durch die Bodenöffnung nach. Sind keine Öffnungen vorhanden oder werden sie durch Klappen verschlossen, findet die Wärmeabgabe in den dahinterliegenden Raum zeitverzögert durch die massive Wand hindurch statt. Das Prinzip der reinen Trombewand (Kollektor-Speicherwand) läßt sich in unseren Breiten allerdings kaum sinnvoll realisieren, da die Transmissionswärmeverluste durch diese ungedämmte Außenwand so hoch sind, daß sie die solaren Wärmegewinne wieder fast völlig zunichte machen. Im Gegensatz zur Trombewand ist der Fassadenkollektor thermisch von der Außenwand durch eine rückseitige Wärmedämmung getrennt und steht demzufolge ausschließlich indirekt in Wechselwirkung mit dem dahinterliegenden Innenraum. Kernstück eines **Fassadenluftkollektors** ist in aller Regel ein unterströmter Rippenabsorber aus Aluminium. Das Kollektorelement ist mit einer Zuluft- und einer Abluftöffnung versehen. Im Unterschied zur Trombewand wird beim eigentlichen solaren **Fassadenkollektor** und **Fensterkollektor** die Wärme über einen mechanisch – d.h. mit Hilfe eines Ventilators – geförderten Luftstrom vom Absorber abgeführt (siehe Abbildung 2.19b und 2.19c). Man spricht dann von einem *zwangsdurchströmten* solarthermischen System.

#### 2.2.3.4 Integrationsmöglichkeiten

Bei fassadenintegrierten Solar-Luft-Systemen kann man verschiedene **Integrationsmöglichkeiten** unterscheiden, die im folgenden Abschnitt aus baukonstruktiver und architektonischer Sicht beschrieben werden. Die in der Literatur beschriebenen Möglichkeiten der lufttechnischen Verbindung der Fassadenkollektoren mit dem Innenraum bzw. Gebäudeteilen, sowie die Einbindung in gebäudetechnische Gesamtkonzepte werden in der vorliegenden Arbeit nicht behandelt. Die große Fülle an unterschiedlichsten Gebäudekonzepten und -beispielen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Es sei in diesem Zusammenhang auf einige Veröffentlichungen verwiesen, die die Fragen der Gebäudeanbindung von Fassadenkollektoren systematisch abhandeln [47][48][49][61], sich allerdings im Wesentlichen auf Wohngebäude beschränken. Daneben existiert eine Vielzahl an Untersuchungen und Evaluierungen von Wohnhäusern mit solargestützten Luftsystemen [43][89]. An dieser Stelle sei nur die Gemeinsamkeit all dieser Systeme erwähnt: Über die Austrittsöffnung des Fassadenkollektors strömt die erwärmte Luft in den Raum bzw. ein sammelndes Kanalsystem. Die Förderung der Luft kann zentral oder dezentral mit wahlweise kollektorintegrierten Lüftungsgeräten erfolgen. Rein luft-

gestützte Systeme können in Außenluft- oder Umluftbetrieb mit (open loop) und ohne (closed loop) Kanalsystem im Raum betrieben werden. Bei Verwendung von Kanalsystemen ist eine Speicherung in massiven Bauteilen oder auch eine direkte Leitung durch Hohlräume der Raumumfassungsflächen (Hypokausten) möglich. Die so erwärmten Bauteile geben die gespeicherte Wärme phasenverschoben in Form von Strahlungswärme an die Innenräume ab. Solche Systeme können im Sommer auch zur nächtlichen Rückkühlung benutzt werden: Unter Umgehung des Kollektors wird kühle Nachtluft direkt an den Stirnseiten der Deckenplatten angesaugt und in die Hohlkörperdecken eingeblasen.

In vielen Fällen beschränkt sich die Integration heute auf die bloße **Addition** von Luftkollektoren (sogenannte **Elementkollektoren**, ggf. mit integriertem Ventilator und Solarzellen für dessen Antrieb) als zusätzliches Element an der Außenwand. Oft werden diese Kollektoren als kompletter Systembausatz für den Eigenbau im „do-it-yourself“-Verfahren angeboten. Typischer Einsatzfall solcher *low-cost*-Lösungen (Systempreis  $\leq 500$  EURO/m<sup>2</sup>) sind temporär genutzte Ferienhäuser, wo es meist weniger um die Einsparung von Heizenergie als vielmehr um die Vermeidung von Feuchtigkeit in den Innenräumen geht.

Wünschenswert ist dagegen eine wirkliche multifunktionale Integration von Kollektoren im Sinne einer zumindest teilweisen **Substitution** ohnehin notwendiger Bauteile der Gebäudehülle, wie es bei der Realisierung von Warmwasser-Kollektoren als Dachkonstruktion („*Solar Roof*“) bereits praktiziert wird. HUENCHUNIR BUSTOS [61] stellt anhand einiger kommerziell verfügbarer Kollektortypen deren mögliche Fassadenintegration dar. In Anlehnung an diese Veröffentlichung sollen in der vorliegenden Arbeit folgende Integrationsmöglichkeiten angesprochen werden:

- Integration in Pfosten-Riegel-Konstruktion
- Vorhangfassade
- Substitution eines Fensters

Darüber hinaus könnten Fassadenkollektoren natürlich auch in komplett vorgefertigten Fassadenelementen integriert werden. Der Montageaufwand auf der Baustelle unterscheidet sich dann nicht von dem herkömmlicher **Elementfassaden**. Bei der Integration in eine **Pfosten-Riegel-Konstruktion** können die Luftkollektoren in beliebigen Abmessungen gefertigt und somit an das jeweilige Raster angepaßt werden. Der **Märkische Polstermarkt** in Falkensee bei Berlin (*Architekturbüro Raché, 1997*) verfügt beispielsweise über 510 m<sup>2</sup> solchermaßen integrierte Luftkollektoren, die große Teile der Südfassade ersetzen (siehe Abbildung 2.20).



Abbildung 2.20: Märkischer Polstermarkt in Falkensee, 1997 (Architekturbüro Raché): Integration von Luftkollektoren in eine Pfosten-Riegel-Konstruktion; Foto: [112]

Eine weitere Möglichkeit zur Integration von Luftkollektoren in Gebäudefassaden ist die Ausbildung des Luftkollektors als **Vorhangfassade**. Hier wird vor der eigentlichen Primärfassade mit Abstandsprofilen eine luftdurchströmte **Absorberfassade** geschaffen. Das am weitesten verbreitete System dieser Art ist die sogenannte SOLARWALL, bei der die Außenluft direkt durch einen trapezförmig ausgebildeten und perforierten Solarabsorber angesaugt wird (siehe Abbildung 2.21). Luftkollektoren als Vorhangfassade kommen vorzugsweise bei großvolumigen Funktionsbauten zur Anwendung, bei denen große opake Fassadenflächen zur Verfügung stehen, und werden oftmals zur Sanierung bestehender Fassaden eingesetzt.

**Fensterkollektoren** sind Fassadenluftkollektoren mit transparenter Rückwand (siehe Abbildung 2.19c). Sie stellen kein reines Zusatzbauteil dar, sondern können das ohnehin teure Bauteil Fenster fast vollwertig ersetzen. Während Luftkollektoren mit opakem Absorber nach Abbildung 2.22a keinerlei Durchsicht erlauben, kann mit Fensterkollektoren (Abbildung 2.22b) das transparente Bauteil Fenster zumindest temporär erhalten werden. Eine nochmals reduzierte Einschränkung bei der Durchsicht läßt sich mit feinen Drahtgeweben als Absorber in einem Fensterkollektor erwarten (siehe Abbildung 2.22c).

Bei Fensterkollektoren besteht das äußere und innere Fenster häufig jeweils aus Zweischeiben-Isolierverglasung mit einem Zwischenraum von etwa 20 cm, in dem sich eine verstellbare Jalousie mit Lamellen befindet, deren zwei Oberflächen strahlungsabsorbierend bzw. -reflektierend beschichtet sind. Werden die Lamellen mit der absorbierenden Seite zur Sonne hin ausgerichtet (Abbildung 2.23a), wird

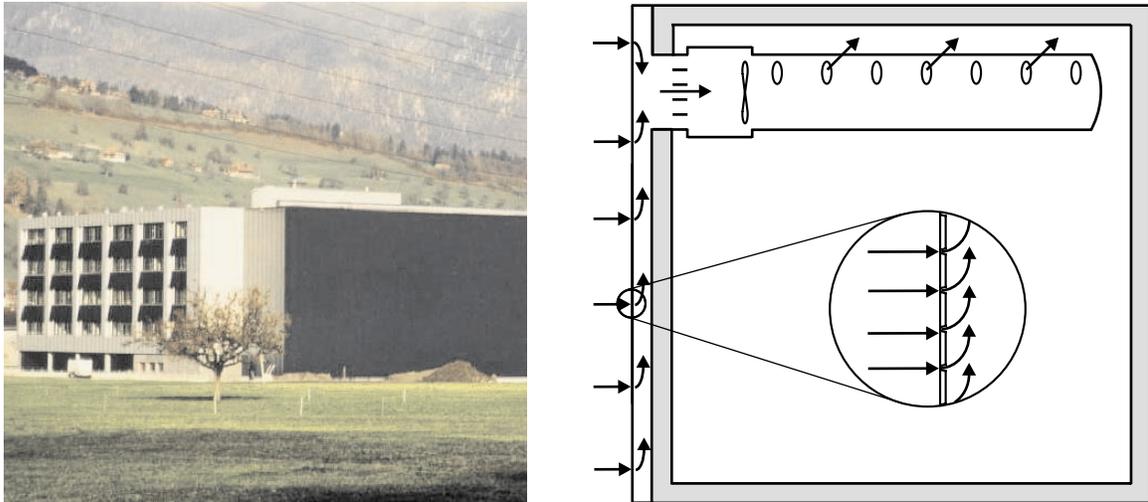


Abbildung 2.21: Luftkollektor als Vorhangfassade am Beispiel des Hochregallagers Leister in Sarnen (CH), 1998 (Architektengruppe Olten); Foto: [114]

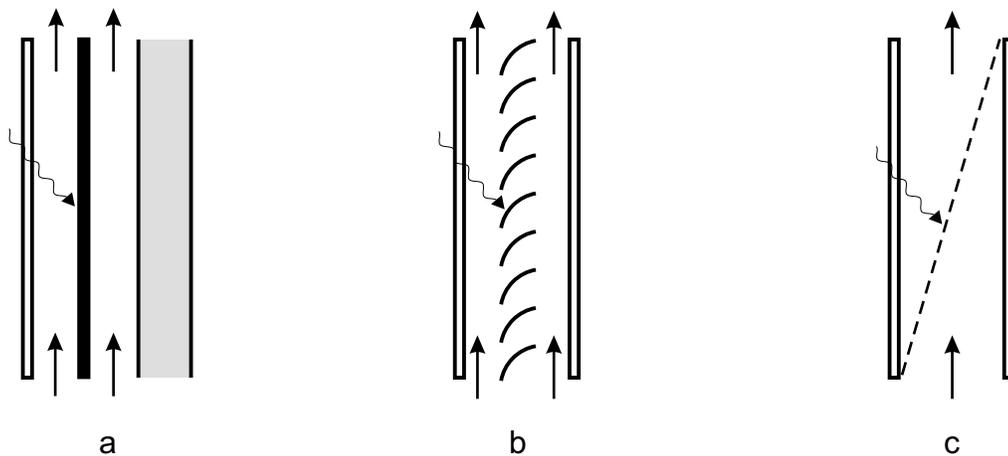


Abbildung 2.22: Schematische Darstellung eines opaken Fassadenkollektors mit beidseitig umströmtem Plattenabsorber (a) und eines Fensterkollektors mit Rafflamellenstore (b) bzw. teiltransparentem Matrixgewebe (c) als Absorber

die Strahlung absorbiert und die entstehende Wärme wie bei einem Luftkollektor abgeführt. Wird keine Wärme im Gebäude benötigt dreht man die Lamellen mit der reflektierenden Seite nach außen. Auch die temporäre nächtliche Nutzung als Wärmeschutz bei komplett geschlossenen, vertikal gestellten und entsprechend ausgeführten Lamellen ist denkbar. Ist eine zumindest teilweise Aussicht nach außen erwünscht, werden die Lamellen horizontal eingestellt (Abbildung 2.23b).

Die Absorptionseigenschaften bleiben bei hochstehender Sonne zum Teil erhalten

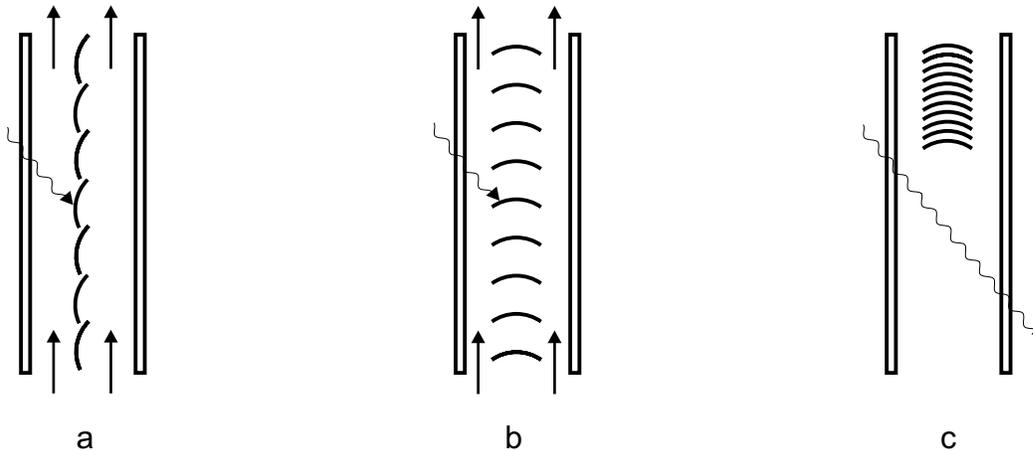


Abbildung 2.23: Fensterkollektor mit verstellbarem Rafflamellenstore aus strahlungsabsorbierend beschichteten Lamellen in verschiedenen Positionen

(ungünstigerer Auftreffwinkel), die Wärmeübertragung an die durchströmende Luft könnte sich sogar etwas verbessern, wenngleich der Druckverlust bei quer zur Strömungsrichtung eingestellten Lamellen signifikant ansteigt. Eine uneingeschränkte Durchsicht läßt sich ausschließlich durch das in Abbildung 2.23c dargestellte, vollständige Hochfahren des Rafflamellenstores erreichen. Dies bedeutet naturgemäß den Wegfall der beiden Funktionen Solarabsorption und Sonnenschutz. Es besteht also bei Fensterkollektoren dieser Bauart der grundsätzliche Nachteil, daß sie zur gleichen Zeit immer nur entweder als reiner Luftkollektor *oder* als uneingeschränktes Fenster betrieben werden können.

Im folgenden Unterkapitel soll anhand einiger Beispielgebäude ein Überblick über realisierte Lösungen fassadenintegrierter Luftkollektoren gegeben werden. Die Objekte werden in Bezug auf die zuvor behandelten Aspekte *Gebäudenutzung*, *Bauform des Fassadenkollektors* und Art der *Fassadenintegration* beschrieben.

## 2.2.4 Beispielobjekte

Fassadenintegrierte Luftkollektoren werden heute in allen möglichen Gebäudetypen eingesetzt, wenn auch ihre Verbreitung noch gering ist und sich die Einsatzgebiete auf wenige Bereiche konzentrieren (siehe Abschnitt 2.2.2). Dennoch wurden in den letzten Jahren unter diesem Aspekt interessante Gebäude realisiert und publiziert. Die Auswahl der Objekte ist dabei nicht ausschließlich durch eine architektonisch besonders gelungene Integration von Luftkollektoren bestimmt, sondern greift durchaus auch Beispiele auf, die vor allem technisch interessante Optionen beinhalten bzw. noch gar nicht realisiert worden sind.

Neben dem **Neubau** wird auch der Bereich der **Gebäudesanierung** berücksichtigt. Insbesondere viele Mehrfamilienhäuser im Bestand sind mit Schachtlüftungen oder mechanischen Abluftanlagen ausgerüstet, deren Energie- und Komfortprobleme sich durch eine solare Vorwärmung der Zuluft entschärfen lassen. Eine wärmetechnische Sanierung der Fassade kann außer den im vorangegangenen Unterkapitel 2.1 beschriebenen Doppelfassaden auch durch für diesen Fall geeignete Luftkollektoren erreicht werden.

### 2.2.4.1 Elementkollektoren

Die bereits oben angesprochene, oft nachträgliche Anbringung von Elementkollektoren an Gebäudefassaden wird fast ausschließlich im Einfamilienhausbereich eingesetzt und soll hier nicht weiter in Form von Beispielen behandelt werden. Im Bereich großer **Mehrfamilienhäuser** gibt es aber durchaus auch Fälle, wo Luftkollektoren nur in Teilbereichen der Fassade additiv angebracht wurden. Die Befestigung erfolgt mit Hilfe einfacher Aluminiumprofile direkt an der Außenwand, eine Verbindung zum Gebäudeinneren wird über an der Kollektorrückwand befindliche Anschlußstutzen hergestellt.

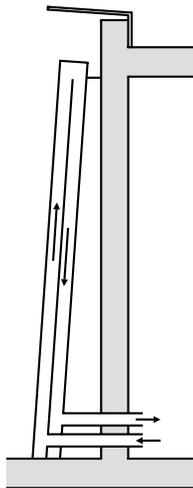


Abbildung 2.24: Luftkollektoraddition: Niedrigenergiehaus Baumgartner-/Ganghoferstraße in München, 1996 (Architekten: Raupach + Schurk); die Luftkollektoren sind im obersten Geschöß mit Hilfe von Aluminium-Winkelprofilen an der Außenwand befestigt; Foto: [46]

Architektonisch ist dies aber nur akzeptabel, wenn wie beim **Niedrigenergiehaus Baumgartner-/Ganghoferstraße** in München (Architekten: Raupach + Schurk, 1996), die Kollektoren dennoch in das Gesamterscheinungsbild mit einbezogen werden oder optisch entsprechend zurücktreten. Dort wurden die Luftkollektoren nach

Abbildung 2.24 ausschließlich an der hinter einer Dachterrasse zurückspringenden Fassade im obersten Geschöß additiv angebracht.

Der interessantere und architektonisch anspruchsvollere Fall ist allerdings die Integration von Luftkollektoren in weite Bereiche der Regelfassade von großen Häusern. Das **Mehrfamilienhaus Lützowstraße** in Berlin (Architekten: *IBUS Institut für Bau-, Umwelt- und Solarforschung, 1988*) verfügt über in die Wand integrierte Luftkollektoren, die in einem geschlossenen Luftkreislauf mit den als Hypokausten ausgeführten Geschößdecken stehen. In Abbildung 2.25 sind links und rechts neben den Wintergärten die vor dem Mauerwerk in die Wand (bzw. in die Dämmebene) integrierten Luftkollektoren zu erkennen. Die Kollektoren selbst bestehen aus schwarzen, an der Rückseite berippten Metallabsorbern hinter einer Verglasung. In einem geschlossenen Umlaufverfahren strömt die Luft am oberen Ende des Kollektors in die von den Rippen gebildeten Kanäle ein, wird unten umgelenkt und strömt durch danebenliegende Rippenkanäle wieder nach oben.



Abbildung 2.25: Integration von Luftkollektoren in die Außenwand beim Mehrfamilienhaus Lützowstraße in Berlin, 1988 (Architekten: *IBUS Institut für Bau-, Umwelt- und Solarforschung*); Foto: [112]

Elementkollektoren können aber nicht nur in gemauerte Fassaden eingebaut werden, sondern können als glasfassadenintegrierte Kollektormodule herkömmliche Fassadenpaneele ersetzen. Ein Beispiel für die Integration der Luftkollektorelemente direkt in Pfosten-Riegel-Konstruktionen ist das **Umweltinformationszentrum Gaytal Park** bei Bitburg (Architekten: *Mossmann & Wolf, 1995*), bei dem die Kollektortafeln an der Südfassade angeordnet wurden (siehe Abbildung 2.26). Die Verbindung der einzelnen Kollektoren erfolgte mit speziellen Muffen und Stechhülsen.



Abbildung 2.26: Integration von Luftkollektoren in eine Pfosten-Riegel-Konstruktion: Umweltinformationszentrum Gaytal Park bei Bitburg, 1995 (Architekten: Mossmann & Wolf); Foto: [112]

#### 2.2.4.2 Kollektorfassaden

Wenn geschoßhohe opake Außenwandbereiche im Gebäudeentwurf vorgesehen sind, wie das bei großvolumigen Funktionsbauten oft der Fall ist, werden durchaus auch ganze **Solarkollektorfassaden** realisiert. Ähnlich wie im Bereich der Warmwasserkollektoren dachintegrierte *Solar-Roof*-Kollektoren Funktionen einer konventionellen Dachhaut gleich mit übernehmen und damit wirtschaftlicher werden, können die Luftkollektoren andere, gegebenenfalls teure Fassadenelemente aus beispielsweise Spiegelglas oder Marmor ersetzen. Die Solarfassade kann hierbei als ein einziger großer Luftkollektor ausgebildet sein, wie dies beim **Gründerzentrum Hambau** in Hamm (Architekten: HHS Hegger, Hegger, Schleiff; 1998) der Fall ist (siehe Abbildung 2.27).

Die Kollektorfassade besteht aus einzelnen Modulen, die in Form einer geschuppten, punktgehaltenen Vorhangfassade an der Südostwand des Bürogebäudes einen gebäudehohen Sonnenkollektor mit einer Fläche von 120 m<sup>2</sup> bilden. Die Außenluft wird von oben nach unten über ein zentrales Lüftungsgerät durch den Kollektor gesaugt.

Ähnlich als Vorhangfassade ausgebildet ist das oben bereits erwähnte SOLARWALL-System: Dort wird die Außenluft nicht an einem Ende der Fassade, sondern flächig direkt durch den Absorber angesaugt (siehe Abbildung 2.28).

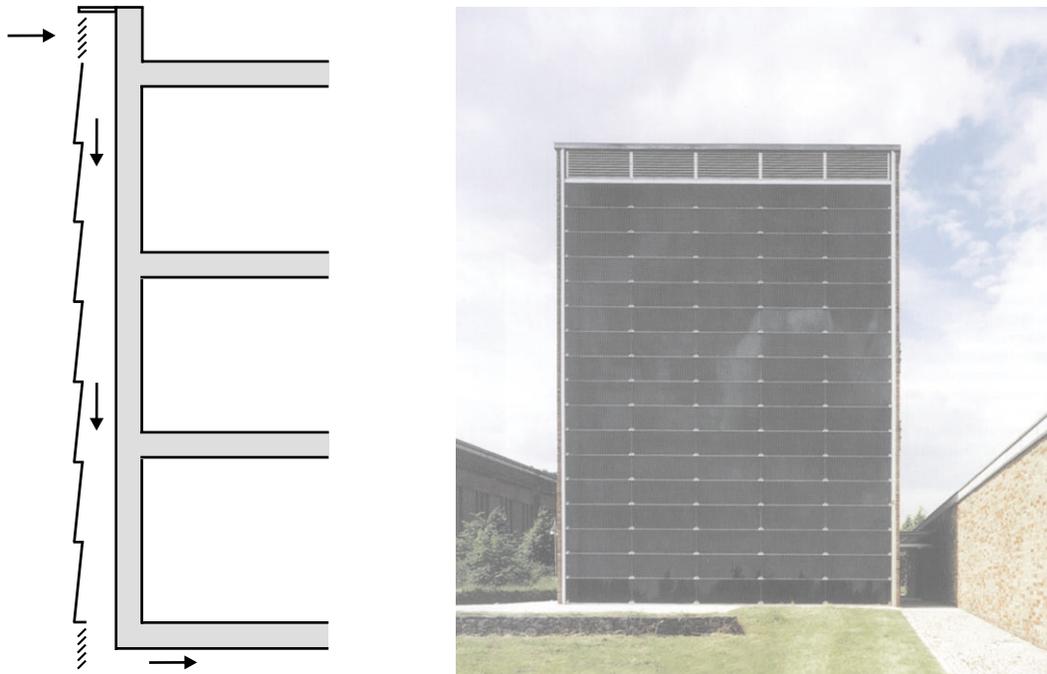


Abbildung 2.27: Funktionsprinzip einer von oben nach unten durchströmten Luftkollektorfassade am Beispiel des Gründerzentrums Hambau, 1998 (Architekten: HHS Hegger, Hegger, Schleiff; Bauklimatik: IB Hausladen); Foto: [54]

Im Gegensatz zum zuvor beschriebenen System besitzt die SOLARWALL keine Glasabdeckung, am Absorber liegt Außenluft an. Diese wird durch die Perforierung der Bleche (Lochanteil 1-2%), die als Außenhaut einer durchlüfteten Fassade fungieren, in den fassadenintegrierten Luftkanal gesaugt und über einen Ventilator in den Nutzungsbereich transportiert. Aus strömungs- und wärmetechnischer Sicht wissenschaftlich beschrieben [44][71], haben diese durchströmten Vorhangfassaden (engl.: „transpired walls“) mittlerweile eine große Verbreitung gefunden. Wenngleich dieses Luftkollektorsystem meist an Produktionshallen und zur Luftvorwärmung eingesetzt wird, gibt es doch auch eine große Anzahl an Beispielobjekten unterschiedlicher Nutzung.

Zu ihrer Verbreitung hat neben den niedrigen Investitions- (50 - 150 EURO/m<sup>2</sup>) und Unterhaltskosten sicherlich ihre vielseitige und meist unkomplizierte Einsetzbarkeit beigetragen. Die erreichbaren Wirkungsgrade (siehe Kapitel 5.1.5, Abbildung 5.13) liegen für ein unverglastes System hoch. Mit nachträglich angebrachten SOLARWALL-Vorhangfassaden können Fassaden wärmetechnisch saniert werden, wie das Beispiel des *Ouellete Manor Senior Citizens' Building* in Windsor/Ontario aus den 1960er Jahren zeigt. Opake Fassadenbereiche wurden im Jahr 1994 großflächig mit einer Vorhangfassade aus perforierten Trapezblechen

bestückt (siehe Abbildung 2.28). Der so entstandene 61 m hohe Fassadenkollektor wird zur Zulufterwärmung in der bestehenden zentralen Lüftungsanlage eingesetzt und reduziert die Transmissionswärmeverluste an der sanierten Fassade.

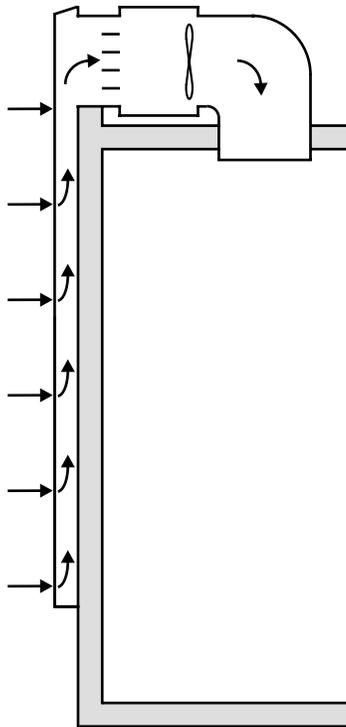


Abbildung 2.28: Unverglaste Luftkollektorfassade SOLARWALL an einem Wohngebäude (Ouellete Manor Senior Citizens' Building) in Windsor/Ontario, Kanada, 1994 (Conserval Engineering Inc.); Foto: [114]

Das Prinzip perforierter und durchströmter Fassadenblechpaneele ist mittlerweile auch für Verwaltungsbauten in Pfosten-Riegel-Konstruktionen integriert und durch dezentrale in die Fassade integrierte Systeme zur Lüftung, Heizung und Kühlung ergänzt worden (siehe Abbildung 2.29).

Bei einem **Institutsgebäude in Frankfurt/Oder** (Architekten: Schürmann/Spannel) sind neben den Luftkollektorkassetten zusätzlich einige Paneele mit Photovoltaik-Elementen für den Antrieb der Lüftermotoren (24 V Gleichstrom, 40 W) bestückt worden (siehe Abbildung 2.29).

Wesentlich umfangreicher wurde Photovoltaik mit einer Kollektorfassade bei dem **Produktions- und Verwaltungsgebäude der Firma WASAG** in Oberentfelden bei Zürich (Architekten: Stengele / Sahl / Holzener SSH AG, 1995) eingesetzt. Dort wurden wiederum basierend auf dem SOLARWALL-Prinzip etwa 500 m<sup>2</sup> Südfassade als solarthermischer Luftkollektor ausgeführt (siehe Abbildung 2.30). Die Beson-

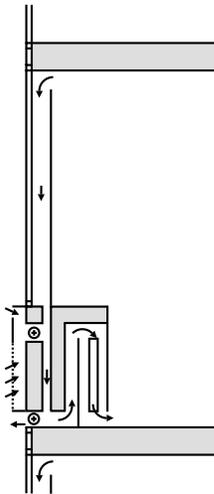


Abbildung 2.29: Institutsgebäude in Frankfurt an der Oder (Architekten: Schürmann/Spaenell): SOLARWALL-Kollektorpaneele in Kombination mit dahinterliegenden brüstungsintegrierten Lüftungsgeräten; Foto: [114]

derheit bei diesem Gebäude ist die Kombination von Photovoltaik und Kollektorfassade: Die Photovoltaik-Elemente sind an einer auskragenden Stahlkonstruktion unmittelbar vor der perforierten Kollektorfassade befestigt. Auf diese Weise werden sie besonders gut mit der vom Kollektor angesaugten Außenluft umströmt und gekühlt, was sich wiederum positiv auf ihren Wirkungsgrad niederschlägt. Das Prinzip der hybriden Kühlung wird am Dach fortgesetzt, das ebenfalls mit Solarmodulen besetzt ist und von Außenluft hinterströmt wird.

Ein weiteres Beispiel für die Kombination von Luftkollektor und Photovoltaik ist die **Bibliothek Pompeu Fabra** in Mataro bei Barcelona (Architekt: Miquel Brullet, 1998). Dort wurde eine Hybrid-Photovoltaikanlage mit einer Spitzenleistung von 53 kW vollständig in die Fassade integriert (siehe Abbildung 2.31).

Dabei kamen neben opaken Photovoltaik-Modulen im Brüstungsbereich auch semitransparente PV-Elemente vor den Fenstern zum Einsatz, die im Innenraum der Bibliothek für Streulicht sorgen. Die PV-Module sind in einer vorgehängten Glasfassade integriert, die mit der Primärfassade einen durchlüfteten Vertikalkanal bildet. Somit werden die Solarmodule leistungssteigernd hinterströmt und gleichzeitig wird thermische Energie über den Luftstrom abgeführt. Über zusätzliche reine Luftkollektoren im obersten Fassadensegment wird die Luft weiter erwärmt und der Lüftungsanlage des Gebäudes zugeführt.

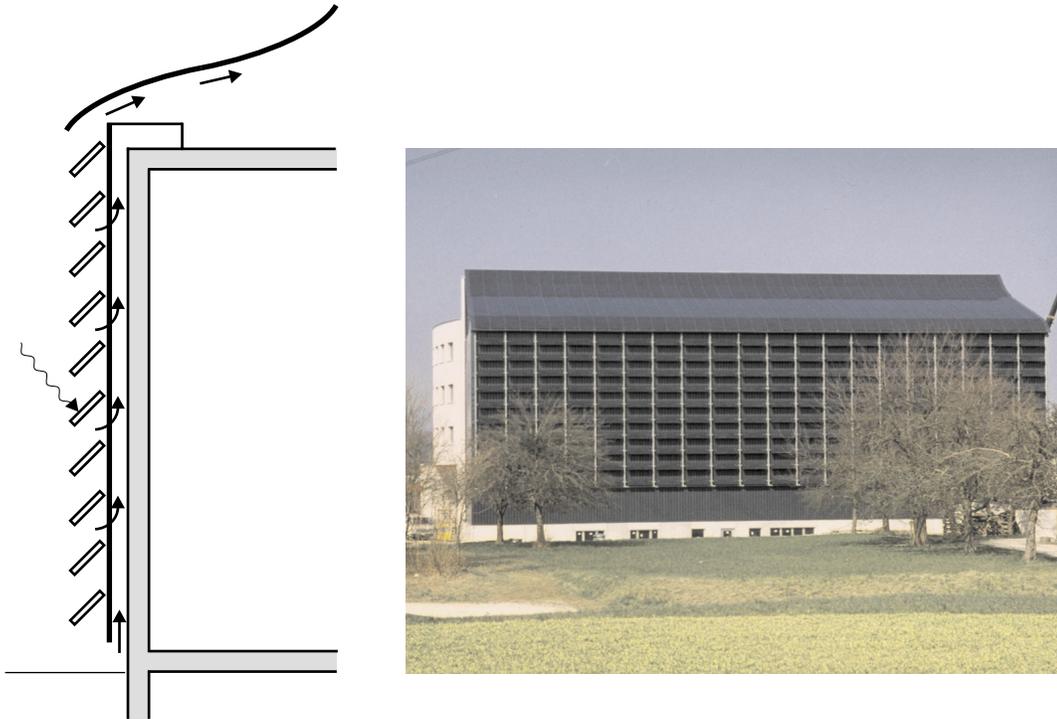


Abbildung 2.30: Produktions- und Verwaltungsgebäude der Firma WASAG in Oberentfelden (CH), 1995 (Architekten: Stengele / Sahl / Holzener SSH AG): Fassadenintegrierte Photovoltaik-SOLARWALL; Foto: [104]



Abbildung 2.31: Bibliothek Pompeu Fabra in Mataro bei Barcelona (Architekt: Miquel Brullet, 1998): Fassadenintegrierte, hybride Photovoltaikanlage; Foto: [112]

Projekt / Baujahr	Architekten/ Planer	Solartechnik	Ausführungsart	Substitutionseffekt	Kollektorfläche
<b>Bürogebäude</b>					
Gründerzentrum, Hamm 1998	Hegger, Hegger, Schleiff HHS Planer & Architekten BDA	Ingenieurbüro Hausladen	geschuppte, punktgehaltene Glasfassade	Teilsubstitution	120 m <sup>2</sup>
Institutsgebäude, Frankfurt/O.	Schürmann/ Spannel	Solarwall, Göttingen	Metallkassette in Pfosten-Riegel-Konstruktion	Teilsubstitution	24 m <sup>2</sup>
WAT Bürogebäude Karlsruhe 1994	Leonhard, Guenter	Transsolar	fassadenintegriert	Integration	59 m <sup>2</sup>
<b>Industrie- und Gewerbegebäude</b>					
Märkischer Polstermarkt, Falkensee, 1997	Raché	Grammer	Stahlrahmenkonstruktion	Komplettsubstitution	500 m <sup>2</sup>
Hochregallager Leister, Sarnen, 1998	Architektengruppe Olten	Solarwall	unverglaste Solarwall	Komplettsubstitution	1400 m <sup>2</sup>
Produktions- und Verwaltungsgebäude WASAG, Oberentfelden, 1995	Berchtold Ingenieure	Solarwall	fassadenintegrierte PV-Solarwall	Addition / Teilsubstitution	500 m <sup>2</sup>
Heizkraftwerk Göttingen, 1993	A. Neumann	Solarwall	perforierte, hinterlüftete Metallfassade	Teilsubstitution	306 m <sup>2</sup>
<b>Sporthallen</b>					
Stavanger Squash Centre, Norwegen 1981	Civil architect MNAL Harald N. Røstvik, Sun Lab.	ABB Miljø AS	Kollektoren als Dachkonstruktion	Vollsubstitution	120 m <sup>2</sup>
<b>Schulgebäude</b>					
Pompeu Fabra Bibliothek, Mataro Spanien, 1998	Miguel Brullet	GRAMMER	hinterlüftete PV-Fassadenelemente	Vollsubstitution	ca. 500 m <sup>2</sup>
Hauptschule Koblach, A 1995	Bösch & Bösch	Drexel, Bregenz	verglaste, perforierte Trapezbleche	Teilsubstitution	ca. 180 m <sup>2</sup>
Tagungszentrum Gaytal, 1995	Mossmann + Wolf	GRAMMER	Pfosten-Riegelkonstruktion	Vollsubstitution	110 m <sup>2</sup>
<b>Wohngebäude</b>					
Mehrfamilienhaus Lützowstraße, Berlin 1988	IBUS, Berlin	GRAMMER	Einzelelemente in Wärmedämmung	Teilsubstitution	106 m <sup>2</sup>
Niedrigenergiehaus Baumgartner-/Ganghoferstraße, München 1996	Raupach + Schurk	GRAMMER	Elementkollektoren vor Außenwand	Addition	26.4 m <sup>2</sup>
Ouellette Manor Citizens' Building, Windsor, Ontario 1960/1994	Conserval Engineering Inc.	Solarwall Engineering Inc.	unverglaste Solarwall Fassadensanierung	Addition / Integration	335 m <sup>2</sup>

Tabelle 2.2: Beispielprojekte mit Fassaden-Luftkollektoren mit unterschiedlichen Integrationsgraden von Addition bis Vollsubstitution

### 2.2.4.3 Weitere Entwicklungen

Weitere Ansätze zur thermischen Nutzung der auf Fassaden auftreffenden Solarenergie jenseits der wenigen heute kommerziell verfügbaren Luftkollektorsysteme sind in einer Reihe wissenschaftlicher Veröffentlichungen beschrieben, bisher allerdings noch nicht oder allenfalls als Prototypen realisiert worden. Ein relativ einfaches System ist die von HAUSER [53] vorgeschlagene **Zuluftfassade**, die in kleineren Einheiten an die Außenwand angebracht wird und auch bei Gebäudesanierungen eingesetzt werden kann. Hier wird auf einer wärmegeämmten Außenwand, wie in Abbildung 2.32a dargestellt, eine möglichst transluzente Vorsatzschale angebracht (Kanaltiefe 2 bis 24 mm). Durch eine Lufteintrittsöffnung wird die Außenluft in den Kanal zwischen Wand und Vorsatzschale mittels einer Abluftanlage in den Innenraum angesaugt und nimmt bei der Durchströmung die solaren Energiegewinne auf.

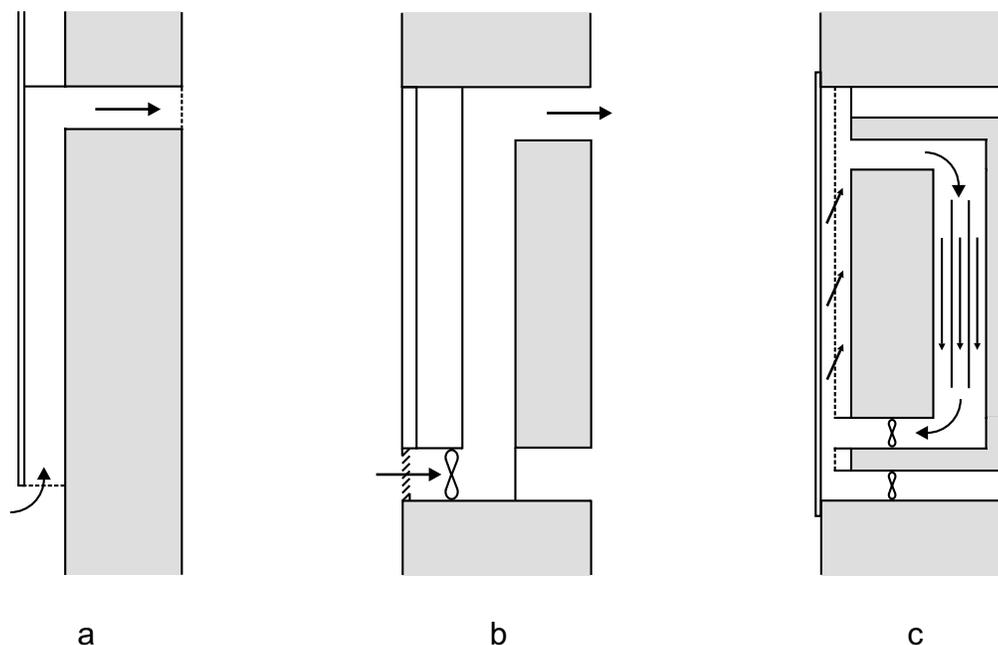


Abbildung 2.32: Wandintegrierte Kollektoren aus Veröffentlichungen: (a) Zuluftfassade nach HAUSER [53], (b) Fassadenluftkollektor nach BEIKIRCHER [5], (c) Solarwand nach LÖFFLER [74]

Die vollständige Substitution eines Teils der Außenwand und seiner Wärmedämmfunktion durch einen **Fassadenluftkollektor** ist mit dem Vorschlag nach Abbildung 2.32b möglich. Ein Ventilator im Eintrittsbereich saugt die Außenluft an und drückt sie durch einen aus rechteckigen Strömungskanälen bestehenden Absorber. Eine Luftschicht zwischen Absorber und transparenter

Glasabdeckung sorgt wie beim klassischen Luftkollektor für eine Begrenzung der Wärmeverluste.

Eine Synthese aus *Trombewand* und regelbarem *Luftkollektor* stellt die von LÖFFLER [74] entwickelte **Solarwand** dar. Abbildung 2.32c zeigt die Einbindung dieses Luftkollektorsystems mit wahlweiser Wärmeübertragung in den dahinterliegenden Wandspeicher oder in einen Wärmetauscher. Es handelt sich also um ein geschlossenes System, dessen Kernstück ein durchströmter Absorber aus gelochtem oder geschlitztem, selektiv beschichtetem Blech ist. Um die konvektiven Wärmeverluste an die Umgebung gegenüber hinterströmten Kollektoren zu verringern, wird die thermische Grenzschicht durch den perforierten Absorber hindurch nach innen abgesaugt. Die Geometrie der Absorber entspricht etwa der SOLARWALL (siehe Abschnitt 2.2.4.2, Abbildung 2.28), die Löcher haben einen Durchmesser von ca. 1.5 mm und einen Abstand von ca. 2 cm.

#### 2.2.4.4 Teiltransparente Absorber für Fensterkollektoren

Wie die bisher genannten Beispiele zeigen, gibt es zwar einige interessante Ansätze zur Fassadenintegration von Luftkollektoren, allerdings nie unter gleichzeitiger Berücksichtigung ihrer optischen Wirkung im dahinterliegenden Raum, da in der Regel opake Solarabsorber zum Einsatz kommen. Opake Solarabsorber wiederum sind aber für den Einsatz in Doppelfassaden ungeeignet. Das Potential, das sich aufgrund der Vielzahl der eingangs angedeuteten Bauformen auch zur architektonisch befriedigenden Integration auftut, scheint aber bei Weitem noch nicht ausgeschöpft. Dies betrifft in besonderem Maß poröse Absorber und transparente Fassaden, die sich bei ausreichender Transparenz des Absorbermaterials gut kombinieren ließen, ähnlich wie es im Bereich teiltransparenter Solarzellen bereits praktiziert wird.

Die thermische Nutzung der Sonnenenergie mit Hilfe von Luftkollektoren bietet sich bei doppelschaligen Fassaden besonders an: Die Doppelfassade stellt mit ihrer Konstruktion aus einer wärmegeprägten Innenfassade und der vorgehängten Glashaut bereits das „Gehäuse“ für einen Sonnenkollektor dar – wenn auch meist ohne eigentlichen Absorber. Von daher ist es naheliegend, sowohl in opaken Bereichen der Primärfassade, aber auch im Fensterbereich Solarabsorber zu installieren, die ganz gezielt und definiert zur Wärmegegewinnung ausgelegt werden. Die Anwendung im Fensterbereich von Fassaden schließt naturgemäß von vornherein den Einsatz herkömmlicher unterströmter, opaker Plattenabsorber aus. Hier bedarf es eines teiltransparenten Absorbers, der möglichst günstige Strahlungskoeffizienten besitzt.

Neben der Forderung nach Teiltransparenz ist eine hohe wärmeübertragende

Oberfläche bei leichter und einfacher Konstruktion am besten mit einem **porösen** Medium zu erfüllen (siehe Abschnitt 2.2.1). 1997 griff KOLB [70] diesen Ansatz mit seinem Matrixkollektor wieder auf und stellte damit ein ökonomisch sinnvolles und technisch umsetzbares Konzept für einen Luftkollektor mit durchströmtem Absorber vor. Dabei entstand ein durch Vermessung eines horizontal unter einer künstlichen Sonne angeordneten Prüfkollektors validiertes numerisches Programmpaket zur energetischen Optimierung des neuen Kollektors. Einsatzmöglichkeiten des auf chemisch oder galvanisch geschwärzten Metallgeweben basierenden Kollektors, wie die Integration in doppelschalige Fassaden, wurden bereits angedeutet. An diesem Punkt knüpft die vorliegende Arbeit an, indem dafür ein konkretes, praxisrelevantes Konzept vorgeschlagen und experimentell untersucht wird.

## 2.3 Fassadenintegrierte Gebäudetechnik

Ein entscheidender und ausbaufähiger Vorteil doppelschaliger Elementfassaden ist die gegenüber allen anderen Fassadenbauarten besser oder überhaupt erst mögliche **Integration von heizungs- und lüftungstechnischen Komponenten**. Architekten und Fachplaner verfolgen heute zunehmend das Ziel, Gebäude als Gesamtsysteme zu planen, bei denen Gebäudekörper, Fassade und Gebäudetechnik eine zusammenwirkende Einheit bilden. Es liegt deshalb nahe, Gebäudetechnik und -fassade nicht nur als funktionale Einheit zu verstehen, sondern wo immer möglich – gerade bei der Doppelfassade – wesentliche gebäudetechnische Elemente tatsächlich auch baulich in die Fassade zu integrieren.

In den folgenden Unterkapiteln werden beispielhaft Gebäudefassaden vorgestellt, bei denen heizungs- und lüftungstechnisch relevante Komponenten in die Fassade integriert werden. Es wird Bezug genommen auf die im vorangegangenen Abschnitt ?? gezeigten Fassadenbauarten und deren grundsätzliche Eignung für fassadenintegrierte Technikkonzepte. Zunächst aber sollen einige grundsätzliche Aspekte von Gebäuden mit dezentraler fassadenintegrierter Technik erwähnt werden.

### 2.3.1 Allgemeine Aspekte dezentraler Gebäudetechnik

Das bisher meist praktizierte Konzept, Gebäude mit relativ starren, passiven Hüllen in ihrem Inneren mit aktiver Technik zu konditionieren, kann die sich in mehrerlei Hinsicht ändernden Anforderungen, nämlich

- ein als möglichst natürlich empfundenenes, individuell einstellbares Raumklima für den momentanen Nutzer,
- aber auch die sich mitunter erheblich unterscheidenden Randbedingungen einer anderen, späteren Nutzung zu berücksichtigen,

mit seiner für einen bestimmten Nutzungsfall *aus-* und zentral *angelegten* Klimatechnik nicht erfüllen. Sollen die vielfältigen Anforderungen der potentiellen späteren Nutzer bereits im Vorfeld abgedeckt werden, bedeutet das zumindest sehr hohe Investitionskosten auf Seiten der Gebäudetechnik für die Vorhaltung von Aggregaträumen, von Schächten und Trassen für Lüftungskanäle und von größeren Stockwerkshöhen für abgehängte Decken mit entsprechendem Verlust klimaregulierender Speichermassen. Weil in vielen Fällen aber während der Planung die Nutzung noch gar nicht feststeht, gibt es nur die Möglichkeit die Vorhaltekosten zu erbringen, und damit frei zu sein für jeden möglichen Nutzer, oder

eben entsprechende Einschränkungen hinzunehmen. Für die Zukunft wäre deshalb eine höhere Flexibilität des Gesamtsystems Gebäude wünschenswert.

Der Ansatz, die Flexibilität von Gebäuden zu verbessern bringt zwangsläufig dezentrale, gegebenenfalls fassadenintegrierte Techniksysteme verstärkt mit ins Spiel und kann darüber hinaus bis zu der Frage führen, ob ein Gebäude überwiegend *zentral* oder *dezentral* organisiert sein soll. Die Verteilung von Funktionen in zentraler und dezentraler Position muß jedenfalls überdacht werden.

Neben der Anpaßbarkeit an die jeweiligen Bedürfnisse des Nutzers bzw. der zukünftigen Nutzerstruktur nennt THIEL [108] weitere Vorteile dezentraler Raumklimatisierung durch die Fassade:

- Baukostensparnis durch geringeren Platzbedarf gegenüber zentraler Lufttechnik
- Bauzeitverringerung durch Wegfall von Gewerkschnittstellen
- Ausnutzungsmöglichkeit der aktiven Nachtkühlung
- Betriebssicherheit durch einzelne Einheiten, bei Störungen kein Ausfall des Gesamtsystems
- Wegfall hygienischer Probleme des Kanalnetzes
- individuelle Betriebskostenabrechnung möglich
- Kombination mit natürlicher Lüftung über Fensterkontakt (direkte Abschaltung) möglich

Dezentrale fassadenintegrierte Klimatisierungsgeräte sind aber auch mit einigen Nachteilen und Einschränkungen verbunden. Die Vielzahl mechanischer Be- und Entlüftungseinheiten kann aus Sicht der Wartung und Instandhaltung auch negativ bewertet werden, eine Feuchtekontrolle wie bei Zentralgeräten ist von vornherein nicht möglich. Bauphysikalische und bauklimatische Nachteile können aus den erforderlichen Fassadenöffnungen für Außenluft und Fortluft, sowie der ausschließlichen Wärme- und Kälteübertragung in den Raum über Konvektion resultieren.

Gerade die Doppelfassade bietet in Form des Luftzwischenraums zusätzlich umbauten Raum, in dem verschiedenste haustechnische Systeme untergebracht werden können, was bis zur kompletten dezentralen Versorgung der dahinterliegenden Räume denkbar ist. Zumindest der näherliegende und in zahlreichen Untersuchungen und Bauten bereits getane erste Schritt der gezielten Steuerung und Einstellung der thermischen und lichttechnischen Verhältnisse an der raumbegren-

zenden Fassade kann durch eine Reihe von Mitteln geschehen, von denen viele durch die Zweischaligkeit erst möglich werden.

Mit der Doppelfassade sind also gebäudetechnisch und bauklimatisch sehr vorteilhafte Konzepte vorwiegend dezentral organisierter Raumluftkonditionierung vorstellbar. Wenn auch in den seltensten Fällen ausschließlich über dezentrale Geräte, so doch zumindest in Verbindung mit Grundlastsystemen, die sich gut mit den obengenannten Vorteilen dezentraler Technikkonzepte vertragen bzw. diese ausnutzen. Die bei dezentralen Systemen mögliche Freihaltung der klimaregulierenden Speichermassen bietet beste Voraussetzungen für ein gutmütiges Verhalten des Gebäudes auch in Verbindung mit hohem Verglasungsanteil in der Primärfassade. Weitergehend ist die aktive Nutzung dieser Speichermassen des Baukörpers im Sinne einer Bauteilaktivierung denkbar.

### 2.3.2 Fassadenintegrierte Heiz- und Lüftungskomponenten

Freie Fensterlüftung erfolgt über die Fassade. Um die lüftungsbedingten *Wärmeverluste* eines Gebäudes zu *reduzieren* und darüber hinaus die *Behaglichkeit* zu *steigern*, hat man über Möglichkeiten nachgedacht, den Luftaustausch nicht ausschließlich dem willkürlichen Verhalten des Nutzers zu überlassen, sondern Hilfsmittel für einen definierten und kontrollierten Luftaustausch über die Gebäudehülle bereitzustellen. Ein weiterer Ausgangspunkt für die Integration lüftungstechnischer Komponenten in der Fassade war sicherlich die erwünschte Wärmerückgewinnung aus den über die Fassade ausgetauschten Luftmengen bei natürlicher Lüftung. Geht man von raumlufttechnisch zu behandelnden Räumen aus, gibt es weitere Argumente für den Einsatz dezentraler Geräte. Die Zuluft kann direkt von außen oder aus dem Luftzwischenraum angesaugt werden, und muß nicht unter hohem Energieaufwand und Platzbedarf für Kanäle von der Klimazentrale zum Arbeitsplatz transportiert werden. Der Einsatz dezentraler Klimatisierungsgeräte, die in der Brüstung oder in einer Doppelfassade integriert sind, setzt allerdings eine bauphysikalisch optimierte Fassade voraus: Die Wärmeverluste der Fassade im Winter und deren Wärmegewinne im Sommer sollten bestmöglich begrenzt werden, um die für die Dimensionierung der Heiz- und Kühlgeräte relevanten **Heiz-** und **Kühllasten** zu minimieren. Nur dann können die für die Raumluftkonditionierung notwendigen Luftmassenströme und Temperaturdifferenzen so weit begrenzt werden, daß sie in einem kompakten Fassadenklimagerät realisierbar sind [108]. Dies gilt im Besonderen, wenn die Geräte so dimensioniert werden sollen, daß keine zusätzliche zentrale Raumlufttechnik notwendig wird, die im Übrigen viele der im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten Vorteile dezentraler Systeme zunichte machen würde.

Eine Konstruktion für einschalige Lochfassaden stellen **fensterbank-integrierte Lüftungsgeräte** (Abbildung 2.33 links) dar: Zwischen Fenster und Brüstung ist ein Zuluftgerät angeordnet, das in der Regel mit einem Gebläse ausgestattet ist. Der Verschuß für Zuluftgeräte kann manuell oder elektrisch mittels einer wärmegeämmten Verschußschiene erfolgen. Der Überströmkanal für die Abluft wird oberhalb des Fensters angeordnet und entweder mechanisch oder über eine selbsttätige, druckabhängige Verschußklappe geregelt. Der Lüftungsvorgang kann grundsätzlich aktiv oder passiv erfolgen. Bei kombinierten Be- und Entlüftungssystemen kann sowohl Zuluft als auch Abluft elektrisch über Gebläse gefördert werden. Die Zuluft wird unterhalb des Fensters direkt senkrecht nach unten auf den Heizkörper geführt, so daß Zugscheinungen vermieden werden. Durch Abluftöffnungen oberhalb des Fensters soll der im Winter übliche Kaltluftabfall im Fensterbereich vermieden werden. Insgesamt soll damit und durch die individuelle Bedienbarkeit eine Verbesserung der Behaglichkeit erreicht werden.

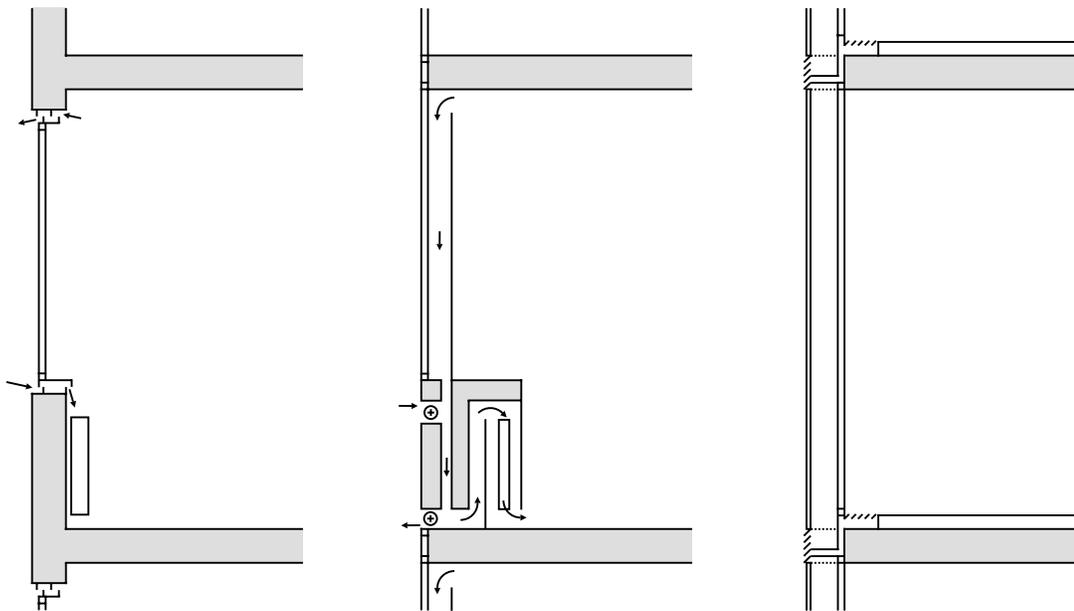


Abbildung 2.33: Fassadenintegrierte Lüftung mit in Fensterbank, Brüstung oder Deckenpaket integrierten Lüftungsgeräten, nach [18]

Einen Schritt weiter gehen **fassadenintegrierte Lüftungsgeräte** bzw. **Brüstungs-Lüftungselemente**, die meist mit Abluftfassaden kombiniert werden (Abbildung 2.33 mitte): Die sonst bei einer Abluftfassade notwendige zentrale Lüftungstechnik wird dezentral in die Fassadenebene integriert. Innerhalb des Lüftungsgerätes befinden sich getrennte Zu-, Ab- und Umluftkanäle sowie ein Heiz- bzw. Kühlkörper. Ein integrierter Wärmetauscher ermöglicht eine Energierückgewinnung. Die Verschlüsse werden elektromechanisch betätigt. Das in der Brüstung

integrierte elektrische Gebläse saugt Außenluft an. Über Filter wird die Luft zur Wärmerückgewinnung über den Wärmetauscher geführt und nimmt die Wärme der über die Abluftfassade geführten Raumfortluft auf. Bevor die Luft in den Raum eintritt, wird sie durch den Heiz-/Kühlkörper geleitet und, je nach Bedarf, weiter erwärmt oder gekühlt. Bei Umluftbetrieb ist eine stufenlose Mischung von Zuluft und Umluft möglich. (Nachteil: Keine natürliche Lüftung möglich). Integriert werden können diese Geräte sowohl in Fensterfassaden als auch in Pfosten-Riegel- oder Elementfassaden, wobei sich letztere besonders anbieten, die Technischelemente im gleichen Arbeitsschritt zusammen mit den Fassadenelementen zu montieren. THIEL [108] schlägt ein dezentrales Klimagerät (DRC-Gerät, engl. „Decentralized Room Conditioning“) vor, das stehend in eine Brüstung integriert oder liegend in einer Doppelfassade angeordnet sein kann und für die Beheizung, Kühlung und Lüftung von üblichen Büroräumen (Raumtiefe bis zu 7 m, Achsmaß von 1.25 bis 1.65 m) geeignet ist. Der von THIEL [108] durchgeführte Wirtschaftlichkeitsvergleich der dezentralen Raumklimatisierung (ausschließlich dementsprechend dimensionierte DRC-Geräte) mit den Systemen „Kühldecke mit unterstützender Lüftung“ und „Klimaanlage (VVS-System)“ ergab Kostenvorteile für die dezentrale Technik. Die Jahreskosten aus Kapital, Energie, sowie Instandhaltung und Wartung liegen für die Varianten mit DRC-Geräten gegenüber Kühldecken und zentralen Klimaanlagen um 15 bis 30% niedriger, einzig die Instandhaltung und Wartung der DRC-Geräte ist etwas aufwendiger als beim Kühldecken-System.

Fassadenintegrierte Lüftungsgeräte können auch mit Doppelfassaden kombiniert werden. Die Zuluft wird dabei aus dem Luftzwischenraum angesaugt und nutzt damit insbesondere im Winter die dort entstehenden solaren Gewinne. Diese Zuluft wird wiederum über einen geräteinternen Wärmetauscher zur Nacherwärmung geleitet. Im Sommer dagegen kann die Zuluft wegen der zu großen Wärmeentwicklung im Luftzwischenraum nicht in dieser Weise geführt werden, sondern muß direkt von außen – also ohne Temperaturerhöhung – angesaugt werden (vgl. Abbildung 2.7).

Insbesondere bei Doppelfassaden besteht die Möglichkeit, Lüftungsgeräte und die Zuluft konditionierende Maßnahmen in das **Deckenpaket** zu integrieren (siehe Abbildung 2.33 rechts), um eine geschosshohe transparente Verglasung realisieren zu können. Wärme- und schallgedämmte Lüftungsgeräte werden in die Fassadenebene sichtbar oder verdeckt eingebaut. Der Luftzwischenraum wird dabei in Form eines Bypasses umgangen und die Zuluft wird mittels eines elektrischen Gebläses über ein kombiniertes Heiz-Kühlelement geleitet, das in Form eines Bodenkonvektors raumseitig vor der inneren Fassade liegt.

Neben den eigentlichen Anlagenkomponenten kann der Luftzwischenraum auch für die Verteilung der notwendigen Betriebsmedien genutzt werden. EVERS [31] schlägt in Ergänzung zu einem liegend in der Doppelfassade angeordneten Lüftungsgerät einen ebendort unterhalb im Deckenbereich integrierten **Medienkanal** vor (siehe Abbildung 2.34). Außer der Anbindung der Lüftungsgeräte könnten dort auch in den benachbarten Räumen benötigte Elektro- und EDV-Leitungen untergebracht werden.

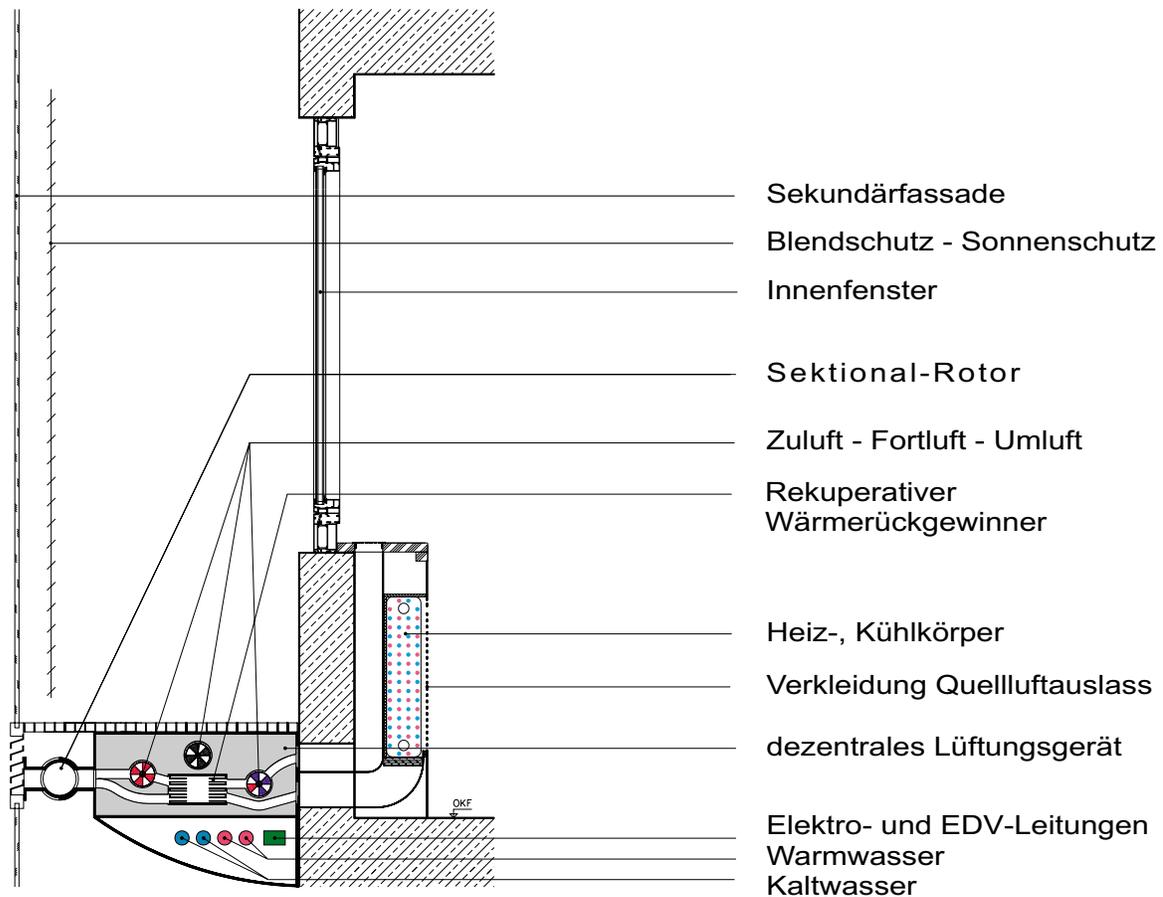


Abbildung 2.34: Komponenten einer Doppelfassade mit Integration der Wärme-, Kälte-, Strom- und Datenversorgung [31]

Eine entschiedene dezentrale Fassadenlösung, bei der lediglich das Regulationssystem noch übergeordnete zentrale Funktionen übernimmt, stellt die „Concept-Fassade“ von SCHÜCO [102] dar. Die gesamte Energie- und Medienversorgung wie auch die Anbindung der wärme- und kälteübertragenden Systeme in den Raum erfolgt dezentral über die Fassade. Kernstück ist ein in der Brüstung integriertes Technikmodul, das einen Sonnenkollektor mit Speicher und angeschlossener Kältemaschine beinhaltet, und über einen Wärmetauscher die angeschlossene

Heiz- bzw. Kühldecke versorgt. Weitere Komponenten sind eine Wärmerückgewinnung aus der Raumabluft und teiltransparente Photovoltaik-Module, die im Oberlichtbereich der Sekundärfassade integriert sind (vgl. Abbildung 2.35).

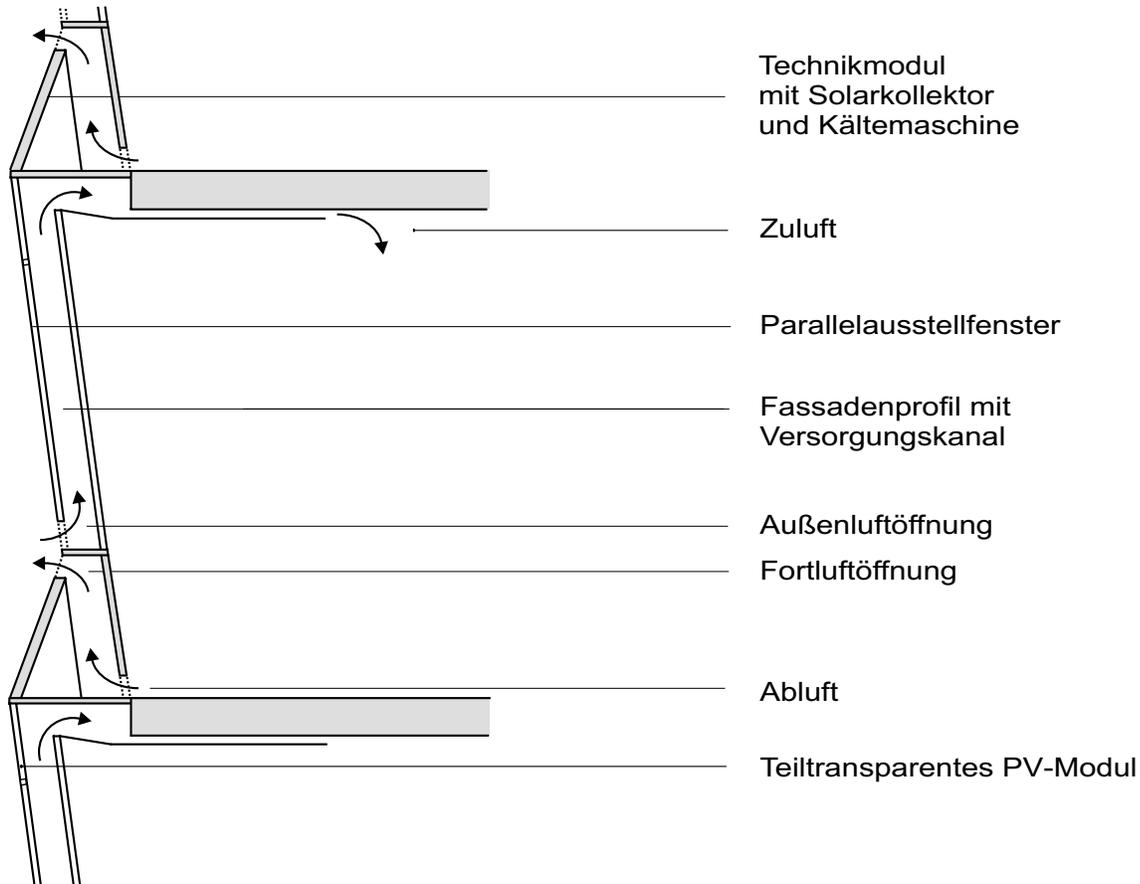


Abbildung 2.35: Konzept für eine Doppelfassade mit integrierter Solarenergienutzung und Anlagentechnik für Heizung, Kühlung, Lüftung mit Wärmerückgewinnung und Beleuchtung: Concept-Fassade [102]

Die Resonanz auf die „Concept-Fassade“ bei ihrer Vorstellung auf der BAU ´99 in München war groß, obwohl das Konzept in vielen Punkten noch nicht ausgereift war. Insbesondere die hier benötigten kleinen Leistungsklassen von Absorptionskältemaschinen stellen ein Problem bei der Integration im Brüstungsbereich dar. Dennoch wurde damit erstmals ein Konzept nicht nur zur räumlichen Integration einzelner heiz- und lüftungstechnischer Komponenten, sondern zur fassadenintegrierten Komplettversorgung eines Büroraumes unter Einbeziehung thermischer und photovoltaischer Solarnutzung gezeigt.

# Kapitel 3

## Konzept und Grundlagen eines Matrixkollektors für doppelschalige Gebäudefassaden

Nachdem im vorangegangenen Kapitel Doppelfassadensysteme sowie solare Luftsysteme an der Fassade vorgestellt wurden, wird im nun folgenden ersten Unterkapitel ausgehend von den Ansätzen aus dieser Literaturrecherche ein neuartiges **Konzept einer doppelschaligen Fassade mit integrierten durchströmten Matrixabsorbern** entwickelt. Motivation dafür ist neben einer **Erweiterung der Lüftungseigenschaften von Doppelfassaden** die weitergehende **thermische Nutzung von Sonnenenergie** nicht nur in opaken, sondern auch in **transparenten Bereichen von Gebäudefassaden**. Das Konzept des Matrixkollektors für Doppelfassaden entspringt aber auch der vielfach gegebenen licht- und klimatechnischen Notwendigkeit von (außenliegenden) **Sonnenschutzmaßnahmen** verbunden mit dem ökonomisch oder ökologisch motivierten Wunsch, das energetische Potential der Sonneneinstrahlung an der Fassade möglichst gut zu nutzen. Konventionelle Sonnenschutzanlagen werden meist so geplant, daß sie einen Großteil der auftreffenden Sonnenstrahlung gezielt nach außen reflektieren. Dieser reflektierte, aber auch der am Sonnenschutz absorbierte Anteil der Einstrahlung bleibt dabei ungenutzt oder wirkt sich sogar negativ auf die bauklimatische Situation des Gebäudes aus. Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Konzept soll hingegen die **aktive thermische Nutzung der Sonneneinstrahlung** durch den Einsatz der in den folgenden Unterkapiteln beschriebenen Matrixabsorber ermöglichen.

Die **Einbindung eines Doppelfassaden-Matrixkollektors** in eine **Kasten-Kasten-Fassade** wird zunächst grundsätzlich beschrieben. Im zweiten Unterkapitel werden die für das Verständnis der geplanten Untersuchungen notwendigen **Grundlagen** und **Eigenschaften** eines **Matrixabsorbers** besprochen. In diesem Zusam-

menhang wird ein mathematisches Modell für die **richtungsabhängige Transparenz** der Matrixabsorber zu deren näherungsweise Berechnung angegeben.

In einem abschließenden Unterkapitel erfolgt die aus den vorhergehend beschriebenen Überlegungen und Grundlagen resultierende **Ableitung sinnvoller Konfigurationen** und sonstiger **Betriebsparameter** des Doppelfassaden-Matrixkollektors. Dazu werden zunächst die für seine unterschiedlichen Funktionen **Sonnenkollektor**, **Sonnenschutz** und **Blendschutz** zu bevorzugenden Konfigurationen hergeleitet und diskutiert. Daneben werden überschlägige Berechnungen und Überlegungen angestellt, um weitere energetisch relevante Betriebsparameter, wie z.B. die einzustellenden Luftmassenströme, festzulegen.

### 3.1 Konzept einer Matrixkollektor-Doppelfassade

#### Erweiterung der Lüftungseigenschaften

Mit dem nachfolgend beschriebenen Konzept eines Doppelfassadensystems mit integrierten Matrixkollektoren wird das Ziel verfolgt, durch die **Kombination von Doppelschaligkeit und Luftkollektor in einem Fassadenelement** eine **Erweiterung und Verbesserung der Lüftungseigenschaften** von Doppelfassaden zu erreichen: Die untere Einsatzgrenze im **Winter** bzw. in der **Übergangszeit** für Fensterlüftung – die bei bestimmten Randbedingungen überhaupt erst zu ermöglichen einer der wichtigsten Vorteile von Doppelfassaden ist (vgl. Kapitel 2.1) – liegt nach THIEL [107] bei Außentemperaturen von  $T_\infty \approx 5^\circ\text{C}$  (bei Windgeschwindigkeiten von  $w_\infty = 8\text{ m/s}$ ). Darunter ist eine freie Fensterlüftung über den Luftzwischenraum ohne Vorwärmung aus physiologischer Sicht nicht mehr wünschenswert. Durch den Einsatz eines solaren Luftkollektors im Luftzwischenraum zur Vorwärmung der Zuluft können die Betriebszeiten einer Doppelfassade mit freier Fensterlüftung ausgedehnt werden. Fensterlüftung wird dann unter bestimmten äußeren Bedingungen auch bei sehr tiefen Außentemperaturen (z.B.  $T_\infty \approx -10^\circ\text{C}$ ) möglich. Im **Sommer** hingegen muß durch geeignete Gegenmaßnahmen verhindert werden, daß die Lufttemperaturen im Luftzwischenraum so hoch werden, daß nicht mehr über die Fenster gelüftet werden kann. Vielmehr muß durch eine **ausreichende Durchströmung** oder eine entsprechende **Fassadenzonierung in Zu- und Abluftzonen** dafür gesorgt werden, daß mit Zuluft auf annähernd Außentemperaturniveau (max.  $22^\circ\text{C}$  [107]) gelüftet werden kann.

#### Zwangsdurchströmung

**Bisher** wurde bei Doppelfassaden meist von einem natürlichen Luftwechsel ausgegangen, also einer **freien Durchströmung** des Luftzwischenraums, was aufgrund der zu geringen Antriebskräfte der freien Konvektion insbesondere bei

nicht ausreichend dimensionierten Fassaden und somit zu niedrigen Luftwechselzahlen im Luftzwischenraum zu seiner temporären Überhitzung führt (vgl. Kapitel 2.1). Veröffentlichungen zeigen aber, das selbst bei großzügiger Dimensionierung der Zu- und Abströmöffnungen keine zuverlässigen Angaben über den Strömungszustand in der Doppelfassade gemacht werden können. Darüber hinaus ist seine Abhängigkeit von den Wetterbedingungen und deren Schwankungen sehr groß. Dies legt bei Doppelfassadensystemen für die **Zukunft** den Einsatz von Ventilatoren nahe, die **witterungsunabhängig** den jeweils notwendigen Luftmassenstrom durch **Zwangsdurchströmung** gewährleisten. Angetrieben werden die Ventilatoren von modernen fremdstrom-kommutierten Gleichstrommotoren mit minimalem Leistungsbedarf, der am sinnvollsten über **Photovoltaik-Elemente** in der Fassade einstrahlungs- und lastenkonform direkt gedeckt werden könnte. Die solchermaßen lastabhängig vorhandene Zwangsdurchströmung ermöglicht außerdem gegenüber der freien Durchströmung des Luftzwischenraums den Einsatz von **Filtereinrichtungen**, deren Strömungswiderstand sonst nicht zu überwinden wäre. Neben dem Vermeiden der sommerlichen Überhitzungsproblematik bieten **zwangsdurchströmte Doppelfassadenkonzepte** also auch eine **Reinigungsmöglichkeit schadstoffbelasteter Zuluft**, was in Ballungsräumen, aber auch vor dem Hintergrund zunehmender Allergien durchaus große Bedeutung hat.

### **Gliederung der Fassade**

Eine weitere Möglichkeit, die Lüftungseigenschaften zu verbessern, besteht in einer geeigneten **Gliederung der Fassade** in unterschiedlich ausgeführte **Zu- und Abluftbereiche**. Die **Zonierung des Luftzwischenraums** selbst spielt im hier vorzustellenden Konzept ebenfalls eine Rolle, da die Art der Positionierung des Matrixabsorbers im Luftzwischenraum Einfluß auf die dortige Temperatur- und Strömungsverteilung hat. Dieser Gesichtspunkt wird in den folgenden Unterkapiteln an verschiedenen Stellen bereits andiskutiert, stellt aber ansonsten ein Ergebnis der experimentellen Untersuchungen (siehe Kapitel 5.1) dieser Arbeit dar.

### **Solarthermische Nutzung**

Neben den bis hierher angedeuteten Möglichkeiten des neuartigen Doppelfassadenkonzeptes zur Einflußnahme auf die Lüftungseigenschaften einer Doppelfassade ist die Motivation zum Einsatz von Sonnenkollektoren die **thermische Nutzung der Sonnenenergie**. In diesem Kontext ist auch die vorliegende Arbeit zu sehen: Die Doppelfassade wird um eine Luftkollektor-Komponente – den **Matrixabsorber** – erweitert, der die solare Einstrahlung hinter der Sekundärfassade absorbiert und die entstehende Wärme mit hohen Wärmeübergangsraten an die den Luftzwischenraum durchströmende Luft abgibt, um sie einer Nutzung zuzuführen. Die erzeugte Warmluft kann im **Winterfall** zur **Vorwärmung der Zuluft** von Nutzungsbereichen wie Aufenthalts- und Büroräumen dienen. Auch Son-

deranwendungen wie die Lufttemperierung von Hallenbädern sind denkbar. Im **Sommerfall** können mit der Warmluft **sorptive Klimatisierungs- und Entfeuchtungsverfahren** unterstützt werden, sofern diese im Gebäudeklimakonzept vorgesehen sind. Ansonsten kann durch reflektierende Gewebelagen dem sommerlichen Überhitzungsfall entgegengewirkt werden.

### Teiltransparenter Absorber

Die wesentlichen Überlegungen, die aus wärmetechnischer Sicht zum Einsatz von **Kupfer-Draht-Geweben** als Matrixabsorber führen, sind dessen **Temperaturbeständigkeit** und **mechanische Festigkeit** bei gleichzeitig extrem **geringer Dicke und Masse**, sowie die **große am konvektiven Wärmeaustausch beteiligte Oberfläche**, die darüberhinaus relativ einfach mit einer selektiven Beschichtung versehen werden kann. Die Kupfergewebe können aber auch aus gestalterischen und architektonischen Gründen mit chemischen oder galvanischen Beschichtungen ausgerüstet werden, womit sich z.B. **verschiedene Farbtöne** realisieren lassen. Die **Rollbarkeit** der Gewebe erlaubt gleichzeitig konstruktiv einfache und flexible Einsatzmöglichkeiten, wie man sie aus dem Bereich textiler Sonnenschutzgewebe kennt. Sie können beispielsweise auf eine Welle aufgerollt werden und – je nach Situation – stufenlos in verschiedene Positionen abgerollt werden. Der Matrixabsorber erlaubt aufgrund seiner **Geometrie** auch im ausgefahrenen Zustand eine gute Durchsicht von innen nach außen, was Gegenstand von Kapitel 3.2.6 ist. Dadurch ist dieser Absorber auch in Fensterkollektoren oder eben in einer Doppelfassade vor verglasten Primärfassadenbereichen einsetzbar. Im folgenden Abschnitt wird das Funktionsprinzip eines porösen, durchströmten Absorbers im Luftzwischenraum von Doppelfassaden erläutert.

#### 3.1.1 Physikalisches Grundprinzip

Nachdem der Einsatz von durchströmten Solarabsorbern in Luftkollektoren bereits in Kapitel 2 vorgestellt wurde, sollen an dieser Stelle einige prinzipielle Zusammenhänge eines Matrixabsorbers im Luftzwischenraum einer Doppelfassade erläutert werden. Der Anteil der auftreffenden Solarstrahlung, der vom Matrixabsorber absorbiert und als Wärme konvektiv an die durchströmende Luft abgegeben wird, kann nicht mehr die Primärfassade oder das Rauminnere erreichen und dort zur sekundären Erwärmung beitragen (vgl. Abbildung 3.1).

Entsprechend der „Porosität“ des Matrixabsorbers passiert ihm ein Teil der Einstrahlung, während der übrige Teil von ihm absorbiert wird. Matrixabsorber können die dabei entstehende Wärme wegen ihrer großen durchströmten Oberfläche leichter – d.h. bei geringeren Strömungsgeschwindigkeiten oder Temperaturdifferenzen – an die Luft abgeben, als dies bei nur (zweidimensional) über-

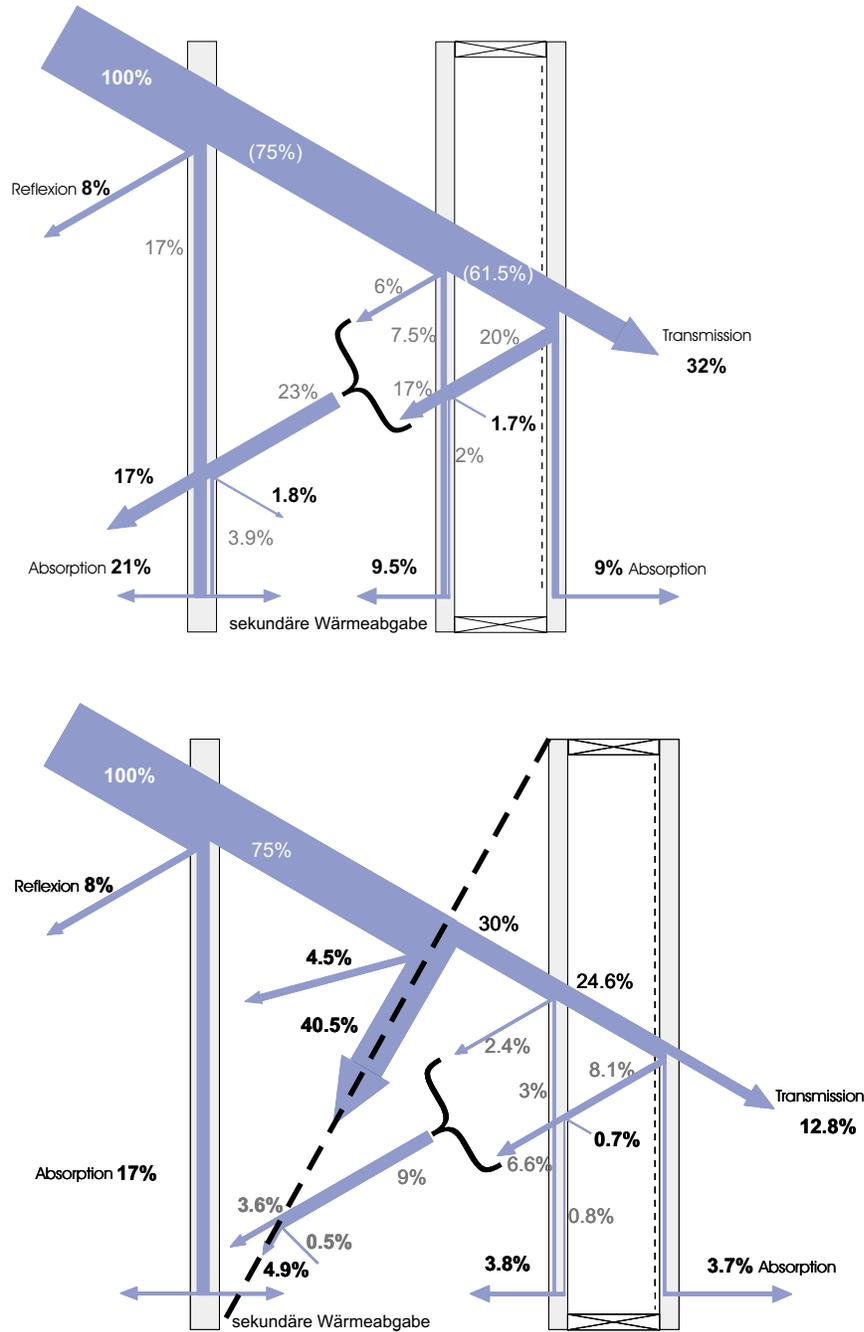


Abbildung 3.1: Strahlungsbilanzen an einer Doppelfassade, oben ohne und unten mit integriertem Matrixabsorber (gestrichelte Linie)

strömten Flächen (z.B. Lamellen eines Fensterkollektors mit absorbierender Jalousie) der Fall wäre. Die sekundäre Strahlungswärmeabgabe der Matrix kann über die Begrenzung der Oberflächentemperaturen der Matrix durch eine stärkere Durchströmung gesteuert werden. Gegenüber konventionellen Sonnenschutzzei-

richtungen hat ein Matrixabsorber dabei wichtige strömungstechnische Vorteile: Das Strömungsbild im Fensterkollektor ist wesentlich gleichmäßiger, Wirbel und Turbulenzen, die zu erhöhter Wärmeabgabe an die äußere Glasscheibe führen, treten weniger auf und insgesamt bleibt der Druckverlust im Fensterkollektor sehr gering.

### 3.1.2 Aufbau und Segmentierung

Der vorliegenden Arbeit liegt der Ansatz zugrunde, *einen Matrixabsorber* jeweils in *einen Fensterkasten* einer **Kastenfenster-** oder **Schacht-Kasten-Doppelfassade** zu integrieren, der so ein in der Regel geschoßhohes Fassaden-Luftkollektorelement darstellt. Die Absorbermatrix kann sowohl im (in der Primärfassade) befensterten Bereich verstellbar oder in opaken Primärfassadenbereichen fest oder ebenfalls verstellbar installiert werden. Das Konzept hebt jedoch primär auf den ersten Fall ab, womit der Doppelfassaden-Matrixkollektor als **Fensterkollektor** zu verstehen ist. Der Doppelfassaden-Matrixkollektor wird grundsätzlich zwangsdurchströmt, was eine Steuerbarkeit der durchgesetzten Luftraten erlaubt. Im **Winterfall** kann er – bei ausreichenden Temperaturhuben – als reine **Zuluftfassade** betrieben werden, beispielsweise wie in Abbildung 3.2 links. Im **Sommerfall** sind die Temperaturen im Luftzwischenraum in der Regel zu hoch, als daß ein direkter Zuluftbetrieb erwünscht wäre. Dann wird der Doppelfassaden-Matrixkollektor als **solare Abluftfassade** betrieben (siehe Abbildung 3.2 rechts). Gleichwohl ist auch im Sommer ein **indirekter Zuluftbetrieb** möglich, wobei die Warmluft aus dem Luftzwischenraum aktiv gekühlt werden muß (Ansaugung von Außenluft gegebenenfalls günstiger). Sinnvoll ist die Einkopplung der erzeugten Warmluft in sorptionsgestützte Klimatisierungsprozesse, was allerdings nicht Gegenstand dieser Arbeit ist.

#### 3.1.2.1 Grundkonzept

Das Gesamtkonzept besteht nun im Wesentlichen darin, mehrere solcher Fassaden-Luftkollektorelemente in der hier beschriebenen Weise miteinander zu kombinieren bzw. zu koppeln. Letztlich handelt es sich um eine Erweiterung der in Kapitel 2 bereits beschriebenen **Modularen Hybridfassade**. Das dort beschriebene **2-achsige** Konzept (vgl. Abbildung 2.12) aus jeweils nebeneinander liegenden Zu- und Abluftsegmenten wird nach Abbildung 3.3 auf ein **Zusammenspiel dreier Achsen** aufgeweitet.

Im vorliegenden Konzept, bei dem sinnvollerweise immer drei lufttechnisch korrespondierende Achsen einem dahinterliegenden Raum zugeordnet sind, gibt es

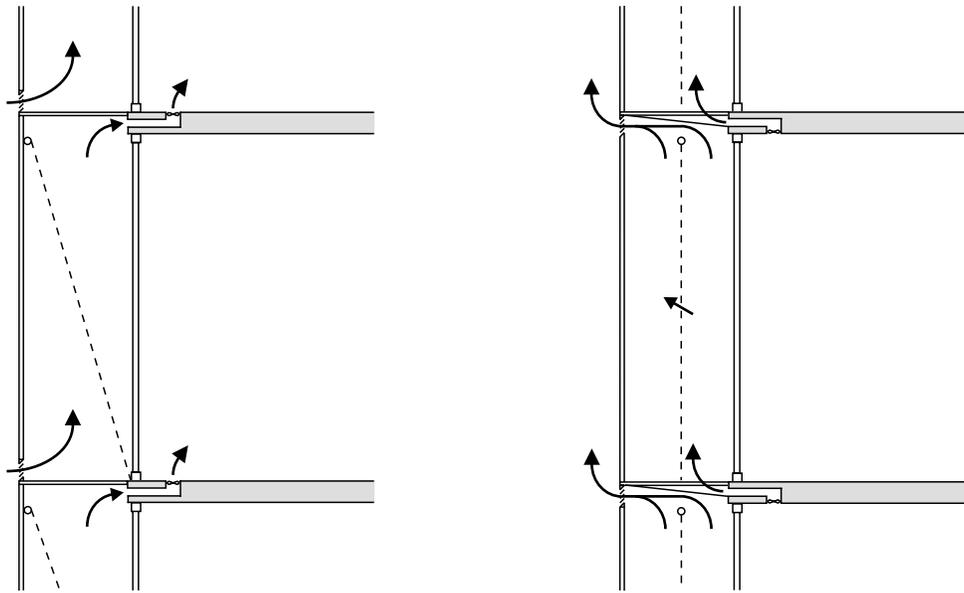


Abbildung 3.2: Funktionsprinzip des Matrixkollektors in einer Doppelfassade, links als Zuluftachse im Winterfall, rechts als Abluftachse im Sommerfall

zwei Zuluftachsen. Ausgangspunkt ist wie bei der Hybridfassade ein als Zuluftsegment fungierender – hier mit Matrixabsorber bestückter – Fensterkasten, in dem die angesaugte Außenluft erwärmt und anschließend dem darüberliegenden Büroraum über einen Bodenkonvektor zugeführt wird. Dieses Konzept bietet darüberhinaus die Möglichkeit, zwei übereinanderliegende Fassadensegmente zu verbinden, um eine stärkere Vorwärmung der Zuluft über zwei Geschosse – besonders interessant bei sehr niedrigen Außentemperaturen – zu erreichen, die dann den oberen Büroraum direkt über ein zu öffnendes Fenster erreicht. In diesem Fall sollte der untere der beiden Matrixkollektoren mit einer nicht öffnenden, gegebenenfalls opaken Rückwand versehen sein, um eine unmittelbare Verbindung der beiden Geschosse über den Luftzwischenraum zu vermeiden. Zwei dieser **Vorwärm-** bzw. **Zuluftachsen** (in Abbildung 3.3 die beiden linken Achsen) liegen jeweils – vertikal um ein Geschöß versetzt – nebeneinander. In der angrenzenden **Abluftachse** des belüfteten Raumes strömt die Abluft wahlweise über geöffnete Fenster in den Fensterkasten und nach außen (solare Abluftfassade) bzw. wird über Ventilatoren nach außen befördert. Im Winterfall ist es durchaus erwünscht, die Raumabluft vorher noch mit der von außen angesaugten Luft in Wärmeaustausch zu bringen. Dies kann über eine Verbindung der Abluftachse mit der angrenzenden Zuluftachse geschehen, so daß dann die in einem Kompaktwärmetauscher im Deckenpaket angesaugte Außenluft vorgewärmt wird, bevor sie in den Fassadenkollektor gelangt, wo sie weiter erwärmt wird. Im Sommerfall wird natürlich auch die Zuluftachse anders betrieben: Der obere Kasten

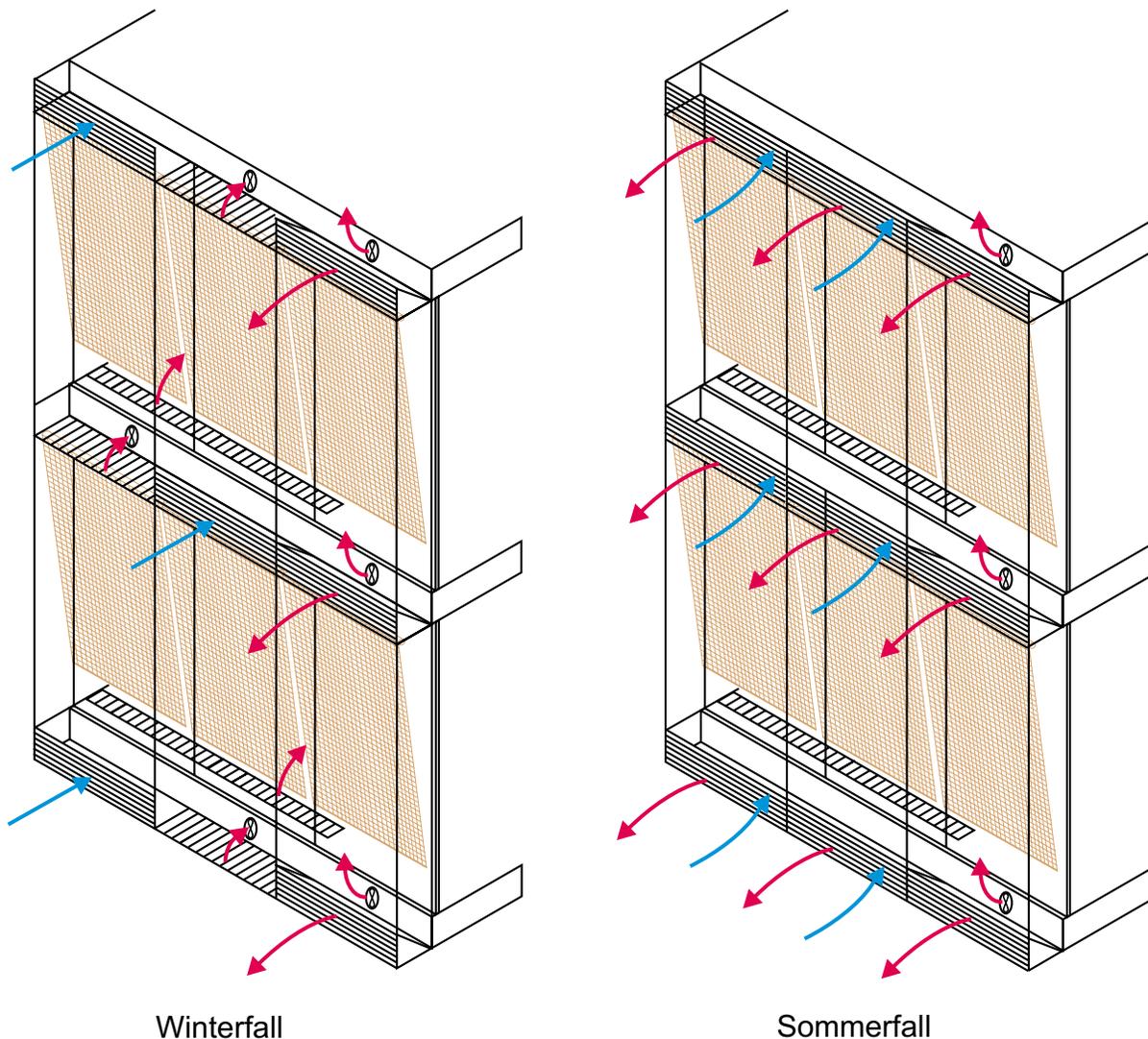


Abbildung 3.3: Schematische Funktionsweise des 3-achsigen bzw. 2-geschossigen Fassadenkonzeptes zur Be- und Entlüftung von Büroräumen unter Einsatz von Matrixkollektoren im Winter- und im Sommerfall

wird vom unteren horizontal abgeschottet, und als alleiniges Zuluftsegment betrieben, das bei geeigneter Matrixpositionierung nach wie vor Fensterlüftung erlaubt. Soll auch im Sommer ein hoher Temperaturhub erreicht werden, bleibt die Kopplung der beiden Kästen übereinander, wobei dann das Fenster im oberliegenden Büroraum geschlossen bleiben muß. In diesem Fall kann Fensterlüftung nur über das Abluftsegment betrieben werden. Im Zuluftsegment ist darüberhinaus aber zusätzlich beim Einsatz eines Bypasses (Sektionalrotor) die Ansaugung von Außenluft unter Umgehung des Luftzwischenraums denkbar. Auch eine Verbindung mit der von HAUSLADEN [55] vorgeschlagenen Kombifassade erscheint

sinnvoll, das Abluftsegment würde in diesem Fall nur einschalig ausgeführt, und dient im Sommer zur reinen freien Fensterlüftung.

Es soll an dieser Stelle noch einmal betont werden, daß das vorgestellte Konzept nicht zuletzt aufgrund der Integration der Solarabsorber grundsätzlich auf Zwangsdurchströmung ausgelegt werden muß, und sei es eine einfache Abluftanlage, die die Luft über die Doppelfassade in den Innenraum nachsaugt. In allen diesen Fällen ist eine über Solarmodule photovoltaisch betriebene Be- und Entlüftung im Rahmen der notwendigen Luftwechsel denkbar und möglich, wie in Abschnitt 3.3 noch zu zeigen sein wird, und ist von daher auf jeden Fall anzustreben.

### 3.1.2.2 Sondervarianten

#### **Kopplung von Luftkollektor und Wärmerückgewinnung**

Die Wärmerückgewinnung aus der Raumabluft und die Zuluftvorwärmung über einen Luftkollektor stehen zunächst einmal immer gewissermaßen in Konkurrenz zueinander. Außerdem ist die Kopplung wie im obigen Konzeptbeispiel bei der Trennung von Zuluft- und Abluftbereichen konstruktiv nicht immer einfach umzusetzen. Dennoch sind in Abwandlung der obigen Ansätze insbesondere in Kombination mit brüstungs-, decken- oder fensterbankintegrierten Wärmetauscher-Lüftungsgeräten sinnvolle Konstellationen möglich. Es ist dann naheliegend, Zu- und Abluftseite nicht mehr achsweise zu trennen, sondern beide Funktionen in einem Achsabschnitt bzw. Fensterkasten unterzubringen. Dies könnte dann z.B. so aussehen, daß die Außenluft im Winterfall zunächst im Wärmetausch mit der Raumabluft geführt wird. Während die so abgekühlte Raumabluft über einen kurzen – den Luftzwischenraum überbrückenden – Kanal weggeführt wird, durchströmt die vorgewärmte Zuluft den darüberliegenden Luftkollektor, bevor sie dem darüberliegenden Raum zugeführt wird. Auch die komplette Umkehr der Luftströmungsrichtung ist – allerdings dann eingeschossig – denkbar: Die Abluft wird von oben nach unten wie bei einer Abluftfassade durch den Fensterkollektor gesaugt und anschließend – im Winterfall – über einen Wärmetauscher zur Erwärmung der Zuluft benutzt, oder – im Sommerfall denkbar – in einem sorptionsgestützt arbeitenden dezentralen Klimagerät zur Desorption eingesetzt.

#### **Kombination mit Tageslichttechnik**

Doppelfassadensysteme schwächen grundsätzlich aufgrund ihrer Mehrschaligkeit aber auch wegen ihrer Geometrie (je nach Gliederung der Sekundärfassade: Festverschattung durch horizontale Segmentierelemente) die Tageslichtbelichtung gegenüber Einfachfassaden mit gleicher Primärfassade (dieser Vergleich hin- und her, weil eine Einfachfassade die gleiche Primärfassaden-Gestaltung in der Regel

gar nicht zuläßt, dennoch wird dieser „Nachteil“ oft angeführt). Es gilt in diesem Zusammenhang natürlich auch für jedwede Doppelfassadenkonstruktion, Kunstlicht während des Tages zu vermeiden bzw. die Einschaltzeiten zu minimieren. Dazu können im Oberlichtbereich der Sekundärfassade Lichtlenkelemente eingesetzt werden.

Ein Matrixkollektor kann zunächst einmal als **additives Bauteil** betrachtet werden, das bisherige Systeme erweitert. Beispielsweise kann weiterhin ein innenliegender (oder an der Außenseite der Primärfassade liegender) Blendschutz eingesetzt werden, der aufgrund der bereits vom Matrixabsorber größtenteils zurückgehaltenen Sonneneinstrahlung kaum mehr Sekundärwärme in den Raum einbringt. In Verbindung mit den oben erwähnten Tageslichtlenksystemen ergeben sich zwar relativ aufwendige aber interessante Kombinationsmöglichkeiten, die nicht nur die auf der Fassade eintreffende Solarstrahlung energetisch direkt optimal ausnutzen, sondern sie weiterhin bestmöglich auch für die Tageslichtbelichtung der Räume nutzen, um energetisch ungünstiges Kunstlicht zu vermeiden.

## 3.2 Grundlagen und Definitionen

Im folgenden Unterkapitel werden die für das Verständnis der geplanten Untersuchungen notwendigen **Grundlagen** besprochen. Zunächst wird das eigentliche Kernstück des Luftkollektors – der **Matrixabsorber** – in seinen wesentlichen **Materialeigenschaften** und **Kenngößen** charakterisiert. Die bezüglich der solaren Einstrahlungssituation und der **geometrischen Verhältnisse** des Matrixabsorbers im Luftzwischenraum und deren Zusammenhang mit dem Betrachter im dahinterliegenden Raum notwendigen **Definitionen** und **Winkelkonventionen** sowie **Begriffsbestimmungen** werden anschließend angegeben. Zur Bewertung von Büroarbeitsplätzen relevante Begriffe aus der **Lichttechnik** werden eingeführt. In diesem Zusammenhang wird auch auf die **richtungsabhängige Transparenz** der Matrixabsorber näher eingegangen und ein **mathematisches Modell** zu deren näherungsweise Berechnung angegeben. Schließlich werden zu erwartende **optische Effekte** bei der kombinierten Verwendung mehrerer Matrixgewebe beschrieben.

### 3.2.1 Eigenschaften des Matrixabsorbers

#### 3.2.1.1 Kenngößen

Wenngleich bei KOLB [70] sowie in DIN/ISO 9044 [25] die Geometrie der verwendeten Drahtgewebe detailliert beschrieben ist, seien an dieser Stelle der

Vollständigkeit halber dennoch die wesentlichen Kenngrößen der Gewebe in Abbildung 3.4 und den Gleichungen (3.1), (3.2) und (3.3) kurz dargestellt:

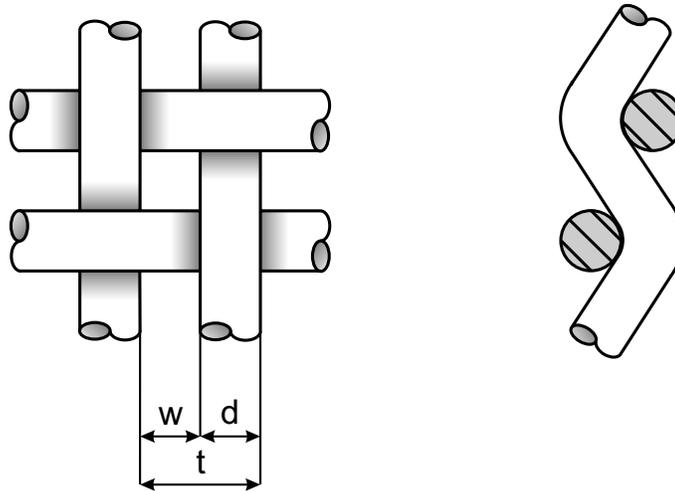


Abbildung 3.4: Geometrie eines Drahtgewebes mit Quadratmaschen in Leinenbindung (Webart der Verkreuzung von Kett- und Schußdrähten)

- **Drahtdurchmesser  $d$**
- **Maschenweite  $w$ :**  
Abstand zwischen zwei benachbarten Kett- (Längs-) oder Schuß- (Quer-) Drähten, mittig in der projizierten Ebene gemessen

- **Teilung  $t$ :**

$$t = w + d \quad (3.1)$$

- **Relative freie Siebfläche  $\psi$ :**

$$\psi = \left( \frac{w}{w + d} \right)^2 = \left( 1 - \frac{d}{t} \right)^2 \quad (3.2)$$

- **Flächengewicht  $G$  [kg/m<sup>2</sup>] nach DIN ISO 9044 [25]:**

$$G = \rho_M \cdot \frac{d^2}{618.1 \cdot (w + d)}, \quad (3.3)$$

worin  $d$  und  $w$  in [mm] und  $\rho_M$  in [kg/m<sup>3</sup>] eingesetzt werden müssen.

- **Wahre Länge  $l$  der Mittelfaser eines gewellten Drahtes der oben beschriebenen Gewebe:**

$$l = \frac{t}{\cos(\arctan(d/t))} \quad (3.4)$$

- **Volumetrische Porosität**  $\varphi$  allgemein:

$$\varphi = \frac{\text{Hohlraumvolumen}}{\text{Gesamtvolumen}} = \frac{V_F}{V} \quad (3.5)$$

Näherungsformel für die volumetrische Porosität [70]:

$$\varphi = 1 - \frac{l d \pi}{4(w + d)^2}, \quad (3.6)$$

wobei  $l$  die näherungsweise ermittelte Länge der Mittelfaser des gewellten Drahtes ist.

- **Spezifische Oberfläche**  $a$  allgemein:

$$a = \frac{\text{benetzte Oberfläche}}{\text{Gesamtvolumen}} = \frac{A_{eff}}{V} \quad (3.7)$$

Für die spezifische Oberfläche der Matrix existiert folgende Näherungsformel [70]:

$$a_M = 1 - \frac{2 \pi l - d}{2(w + d)^2} \quad (3.8)$$

Weitere insbesondere für die Durchströmung des Matrixgewebes charakteristische Größen sind bei KOLB [70] zu finden. Die oben beschriebene Geometrie des Matrixabsorbers hat in der vorliegenden Anwendung neben der in dieser Arbeit nicht detaillierter zu behandelnden strömungstechnischen Relevanz vor allem eine lichttechnische Bedeutung, die sich z.B. in der richtungsabhängigen Transparenz des eingesetzten Drahtgewebes zeigt. Diese optischen Charakteristika werden in Abschnitt 3.2.4 eingehend besprochen.

### 3.2.1.2 Material und Beschichtung

Prinzipiell sind die oben beschriebenen Drahtgewebe nach DIN ISO 9044 [25] aus Metalldrähten unterschiedlicher Werkstoffe nach DIN ISO 4782 [24] erhältlich. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Matrixgewebe bestehen aus **Reinkupfer** (E-Cu 58, Kupferanteil  $\geq 99.9\%$ ), ein weicher Werkstoff mit guter elektrischer Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Die maximale Gebrauchstemperatur liegt bei ca.  $150^\circ\text{C}$ . Die Rohdichte  $\rho_M$  beträgt  $8900 \text{ kg/m}^3$ . Es werden grundsätzlich Drahtstärken  $d$  von  $0.020 \text{ mm}$  (extraleichte Qualität) bis  $4.0 \text{ mm}$  (extra schwer) bei Maschenweiten  $w$  von  $0.020 \text{ mm}$  bis  $16.0 \text{ mm}$  angeboten. In der vorliegenden Anwendung kommen ausschließlich leichte Gewebe mit Drahtstärken  $d$  von ca. **0.10 mm bis 0.5 mm** bei entsprechenden Maschenweiten zum Einsatz. Die freie

Siebfläche  $\psi$  liegt damit je nach Kombination zwischen **0.3** und **0.5**, das Flächengewicht  $G$  zwischen ca. **0.5** und **2.0 kg/m<sup>2</sup>**. Diese Materialwerte bedeuten folgende, im Einsatz als Matrixabsorber vorteilhafte Materialeigenschaften:

Die durch die obengenannte freie Siebfläche bestimmte **Transparenz** der Drahtgewebe ist für eine ungehinderte Durchsicht von innen nach außen ausreichend hoch. Gleichzeitig ist das Gewebe eng genug, um Verschattungsfunktionen im relevanten Bereich der Winkelverhältnisse (siehe Abschnitt 3.2.4) erfüllen zu können. Die feine Geometrie des Matrixabsorbers – mit Drahtstärken von 0.5 mm und darunter – bewirkt ferner, daß bei den im Fassadeneinsatz üblichen Abständen zum Betrachter die Einzeldrähte nicht mehr scharf auf der Netzhaut abgebildet werden. Das Drahtgewebe ist damit nicht als solches erkennbar und schränkt die Durchsicht nach außen kaum ein. Neben den visuellen Vorzügen haben feine Gewebe aufgrund ihres geringen Flächengewichts auch den Vorteil einer nur **geringen thermischen Trägheit**. Dies bedeutet – insbesondere bei wechselnden Einstrahlungsbedingungen – eine verzögerungsfreie Umsetzung einsetzender Solarstrahlung in Temperaturhub der durchströmenden Luft. Für die praktische Umsetzbarkeit ist schließlich eine gute **mechanischen Rollbarkeit** von entscheidender Bedeutung. Sollen die Drahtgewebe im Luftzwischenraum abrollbar auf einer Welle betrieben werden, müssen sie dauerhaft knick- bzw. knitterfrei auf üblichen Wellendurchmessern (ca. 50 - 80 mm) eingesetzt werden können. Dies ist bei Drahtstärken von bis zu 0.5 mm der Fall, wird jenseits davon in Verbindung mit den oben genannten Wellendurchmessern aber sehr schnell unmöglich.

Da unbehandeltes Kupfer als Absorber für Sonnenkollektoren aufgrund seines niedrigen Absorptionsvermögens für die kurzwellige Solarstrahlung ungeeignet ist, muß es beschichtet werden. Erreicht man eine im kurzwelligen Bereich (etwa 0.3 - 3.0  $\mu\text{m}$ ) gut absorbierende **Oberflächen-Beschichtung** mit einem gleichzeitig geringen Emissionsvermögen im Wellenlängenbereich über 3.0  $\mu\text{m}$ , spricht man von **spektral-selektiven** Beschichtungen. Es existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden zur Herstellung spektral-selektiver Oberflächen [1][70], bei denen unterschiedliche, oft gleichzeitig wirksame physikalische Effekte ausgenutzt werden. In der vorliegenden Arbeit werden die Kupferdrahtgewebe mit einer selektiven Metalloxidschicht (**Kupferschwarz**) versehen. Zu deren Brünierung wird EBONOL C<sup>1</sup> verwendet, ursprünglich eine Lösung zum dekorativen chemischen Färben von Kupfer, mit dem bei relativ geringem Herstellungsaufwand gut haftende und mechanisch wie optisch stabile Oxidschichten hergestellt werden können. EBONOL C wurde bereits vielfach zur Oxidation von Solarabsorbern aus Kupfer eingesetzt und wird in der Literatur ausführlich beschrieben [1][70].

---

<sup>1</sup>Hersteller: Enthone-OMI Inc., USA

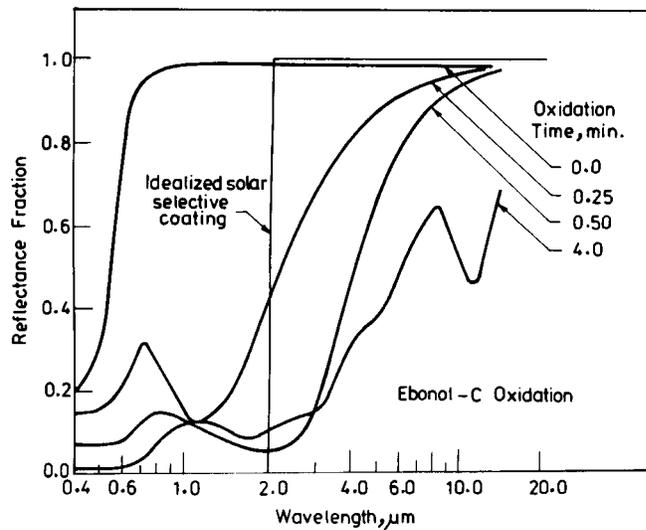


Abbildung 3.5: Spektraler Reflexionsgrad von EBONOL C-Beschichtungen für unterschiedliche Oxidationszeiten (AGNIHOTRI und GUPTA [1])

Abbildung 3.5 zeigt die Abhängigkeit des spektralen Verlaufs des Reflexionsgrades einer EBONOL-Kupferbeschichtung von der Oxidationszeit. Mit steigender Oxidationszeit verschiebt sich zunächst die sogenannte **Kantenwellenlänge** gegenüber blankem Kupfer in den langwelligeren Bereich, wobei aber Oxidationszeiten im Bereich mehrerer Minuten keine weitere Verschiebung mehr bewirken, sondern nurmehr einen verminderten Reflexionsgrad im Infrarot-Bereich. In der Praxis weisen selektive Oberflächen kein ideales sprunghaftes Verhalten bei der Kantenwellenlänge auf, wie es in Abbildung 3.5 zusätzlich im Vergleich zu den realen Verläufen dargestellt ist. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit konkret verarbeitete Beschichtung wird in Kapitel 4.2.3 vorgestellt.

## 3.2.2 Geometrische Verhältnisse

Nachdem wesentliche Eigenschaften und Kenngrößen von Drahtgeweben im vorhergehenden Abschnitt beschrieben wurden, soll im Folgenden die Geometrie im Gesamtzusammenhang mit dem Einsatz als Solarabsorber in doppelschaligen Fassaden definiert werden.

### 3.2.2.1 Auftreffwinkel direkter Solarstrahlung auf die Matrix

Zunächst werden die Auftreffwinkel der direkten Sonneneinstrahlung auf das Matrixgewebe bei beliebiger Orientierung und Neigung benötigt. Die Verteilungscharakteristik der Einstrahlwinkel auf die Einzeldrähte des Gewebes wird in der

vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht. Vielmehr wird grundsätzlich auf den Normalenvektor der beiden parallelen Hüllebenen des Drahtgewebes (wird demnach hier als Platte betrachtet) Bezug genommen, womit sich die in Abbildung 3.6 und 3.7 dargestellten Winkel nach DIN 5034 [22] ergeben.

Sonneneinstrahlung

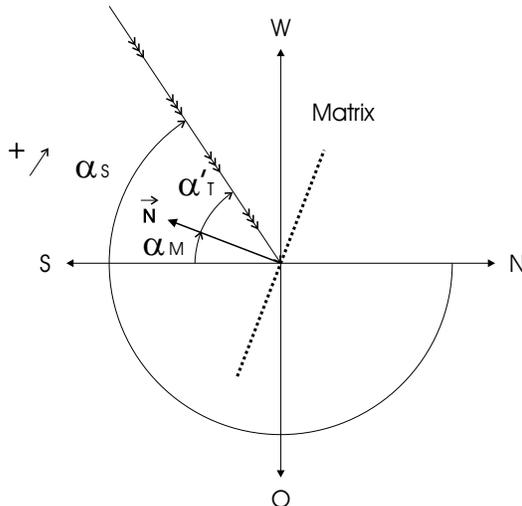


Abbildung 3.6: Azimutwinkel bzw. auf Horizont projizierter Einstellwinkel der Matrix

Sonneneinstrahlung

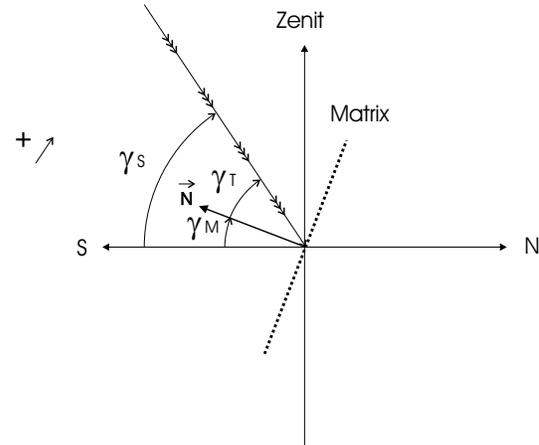


Abbildung 3.7: Elevationswinkel bzw. vertikaler Einstellwinkel der Matrix

### 3.2.2.2 Geometrie von Matrix und Luftzwischenraum

Über den vorangehenden Abschnitt hinaus werden nun einige grundlegende Konventionen für die Ausrichtungs- und Winkelverhältnisse des in eine Doppelfassade integrierten Matrixabsorbers getroffen. Es wird grundsätzlich davon ausgegangen, daß die Matrix die gleiche Himmelsorientierung wie die Fassade aufweist, also im Luftzwischenraum bezüglich des horizontalen Einstellwinkels nicht gedreht werden kann ( $\alpha_M = \alpha_F$ ). Der vertikale Einstellwinkel der Matrix hingegen kann innerhalb der Fassade, die grundsätzlich vertikal ( $\gamma_F = 0$ ) ausgerichtet ist, verstellt werden. Es wird definiert:

- $\gamma_M \geq 0$  : **positiv** geneigt (nach oben, zur Sonne hin gerichtet)
- $\gamma_M \leq 0$  : **negativ** geneigt (nach unten, von der Sonne weg gerichtet)

Damit ergeben sich nach Abbildung 3.8 durch die Geometrie des Luftzwischenraums begrenzte **Neigungs-** oder **Anstellwinkel**  $\gamma_M$  der Matrix. Hierbei ist zu bemerken, daß die Tiefe des Luftzwischenraums  $S$  in der Regel nicht vollständig zur

Verfügung steht, sondern eine durch Befestigung und Lagerung der Matrixabsorber verminderte Spanntiefe  $S_M$ .

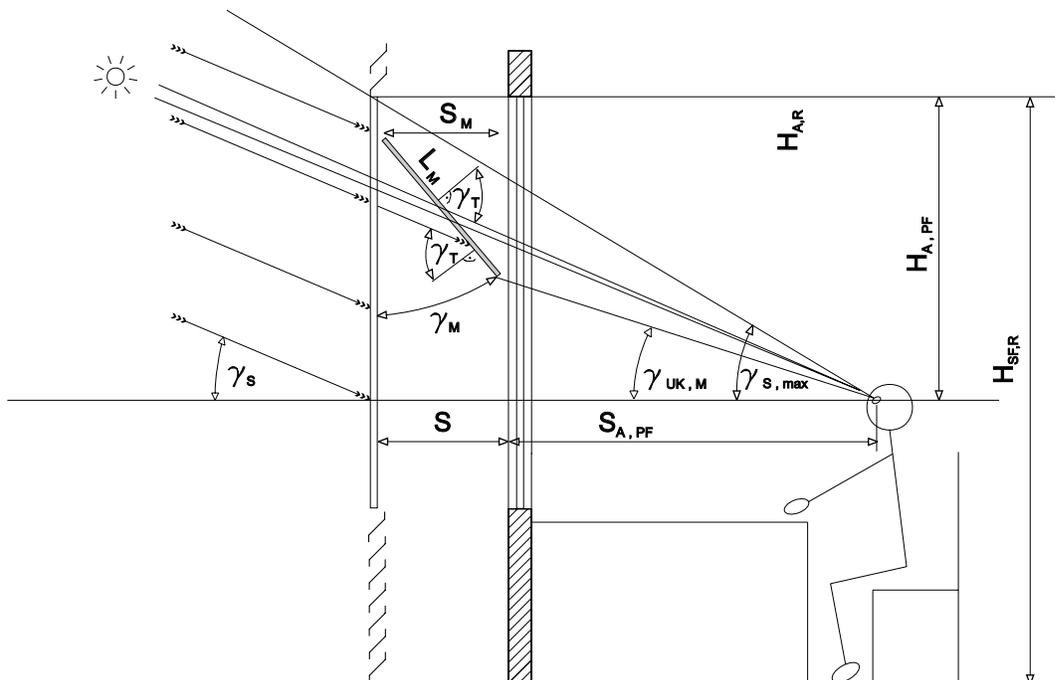


Abbildung 3.8: Winkelkonventionen und -beziehungen zwischen Doppelfassaden-Matrixkollektor und Betrachter und im dahinterliegenden Raum

### 3.2.2.3 Geometrie zwischen Matrix und Betrachter im Innenraum

Abbildung 3.8 gibt über die Verhältnisse in der Matrixkollektor-Doppelfassade selbst hinaus auch die verwendeten Größen zur Beschreibung der Geometrie zwischen Sonne, Betrachter und dazwischen liegender Matrix an. Mit Hilfe dieser Geometriegrößen läßt sich jede beliebige Konstellation zwischen Matrixkollektor-Doppelfassade und dem Innenraum bzw. der Position der Augen der arbeitenden Person beschreiben. Neben der insgesamt lichttechnischen Qualität des Büroarbeitsplatzes, deren Bewertungskriterien Inhalt des nachfolgenden Unterkapitels 3.2.3 sind, ist der Blick durch den Fensterkollektor nach draußen durch das Zusammenspiel von Matrixkonfiguration, momentanem Sonnenstand und der jeweiligen Position des Betrachters im Raum bestimmt. Ob, und wenn ja, an welcher Stelle der Fassade die Sonne sichtbar ist, hängt vom Abstand von der Fassade  $S_A$  und von der Sturzhöhe  $H_A$  der jeweils relevanten Fassadenebene (SF oder PF) ab. Voraussetzung ist natürlich, daß sich der Sonnenazimut  $\alpha_s$  innerhalb des – wiederum durch den Abstand des Betrachters von der Fassade  $S_A$  und die Achsbreite

$B$  des Fensterkollektors vorgegebenen – „Breitenwinkels“  $\beta_{SF}$  bewegt. Damit ergibt sich ein maximaler Höhenwinkel  $\gamma_{S,max}$ , oberhalb dessen die Sonne durch die feste Verschattung in Form der Fassade selbst für den Betrachter ohnehin nicht sichtbar ist.

$$\gamma_{S,max} = \arctan \frac{H_A}{S_A} \quad (3.9)$$

Ist die momentane Sonnenhöhe  $\gamma_S$  kleiner als  $\gamma_{S,max}$ , befindet sich die Sonne im Blickfeld des Betrachters und Schutzvorrichtungen gegen die direkte Blendung durch die Sonne sind zwingend erforderlich. Die Lage der Projektion der Sonne an der Primär- und Sekundärfassade ergibt sich mit den in Abbildung 3.8 dargestellten Größen wiederum aus den trigonometrischen Beziehungen (3.10) und (3.11). Die Angabe ihrer Höhenlage  $H_{S,PF}$  bzw.  $H_{S,SF}$  bezieht sich dabei grundsätzlich auf die Sturzkante der Primärfassade, die immer niedriger liegt als die der Sekundärfassade.

$$H_{S,PF} = H_{A,PF} - S_{A,PF} \cdot \tan \gamma_S \quad (3.10)$$

$$H_{S,SF} = H_{A,PF} - (S_{A,PF} + S) \cdot \tan \gamma_S \quad (3.11)$$

Um die Direktblendung durch die Sonne bzw. deren Projektion an der Fassade zu unterbinden, muß zwischen Betrachterauge und Blendquelle (Sonne) ein Material gespannt werden, das in Blickrichtung opak wirkt und eine ausreichende Ausdehnung zur Abdeckung der Blendquelle aufweist. Dabei wird in erster Näherung davon ausgegangen, daß der Blickwinkel auf die Matrix ungefähr gleich  $\gamma_T$  ist. Folgende notwendige, aber noch nicht hinreichende Bedingungen müssen erfüllt sein, um einen wirksamen Blendschutz realisieren zu können:

$$\gamma_S > \gamma_{UK,M} \cup \gamma_S < \gamma_{S,max} \quad (3.12)$$

$$\gamma_S < \gamma_{OK,M} \quad (3.13)$$

Bei der Dimensionierung eines solchen Blendschutzes ist es sinnvoll, von vornherein zu berücksichtigen, daß sich die Person innerhalb bestimmter Grenzen im Raum bewegt ( $S_A, H_A \neq \text{konst.}$ ) und der Höhenwinkel  $\gamma_S$  der Sonne sich verändert, während sie an der Fassade „vorbeizieht“. Wie der Blendschutz mit der in Abschnitt 3.2.1.1 charakterisierten Gewebe-Geometrie realisiert werden kann, ist Gegenstand eines eigenen Unterkapitels, in dem auch die dazu notwendigen Grundlagen zur Berechnung erläutert werden.

### 3.2.3 Lichttechnische Bewertung

Das Seitenfenster dient primär dem **visuellen Bezug nach außen** und der **Tagesbelichtung des Innenraumes**. Gleichzeitig bringen seitliche Fensteröffnungen naturgemäß **Blendungseffekte** und **solare Kühllasten** mit sich. Das führt zu einem grundsätzlichen **Zielkonflikt**: Wirksamer Blend- und Sonnenschutz ohne Mißachtung der primären Aufgaben eines Fensters läßt sich nach dem konventionellen **Stand der Technik** nicht realisieren. Zumindest resultiert in vielen Fällen eine Planungsunsicherheit beim sommerlichen thermischen Verhalten des Raumes, wenn der Nutzer beispielsweise bei Jalousiesystemen aus visuellen Komfortgründen die Lamellen öffnet. Die Vielzahl der Anforderungen und notwendiger Bewertungskriterien in Bezug auf den Nutzer und auf neue Systeme scheint darüber hinaus im derzeitigen Normenwerk noch nicht ausreichend berücksichtigt zu sein.

In den folgenden Abschnitten werden Hilfsmittel zur Analyse der visuellen Situation von Büroarbeitsplätzen (heute fast ausschließlich Bildschirmarbeitsplätze) mit dem Ziel vorgestellt, eine Bewertung des in dieser Arbeit vorgeschlagenen Systems eines teiltransparenten Solarabsorbers zu ermöglichen. Ausgehend von einigen grundsätzlichen Überlegungen zur visuellen Wahrnehmung werden die beiden Gesichtspunkte Blendungsbewertung und Verteilung der Leuchtdichte im Raum herausgegriffen.

#### 3.2.3.1 Visuelle Wahrnehmung

Eine augengerechte Beleuchtung des Arbeitsplatzes bedeutet – neben der bloßen Einhaltung von Mindestbeleuchtungsstärken – die Schaffung optimierter Sehbedingungen, die ein für die Augen schadenfreies und ermüdungsarmes, permanentes Arbeiten erlauben. BARTENBACH [4] [41] geht bei der lichttechnischen Gestaltung von Arbeitsplätzen mit wissenschaftlichen Methoden vom Erscheinungsbild eines Raumes aus, um über die **visuelle Wahrnehmung** des Menschen zu Lichtkonzepten und – als deren technische Übersetzung – zu Lichtsystemen zu kommen. Dazu ist ein genaues Verständnis dessen notwendig, was visuelle Wahrnehmung eigentlich ist.

Die **visuelle Wahrnehmung** beginnt mit der **Aufnahme optischer Reize** durch das Auge und wird mit der **Verarbeitung visueller Informationen** durch das menschliche Gehirn vollendet. Man kann sie als in zwei Ebenen ablaufend beschreiben [41]:

- weitgehend *unbewußte*, gleichzeitige und automatische Wahrnehmung des gesamten Gesichtsfeldes
- *intentionale*, gerichtete Abtastung des Gesichtsfeldes

Der „Verrechnungsprozeß“ aller visuellen Eindrücke im Gehirn sollte minimiert werden, um es für andere Denkprozesse zu entlasten bzw. Ermüdungserscheinungen vorzubeugen. Ziel ist demnach eine **stabile Wahrnehmung**, die mit möglichst wenig und kurzen Adaptationsvorgängen<sup>2</sup> auskommt.

### 3.2.3.2 Leuchtdichtemodell

Die Theorie der visuellen Wahrnehmung unterteilt das gesamte Sehfeld<sup>3</sup> in Bereiche **erhöhter Aufmerksamkeit (Infeld)** und Bereiche **geringerer Aufmerksamkeit (Umfeld)** (siehe Abbildung 3.9). Letzteres wird weiterhin in das *primäre* Umfeld (erweiterter Arbeitsbereich im Gesichtsfeld, der nicht mehr mit Augenbewegungen allein erfaßt werden kann) und das *sekundäre* Umfeld (maximal sichtbarer Ausschnitt aus dem potentiellen Gesamtgesichtsfeld) unterteilt. Das **Leuchtdichtemodell** [41] dient als Arbeitsgrundlage zur Abstimmung der Infeld- und Umfeldleuchtdichten, deren Unterschied vom Auge zur Erreichung des obengenannten stabilen Adaptationszustands nur innerhalb bestimmter Schwankungsbreiten toleriert wird.

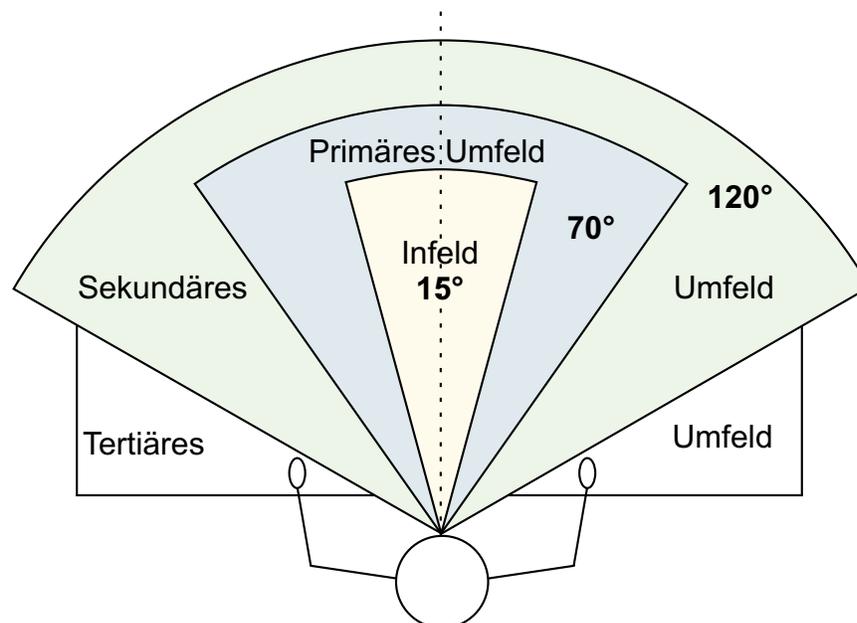


Abbildung 3.9: Aufteilung des Sehfeldes: Infeld, primäres, sekundäres und tertiäres Umfeld

<sup>2</sup>Fähigkeit des Auges, sich verändernden Leuchtdichteniveaus anzupassen

<sup>3</sup>Gesichtskreis: vertikal ca.  $140^\circ$ , horizontal  $\geq 180^\circ$

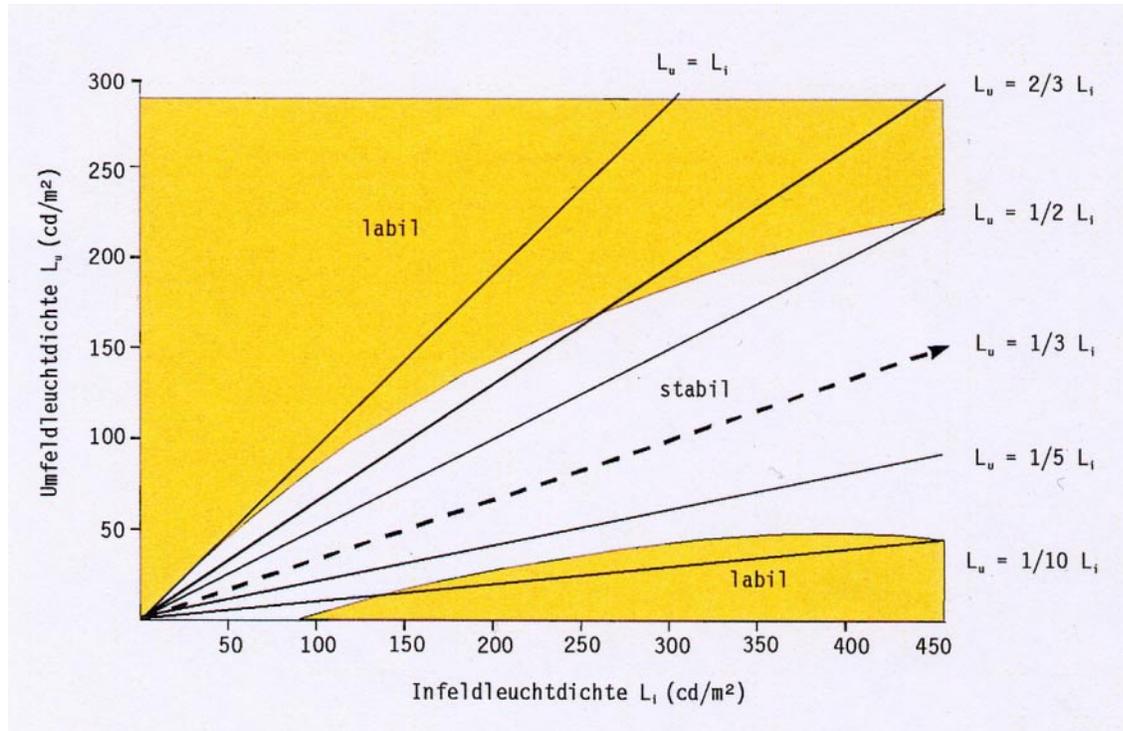


Abbildung 3.10: Verhältnisse von Umfeld- zu Infeldleuchtdichte mit Bereichen stabiler und labiler Wahrnehmung nach dem Leuchtdichtemodell [4]

Abbildung 3.10 zeigt den geeigneten Bereich der Proportionen zwischen Umfeld- und Infeldleuchtdichten zur Sicherstellung stabiler belastungsfreier Wahrnehmungsbedingungen im Tätigkeitsfeld. Demnach erreicht man mit einem Verhältnis der Umfeld- zur Infeldleuchtdichte von 1:3 die günstigsten Wahrnehmungsbedingungen bei gegenüber der Sehaufgabe dunklerer Nahumgebung.

Auf Fensterflächen können Leuchtdichten von bis zu  $8000 \text{ cd/m}^2$  auftreten. Solche Leuchtdichtebereiche im sekundären oder tertiären Umfeld führen zu Direkt- und Reflexblendung, insbesondere bei der Nutzung von Datensichtgeräten. Um deren Nutzung dennoch zu ermöglichen, sind Blendschutzmaßnahmen notwendig, die die Fensterleuchtdichte auf maximal  $200\text{-}300 \text{ cd/m}^2$  reduzieren [4], aber gleichzeitig eine ausreichende Tageslichteinbringung gewährleisten. Für diesen häufigen Fall des fensternahen Bildschirmarbeitsplatzes wird in der Literatur ein noch als angenehm empfundener Leuchtdichtekontrast von 15:1 angegeben [29].

Der Einsatz der oben beschriebenen Matrixabsorber entsprechender freier Siebfläche läßt durchaus Leuchtdichten am Fenster erwarten, die im Umfeld von Bildschirmarbeitsplätzen innerhalb der oben geschilderten Grenzen liegen, ohne zu viel Tageslicht auszublenden. Gegebenenfalls könnte jedoch auch eine – dem Ansatz von BARTENBACH [41] entsprechende – Trennung von Tageslichtführung und

visuellem Bezug nach außen umgesetzt werden, indem man im Oberlichtbereich Tageslichtlenksysteme verwendet. Der Ausblick im darunterliegenden Bereich würde gleichzeitig durch die Absorbergewebe nur unwesentlich eingeschränkt.

### 3.2.4 Berechnung der richtungsabhängigen Transmissionsgrade

Beim Einsatz des Matrixabsorbers in Fensterkollektoren hat seine geometriebedingte *winkelabhängige Transparenz* eine besondere funktionale Bedeutung. Der Transmissionsgrad eines Matrixabsorbers ist durch entsprechende Neigung gegen die einfallende Direktstrahlung veränderbar. Ist das Gewebe normal zur einfallenden Direktstrahlung gespannt, ist die Durchlässigkeit maximal. Durch ein Herausdrehen des Gewebes aus der Normalen, wie in Abbildung 3.11 dargestellt, nimmt die Durchlässigkeit ab. Beim Erreichen eines Grenzwinkels  $\gamma_{Gr}$  wird der Transmissionsgrad für Direktstrahlung zu Null (siehe Abbildung 3.12).

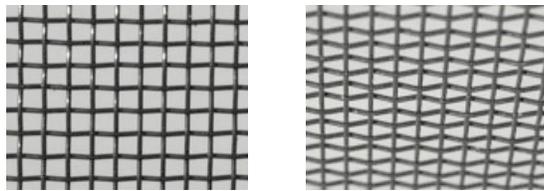


Abbildung 3.11: Gewebedetail in der Aufsicht: Links normal zur Blickrichtung, rechts aus der Flächennormalen herausgedreht

Der Transmissionsgrad wird im Folgenden in Abhängigkeit von den Einstrahlwinkeln  $\alpha_T$  und  $\gamma_T$ , sowie von der freien Siebfläche des jeweils verwendeten Absorbergewebes berechnet. Das in Abschnitt 3.2.1.1 charakterisierte **Drahtgewebe** wird hierzu näherungsweise als **Drahtgitter** nach Abbildung 3.13 betrachtet, was aufgrund der kleinen Drahtstärken zulässig ist.

Um die transmittierte Strahlung durch das mit einem beliebigen Einstrahlwinkel beaufschlagte Gitter zu berechnen, wurde eine Projektion des Matrixabsorbers auf eine dahinterliegende Ebene  $\Pi_0$  durchgeführt. Abbildung 3.14 zeigt die Geometrie des projizierten Gitters.

Für die Berechnung des direkten Transmissionsgrades wurden folgende Vereinfachungen und Annahmen getroffen: Reflektierte, gebeugte und diffuse Strahlung wird nicht berücksichtigt. Der direkte Transmissionsgrad ist der Quotient aus besonnener Fläche  $f_{bes}$  und Referenzfläche  $f_{ref}$ . Nach Abbildung 3.14 gilt:

$$f_{bes} = \Omega \omega | \sin \chi | \quad (3.14)$$

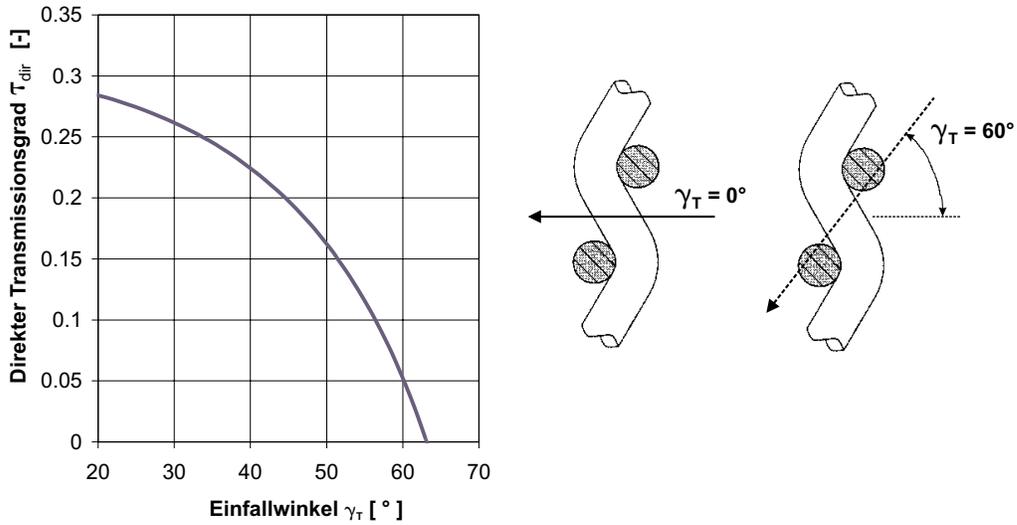


Abbildung 3.12: Abhängigkeit des direkten Transmissionsgrades  $\tau_{dir}$  eines Gewebes vom Einfallswinkel  $\gamma_T$  (hier:  $\psi = 0.3$ ,  $\gamma_{T,Gr} \approx 63^\circ$ )

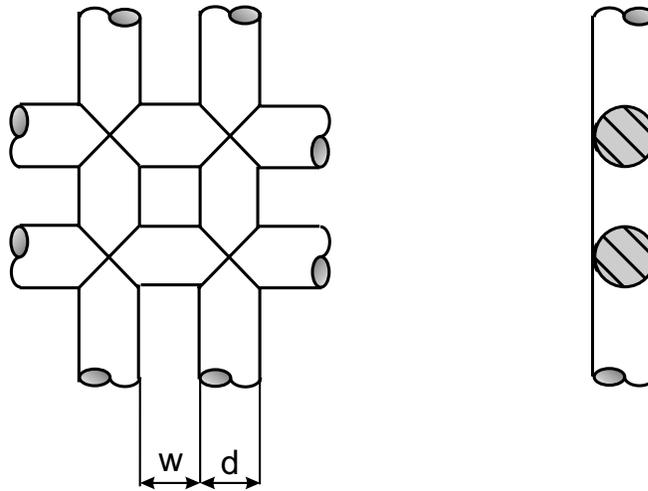


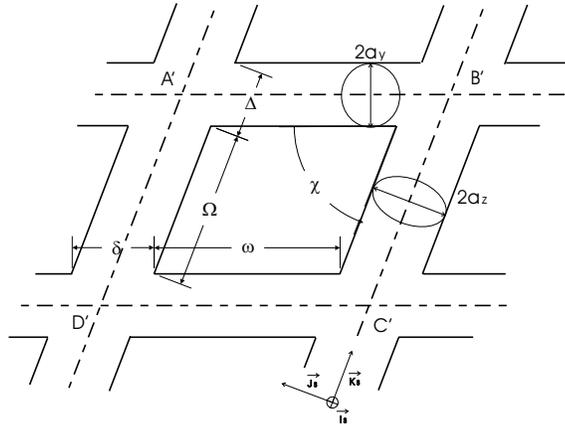
Abbildung 3.13: Geometrie eines Drahtgitters mit Quadratmaschen

und

$$f_{ref} = (\Omega + \Delta)(\omega + \delta) |\sin \chi| \quad (3.15)$$

Daraus ergibt sich für den direkten Transmissionsgrad  $\tau_{dir}$ :

$$\tau_{dir} = \frac{f_{bes}}{f_{ref}} \quad (3.16)$$

Abbildung 3.14: Geometrie der auf die Ebene  $\Pi_0$  projizierten Matrix

$$\tau_{dir} = \frac{\Omega}{\Omega + \Delta} \frac{\omega}{\omega + \delta} \quad (3.17)$$

Unter Einarbeitung der einzelnen von der jeweiligen Gittergeometrie abhängigen Längen und des momentanen Sonnenstandes erhält man zusammenfassend

$$\tau_{dir} = \left[ 1 - \frac{1 - \sqrt{\psi}}{|\cos \alpha_S|} \right] \left[ 1 - \frac{(1 - \sqrt{\psi}) \sqrt{\cos^2 \alpha_S + \sin^2 \gamma_S \sin^2 \alpha_S}}{|\cos \alpha_S \cos \gamma_S|} \right], \quad (3.18)$$

oder mit

$$\alpha_T = \alpha_S - \alpha_M$$

$$\gamma_T = \gamma_S - \gamma_M$$

$$\tau_{dir} = \left[ 1 - \frac{1 - \sqrt{\psi}}{|\cos \alpha_T|} \right] \left[ 1 - \frac{(1 - \sqrt{\psi}) \sqrt{\cos^2 \alpha_T + \sin^2 \gamma_T \sin^2 \alpha_T}}{|\cos \alpha_T \cos \gamma_T|} \right] \quad (3.19)$$

### 3.2.4.1 Gültigkeitsbereich

Da  $\tau_{dir}$  immer zwischen 0 und 1 liegen muß, ist der Winkelbereich abzugrenzen, für den die Formel (3.19) negative Ergebnisse liefert. Die Winkel, für die die Formel  $\tau_{dir} = f(\psi, \alpha_T, \gamma_T)$  demnach nicht gültig ist, werden als **Grenzwinkel** bezeichnet, für sie ist  $\tau_{dir}$  gleich Null.

**Grenzwinkel  $\alpha_{T,Gr,min}$  und  $\alpha_{T,Gr,max}$** 

Das Gültigkeitsgebiet, innerhalb dessen sich der resultierende Azimutalwinkel  $\alpha_T$  bewegen muß, lautet also  $\alpha_{T,Gr,min} \leq \alpha_T \leq \alpha_{T,Gr,max}$ , mit

$$\alpha_{T,Gr,min} = \frac{180^\circ}{\pi} \arccos \left( -1 + \sqrt{\psi} \right) \quad (3.20)$$

$$\alpha_{T,Gr,max} = \frac{180^\circ}{\pi} \left( 2\pi - \arccos \left( -1 + \sqrt{\psi} \right) \right) \quad (3.21)$$

**Grenzwinkel  $\gamma_{T,Gr}$** 

Das Gültigkeitsgebiet für den resultierenden Elevationswinkel  $\gamma_T$  lautet für  $\gamma_S \geq 0$  (Sonne über dem Horizont)  $\gamma_{T,Gr,min} \leq \gamma_T \leq \gamma_{T,Gr,max}$ , mit

$$\gamma_{T,Gr,max} = \frac{180^\circ}{\pi} \arcsin \left( \sqrt{\frac{1 - (1 - \sqrt{\psi})^2}{1 + (1 - \sqrt{\psi})^2 \tan^2 \alpha_T}} \right) \quad (3.22)$$

$$\gamma_{T,Gr,min} = -\gamma_{T,Gr,max} \quad (3.23)$$

**Grenzwinkel  $\gamma_{T,Pkt}$** 

Weiterhin wird der Grenzwinkel  $\gamma_{T,Gr,max}$  zu  $\gamma_{T,Pkt}$  definiert, wenn  $\alpha_T$  gleich  $\alpha_{T,Gr,min}$  ist. Dann gilt:

$$\gamma_{T,Pkt} = \frac{180^\circ}{\pi} \arcsin \left( \sqrt{\frac{1 - (1 - \sqrt{\psi})^2}{2 - (1 - \sqrt{\psi})^2}} \right) \quad (3.24)$$

**3.2.4.2 Graphische Darstellung**

Das Gültigkeitsgebiet der Berechnungsformel  $\tau_{dir} = f(\psi, \alpha_T, \gamma_T)$  wird nun in der Ebene ( $\alpha_T \times \gamma_T$ ) graphisch dargestellt. Dazu werden die beiden Zwischenparameter  $\alpha_P$  und  $\gamma_P$  eingeführt:

$$\begin{aligned} \alpha_P &= | \alpha_T - 180^\circ | \\ \gamma_P &= | \gamma_T | \end{aligned}$$

Der Gültigkeitsbereich der Formel (3.19) ergibt sich in Abbildung 3.15 zwischen  $\alpha_P = 0$ ,  $\gamma_P = 0$  und den beiden Grenzkurven  $\alpha_P = f_1(\psi)$  und  $\gamma_P = f_2(\alpha_P, \psi)$ . Für  $\psi = 0.3$  und  $\psi = 0.5$  sind die Grenzkurven im folgenden Diagramm 3.15 dargestellt. Die auf den Grenzkurven liegenden Wertepaare für  $\alpha_P$  und  $\gamma_P$  repräsentie-

ren die Einstrahlwinkel, ab denen  $\tau_{dir}$  zu Null wird, und damit die Matrix im zugehörigen Neigungswinkel  $\alpha_M$  bzw.  $\gamma_M$  im Luftzwischenraum zur Verschattung von Flächen im dahinterliegenden Raum eingesetzt werden kann.

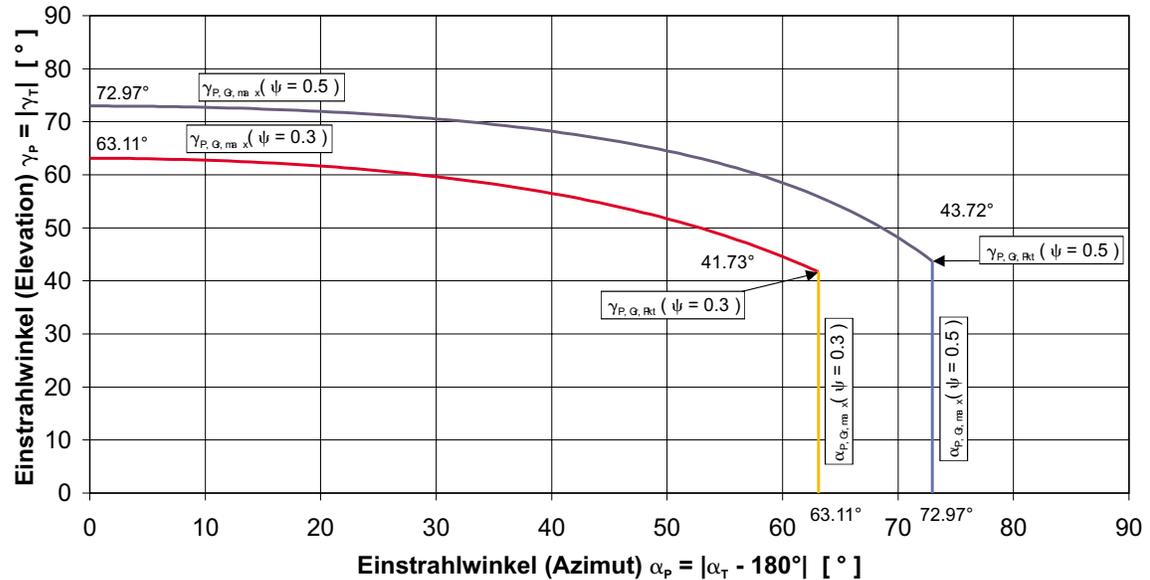


Abbildung 3.15: Gültigkeitsbereich der Formel  $\tau_{dir} = f(\psi, \alpha_T, \gamma_T)$  für  $\psi = 0.3$  und  $\psi = 0.5$

### 3.2.5 Tagesverläufe des direkten Transmissionsgrades

Im vorhergehenden Abschnitt wurden die zur Berechnung des direkten Transmissionsgrades  $\tau_{dir}$  eines Matrixabsorbers in Abhängigkeit von Geometrie und Einstrahlwinkel notwendigen Zusammenhänge dargestellt. An dieser Stelle soll noch einmal darauf hingewiesen werden, daß der Begriff der **Verschattung** lediglich als Synonym für den Fall  $\tau_{dir} = 0$  verwendet wird, hier aber nicht im Sinne eines Blendschutzes aus der Blickrichtung des Betrachters im dahinterliegenden Raum zu verstehen ist. Im Tagesverlauf ändern sich die Einstrahlverhältnisse auf einen fest eingebauten Matrixabsorber kontinuierlich mit der Sonnenposition. Im Folgenden werden für die geographische Lage von München die daraus resultierenden Tagesverläufe des Transmissionsgrades für verschiedene Himmelsorientierungen (Azimut) und Neigungswinkel des Matrixabsorbers dargestellt und diskutiert. Dabei wird das über den Jahresverlauf mögliche Spektrum der Sonnenbahnen jeweils durch die Tage der Sommersonnenwende (21.6. bzw. 21.12., Sonnenhöchst- bzw. Sonnentiefststand) sowie einen dazwischenliegenden Tag (hier: kalendarischer Herbstbeginn, 21.9.) exemplarisch aufgetragen. Um über den Tagesverlauf

eine kontinuierliche Verschattung zu erzielen, müsste ein Matrixabsorber entsprechend dem Sonnenstand nachgeführt werden.

## Fassadenorientierung und Variation des Neigungswinkels

### Südorientierung

Nach Abbildung 3.16 erreicht der Transmissionsgrad  $\tau_{dir}$  für eine südorientierte Fassade mit positiv geneigter Matrix ( $\gamma_M = 20^\circ$ ) im Winterfall aufgrund der tiefstehenden Sonne um die Mittagszeit herum sein Maximum ziemlich genau beim Wert der freien Siebfläche  $\psi$ , da die Einstrahlung auf das Gewebe dann praktisch senkrecht erfolgt. Auch am 21.9. ist die Sonnenbahn noch so hoch, daß  $\tau_{dir}$  zwischen 10 und 14 Uhr nur 10 - 20% unter dem Wert vom 21.12. bleibt. Erst bei sehr hoher Sonnenbahn ist bei dieser Konfiguration eine Reduktion von  $\tau_{dir}$  um 40% und mehr möglich. Vor 10 Uhr und nach 14 Uhr wird keine direkte Einstrahlung mehr transmittiert.

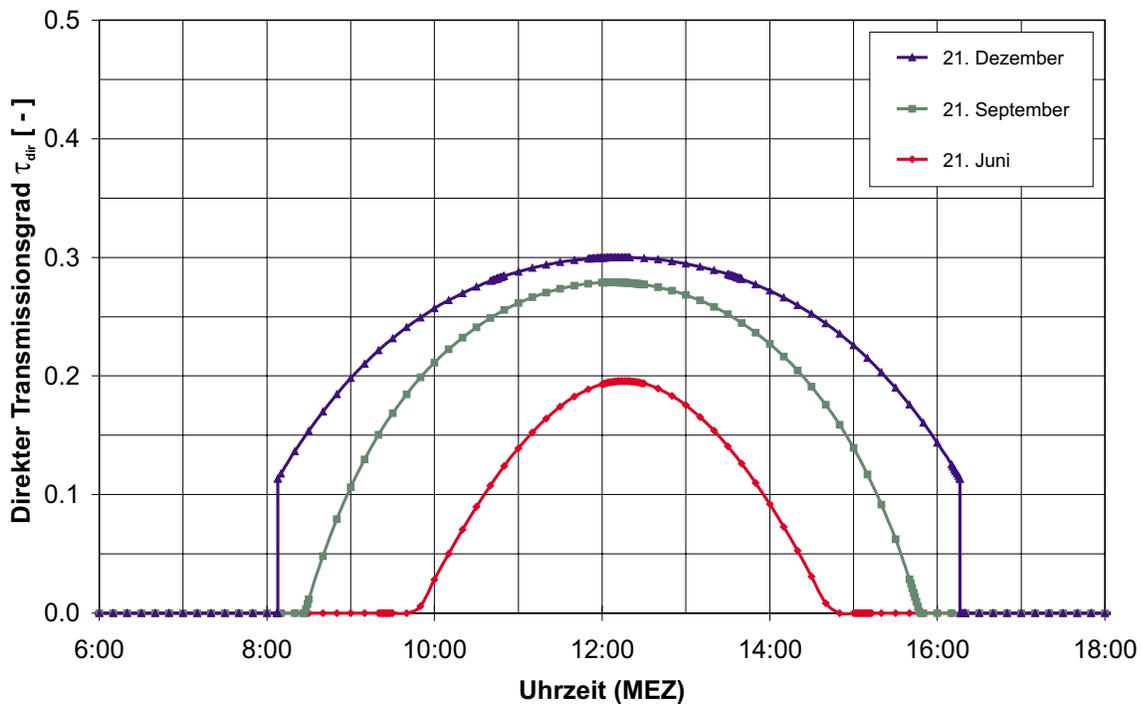


Abbildung 3.16: Tagesverläufe des Transmissionsgrads einer südorientierten Matrix ( $\psi = 0.3$ ) bei einem Neigungswinkel von  $\gamma_M = 20^\circ$ , München ( $\varphi = 48^\circ 10'$ )

Bei vertikaler Einstellung wird  $\tau_{dir}$  der gleichen Matrix für den 21.6. den ganzen Tag zu Null, während  $\tau_{dir}$  für den Herbst- und Winterfall noch bei maximal 0.2 und 0.29 liegt. Neigt man die Matrix negativ um  $\gamma_M = -20^\circ$ , erreicht man nach

Abbildung 3.17 auch für den Herbstfall bereits annähernd vollständige Verschattung. Der maximale Wert für  $\tau_{dir}$  liegt bei 0.23. Bei Südorientierung wird  $\tau_{dir} = 0$  im Winterfall erst für Neigungswinkel der Matrix  $\gamma_M$  kleiner als  $-45^\circ$  erreicht. Das bedeutet bei Verwendung dieser einen Matrix für die Verschattung der gesamten Fensterhöhe mindestens eine notwendige Luftzwischenraumtiefe der gleichen Größe.

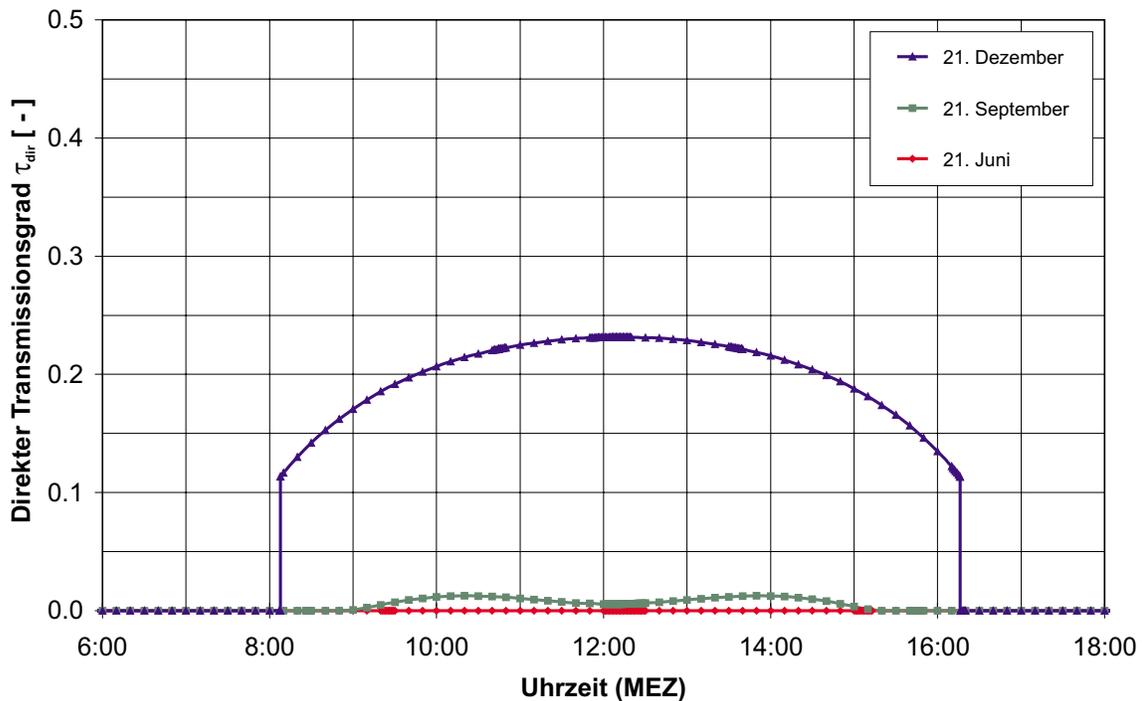


Abbildung 3.17: Tagesverläufe des Transmissionsgrades einer südorientierten Matrix ( $\psi = 0.3$ ) bei einem Neigungswinkel von  $\gamma_M = -20^\circ$ , München ( $\varphi = 48^\circ 10'$ )

Für Matrixabsorber mit größerer freier Siebfläche  $\psi$  ergeben sich qualitativ die gleichen Verläufe, die entsprechend höhere Werte annehmen, bzw. eine Verschattung erst bei größeren Einstrahlwinkeln ermöglichen. So liegt beispielsweise  $\tau_{dir}$  im Winterfall mit  $\psi = 0.5$  und  $\gamma_M = -45^\circ$  immer noch bei etwa 0.25.

### Westorientierung

Bei einer westorientierten Fassade sind die resultierenden Einstrahlwinkel aufgrund der geringen Sonnenhöhen in den Nachmittagsstunden insgesamt kleiner, so daß nach Abbildung 3.18 mit einer um  $-20^\circ$  geneigten Matrix auch im Sommerfall keine Verschattung mehr möglich ist. Es treten für den genannten Fall  $\tau_{dir}$ -Werte von um 0.25 auf, wenn auch im Winterfall aufgrund der früher untergehenden Sonne für kürzere Zeit als im Herbst- und Sommerfall.

Bei noch stärker geneigter Matrix ( $\gamma_M = -45^\circ$ ) sinkt  $\tau_{dir}$ , die Zeiträume während

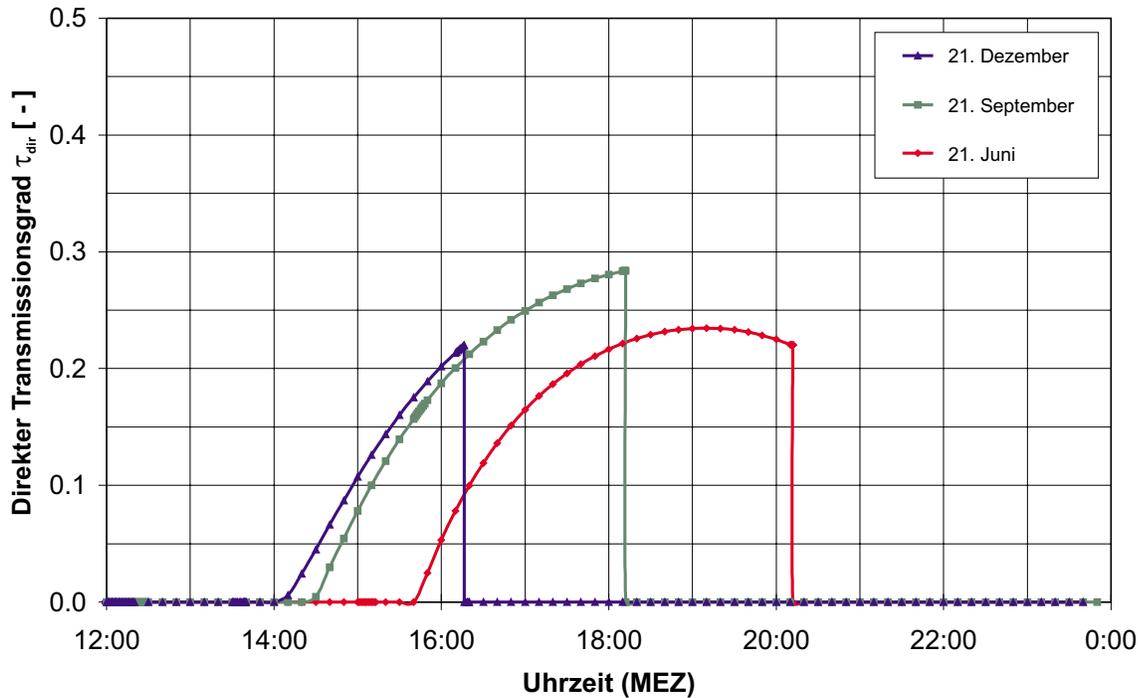


Abbildung 3.18: Tagesverläufe des Transmissionsgrades einer westorientierten Matrix ( $\psi = 0.3$ ) bei einem Neigungswinkel von  $\gamma_M = -20^\circ$ , München ( $\varphi = 48^\circ 10'$ )

derer solare Einstrahlung direkt die Matrix passiert, werden wesentlich kürzer. Eine vollständige Verschattung während des gesamten Zeitintervalls der Besonnung der Fassade ist jedoch wegen der vor Sonnenuntergang gegen Null laufenden Sonnenhöhe im Gegensatz zur Südfassade grundsätzlich nicht möglich.

## 3.2.6 Optische Effekte bei der Durchsicht von Matrixabsorbern

### 3.2.6.1 Durchsicht eines einzelnen Matrixabsorbers

Die Durchsicht durch einen Matrixabsorber aus Drahtgewebe oder -gitter hängt sowohl von der freien Siebfläche  $\psi$ , als auch von den absoluten Dimensionen der Drahtstärke  $d$  bzw. der Maschenweite  $w$  ab. Je feiner das Gewebe, desto heller der Eindruck bei Durchsicht von innen, bzw. kann ein mit dünnen Einzeldrähten gewebtes Material wesentlich engmaschiger verarbeitet sein, als ein grobes Material, um den gleichen Helligkeitseindruck zu vermitteln. Dies liegt an der Streuung an den gekrümmten Oberflächen der Gewebe, die mit zunehmender Maschenweite bzw. abnehmender Drahtstärke steigt. Die Durchsicht durch ein vertikal im Fensterkasten gespanntes Drahtgewebe wird durch ein feines Gewebe weniger beeinträchtigt als durch ein grobes Gewebe. Das liegt daran, daß die feinen Drähte nur

jeweils sehr kleine Ausschnitte des Ausblicks wegnehmen und das Auge deshalb einen insgesamt sehr vollständigen, wenn auch etwas unscharfen Eindruck der Außenwelt gewinnt. Auch der Einfluß des Abstands des Auges vom betrachteten Gewebe ist so zu erklären. Neben den reinen Geometriegrößen hängt der Helligkeitseindruck bzw. die Durchsicht aber auch vom Neigungswinkel ab, unter dem das Gewebe betrachtet wird, was Gegenstand des Unterkapitels 3.2.4. Wird das Gewebe aus der Blickrichtung der Flächennormalen herausgedreht, bei der es der Geometrie entsprechend maximale Durchsicht erlaubt, nimmt die Durchsicht sukzessive ab, bis irgendwann der sogenannte Grenzwinkel erreicht wird, jenseits dessen es opak wird, also keine Durchsicht mehr erlaubt.

### 3.2.6.2 Durchsicht zweier Matrixabsorber – Moiré-Effekt

Wenn zwei oder mehr geometrische **Rasterstrukturen** (z.B. aus alternierend angeordneten lichtundurchlässigen und transparenten Streifen zusammengesetzte Strukturen) überlagert werden, ergeben sich an einigen Stellen helle, an anderen Stellen dunklere Bereiche. Diese Wechselwirkung zwischen zwei geometrischen Mustern nennt man **Moiré-Effekt** (sinngemäß: „Muster“, „Lichteffekt“). In der Optik wird diese Überlagerungserscheinung von Rastern auch als **mechanische Interferenz** bezeichnet [67]: Die geometrische Struktur der Raster liegt um einige Größenordnungen oberhalb des Bereichs der Lichtwellenlänge. Die Ursache für die Wahrnehmung des Moiré-Effektes ist die Lichtabsorption der hintereinander liegenden Strukturen. Flächen, bei denen z.B. zwei Gitterdrähte genau aufeinander geraten, wirken heller als Flächen, bei denen ein Draht neben dem anderen liegt, es gibt Stellen mit Überlagerung im Gleichtakt und mit solchen im Gegenteil. Viele Werke der Op Art (optical art) der 60er und 70er Jahre des letzten Jahrhunderts spielen mit diesem Effekt. Abbildung 3.19 zeigt die zu erwartenden Moiré-Streifen, wenn die erzeugenden Strukturen nahezu periodisch sind und sich nur wenig voneinander unterscheiden, wie es beim Einsatz von Drahtgeflechten der Fall ist.

Beim Einsatz von Drahtgeweben im Fensterbereich ist der Moiré-Effekt zu berücksichtigen, der besonders deutlich erscheint, wenn der Betrachter einen Abstand zur Überlagerungsfigur einnimmt, bei dem die einzelnen Streifen des erzeugenden Rasters nicht mehr scharf auf der Netzhaut abgebildet werden [7]. In Kapitel 5 wird auf den Moiré-Effekt beim Einsatz von Drahtgeweben im Fensterkasten einer Doppelfassade abhängig von Gewebeanzahl und -position im Rahmen der getesteten Konfigurationen eingegangen.

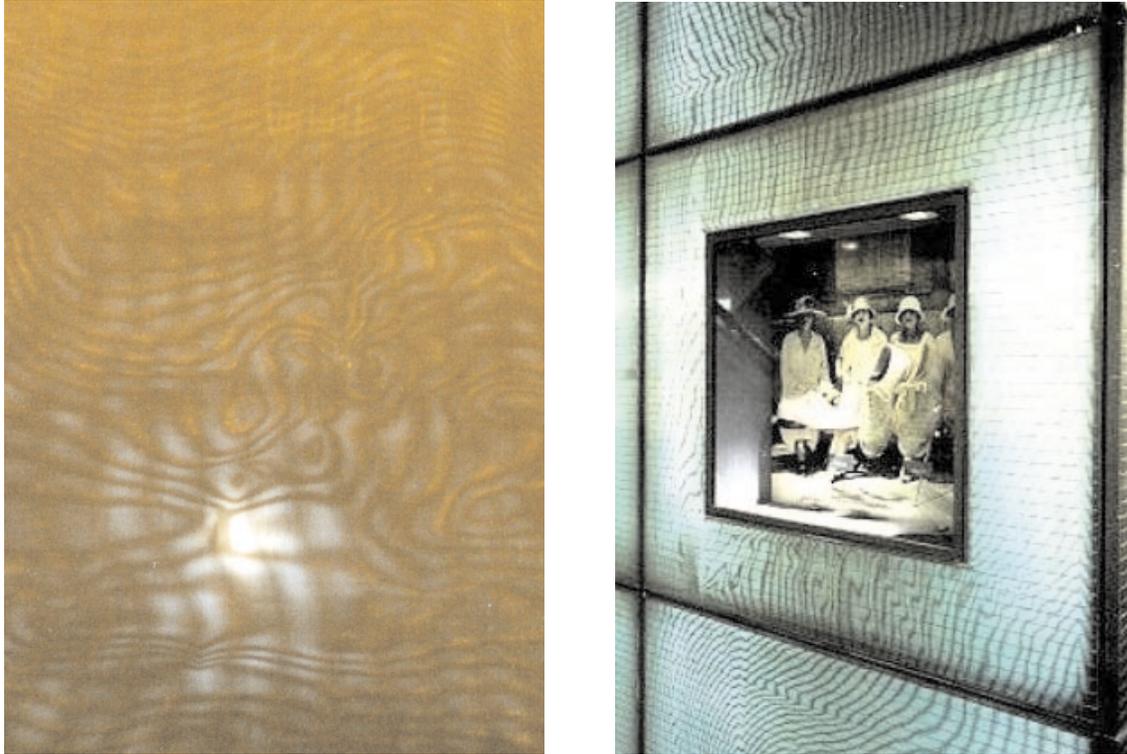


Abbildung 3.19: Links: Interferenzerscheinungen an unbehandelten Kupfergeweben; rechts: Moiré-Effekt an Drahtgeweben hinter einer Verglasung (Bally Shop Bahnhofstraße, Zürich [111])

### 3.3 Betriebsparameter und Konfigurationen

Der wichtigste Betriebsparameter eines Sonnenkollektors ist der **Massenstrom** des Fluids, das den Kollektor durchströmt. Sämtliche andere Einflußparameter sind durch die Bauart und Geometrie, die Einbausituation (Orientierung und Neigungswinkel) und nicht zuletzt durch die Witterungsbedingungen (Einstrahlung, Wind, Außentemperatur) festgelegt. Beim hier vorliegenden Matrixkollektor kommt als weiterer variabler Parameter die einstellbare **Abrollposition** und der **Neigungswinkel** der Matrixabsorber innerhalb des Gehäuses (Fensterkasten) hinzu. Sie werden im Folgenden als **Matrixkonfigurationen** bezeichnet. Die sinnvollerweise einzustellenden Luftmassenströme und Matrixkonfigurationen abzuschätzen, die im experimentellen Teil der vorliegenden Arbeit untersucht werden sollen, ist Inhalt des laufenden Unterkapitels.

Zunächst aber wird das Potential zur möglichen **Betriebszeiterhöhung** einer Doppelfassade anhand des Testreferenzjahres für München (TRY9) abgeschätzt. Aus dem notwendigen Temperaturhub zwischen Außenluft und notwendiger Zuluft-

temperatur wird der **Luftmassenstrom** errechnet, der mit einem Matrixkollektor erwärmt werden kann.

Die Matrixkonfiguration beeinflusst das Wärmeübergangs- und Strömungsgeschehen im Matrixkollektor und läßt deshalb Rückwirkungen auf den Wirkungsgrad und den Temperaturhub erwarten. Dazu werden an dieser Stelle jedoch nur qualitative Vorüberlegungen angestellt, um eine sinnvolle Vorauswahl zu treffen. Die aus sonnenschutz- bzw. blendschutztechnischen Gründen interessanten Matrixkonfigurationen können dagegen konkret mit Hilfe des Berechnungsmodells (Abschnitt 3.2.4) ausgewählt werden.

### 3.3.1 Betriebsparameter des Matrixkollektors in Doppelfassaden

#### Erhöhung der Fassadenbetriebszeit

Das Erweiterungspotential von Doppelfassaden in Bezug auf die Fensterlüftung liegt vor allem in den bei Einfachfassaden begrenzenden Faktoren **Windgeschwindigkeit** und **Außentemperatur** begründet, Außenlärm wird hier nicht näher betrachtet. Gegenüber einer Einfachfassade ergibt sich eine Ausweitung der Betriebszeiten, da die Windlasten an der Doppelfassade abgebaut werden können, und somit eine Fensterlüftung bis zu Windgeschwindigkeiten von etwa 8 m/s ohne Zugserscheinungen im Raum möglich wird [9]. Wird die Außenluft weiterhin nicht direkt, sondern über den höher temperierten Luftzwischenraum den Räumen zugeführt, kann bis zu Außentemperaturen  $\geq 5^{\circ}\text{C}$  über die Fenster gelüftet werden [107]. Geht man davon aus, daß ähnlich wie bei der Quelllüftung (letztendlich ist die Fensterlüftung nichts anderes) Untertemperaturen von nur 2 bis 3 K physiologisch optimal sind, rückt diese Grenze der Außentemperatur auf  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  nach oben. Im Luftzwischenraum kann bei ausreichender Durchströmung nämlich nicht mit mehr als 5 bis 8 K Temperaturhub gerechnet werden. Die Außenlufttemperaturen wiederum liegen beispielsweise in Deutschland gemäß den Testreferenzjahren (TRY) zwischen 1200 und 1500 Stunden pro Jahr während der Betriebszeit (werktags zwischen 7 und 19 Uhr) bei  $10^{\circ}\text{C}$  und darunter, was etwa 50% der gesamten Betriebszeit entspricht. Nachdem andererseits Außentemperaturen von  $\leq -5^{\circ}\text{C}$  während der Betriebszeit in Deutschland fast nie vorkommen, könnte mit einem Temperaturhub in der Doppelfassade von bis zu 25 K eine Lüftung über die Fassade während dieser kalten 50 % der Betriebszeit mit Außentemperaturen  $< 10^{\circ}\text{C}$  bewerkstelligt werden. Dieser zusätzliche Temperaturhub kann durch die Integration von Matrixabsorbern in den Luftzwischenraum erreicht werden, wie im Folgenden zu zeigen sein wird.

Dazu muß zunächst einmal der Frage nachgegangen werden, ob das Strahlungsangebot für den jeweils notwendigen Temperaturhub ausreicht. Grundsätzlich ist aus den TRY abzuleiten, daß in mitteleuropäischen Klimaregionen sehr niedrige Außentemperaturen in der Regel nur an klaren, strahlungsreichen Tagen vorkommen. Bei trübem, strahlungsarmem Wetter liegen die Lufttemperaturen dagegen meist deutlich über dem Gefrierpunkt, so daß dann auch in der Doppelfassade nur geringe Temperaturhübe erreicht werden müssen. Während der anderen, warmen 50% ( $T_{\infty} \geq 10^{\circ}\text{C}$ ) der Betriebszeit genügt die Temperaturerhöhung der Luft im Luftzwischenraum ohne zusätzliche Maßnahmen. Teilweise kann es aber hier zu Überhitzungserscheinungen im Luftzwischenraum kommen, insbesondere bei Außentemperaturen  $\geq 20^{\circ}\text{C}$ , die etwa 500 h (15%) der Betriebszeit ausmachen.

### Luftmassenstrom und Temperaturhub

Soll über den in der Doppelfassade integrierten Matrixkollektor gelüftet werden, so muß der dazu notwendige Luftmassenstrom auf eine bestimmte Zulufttemperatur erwärmt werden. Diese soll im Winterfall der Lufttemperatur des Innenraums möglichst nahe kommen, um physiologisch unbehagliche Zustände durch zu kalte Zuluft zu vermeiden. Im Heizfall liegt die Zulufttemperatur günstigerweise über der Raumtemperatur, um einen Heizbeitrag leisten zu können. Das hier vorgestellte Konzept basiert nicht auf einer rein natürlichen Fensterlüftung, weil die Zuluftherwärmung und -strömung über den Matrixabsorber zwangskonvektiv stattfinden sollte, wie weiter oben bereits erläutert wurde. Vielmehr handelt es sich um eine mechanische Lüftung des Innenraums, die den notwendigen Grundluftwechsel gewährleistet. Die Fenster sind aber offenbar, um den Luftwechsel individuell beeinflussen zu können.

Der notwendige Massenstrom zur Lüftung eines Büroraumes ergibt sich aus dem notwendigen Luftwechsel. Er liegt im Büro noch mindestens bei etwa  $2\text{ h}^{-1}$ , gegen kleinere Luftwechsel sprechen die heute noch zu großen Verunreinigungsquellen [37]. Geht man von einem  $15\text{ m}^2$ -Raum ( $3\text{ m} \times 5\text{ m}$ ) mit  $37.5\text{ m}^3$  Luftvolumen aus, so erhält man einen notwendigen Luftvolumenstrom von  $75\text{ m}^3/\text{h}$ , was etwa einem Massenstrom von  $25\text{ g/s}$  entspricht. Für  $\dot{M} = 25\text{ g/s}$  erreichte KOLB [70] mit seinem Matrixkollektor im Frischluftbetrieb ca.  $25\text{ K}$  Temperaturhub bei einem Wirkungsgrad von etwa 60%. So ist beispielsweise im Winterfall bei  $-5^{\circ}\text{C}$  Außentemperatur und einer direkten Sonneneinstrahlung von  $800\text{ W/m}^2$  (Südorientierung) der obengenannte Luftmassenstrom von  $0.025\text{ kg/s}$  notwendig, um eine Zuluftvorwärmung auf  $20^{\circ}\text{C}$  zu erreichen. Es wäre also denkbar, die Fassade des beschriebenen Büroraumes in einer Achse (z.B.  $1\text{ m}$  Breite,  $1.5\text{ m}$  Höhe, Aperturfläche  $1.5\text{ m}^2$ ) als Matrixkollektor zu gestalten, über den der gesamte Grundluftvolumenstrom vorgewärmt werden kann.

Eine Abschätzung der erreichbaren Temperaturhöhe der Luft kann für verschiedene Einstrahlungswerte und Massenströme über eine einfache Energiebilanzierung (1. Hauptsatz der Thermodynamik) am Kollektor vorgenommen werden:

$$\dot{M} \cdot c_p \cdot (T_{F,aus} - T_{F,ein}) = \eta_{th} \cdot \dot{G}_{Fas} \cdot A_{Abs} \quad (3.25)$$

### Heizlast und Kühllast

Allgemein gilt für die zur Aufheizung oder Abkühlung eines Fluidmassenstroms  $\dot{M}$  von  $T_1$  auf  $T_2$  notwendige Wärmeleistung  $\dot{Q}$ :

$$\dot{Q} = \dot{M} \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.26)$$

Unterstellt man wieder den obengenannten 15 m<sup>2</sup>-Bürraum und nimmt ferner idealisierterweise an, daß Wärmegewinne und -verluste nur über die Fassade stattfinden, so beträgt die einstrahlungsbedingte Kühllast über die transparenten Fensterkästen (2 × 1.5 m<sup>2</sup>, Fensterflächenanteil  $f = 0.4$ ) an einem strahlungsreichen Wintertag an einer Südfassade zur Mittagszeit ohne Sonnenschutz beispielsweise 1500 W oder  $\dot{q}_K = 100 \text{ W/m}^2$ . Dies ist etwa das Doppelte dessen, was an Wärmebedarf durch die Lüftung mit kalter Außenluft und einem Luftwechsel von 2 h<sup>-1</sup> entsteht ( $\dot{q}_H = 50 \text{ W/m}^2$ ). Wird die Gesamtkühllast durch den Einsatz von Matrixabsorbern in so einem Fall auf z.B. 40 W/m<sup>2</sup> gesenkt, so verbleibt ein geringer Restwärmebedarf durch Lüftung von etwa 10 - 20 W/m<sup>2</sup>, der durch die am Matrixabsorber vorgewärmte Luft fast bis auf Null gesenkt werden kann. Die Vorteile einer solchen gesteuerten Wärmeabgabe in den Raum über die Doppelfassade bzw. den Matrixkollektor liegen auf der Hand: Durch die gezielte Einstellung von Art, Anzahl und Position der Matrixgewebe kann der solare Strahlungseintrag in den Innenraum gesteuert werden. Gleichzeitig sorgt die im Matrixkollektor vorgewärmte Luft für eine physiologisch angenehme Lüftung, was bei einer Einfassade nur mit einer Wärmerückgewinnung aus der Raumabluft möglich wäre.

### Photovoltaisch betriebene Ventilatoren

Der oben abgeleitete Luftvolumenstrom von 75 m<sup>3</sup>/h kann mit photovoltaisch betriebenen Ventilatoren durch den Matrixkollektor gesaugt und dem Innenraum zugeführt werden. Bei einer Luftzwischenraumtiefe von 0.6 m und einer Achsbreite von 1 m ergibt sich im Fensterkollektor ein Luftwechsel von ca. 50 h<sup>-1</sup>, der bei dem notwendigen Förderdruck (stark abhängig von den Druckverlusten der Eintrittsöffnung mit Filter, Fensterkasten mit Matrixgewebe, Luftaustritt) zu einer

maximalen Leistungsaufnahme des Lüfters von etwa 20 W führt. Die Bereitstellung dieser elektrischen Leistung kann über ein monokristallines Solarmodul mit einem mittleren Modulwirkungsgrad von ca. 12 - 13% bei einer Bestrahlungsstärke von  $800 \text{ W/m}^2$  über eine Fläche von ca.  $0.2 \text{ m}^2$  (z.B.  $2 \times 10$  Solarzellen in Reihe geschaltet) erfolgen. Die Solarzellen könnten beispielsweise unmittelbar über dem Lufteintritt als etwa 20 cm hohes PV-Band über die gesamte Achsbreite eines Fensterkastens in der Sekundärfassade integriert werden.

### 3.3.2 Matrixkonfigurationen

Es sind drei **Standardpositionen** der Matrixgewebe im Luftzwischenraum möglich, die in Abbildung 3.20 schematisch dargestellt sind. Sie sind dadurch gekennzeichnet, daß die Gewebe diagonal im Luftzwischenraum an die gegenüberliegende Seite über die ganze Fensterhöhe gespannt bzw. vertikal ganz nach unten abgerollt werden.

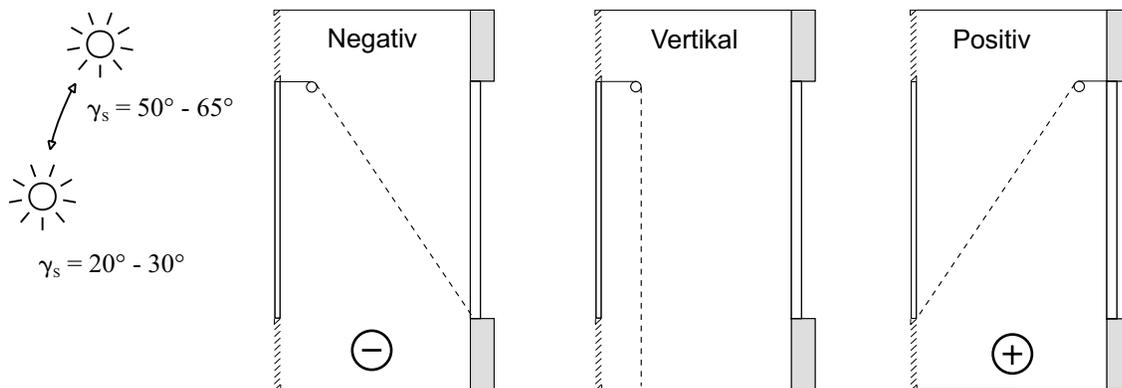


Abbildung 3.20: Drei prinzipiell denkbare Matrixpositionen für einen Fassaden-Luftkollektor: Nach unten geneigt („negativer“ Anstellwinkel, links), vertikal (mitte) und nach oben geneigt („positiver“ Anstellwinkel, rechts), und Einstrahlwinkel auf südorientierte Fassade

Abhängig von dem an Doppelfassaden realisierten Luftzwischenraum ergeben sich für diese Standardpositionen bestimmte **Neigungswinkel** der Matrixabsorber (nach unten gerichtet, **negativer** Neigungswinkel; **vertikal**,  $90^\circ$ -Winkel; nach oben gerichtet, **positiver** Neigungswinkel). Daneben sind einige – in der Regel lichttechnisch motivierte – **Sonderkonfigurationen** möglich, bei denen die Gewebe nur teilweise abgerollt sind, in unterschiedlichen Neigungswinkeln gespannt oder über Umlenkrollen geführt sind und damit eine Zonierung im Fensterbereich darstellen (siehe Abbildung 3.21).

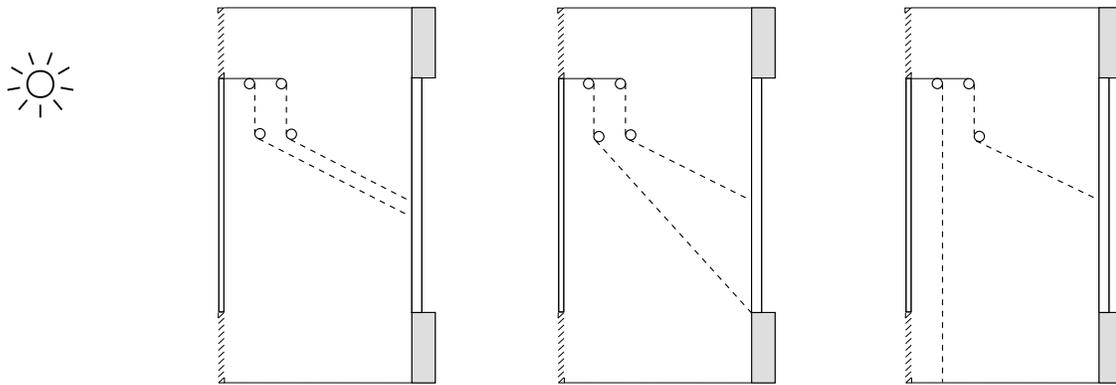


Abbildung 3.21: Drei mögliche Sonderkonfigurationen als Blendschutz

### Konfiguration als Sonnenkollektor

Ausgangspunkt für die Konzeption ist der Gedanke, das absorbierend beschichtete Matrixgewebe so in den Luftzwischenraum zu integrieren, daß der betrachtete Fassadenbereich einen möglichst effektiven Luftkollektor darstellt. Dazu ist der jeweils relevante Sonnenstand (Sonnenhöhe  $\gamma_S$ ) zu betrachten, woraus sich abhängig von Himmelsorientierung und Jahreszeit mehr oder weniger günstige – bezogen auf die **bestrahlte Absorberfläche** – Absorberpositionen ergeben (siehe Abbildung 3.20).

Während bei der Konfiguration mit positiv angestellter Matrix bei großer Sonnenhöhe die Matrix durch die Fassadentiefe zu einem Großteil verschattet ist und von daher nur diffus bestrahlt wird, ist die direkt besonnte Matrixfläche bei vertikal gespannter bzw. negativ angestellter Matrix weitgehend von der Sonnenhöhe unabhängig (im vertikalen Fall allerdings nur bei sekundärfassadennahe Anbringung). Allerdings könnte dies durch eine entsprechende Gliederung der Sekundärfassade beeinflusst werden. Ein zweiter Gesichtspunkt ist die **Durchströmungsrichtung** des Absorbers bzw. des ganzen Fensterkastens. Die dargestellten Fassadenkollektoren werden grundsätzlich von unten nach oben von Luft durchströmt. Bei einer Matrixposition mit positivem Anstellwinkel streicht die nach Durchströmung des Matrixgewebes erwärmte Luft an der im Winterfall kalten Sekundärscheibe unter entsprechenden Wärmeverlusten vorbei, was aus energetischer Sicht zu vermeiden ist. Bei vertikaler Matrix oder negativem Anstellwinkel hingegen kommt ausschließlich die kühlere in den Fensterkollektor einströmende Luft mit der Sekundärscheibe in Berührung und wird durch das Matrixgewebe hindurch primärfassadenseitig nach oben abgesaugt.

### 3.3.2.1 Konfiguration als Blendschutz

An Büroarbeitsplätzen und hier insbesondere Bildschirmarbeitsplätzen sind mäßige Leuchtdichtedifferenzen zwischen Sehobjekt (Infeld) und näherer Umgebung (Umfeld) anzustreben, wie in Abschnitt 3.2.3 erläutert wurde. Setzt man das Matrixgewebe im Luftzwischenraum zwischen Primär- und Sekundärverglasung ein, reduziert das grundsätzlich bei den hier eingesetzten feinmaschigen Geweben – abhängig von der freien Siebfläche des Gewebes – die Leuchtdichte der Fensterfläche vom dahinterliegenden Raum aus betrachtet. Neben der Geometrie des Gewebes selbst beeinflußt aber auch der Einbauwinkel der Matrix und die Blickrichtung des Betrachters – letztendlich der resultierende Blickwinkel auf das Gewebe – dessen Leuchtdichtewirkung im Raum. Wird das Gewebe also im entsprechenden Winkel – sprich im Bereich des Grenzwinkels (vgl. Abschnitt 3.2.4) und darüber – zwischen Blendquelle (z.B. Sonne) und Betrachter gespannt, wirkt es als Blendschutz. Zur konkreten Berechnung der Grenzwinkel sei auf die Teilkapitel 3.2.2 und 3.2.4 verwiesen. Neben der Direktblendung des Betrachters durch eine außenliegende Blendquelle kann eine zu hohe Leuchtdichte der Arbeitsfläche durch eine Reduktion ihrer Beleuchtungsstärke erreicht werden. Dies erreicht man, indem das Matrixgewebe so angeordnet wird, daß es die relevante Arbeitsfläche verschattet. Durch den Einsatz zweier getrennt steuerbarer Gewebelagen sind zusätzliche Einstellvariationen (siehe Abbildung 3.21), z.B. bezüglich des Absorptionsgrades, darstellbar. Außerdem können unterschiedliche Bereiche innerhalb eines Bauelements (Zonierung) realisiert werden, indem beispielsweise im Bereich des Oberlichts zwei Gewebelagen für Blendfreiheit sorgen, während im unteren Bereich nur ein Gewebe vollständig abgerollt ist und so der Sichtbezug innen-außen erhalten bleibt.

# Kapitel 4

## Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen wurden an einer **doppelschaligen Versuchsfassade** auf dem **Solaren Forschungsfeld** der TU München in Garching durchgeführt. Der geometrisch variable, speziell für **Outdoormessungen** konzipierte Doppelfassaden-Versuchsstand wurde 1999 in Zusammenarbeit mit der ALU-SOMMER GMBH (Stoob, Österreich) errichtet und zur Untersuchung des kombinierten Wärmetransports in Doppelfassaden genutzt [122]. Für die vorliegende Arbeit wurden zwei Fensterkästen der im folgenden Unterkapitel beschriebenen Versuchsfassade mit in verschiedenen Positionen einstellbaren Matrixabsorbern bestückt. Aufbauend auf den Ergebnissen der von KOLB [70] durchgeführten und mit Indormessungen validierten Untersuchungen an Matrixabsorbern werden deren Einsatzmöglichkeiten in einer realen Fassade bei typischen Betriebsbedingungen untersucht. Die **Outdoor-Messungen bei variablen Betriebs- und Umgebungsbedingungen** wurden in Anlehnung an die einschlägigen Normen (z.B. DIN 4757 [21]) bzw. an von Fachinstituten erarbeiteten Richtlinien und Testprozeduren (z.B. IEA Task 19 [34]) durchgeführt und eignen sich damit grundsätzlich für die Ermittlung der thermischen Wirkungsgrade des Doppelfassaden-Matrixkollektors. Gleichwohl lag das Hauptaugenmerk auf der experimentellen Untersuchung der thermo- und fluiddynamischen Phänomene an einer realen doppelschaligen Gebäudefassade mit integriertem Matrixkollektor. Die gewonnenen praxisrelevanten Ergebnisse können als Eingangsdaten für die Erstellung gebäudetechnischer Konzepte unter Einbeziehung von Matrixkollektoren herangezogen werden. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden zunächst der doppelschalige Versuchsstand mit den daran für die **Integration der Matrixabsorber** vorgenommenen Veränderungen, sowie die eingesetzten Absorbergewebe selbst beschrieben. Daraufhin erfolgt die Darstellung der installierten **Meßwerterfassungsanlage** sowie der **Versuchsdurchführung**. Den Versuchsergebnissen sowie deren Interpretation wird anschließend ein eigenes Hauptkapitel gewidmet.

## 4.1 Doppelfassaden-Versuchsstand

Die baulichen und konstruktiven Eigenschaften der Doppelfassaden-Versuchsstände einschließlich der Meßwarte auf dem Solaren Forschungsfeld der TU München sind von ZÖLLNER [122] detailliert beschrieben worden, so daß sich die nachfolgende Beschreibung auf die für die hier vorzustellenden Experimente notwendigen Parameter und Informationen beschränkt. Die Versuche wurden an dem in Abbildung 4.1 dargestellten, *südorientierten* Prüfstand mit verschiebbarer Sekundärfassade und dahinterliegendem Versuchsraum durchgeführt (vgl. auch Abbildung 4.2, Nr. 2). Der Versuchsstand wurde mit speziellen Konfigurationen und Einbauten versehen, die im Folgenden erläutert werden. Weitere Versuchsreihen, die nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind, fanden an einem separaten Luftkollektorelement (siehe Abbildung 4.2, Nr. 4) in *West- bzw. Südorientierung* statt.



Abbildung 4.1: Ansicht des südorientierten doppelschaligen Versuchsstands mit den beiden Fensterkästen FK1 (links) und FK2 (rechts) samt integrierten verstellbaren Matrixkollektoren und Luftabsaugkanälen, sowie dem dazwischen liegenden Schachtbereich

Die in Abbildung 4.1 gezeigte Versuchsfassade ermöglicht prinzipiell die Darstellung der wesentlichen Doppelfassadensysteme hinsichtlich der Segmentierung des Luftzwischenraums. Sie wurde hier aber ausschließlich als Fensterkasten-Fassade mit dazwischenliegendem, lufttechnisch unabhängigem Schacht betrieben, d.h. Verbindungen zum daneben liegenden Schacht der Fassade, wie Überströmöffnungen sind abgedichtet. Untersucht wurden die thermischen und strömungstechnischen Verhältnisse in jeweils einem einzelnen transparenten Fensterkasten, der als kleinste funktionale Einheit doppelschaliger Fassadensysteme angesehen werden kann und hier als Fensterkollektor ausgebildet ist. Die beiden Fensterkästen FK1 und FK2 wurden parallel vermessen, um bei identischen Umgebungsbedingungen unmittelbare Vergleiche bestimmter Parametervariationen (siehe Abschnitt 5) zu erhalten, insbesondere im Winterfall aber auch um lichttechnisch bzw. energetisch sinnvolle Konfigurationen einander gegenüberstellen zu können. Die **Breite  $B$  eines Fensterkastens** (Achismaß) war dabei grundsätzlich ebenso fest eingestellt (**90 cm**) wie der **Fassadenabstand (63 cm)** sowie die Höhe und Art der **Lufteinströmöffnungen (6 Fugen)**. Die Tabellen 4.1 und 4.2 fassen die eingestellten Geometriedaten der beiden untersuchten Fensterkästen zusammen.

Fensterkasten					Einströmöffnungen		
Höhe $H$	Breite $B$	Abstand $S$	$H/S$	$B/S$	Fugenanzahl $F_n$	Öffnungshöhe $h$	rel. Öffnungsfläche $\phi_{rel}$
[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[m]	[%]
2.4	0.9	0.63	4	1.5	6	0.14	42

Tabelle 4.1: Eingestellte Geometriedaten der beiden Doppelfassaden-Fensterkästen

Fassadenebene	Art der Verglasung	Dicke $d$ [mm]	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K]	$\tau_{sol}^+$ [%]	$\rho_{sol}^+$ [%]	Aperturfläche [m <sup>2</sup> ]
Primärfassade	ISO	6 / 12 / 6	2.8	59.1	21.5	–
Sekundärfassade	ESG	12	5.7	74	14	1.44

+ winkelunabhängiger hemisphärischer Wert

Tabelle 4.2: Eigenschaften der Verglasung der Primär- und Sekundärfassade

Beide Fensterkollektorkästen werden im offenen Saugbetrieb mit Hilfe zweier separat zu steuernder Ventilatoren bei Zwangsdurchströmung von unten nach oben im Gleichstromprinzip betrieben. Die Fassade ist mit einem umfangreichen System zur Meßdatenerfassung ausgestattet, das in Kapitel 4.3 näher erläutert wird. Aufgenommen wurden dabei sowohl die Daten der Umgebungsbedingungen (solare Einstrahlung, Außentemperatur, Luftfeuchte, Winddaten), als auch die Zustände im Luftzwischenraum der Versuchsfassade (Luft- und Oberflächentemperaturen, Strömungsgeschwindigkeiten) und des dahinter liegenden Versuchsraumes.

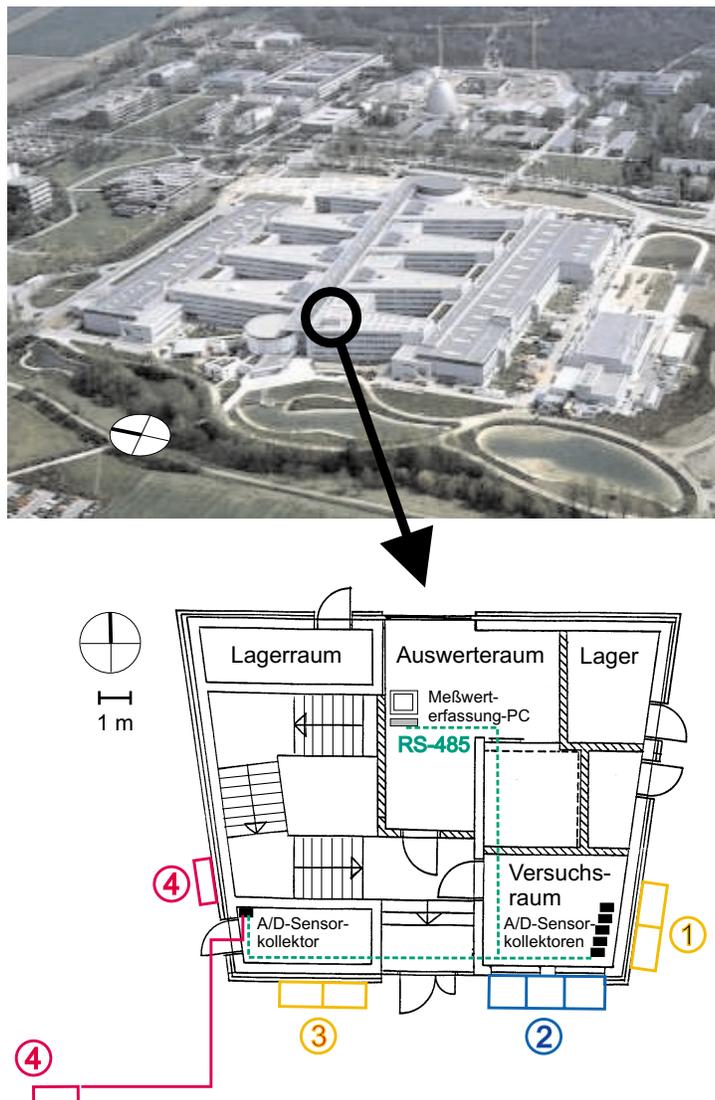


Abbildung 4.2: Lage und Grundriß der Versuchsfassaden an der Meßwarte auf dem Solaren Forschungsfeld mit den vier separaten Versuchsbereichen

## 4.2 Matrixabsorber im Luftzwischenraum

Um die Matrixabsorber in den gewünschten Positionen im Luftzwischenraum der vorhandenen Testfassade unterzubringen und variabel zu befestigen, waren verschiedene Überlegungen notwendig, die im Folgenden beschrieben werden und zu der in Abbildung 4.3 dargestellten Konstruktion führten.

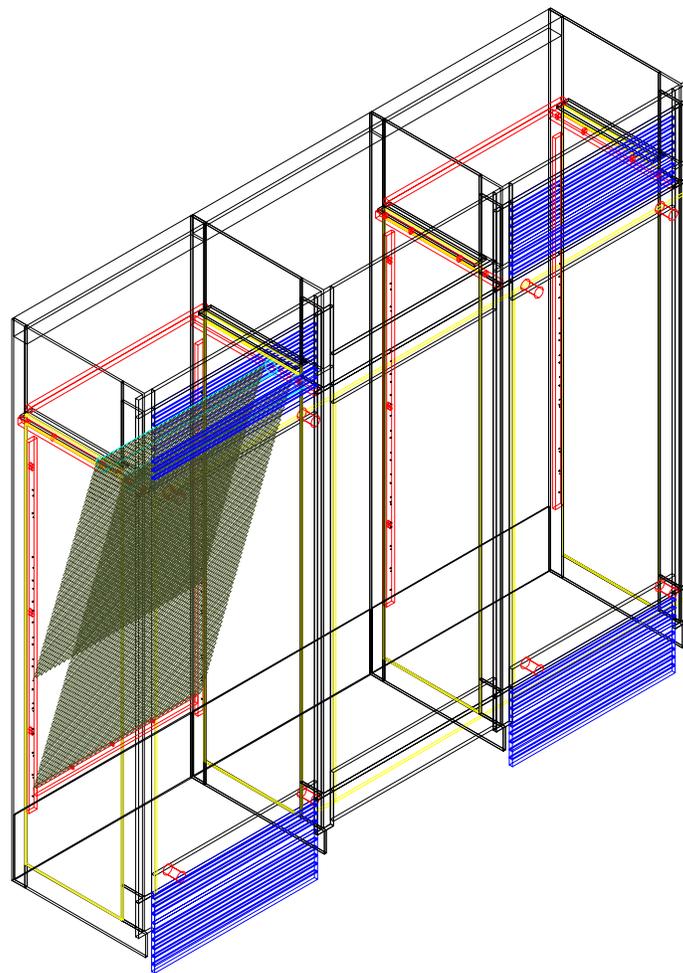


Abbildung 4.3: Dreidimensionale Ansicht der beiden unteren Fensterkästen (FK 2 links mit zwei negativ angestellten Matrixabsorbern, FK 1 rechts ohne Matrix) der Versuchsfassade mit dazwischen liegendem Schachtbereich

### 4.2.1 Variable Matrixbefestigung

Die Matrixabsorber werden jeweils auf einer speziell angefertigten Rohrwelle aus Aluminium, die im oberen Bereich des Fensterkastens (unterhalb der Luftaustrittsöffnungen) gelagert ist, nach unten abrollbar aufgewickelt (siehe Abbildung 4.4, links oben). Dazu wurde ein einfacher Klemmmechanismus sowohl für die Befestigung des Absorbergewebes auf der Welle als auch unten an der jeweils gewünschten Stelle der Primär- oder Sekundärfassade konstruiert, um möglichst kurze Umrüstzeiten zwischen den einzelnen Experimenten zu realisieren. Die Wellen können in vier unterschiedlichen Abständen von der Primär- bzw. Sekundärfassade gelagert werden. Der Matrixabsorber wird von der Welle nach unten abgewickelt und in unterschiedlichen Positionen in den Luftzwischenraum gespannt. In Abbildung 4.3 und 4.4 sind zwei in negativem Neigungswinkel von etwa  $20^\circ$  gespannte Matrixabsorber dargestellt.

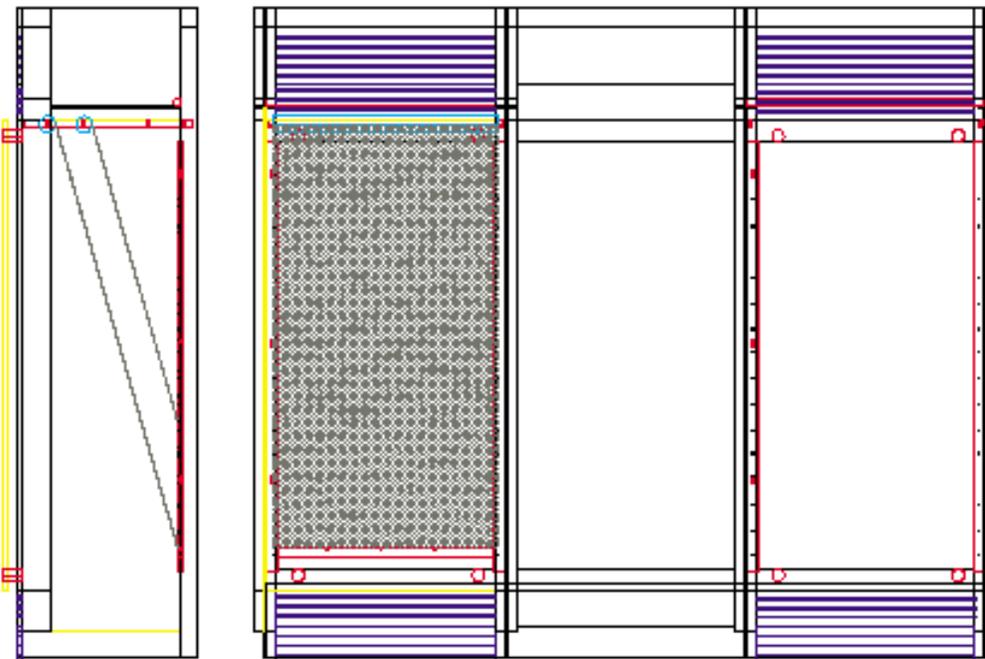


Abbildung 4.4: Zusammenstellung der Versuchsfensterkollektoren, FK 1 (rechts) ohne, FK 2 (links) mit zwei negativ angestellten Matrixabsorbern, dazwischen Schachtbereich mit opaker Rückwand

Für die Übersicht der vermessenen Matrixkonfigurationen sei auf die Abbildungen 4.11, 4.12 und 4.13 verwiesen.

### 4.2.1.1 Antrieb

Nachdem verschiedene Möglichkeiten eines Antriebs für die abrollbaren Matrixabsorber untersucht worden waren, wurde auf eine für die Fensterkollektoren im Versuchsstand aufwendige Sonderanfertigung eines in die Welle integrierten Motors zugunsten einer **manuellen Verstellung** verzichtet. Bei einer kommerziellen Lösung würde man natürlich versuchen, Antriebsmotore zu verwenden, die auch im Bereich herkömmlicher Sonnenschutzvorrichtungen eingesetzt werden. Für den Versuchsstand ist es ausreichend, die Einstellung der Matrixabsorber einmal am Tag, jeweils nach Abschluß der Experimente, bei geöffneter Fassade zu verändern. Gleichwohl wurde im oben erwähnten separaten Luftkollektorelement eine Antriebsmöglichkeit für den Einsatz in Doppelfassaden demonstriert. Das Absorbergewebe ist wiederum an seiner Oberkante mittels einer schnell lösba- ren Nut- und Stabverbindung in der Abrollwelle geklemmt. Die Unterkante des Gewebes ist in ein Aluminiumprofil geklemmt, das auf zwei vertikalen Führungsschienen läuft und über einen Zahnriemen vom Motor angetrieben wird.

### 4.2.1.2 Spannvorrichtung

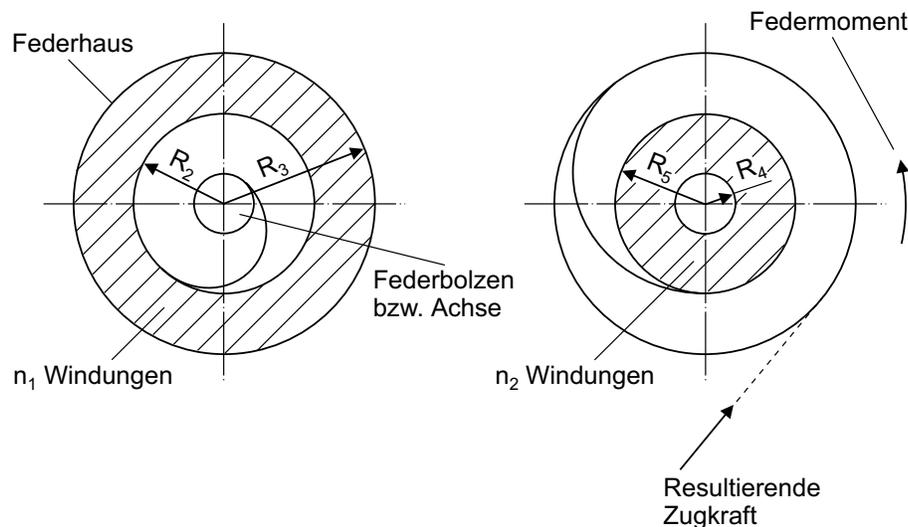


Abbildung 4.5: Spiralfeder ohne Windungsabstand im Gehäuse (Federhaus), links im abgelaufenen, rechts im aufgezo- genen Zustand

Für einen einwandfreien Ab- und Aufrollvorgang des Absorbergewebes ist eine gleichmäßig verteilte und gleichbleibende Vorspannkraft notwendig. Bei den zum Einsatz kommenden Drahtgeweben wurde eine resultierende Zugkraft in der Matrix von mindestens 40 N experimentell ermittelt. Um diese Vorspannung

in jeder Abrollposition zu gewährleisten, wurden Spiralfedern ohne Windungsabstand aus Federbandstahl den einschlägigen Normen entsprechend dimensioniert und hergestellt. Ihre Federkennlinie ist durch einen relativ gleichmäßigen, fast linearen Anstieg gekennzeichnet. Die Spiralfedern wurden in die beiden als Federhaus gearbeiteten Enden der Rohrwellen eingesetzt. Die Feder treibt einen im Federhaus gelagerten Mitnehmer an, während die Verbindung zwischen der Achse, auf der die Welle gelagert ist, und der Feder fest verschraubt ist.

#### 4.2.1.3 Abdichtung

Voruntersuchungen an einem Matrixkollektorelement zeigten, daß ohne Abdichtung bzw. großem Abstand der Matrixabsorber gegen die begrenzenden Kollektorstände ein Großteil der durchgesetzten Luft seitlich bzw. vor und hinter dem Absorber *vorbeiströmt* und somit das Gewebe nicht in der gewünschten Weise *durchströmt*. Aus diesem Grund wurde die Konstruktion der Matrixbefestigung in der Testfassade so gewählt, daß sich an allen Seiten des Matrixabsorbers Spaltmaße zu den Seiten-, Primär- und Sekundärgläsern von nicht mehr als 2 bis 3 cm ergeben. Die verbleibenden Zwischenräume wurden mit verschiedenen Mitteln abgedichtet. Die bewegliche Aufwickelwelle wurde mit einem ca. 20 cm breiten Gummistreifen gegen das Gehäuse abgedichtet. Die untere Befestigungsleiste wurde mit einem Bürstendichtungsprofil versehen. Die größten Schwierigkeiten bringt naturgemäß die Dichtung gegen die seitlichen Glasflächen mit sich, insbesondere weil sich je nach momentaner Matrixposition unterschiedliche abzudichtende Längen ergeben. Letztendlich wurden die Gewebe seitlich auf mit Moosgummi beklebten Winkelprofilen geführt, die mit Saugnäpfen an den Glasflächen fixiert wurden und jeweils in der der Matrixposition entsprechenden Länge eingesetzt wurden. Vor allem die seitliche Dichtung stellt bei einer seriennahen kommerziellen Umsetzung eines abrollbaren Matrixabsorbers ein schwer zu lösendes Problem dar. Um deren Einfluß zu untersuchen wurden in der vorliegenden Arbeit vergleichende Messungen mit und ohne seitliche Dichtungen durchgeführt.

#### 4.2.2 Einstellbare geometrische Parameter der Matrixabsorber

Ungeachtet der Geometrie der eingesetzten Matrixabsorber selbst, die bereits in Abschnitt 3.2.1.1 behandelt wurden, sollen an dieser Stelle die sich aus der Geometrie eines Fensterkastens (siehe Kapitel 4.1) sowie der im vorangehenden Unterkapitel beschriebenen Konstruktion ergebenden geometrischen Verhältnisse wiedergegeben werden.

#### 4.2.2.1 Neigungswinkel des Matrixabsorbers im Fensterkasten bei geneigter Position

Der Neigungswinkel eines Absorbergewebes ergibt sich aus der Höhe sowie der Tiefe im Luftzwischenraum, über die das Gewebe gespannt wird. Durch die Geometrie der Doppelfassade (Fassadenabstand) bedingt sind – abhängig von der Lage der Aufwickelwelle im Luftzwischenraum und der abgerollten Länge des Gewebes – bestimmte Neigungswinkel realisierbar. Die untere Fixierung findet grundsätzlich – außer bei vertikaler Position – an einer Befestigungsschiene an der Primär- bzw. Sekundärfassade statt. Theoretisch ist im Fensterkasten also jeder beliebige Neigungswinkel zwischen 0 und 180° realisierbar. Tabelle 4.3 listet für einige praxisrelevante Absenkpositionen die resultierenden Neigungswinkel der Matrixabsorber auf, wobei hier die Abrollachse nach Abbildung 4.6 jeweils in der vordersten (Sekundärfassade) bzw. hintersten (Primärfassade) Position gelagert ist und an der gegenüberliegenden Fassade an der jeweiligen Absenkposition fixiert ist.

Position der Matrix	Kurzbezeichnung	$H_M$ [m]	$\gamma_M$ [°]	$L_M$ [m]
ganz abgesenkt	1	1.60	$\pm 20$	1.70
zu 3/4 abgesenkt	0.75	1.20	$\pm 26$	1.34
zur Hälfte abgesenkt	0.5	0.80	$\pm 37$	1.00
zu 1/4 abgesenkt	0.25	0.40	$\pm 54$	0.68

Tabelle 4.3: Realisierbare Neigungswinkel der Matrixgewebe bei einer Tiefe des Luftzwischenraums von 63 cm (vgl. Abbildung 4.6)

### 4.2.3 Verwendete Gewebe und Beschichtungen

Für die Versuchsreihen werden die in Kapitel 3.2.1.2 vorgestellten, mit EBONOL C115 beschichteten **Kupferdrahtgewebe** verwendet.

#### 4.2.3.1 Matrixgeometrie

Variiert werden die beiden geometrischen Kenngrößen Maschenweite  $w$  und Drahtdurchmesser  $d$ , bzw. die daraus resultierende freie Siebfläche  $\psi$  eines quadratmaschigen Gewebes in Leinenbindung. KOLB [70] ermittelte im Rahmen der von ihm experimentell und numerisch untersuchten Geometrien ein Gewebe mit  $\psi = 0.34$  als energetisch optimal. Wesentlich kleinere Werte sind technisch nicht realisierbar, aus lichttechnischer Sicht wiederum sind freie Siebflächen  $\psi \geq 0.6$

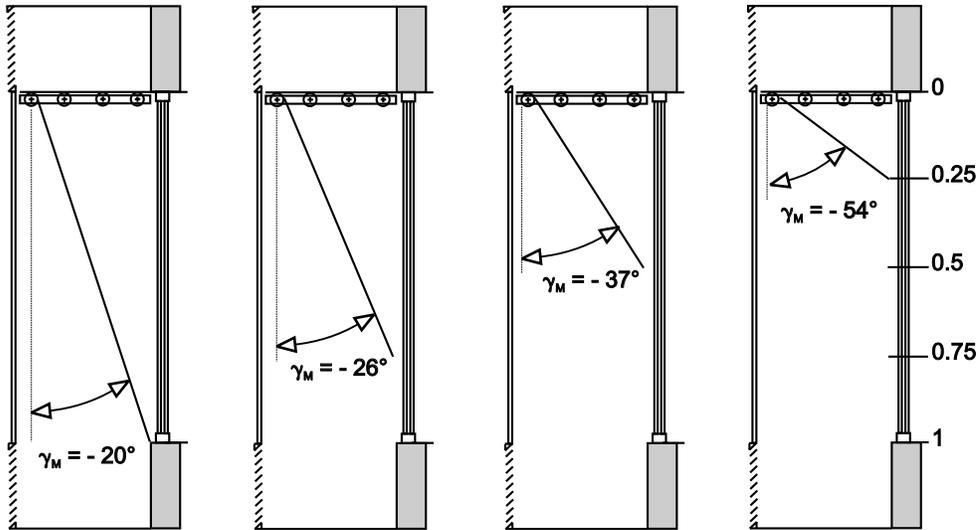


Abbildung 4.6: Neigungswinkel bei unterschiedlicher Absenkposition der Matrix und Lagerung der Abrollwelle in der vordersten Position (vgl. Tabelle 4.3)

uninteressant. Aus diesen und den in Kapitel 3.2.1.2 ausführlich beschriebenen Überlegungen heraus ergab sich die Auswahl der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Kupfergewebe nach Tabelle 4.4.

Matrix	$w$ [mm]	$d$ [mm]	$\psi$ [-]	$l$ [mm]	$a_M$ [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	$\varphi_M$ [-]	$G$ [kg/m <sup>2</sup> ]
M1	0.375	0.14	0.53	0.534	6058	0.779	0.548
M2	0.14	0.112	0.31	0.276	12761	0.618	0.717
M3	0.50	0.315	0.38	0.874	3896	0.675	1.753

Tabelle 4.4: Geometriedaten und Flächengewicht der verwendeten Kupfergewebe (Quadratmaschen in Leinenbindung), die mit den Gleichungen (3.2), (3.3), (3.4), (3.6) und (3.8) berechnet wurden; weitere Daten siehe KOLB [70])

Die bei den Experimenten eingesetzten und in Abschnitt 3.2.1.1 detailliert beschriebenen Gewebe nach Tabelle 4.4 wurden bezüglich ihres vom Einfallswinkel abhängigen Transmissionsgrades im sichtbaren Wellenlängenbereich (vgl. Abschnitt 3.2.4) am Institut für Fenstertechnik (ift) Rosenheim unter Laborbedingungen (Ulbrichtkugel) vermessen. Dabei ergaben sich die in Abbildung 4.7 dargestellten Verläufe. Der Transmissionsgrad der Matrixgewebe im gesamten Spektrum der Solarstrahlung  $\tau_{sol}$  – aufgrund der resultierenden äußeren einstrahlungsbedingten Kühllasten aus klimatechnischer Sicht interessant – wurde darüberhinaus aber auch an der Testfassade über zwei vor und hinter dem eingebauten Matrixgewebe angebrachten Strahlungspyranometer ermittelt (siehe Kapitel 5.2.2).

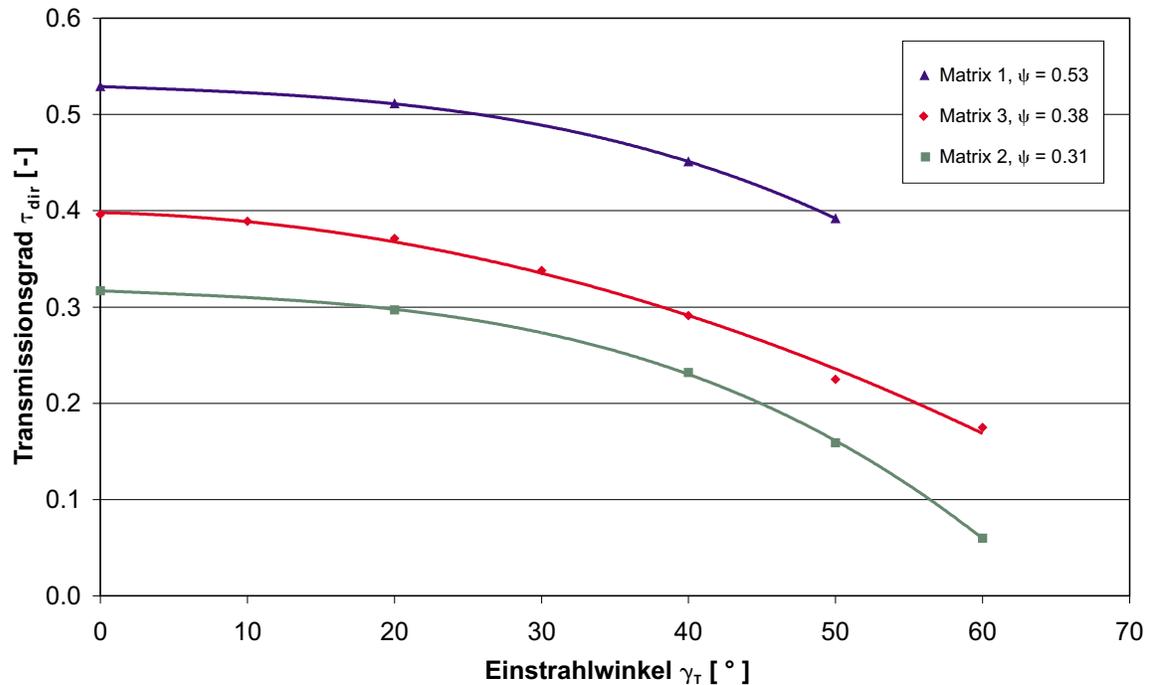


Abbildung 4.7: Richtungsabhängiger Transmissionsgrad der eingesetzten Absorbiergewebe, nach Laborvermessung (Ulbrichtkugel)

Die bei  $\gamma_T = 0^\circ$  abzulesenden Werte für den Lichttransmissionsgrad  $\tau_{vis}$  entsprechen ziemlich genau der freien Siebfläche  $\psi$  des jeweiligen Gewebes. Abweichungen hiervon ergeben sich durch die Streuung an den gekrümmten Oberflächen der Gewebe. Dieser Effekt tritt, wie in der Literatur angegeben [70], mit zunehmender Maschenweite  $w$  und mit abnehmender Drahtstärke  $d$  verstärkt auf.

#### 4.2.3.2 Matrixbeschichtung

Die mit EBONOL C115 (vgl. Abschnitt 3.2.1.2) erzielbare dunkelbraune bis schwarze Färbung beruht auf einer oberflächlichen Oxidation des Kupfers zu überwiegend  $CuO$  mit einem geringen Anteil an  $Cu_2O$  und wird bei Arbeitstemperaturen von  $25^\circ$  bis  $30^\circ C$  durchgeführt. Für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchzuführenden Experimente wurden die Kupfergewebe mit einer Oxidationszeit von 1 min behandelt. Die damit erreichten Strahlungseigenschaften wurden im Labor des ift Rosenheim mit einem Reflexions-Spektrometer vermessen und zeigen den in Abbildung 4.8 dargestellten Verlauf.

Die Beschichtung mit EBONOL C115 bewirkt demnach ein eindeutig selektives Strahlungsverhalten des Materials. Von einem über 95%-igen Absorptionsgrad im kurzwelligen Solarstrahlungsbereich ausgehend, sinkt er am oberen Ende des

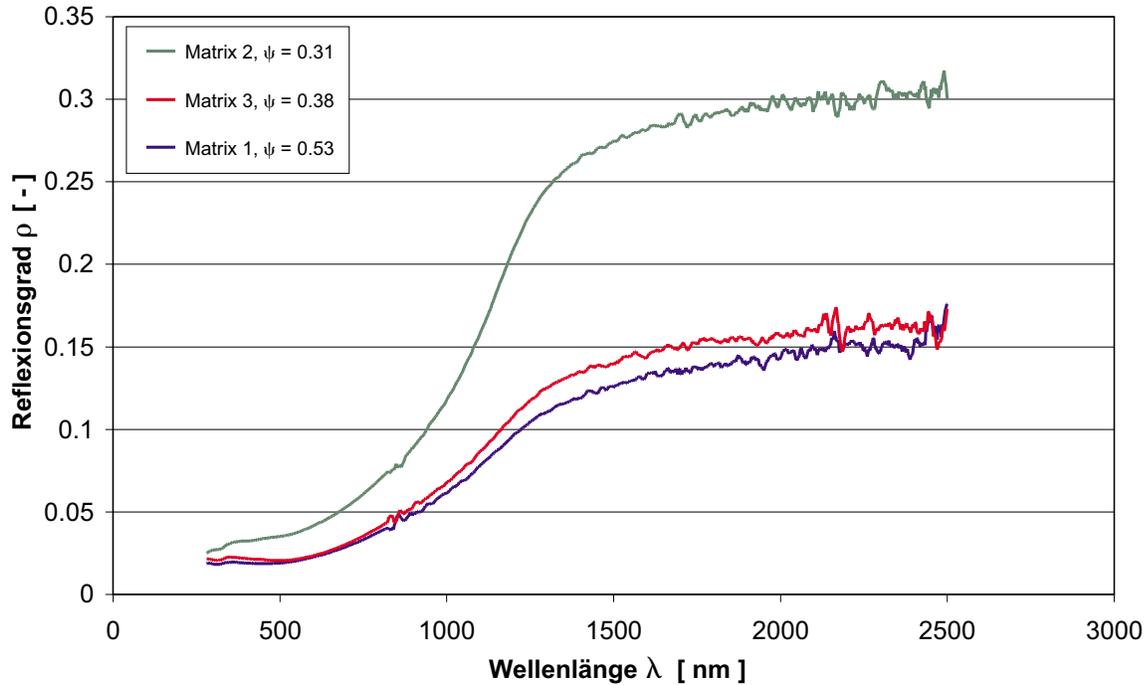


Abbildung 4.8: Spektraler Reflexionsgrad der Absorbergewebe, nach Laborvermessung (Reflexionsspektrometer)

sichtbaren Spektrums über den Wellenlängenbereich bis  $1.5 \mu\text{m}$  auf ca. 0.7 (Matrix 2) bzw. auf ca. 0.83 (Matrix 3) bis 0.85 (Matrix 1) ab.

## 4.3 Meßtechnik

In diesem Unterkapitel wird die Anlage zur Erfassung der Meßwerte beschrieben. Die für die Versuchsdurchführung notwendigen Meßgeräte und Meßstellen werden benannt, eine Fehlerbetrachtung der einzelnen Meß- und Rechengrößen wird durchgeführt.

Die Matrixkollektor-Doppelfassade in Form der beiden Fenster(-kollektor-)kästen wird bezüglich der Temperatur- und Strömungsverhältnisse im Luftzwischenraum vermessen. Darüber hinaus werden lichttechnische Kennwerte im dahinter liegenden Versuchsraum erfaßt.

### 4.3.1 Meßgeräte und Meßgrößen

In Tabelle 4.5 sind alle während der Versuchsdurchführung aufgenommenen Meßgrößen und die entsprechenden Meßgeräte zusammengestellt.

Meßgrößen	Meßgeräte
kurzwellige Strahlungsflußdichte	Pyranometer des <i>Sekundärstandards</i> gemäß der WMO-Klasseneinteilung
Windgeschwindigkeit	Windgeber mit trägheitsarmen Schalenstern und Gleichstrommeßgenerator
Differenzdrücke	kapazitive Differenzdruckaufnehmer
Außen- und Raumlufttemperatur	Pt-100 Platin-Meßwiderstände
Außen- und Raumluftfeuchte	kapazitiver Feuchtesensor
Glastemperaturen	Pt-100 Platin-Meßwiderstände
Matrixoberflächentemperaturen	Pt-100 Platin-Meßwiderstände
Oberflächentemperaturen	Thermoelementperlen Typ K
Lufttemperaturen	Mantelthermoelemente Typ K
Luftgeschwindigkeiten	Hitzdrahtanemometer
Volumenstrom	Hitzdrahtanemometer in Meßstrecke
Leuchtdichte	Luxmeter mit Leuchtdichtekopf
Öffnungszustand Türen/Fenster	Reed-Kontakte

Tabelle 4.5: Meßgrößen und verwendete Meßgeräte

### 4.3.2 Meßstellen

In Abbildung 4.9 ist die Lage der Meßstellen in den Fenster(-kollektor-)kästen und im Meßraum dargestellt. Je nach Position der Matrixabsorber im Luftzwischenraum und der daraus resultierenden Geometrie ergaben sich von Abbildung 4.9 abweichende Meßstellen der Hitzdrahtanemometer. Die Oberflächentemperaturen der Matrixabsorber wurden mit fest auf dem Gewebe vernähten Sensoren (siehe auch Abschnitt 4.3.2.1) erfaßt, weswegen diese Meßstellen innerhalb des Luftzwischenraums abhängig von der momentanen Matrixposition variierten.

#### 4.3.2.1 Temperaturmessung am Matrixabsorber

Die Messung der Absorbentemperatur ist aufgrund der inhomogenen Oberfläche der Matrix mit verschiedenen Meßfühlern getestet worden. Die Matrixtemperaturen sind letztendlich mit PT100 Oberflächentemperatur-Foliensensoren von besonders kleinen Abmessungen (hier:  $l \times b \times h = 2.2 \text{ mm} \times 2.3 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ ) erfaßt worden, die – über eine lösbare Mikrosteckerverbindung im 4-Leiter-Verfahren angeschlossen – am Stecker auf dem Matrixgewebe mit einem Faden festgenäht werden. Der Sensor selbst wurde unter Verwendung von Wärmeleitpaste zur Verbesserung der Wärmeleitung zwischen Matrix und Sensoren mit Aluminiumklebeband auf Kontakt zum Absorbergewebe gehalten. Trotz der kleinen, im Vergleich zu den Drahtdurchmessern aber immer noch relativ großen Abmessungen

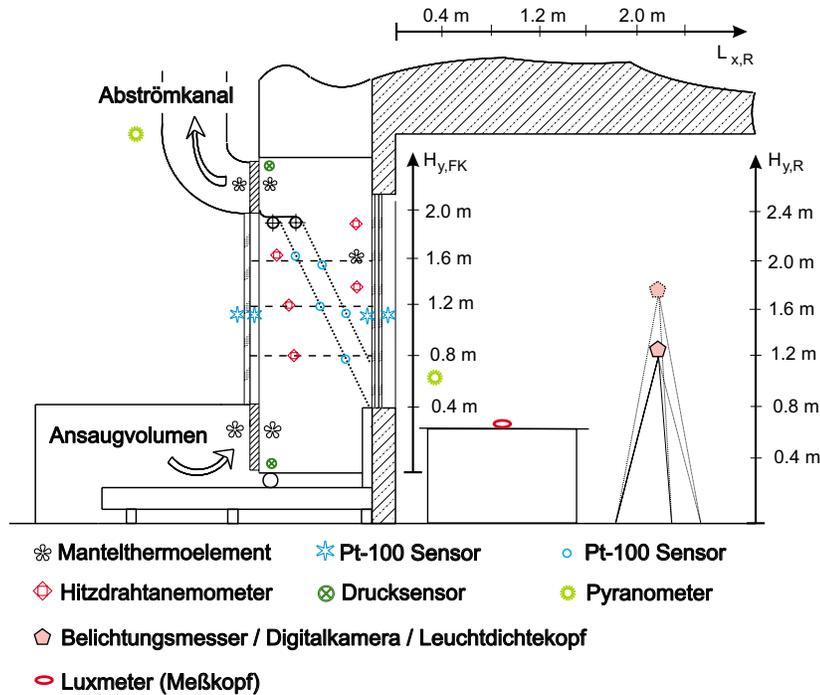


Abbildung 4.9: Lage der Meßstellen an der Versuchsfassade und im Meßraum

der PT100 und trotz sorgfältiger Verarbeitung der Temperaturmeßstellen muß auf die Verfälschung der Meßwerte durch die nur noch stark eingeschränkte bis überhaupt nicht mehr vorhandene Durchströmung des Gewebes an der Meßstelle hingewiesen werden. Durch die hohe Wärme- bzw. Temperaturleitfähigkeit des verwendeten Kupfergewebes kann jedoch davon ausgegangen werden, daß die Temperatur des unmittelbar umgebenden durchströmten Gewebes von der gemessenen Temperatur nur geringfügig abweicht.

#### 4.3.2.2 Messung der Lufttemperaturen

Die **Lufttemperaturen** in den Fensterkollektoren wurden mit Hilfe von NiCr-Ni-Mantelthermoelementen (Typ K,  $\varnothing$  1 mm, nach DIN 43721) erfaßt. Zur Bestimmung des erreichten Temperaturhubs und des zugehörigen Wirkungsgrades wurden die Lufttemperaturen am Luftein- und -austritt des Fensterkastens gemessen. Der thermische Wirkungsgrad des Luftkollektors wird aus dem Verhältnis von abgegebenem Wärmestrom  $\dot{Q}$  (vgl. Gleichung (3.26), und der auf die Absorberfläche (unter Berücksichtigung eines einstrahlwinkel- und verschattungsabhängigen Ansatzes der jeweilig wirksamen Absorberfläche bzw. Aperturfläche) auftreffenden solaren Strahlungsdichte  $\dot{G}_{Fa_s}$  ermittelt.

### 4.3.2.3 Messung des Luftvolumenstroms

Den beiden Fensterkollektoren wurde jeweils eine **Volumenstrommeßstrecke** nachgeschaltet, bestehend aus Abströmflansch, Lüftungskanal, Strömungsgleichrichter, Meßstrecke inkl. Ein- und Auslaufstrecke sowie jeweils einer Ventilatoreinheit. Die **Abströmflansche** sind derart gestaltet, daß sie ein kontrolliertes Absaugen der Luft aus dem Fensterkollektor orthogonal zur Fassadenfläche erlauben. Eine entsprechende Absaugung nach hinten, die einer Integration in die Fassade am nächsten käme, war aus baulichen Gründen am Versuchsstand nicht umsetzbar. Nach dem Übergang vom vorgegebenen Rechteck- auf einen Kreisquerschnitt und mehreren Umlenkungen wurde die mittlere Luftgeschwindigkeit im Kanalquerschnitt mit Hitzdrahtanemometern bestimmt und daraus über die Kontinuitätsgleichung der entsprechende Volumen- und Massenstrom berechnet.

### 4.3.2.4 Messung der Umgebungsbedingungen

Die **Gesamtstrahlung** auf die vertikale Fassadenebene wurde mit einem Strahlungspyranometer des Sekundärstandards (nach WMO) unter Einschluß der Reflexionsanteile aus der Umgebung (Nebengebäude, Dachfläche Installationen) gemessen. **Außenlufttemperatur** und **-feuchte** wurden mit einem kombinierten Temperatur-Feuchte-Sensor direkt neben dem Versuchsstand erfaßt. Die **Windgeschwindigkeit** wurde durch ein Schalenkreuz-Anemometer oberhalb der Testfassade aufgenommen.

## 4.3.3 Meßwerterfassungsanlage

Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten auf dem Solaren Forschungsfeld (siehe Abbildung 4.2) wurde ein **dezentral** strukturiertes, **modular** aufgebautes **Meßsystem** aufgebaut und anschließend mit bereits vorhandenen Meßmodulen kombiniert. Der dezentrale Aufbau über eine RS-485 Schnittstelle ermöglicht die Installation der Meßmodule in unmittelbarer Nähe des Versuchsstands, womit störanfällige Zuleitungen von Sensoren mit schwachen Analogsignalen (z.B. Thermoelemente) kurz gehalten werden können. Als Meßmodule wurden **Sensorkollektoren** QLI-50 der Fa. Vaisala eingesetzt, die über einen integrierten A/D-Wandler (16-bit) mit vorangeschalteten Multiplexer verfügen. In Form eines Busses lassen sich prinzipiell beliebig viele solcher Sensorkollektoren an eine RS-485 Schnittstelle anschließen. Im vorliegenden Fall wurden sieben QLI-50 an einen zum Industriestandard kompatiblen Personal Computer (Pentium, 133 MHz) angeschlossen (Abbildung 4.10).

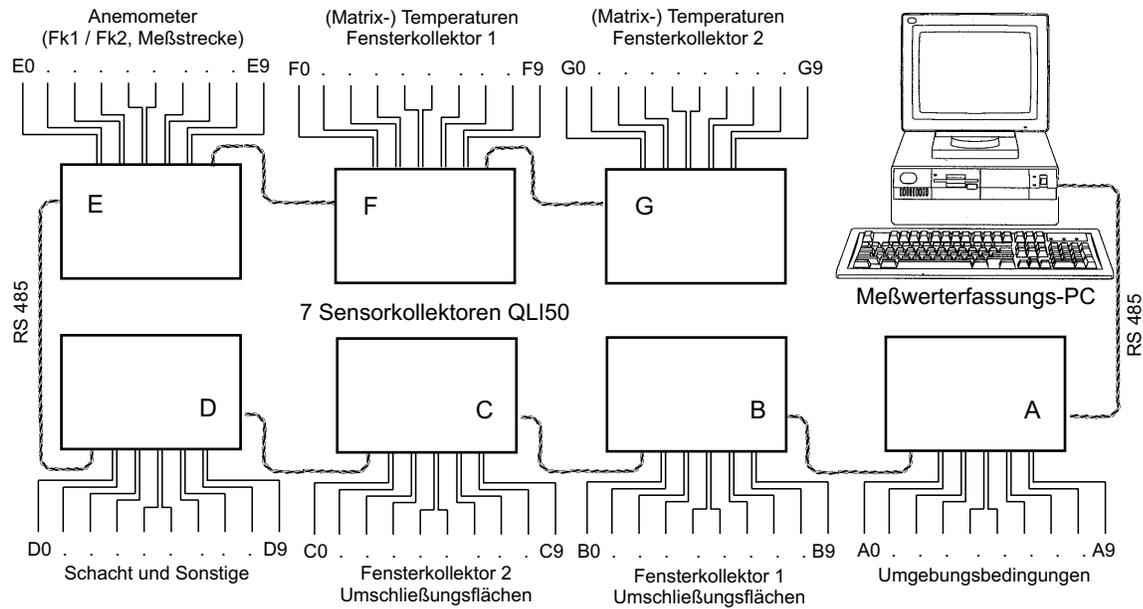


Abbildung 4.10: Schematisches Fließbild der Datenerfassung mit Adressierung (A - G) der Meßmodule und deren Sensorbelegung

Zur **Meßdatenerfassung**, Programmierung und Ansteuerung der Sensorkollektoren wurde **LabView 4.1** der Fa. National Instruments eingesetzt, eine modular aufgebaute, flexible und vielseitige Software. Das damit erstellte Programm legt die Meßdaten im \*.dat-Format ab. Anschließend wurden die Datenfiles in das Tabellen-Kalkulationsprogramm MS-Excel importiert, weiterverarbeitet und ausgewertet.

## 4.4 Versuchsdurchführung

Im folgenden Abschnitt werden die am Doppelfassaden-Matrixkollektor durchgeführten Experimente dargestellt. Beginnend mit dem **Sommerfall** (Juni – August) werden außerdem Versuche in der **Übergangszeit** (September – Oktober / März – April) und für den **Winterfall** (November – Februar) gefahren.

### 4.4.1 Randbedingungen und Vereinfachungen

Bei der Versuchsdurchführung lagen folgende Randbedingungen bzw. Annahmen und Vereinfachungen vor:

- Die beiden untersuchten Doppelfassaden-Matrixkollektoren werden als jeweils eigener unabhängiger zwangsdurchströmter Fensterkasten mit vertikal übereinander angeordneten Ein- und Ausströmöffnungen betrieben. Zwischen den beiden Fensterkästen befindet sich ein frei durchströmter Schacht ohne Verbindung zum benachbarten Fensterkasten.
- Die Matrixabsorber im Luftzwischenraum werden nicht vollständig gegen die begrenzenden Glasflächen abgedichtet (s.a. Konstruktionsbeschreibung). Infolge dessen gelangt ein bestimmter Anteil des Luftmassenstromes immer über die internen Undichtigkeiten zum Austritt ohne den Absorber zu durchströmen und damit am Wärmeaustausch dort teilzunehmen. Diese Luftmengen nehmen dagegen am Wärmeaustausch an den Begrenzungsflächen des Fensterkastens teil, was implizit durch den Temperaturhub zwischen Ein- und Austritt mitgemessen wird. Vergleichende Untersuchungen mit und ohne seitliche Dichtungen geben Aufschluß über den zu erwartenden Unterschied.  
Grundsätzlich ist anzumerken, daß die seitliche Abdichtung zwischen Matrixabsorber und Glaslisene in einer realen Doppelfassade mit verstellbaren Matrixabsorbern nur unter unverhältnismäßig hohem konstruktiven Aufwand möglich ist.
- Windeinflüsse werden soweit wie möglich ausgeschaltet. Dazu wurde vor den Einströmöffnungen ein Ansaugvolumen (2-3 faches Fensterkastenvolumen) angebaut, aus dem die nahezu ruhende Luft angesaugt werden kann. An den oberen Luftauslaßöffnungen ist jeweils eine Absaughaube angebracht, der die Volumenstrommeßstrecke nachgeschaltet ist. Damit wird auch am Austritt der Windeinfluß eliminiert.
- Außenluft- und Innenraumtemperatur werden nicht geregelt. Da es sich um einen Outdoorversuchstand handelt und die Außenlufttemperatur dadurch natürlichen Schwankungen unterliegt, wird auf eine Regelung der Innenraumtemperatur, die als frei schwingend betrachtet wird, verzichtet.
- Die Doppelfassaden-Matrixkollektoren werden ausschließlich im Frischluftbetrieb untersucht. Es wird somit ausschließlich der Betriebspunkt betrachtet, bei dem die Temperatur der Luft am Eintritt des Kollektors (hier: unmittelbar vor dem Einlaßgitter, innerhalb des Ansaugvolumens) der Umgebungstemperatur entspricht.
- Die (öffnenbaren) Fenster der Primärfassade bleiben während sämtlicher Versuche geschlossen.

Eine prinzipiell mögliche direkte Lüftungstechnische Kopplung des Luftvolumens im Luftzwischenraum mit dem Raumluftvolumen der dahinterliegenden Meßwarte wird nicht untersucht.

- Vereinfachungen bei der lichttechnischen Untersuchung der Absorbergewebe (Streuung, Beugung, Reflexion, etc.)

#### 4.4.2 Übersicht der vermessenen Konfigurationen

Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, gibt es drei **Standardpositionen** der Matrixgewebe im Luftzwischenraum, die dadurch gekennzeichnet sind, daß die Gewebe diagonal im Luftzwischenraum an die gegenüberliegende Seite über die ganze Fensterhöhe gespannt bzw. vertikal ganz nach unten abgerollt werden. Bei dem an der Versuchsfassade eingestellten Luftzwischenraum von 63 cm ergeben sich für diese Standardpositionen Neigungswinkel der Matrix von  $-20^\circ$  (nach unten gerichtet, *negativ* angestellt),  $0^\circ$  (vertikal) und  $+20^\circ$  (nach oben gerichtet, *positiv* angestellt). Daneben werden einige – in der Regel lichttechnisch motivierte – **Sonderkonfigurationen** behandelt, bei denen die Gewebe nur teilweise abgerollt sind, in unterschiedlichen Neigungswinkeln gespannt oder über Umlenkrollen geführt sind und damit eine Zonierung im Fensterbereich darstellen.

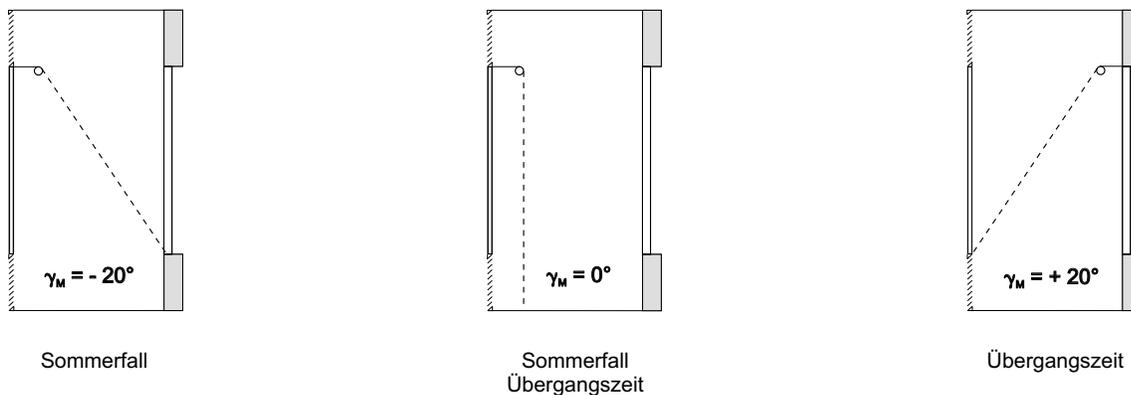


Abbildung 4.11: Meßzeiträume der Standardkonfigurationen mit einem Matrixabsorber in  $(-20^\circ)$ -,  $(0^\circ)$ - und  $(+20^\circ)$ -Neigung

In den Abbildungen 4.11, 4.12 und 4.13 wird ein Überblick über die bei den Experimenten eingestellten Positionen der Absorbergewebe im Luftzwischenraum gegeben. Es wird dort jeweils der Meßzeitraum der einzelnen Konfigurationen angegeben, unterschieden zwischen *Standardkonfigurationen* mit einem oder zwei Matrixgeweben und *Sonderkonfigurationen*. In den folgenden Kapiteln werden die dort abgebildeten Schemabilder zur Identifikation der Konfigurationen benutzt,

auf Modifikationen oder Abweichungen von den hier schematisch gezeigten Einstellungen wird im Einzelfall eigens hingewiesen.

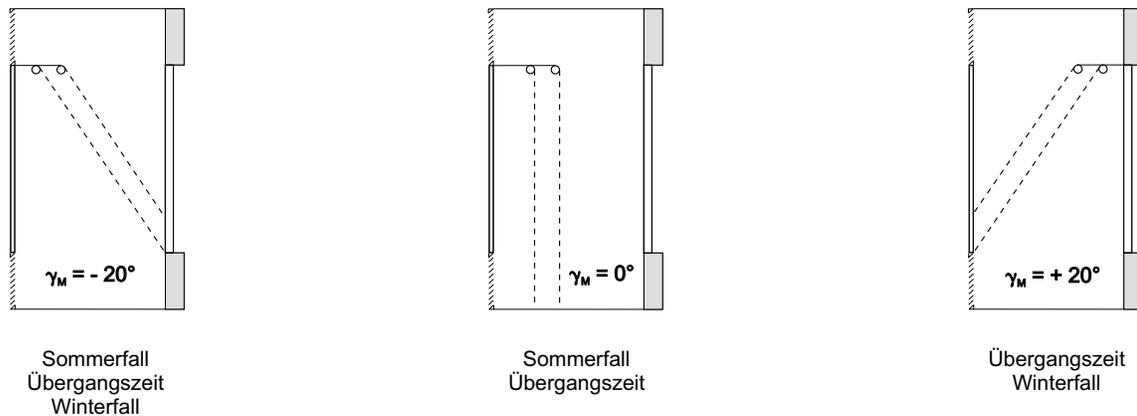


Abbildung 4.12: Messzeiträume der Standardkonfigurationen mit zwei Matrixabsorbern in  $(-20^\circ)$ -,  $(0^\circ)$ - und  $(+20^\circ)$ -Neigung

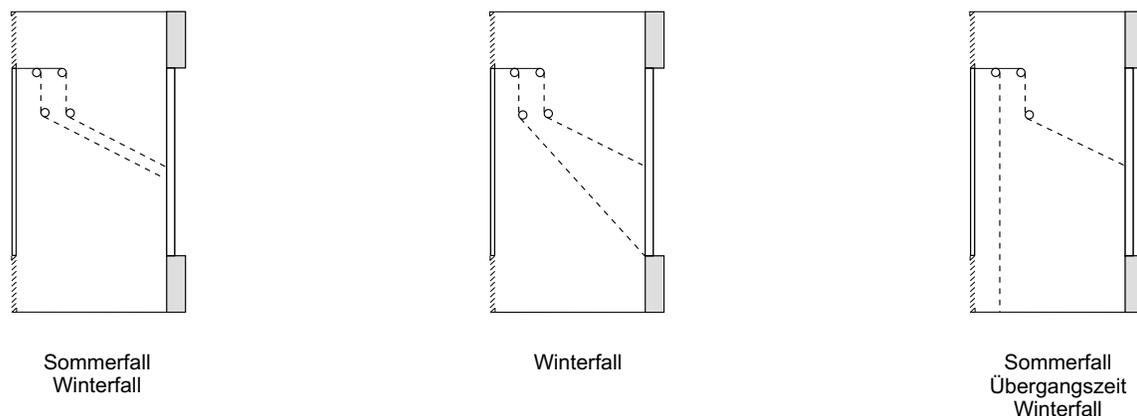


Abbildung 4.13: Messzeiträume der Sonderkonfigurationen mit zwei Matrixabsorbern und negativem Neigungswinkel  $\geq -20^\circ$  und unterschiedlicher vertikaler Abspannung eines oder beider Matrixabsorber

### 4.4.3 Versuchsablauf

Die Aufnahme der Meßwerte im Doppelfassaden-Matrixkollektor erfolgte bei **Zwangskonvektionsbetrieb**. Die Variation der Luftmassenströme wies grundsätzlich folgendes Muster auf: Nach einer – die Outdoor-Bedingungen berücksichtigenden – bestmöglichen Angleichung der **Startbedingungen** durch

Verschatten der Glaslisenen mit speziell angepassten Vakuum-Dämmplatten und Durchströmen der Fensterkästen bei hohen Luftmassenströmen wurden letztere stufenweise verändert. Dabei wird der jeweilig einzustellende Luftmassenstrom manuell über ein Potentiometer bzw. einen Ringkerntransformator unter Berücksichtigung der momentanen Lufttemperatur in der Meßstrecke gesteuert.

Die Experimente wurden in der Regel im sogenannten **Meßzeitraum** zwischen **11:00** und **14:00 Uhr MEZ** durchgeführt, um annähernd senkrechte (Azimutal-) Auftreffwinkel (tatsächlich max ca.  $\pm 20^\circ$  auf die südorientierte Versuchsfassade zu haben. Innerhalb dieses Zeitraumes wurde alle ein bis zwei Sekunden ein Meßwert aufgezeichnet, während die Meßdatenaufzeichnung in der übrigen Zeit mit geringerer Auflösung lief. Die Datenpunkte eines Experimentes wurden durch eine Mittelwertbildung sämtlicher über einen Zeitraum von in der Regel 10 Minuten aufgezeichneter Meßwerte gebildet. Um nach dem planmäßigen Verändern des Luftmassenstromes wieder eingeschwungene Verhältnisse zu erreichen, ließ man jeweils einen Zeitraum von 20 bis 30 Minuten verstreichen, bevor mit der Meßwertauswertung für das nächste Experiment begonnen wurde.

Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse unterschiedlicher Konfigurationen ist durch die Auswahl der konkret verglichenen Meßzeiträume gegeben, bzw. daß am gleichen Meßtag parallel in beiden Fensterkollektoren gemessen wurde. Als **ausagekräftige Experimente** werden im Folgenden diejenigen bezeichnet, bei denen es im Rahmen der oben skizzierten Randbedingungen und Maßnahmen gelang, *pseudostationäre* Bedingungen zu erreichen. Dies bedeutet im Einzelnen entsprechend geringe Schwankungen der Umgebungsbedingungen Solarstrahlung, Außentemperatur und Wind. Außerdem wurde versucht, auch an unterschiedlichen Meßtagen ähnliche Bedingungen auszunutzen, um die bestmögliche direkte Vergleichbarkeit der Einzelversuche, z.B. verschiedener Konfigurationen an zwangsläufig verschiedenen Tagen, aber mit sehr ähnlichen Randbedingungen, zu gewährleisten. Im Hinblick auf die solare Globalstrahlung in der (südorientierten, vertikalen) Fassadenebene wurden Abweichungen von  $\pm 10\%$  toleriert (im Winterfall Einstrahlungswerte in der Größenordnung von  $800 - 900 \text{ W/m}^2$ , in der Übergangszeit  $700 - 800 \text{ W/m}^2$  und im Sommerfall  $500 - 700 \text{ W/m}^2$ ). Die Außentemperaturen bewegten sich bei den verglichenen Konfigurationen im Bereich von  $\pm 2 \text{ K}$ . Die Windverhältnisse waren insofern vergleichbar, als bei direkten Vergleichen die Windgeschwindigkeiten sich jeweils in ähnlichen Bereichen bewegten, in der Regel aber Experimente bei schwachwindigen Verhältnissen bis maximal  $5.4 \text{ m/s}$  ( $\equiv$  Windstärke 3 Beaufort, *schwache Brise*) ausgewählt wurden.

Pro Meßtag wurde eine Konfiguration vermessen, so daß während eines Experimentes die einzigen Variablen der einzustellende Luftmassenstrom und die vorliegenden Witterungsbedingungen sind. Ausgehend von den raumluftechni-

schen Anforderungen (Zulufttemperatur im Winterfall, notwendige Luftwechsel im Winter- und Sommerfall) ergibt sich ein **Variationsbereich** des Luftmassenstroms zwischen **0.01 kg/s** und **0.3 kg/s**. Der Massenstrom wird dabei sowohl den Umweltbedingungen (Einstrahlung, Außenlufttemperatur) als auch den raumklimatischen Erfordernissen entsprechend in einem jeweils sinnvollen Bereich variiert. Es ergibt sich folgende grobe Einteilung der Luftmassenströme in Abhängigkeit der vorhandenen Bedingungen bzw. erwünschten Effekte:

- hoher Massenstrom bei hoher Einstrahlung (Absorption) und hohen Außentemperaturen (Sommerfall, Übergangszeit; Begrenzung der Übertemperaturen im Luftzwischenraum)
- niedrigere Massenströme bei niedrigen Außentemperaturen (Winterfall; ausreichend hoher Temperaturhub)
- mittlere Massenströme bei hoher Einstrahlung (Absorption) und gefordertem Mindest-Temperaturhub

Die meisten Versuchsergebnisse wurden aus den in Kapitel 3.1 dargestellten Gründen bei Luftmassenströmen zwischen 25 und 100 g/s generiert. Im Sommerfall wurden häufig auch höhere Massenströme gefahren, um die Temperaturen im Luftzwischenraum zu begrenzen, während im Winter auch unter 25 g/s gemessen wurde, um möglichst große Temperaturhübe zu erreichen.

Wie in Abschnitt 3.1 bereits erklärt, geht es in der vorliegenden Arbeit primär nicht um eine klassische energetische Optimierung des untersuchten Luftkollektortyps, sondern vielmehr darum, im Zusammenspiel mit der Fassade und dem angrenzenden Raum direkt praxisrelevante Meßwerte für die bei der Integration eines durchströmten Absorbers in eine transparente doppelschalige Konstruktion erreichbaren Temperaturhübe und thermische Wirkungsgrade des neuartigen Fensterkollektors unter Outdoor-Bedingungen zu erfassen. Diese Meßwerte werden gleichwohl einer vergleichenden Bewertung unterzogen, um Aussagen über das thermische Verhalten der Vielzahl unterschiedlicher Matrixkonfigurationen bei bestimmten Randbedingungen machen zu können.



# Kapitel 5

## Versuchsauswertung und Ergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die wesentlichen Ergebnisse der umfangreichen experimentellen Untersuchungen entsprechend der bifunktionalen Konzeptionierung des Doppelfassaden-Matrixkollektors zunächst aus **thermischer** und **strömungstechnischer**, anschließend aus **lichttechnischer** Sicht vorgestellt.

### 5.1 Thermische und strömungstechnische Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten wird ein Teil der experimentell ermittelten Ergebnisse zu den thermischen und strömungstechnischen Verhältnissen in einem Doppelfassaden-Matrixkollektor in Abhängigkeit der zugrunde liegenden Konfigurationen und Randbedingungen sowie bezüglich **Sommer-, Winter- und Übergangszeitfall** eingehend analysiert. Das geschieht immer vor dem Hintergrund, Bewertungen und Empfehlungen der für bestimmte Zielsetzungen und Einbindungen ins gesamte Konzept geeignetsten Matrixkonfigurationen und Betriebsparameter zu erarbeiten. Dazu werden in einem einführenden Unterkapitel zunächst wichtige Darstellungsgrößen und -formen für die Versuchsergebnisse hergeleitet.

Zuerst werden die mit Doppelfassaden-Matrixkollektoren erreichbaren **Temperaturhübe** und die resultierenden **thermischen Wirkungsgrade** bei variierendem Luftmassenstrom bzw. bei unterschiedlichen Matrixkonfigurationen und Einstrahlverhältnissen miteinander verglichen. Bei der Diskussion der Meßergebnisse wird auch der bereits ausführlich beschriebene Fall [122] eines Doppelfassaden-Fensterkastens ohne Matrixabsorber oder sonstige solare bzw. dem Sonnenschutz dienende Einbauten mit einbezogen. Anschließend wird auf die **Temperaturverteilung** im Kollektor, insbesondere die **Oberflächentemperaturen** der Matrixabsorber und der umschließenden (**Glas-)Flächen** eingegangen. Die Oberflächentemperaturen liefern bereits erste Anhaltspunkte auf die örtlich vorliegenden

Strömungsgeschwindigkeiten, parallel dazu werden die an ausgewählten Positionen gemessenen **Luftgeschwindigkeiten** diskutiert. Die aus diesen Meßwerten und begleitend dazu durchgeführten **Nebelversuchen** abgeleiteten Strömungsbilder werden beschrieben. Um den jeweiligen Beitrag der am Wärmetransport beteiligten Matrix- und Glasflächen zu ermitteln bzw. zu separieren, werden mit Hilfe der experimentellen Rohdaten in Kombination mit Werten aus der Literatur **mittlere Wärmeübergangskoeffizienten** rechnerisch bestimmt. Am Schluß dieses ersten Teilkapitels werden die energetischen Ergebnisse des untersuchten Doppelfassaden-Matrixkollektors mit denen kommerzieller Luftkollektoren verglichen.

### 5.1.1 Herleitung und Darstellungsweisen

Da es sich bei den im Folgenden zu diskutierenden Versuchsergebnissen in der Regel um keine reinen **Meßergebnisse**, sondern bereits weiterverarbeitete Größen handelt, werden zunächst die dafür geeigneten und zu verwendenden Darstellungsarten vorgestellt und erklärt. Zum Vergleich und zur Beurteilung der Wirkungsweise von Sonnenkollektoren werden im Wesentlichen zwei Größen herangezogen: Der **thermische Wirkungsgrad** und der **Temperaturhub**. Daneben wird für exergetische Betrachtungen der Druckverlust eines Kollektors berücksichtigt. Was Richtlinien und Standards für die Vermessung von Sonnenkollektoren angeht, muß man zwischen Wasser- und Luftkollektoren unterscheiden. Während für flüssigkeitsgefüllte Kollektoren nationale und internationale Normen (DIN 4757 [21], ISO 9806 [64], EN 12975 [23]) zum Teil seit langem eingeführt sind, gibt es für die Prüfung von Luftkollektoren keine einschlägigen Normen. Erst mit den Ergebnissen des von der Internationalen Energieagentur (IEA) initiierten und Ende 1999 abgeschlossenen IEA Tasks 19 unter dem Titel „Solar Air Systems“ wurden erste Grundlagen standardisierter Testabläufe und Bewertungsmethoden für solare Luftsysteme geschaffen [34]. Gleichwohl stehen in der Literatur [28] die theoretischen Berechnungsgrundlagen sowohl für Wasser- als auch für Luftkollektoren zur Verfügung.

#### 5.1.1.1 Wirkungsgrad

Der thermische Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  eines Sonnenkollektors wird nach DUFFIE und BECKMAN [28] folgendermaßen definiert:

$$\eta_{th} = \frac{\text{Nutzleistung des Kollektors}}{\text{Globalstrahlung auf Kollektorfläche}} = \frac{\dot{Q}_{Nutz}}{A_{Koll} \dot{G}} \quad (5.1)$$

Die Nutzleistung ergibt sich aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik für sta-

tionär mit dem Massenstrom  $\dot{M}$  durchströmte offene Systeme und der Ein- bzw. Austrittstemperatur des Fluids zu:

$$\dot{Q}_{Nutz} = \dot{M} \cdot c_p \cdot (T_{F,aus} - T_{F,ein}) \quad (5.2)$$

Die thermische Nutzleistung nach Gleichung (5.2) wird unter Randbedingungen des Sonnenkollektors abgegeben, die anzeigen, wie der Kollektor die Sonnenergie absorbiert und in welchem Maß er Energie wieder an die Umgebung verliert. Somit kann die thermische Nutzleistung auch in der Form

$$\dot{Q}_{Nutz} = A_{Koll} \left[ \dot{G}(\tau\alpha) - U_L(T_{Abs} - T_\infty) \right] \quad (5.3)$$

dargestellt werden, mit  $U_L$  als Wärmeverlustkoeffizient („*overall heat loss coefficient*“) und  $(\tau\alpha)$  als Produkt aus Transmissionsgrad der Abdeckung und Absorptionsgrad des Solarabsorbers. Die maximale Nutzleistung wird erreicht, wenn der gesamte Kollektor die Eintrittstemperatur des Fluids annimmt, da die Verluste an die Umgebung dann minimal sind. Der Bezug auf die Eintrittstemperatur  $T_{F,ein}$  und damit die maximal mögliche Nutzleistung wird mit dem Wärmeabfuhrfaktor  $F_R$  („*heat removal factor*“) hergestellt:

$$\dot{Q}_{Nutz} = A_{Koll} F_R \left[ \dot{G}(\tau\alpha) - U_L(T_{F,ein} - T_\infty) \right] \quad (5.4)$$

Der Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  nach Gleichung (5.1) kann dann mit Gleichung (5.4) geschrieben werden:

$$\eta_{th} = F_R \left[ (\tau\alpha) - \frac{U_L(T_{F,ein} - T_\infty)}{\dot{G}} \right] \quad (5.5)$$

Aus der durch Gleichung (5.5) beschriebenen linearen Kollektor-Kennlinie läßt sich sowohl die Einstrahlung ablesen, ab der sich ein Wärmegewinn einstellt

$$\dot{G}_{min} = \frac{U_L(T_{F,ein} - T_\infty)}{(\tau\alpha)}, \quad (5.6)$$

als auch der Wirkungsgrad des Kollektors im Frischluftbetrieb bestimmen:

$$\eta_{th} = F_R \cdot (\tau\alpha) \quad (5.7)$$

Der Wirkungsgrad eines Luftkollektors im stationären Frischluftbetrieb hängt demnach nicht von der Einstrahlung, sondern vom Massenstrom ab. Bei der Bestimmung der Ein- und Austrittstemperaturen der Luft wurde deshalb der Mas-

senstrom über den Versuchszeitraum konstant gehalten und der Wirkungsgrad – von Gleichung (5.1) abgeleitet – aus den Meßwerten folgendermaßen berechnet:

$$\bar{\eta}_{th} = \frac{c_{p,L} \cdot \sum_{i=1}^n \dot{M}(t_i) \cdot [T_{F,aus}(t_i) - T_{F,ein}(t_i)]}{A_{Abs} \cdot \sum_{i=1}^n \dot{G}(t_i)} \quad (5.8)$$

Der Wirkungsgrad sinkt nach Gleichung (5.3) mit gegenüber der Umgebung ansteigendem Temperaturniveau des Kollektors aufgrund der dann größeren Wärmeverluste. Eine Erhöhung des Massenstromes hingegen führt zu einem sinkenden Temperaturniveau, einem verbesserten Wärmeübergang vom Absorber auf den Luftstrom und somit zu ansteigenden Kollektorwirkungsgraden. Bei der Darstellung des Wirkungsgradverlaufs spielt die Kollektor-Bezugstemperatur (in Gleichung (5.4):  $T_{F,ein}$ ) eine wichtige Rolle. Physikalisch korrekt müßte die gewichtete Mitteltemperatur des gesamten Kollektors als Bezugstemperatur herangezogen werden, was einen sehr hohen meßtechnischen Aufwand bedeuten würde. Deshalb wird entweder die Eintrittstemperatur  $T_{F,ein}$ , die Austrittstemperatur  $T_{F,aus}$  oder der arithmetische Mittelwert aus beiden als Referenztemperatur verwendet. Messungen an Luftkollektoren zeigen, daß die physikalische Mitteltemperatur des Kollektors meist viel näher an der Austrittstemperatur als am arithmetischen Mittelwert zwischen Ein- und Austrittstemperatur liegt [34]. Deshalb ist in der Regel als Bezugsgröße bei Luftkollektoren die **Temperaturdifferenz zwischen Umgebungsluft und Austrittstemperatur** die physikalisch beste Darstellungsart [28]. Dennoch kann dies nicht verallgemeinert werden, die geeignetste Darstellungsart hängt vielmehr von den beiden Faktoren *Wärmeübergang am Absorber* und *Temperaturhub* ab.

Der Wirkungsgradverlauf eines Kollektors kann in zweierlei Diagrammartentypen präsentiert werden. In geschlossenen Kollektorsystemen (*closed loop*) wird die oben formelmäßig beschriebene Darstellung in Abhängigkeit von der Lufttemperatur am Austritt des Kollektors bevorzugt, die der bei mit flüssigen Medien betriebenen Kollektoren entspricht. In Abbildung 5.1 wird diese Darstellungsweise des Wirkungsgradverlaufs für verschiedene Luftkollektoren benutzt.

Für Kollektoren, die im Frischluftbetrieb arbeiten, also ausschließlich mit angesaugter Umgebungsluft (*open loop*), bietet sich jedoch die Darstellung des Wirkungsgrades in Abhängigkeit vom Massenstrom an. Der in der vorliegenden Arbeit präsentierte, in Doppelfassaden integrierte Matrixkollektor wird in der Regel für den Frischluftbetrieb konzipiert, weswegen die Versuchs- und Berechnungsergebnisse in Abschnitt 5.1.2 für die Wirkungsgrade in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom dargestellt und diskutiert werden.

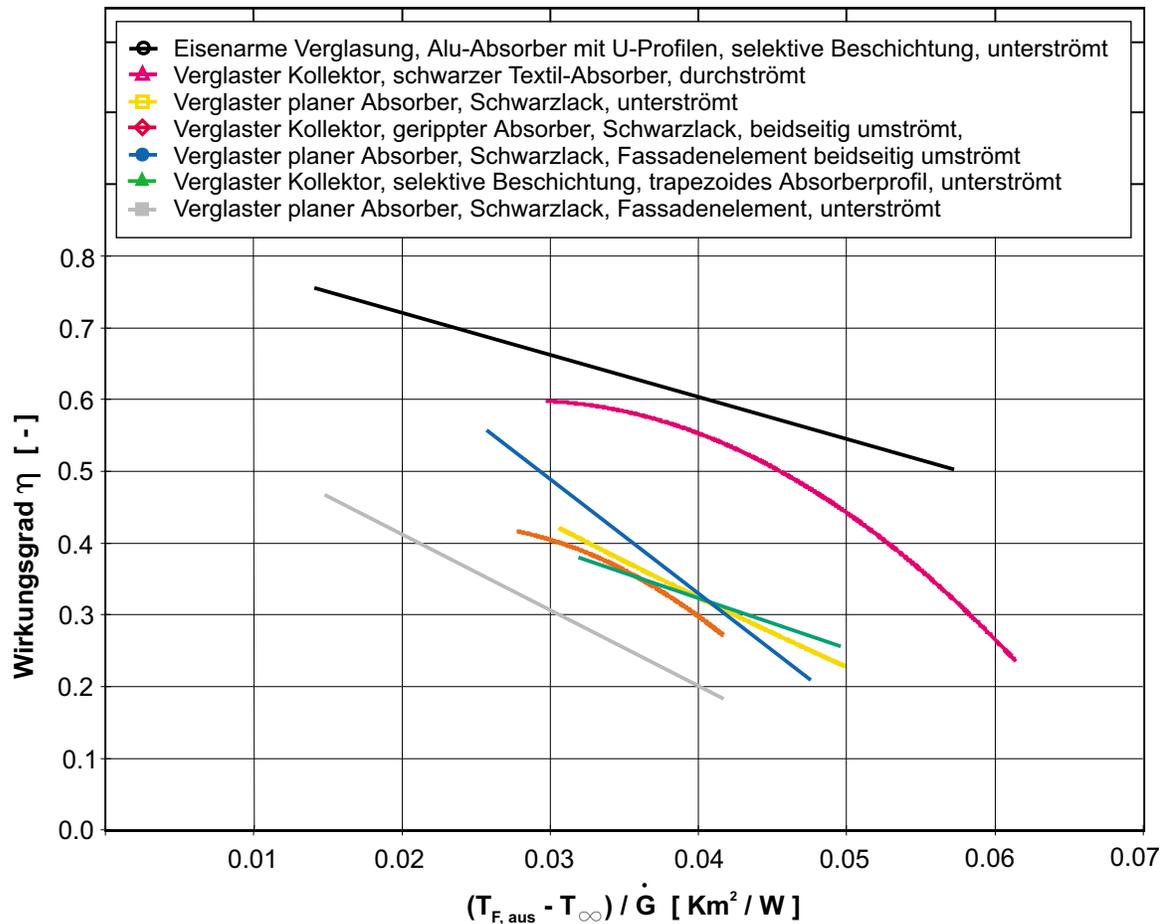


Abbildung 5.1: Wirkungsgradverlauf verschiedener Luftkollektoren in Abhängigkeit von der Austrittstemperatur bei einem Massenstrom von  $40 \text{ kg/hm}^2$  und einer Umgebungsluftgeschwindigkeit von  $3 \text{ m/s}$ , nach [34]

### 5.1.1.2 Temperaturhub

Die im Sonnenkollektor erreichte Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austrittstemperatur der Luft – im folgenden als Temperaturhub bezeichnet – wurde bereits in Abschnitt 3.3 behandelt und mit der dort angegebenen Gleichung (3.25) abgeschätzt.

### 5.1.1.3 Konvektiver Wärmeübergang

Die konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten in einem Luftkollektor hängen stark von der Strömungsgeschwindigkeit und der Geometrie bzw. Anströmung des Absorbers ab und variieren in einem Wertebereich von ca.  $5$  bis  $50 \text{ W/m}^2\text{K}$  [29]. In einem Doppelfassaden-Matrixkollektor ist nicht nur der Wärmeübergang

vom Absorber an die durchströmende Luft zu berücksichtigen, sondern es wird in besonderem Maß auch von den begrenzenden, von der Sonnenstrahlung direkt beheizten Glas- und Metallflächen Wärme an die Luft abgegeben. Dieser Anteil ist sicherlich kaum zu vernachlässigen, was sich schon daran zeigt, daß sich die Luft im Luftzwischenraum doppelschaliger Ganzglasfassaden auch ohne strahlungsabsorbierende Einbauten nicht unerheblich erwärmt. Dies liegt am sogenannten **Strahlungsfalleneffekt**, der bedeutet, daß die **kurzwellige** Solarstrahlung über die Glasflächen in den Luftzwischenraum eintritt und von den Glas- und Metallflächen teilweise absorbiert wird, daß die von den so erwärmten Bauteilen emittierte, **langwellige** Wärmestrahlung den Luftzwischenraum aber nicht mehr verlassen kann, weil die Verglasung dafür undurchlässig ist. Gegenseitiger Wärmeaustausch durch Wärmestrahlung findet demnach im Luftzwischenraum nur zwischen den umgrenzenden Oberflächen statt. Von den erwärmten Oberflächen findet der Wärmeübergang an die Luft wiederum durch **Konvektion** statt.

Aus einer einfachen Enthalpiebilanz für die Luftströmung im Luftzwischenraum ergibt sich (unter Vernachlässigung von Leckagen und damit  $\dot{M}_{ein} = \dot{M}_{aus} = \dot{M}$ ) der Nettowärmestrom  $\dot{Q}_{zu}$ , der dem Luftmassenstrom im Fensterkasten zugeführt wird und in dem die Leitungs- und Konvektionsverluste an die Umgebung, den Raum und den einseitig angrenzenden Luftzwischenraum bereits berücksichtigt sind:

$$\dot{Q}_{zu} = \dot{M} \cdot c_{p,L} \cdot (T_{F,aus} - T_{F,ein}) \quad (5.9)$$

Der Wärmestrom, den die Luft durch konvektive Wärmeübergänge an den Umschließungsflächen des Fensterkastens und an den Matrixabsorbern aufnimmt, setzt sich aus den folgenden Bestandteilen zusammen:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{zu,kon} &= \bar{\alpha}_{Glas-Luft} \cdot \sum_{i=1}^n A_{Glas,i} \cdot \Delta T_{Glas,i-Luft} \\ &+ \bar{\alpha}_{Matrix-Luft} \cdot \sum_{i=1}^n A_{Matrix,i} \cdot \Delta T_{Matrix,i-Luft} \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} \text{mit} \quad \Delta T_{Glas,i-Luft} &= \bar{T}_{Glas,i} - \bar{T}_L \\ \text{bzw.} \quad \Delta T_{Matrix,i-Luft} &= \bar{T}_{Matrix,i} - \bar{T}_L \end{aligned}$$

Dabei stellen  $\bar{\alpha}_{Glas-Luft}$  und  $\bar{\alpha}_{Matrix-Luft}$  (im Folgenden:  $\bar{\alpha}_{G-L}$  bzw.  $\bar{\alpha}_{M-L}$ ) **zeitlich und örtlich gemittelte Wärmeübergangskoeffizienten**<sup>1</sup> dar, die die an den Umschließungsflächen des Fensterkastens bzw. an der Absorbermatrix herrschenden

<sup>1</sup>englisch: „overall heat transfer coefficient“

und *lokal stark differierenden konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten*  $\alpha_i$  berücksichtigen. Die mittlere Lufttemperatur  $\bar{T}_L$  im Luftzwischenraum wird aus dem arithmetischen Mittelwert zwischen Ein- und Austrittstemperatur des Luftmassenstromes gebildet. In die Berechnung der Temperaturen sowie der wärmeübertragenden Oberflächen aus Gleichung 5.10 fließen alle vier gläsernen Umschließungsflächen  $A_{Glas,i}$  (für  $i$ : Primärfassade - PF, Sekundärfassade - SF, Lisene links - Li, li und Lisene rechts - Li, re) des Fensterkastens mit ein.

Den Anteil des konvektiven Wärmeübergangs am Absorber von dem der den Luftzwischenraum bildenden Flächen mit Hilfe von Gleichung (5.10) zu separieren, also  $\bar{\alpha}_{G-L}$  und  $\bar{\alpha}_{M-L}$  zu bestimmen, ist Inhalt der folgenden Überlegungen.

### Wärmeübergang im Luftzwischenraum

Ausgangspunkt sind die von ZÖLLNER [122] angegebenen mittleren **Nußelt-Zahlen** bei **Zwangskonvektion** in einer Kasten-Kasten-Fassade mit einer Tiefe des Luftzwischenraums von  $S = 60$  cm. Bei der Herleitung der relevanten Nußelt-Reynolds-Beziehungen wird dort für die Zwangsdurchströmung des Luftzwischenraums eine **Schachtströmung** zugrunde gelegt. In der vorliegenden Arbeit wird davon ausgegangen, daß die Durchströmung des Luftzwischenraums durch das Hineinspannen eines oder zweier Matrixabsorber mit sehr geringem Strömungswiderstand [70] nicht nachhaltig beeinflußt wird. Die Wärmeübergangskoeffizienten *ohne Matrixgewebe* entsprechen somit in erster Näherung denen *mit Matrixgewebe*. Für diese Vorgehensweise spricht auch, daß in der Literatur zwar Wärmeübergangskoeffizienten für Drahtgewebe angegeben werden [62], diese aber nur für bestimmte Anströmungssituationen, von denen sie wiederum quantitativ stark abhängig sind, angegeben und anwendbar sind. Es ist also sinnvoller, von den Nußelt-Zahlen in Doppelfassaden auszugehen und daraus die für diesen Einsatzfall resultierenden Wärmeübergangskoeffizienten der Absorbergewebe näherungsweise abzuleiten.

Die dimensionslose Nußelt-Zahl hängt zunächst einmal von dem Verhältnis zwischen Trägheits- und Reibungskräften der erzwungenen Strömung ab, das als dimensionslose Reynolds-Zahl

$$Re = \frac{v_{LZR} \cdot L}{\nu} \quad (5.11)$$

angegeben wird, worin  $w_{sp}$  die mittlere, auf den Querschnitt des Luftzwischenraums bezogene, aus dem eingestellten Massenstrom nach der Kontinuitätsgleichung resultierende Luftgeschwindigkeit, und  $L$  die *charakteristische Länge*, in diesem Fall der **hydraulische Durchmesser**  $D_h$ , des Fensterkastens ist. Mit Hilfe der von ZÖLLNER [122] angegebenen  $Nu-Re$ -Beziehungen erhält man eine mittlere Nußelt-Zahl für den jeweils vorliegenden Fall. Aus der Nußelt-Zahl in der Form

$$\overline{Nu}_{G-L} = \frac{\overline{\alpha}_{G-L} \cdot L}{\lambda_{\overline{T}_L}} \quad (5.12)$$

ergibt sich schließlich der mittlere Wärmeübergangskoeffizient  $\overline{\alpha}_{G-L}$ .

### Wärmeübergang am Matrixabsorber

Indem der so erhaltene Wärmeübergangskoeffizient  $\overline{\alpha}_{G-L}$  in Gleichung (5.10) eingesetzt und nach  $\overline{\alpha}_{M-L}$  aufgelöst wird, kann der dazugehörige mittlere Wärmeübergangskoeffizient am Absorbergewebe näherungsweise bestimmt werden. Somit kann der Anteil des Matrixabsorbers am konvektiven Wärmeübergang auf der Grundlage der gemessenen Oberflächentemperaturen näherungsweise abgeschätzt werden.

## 5.1.2 Temperaturhub und Wirkungsgrad

### 5.1.2.1 Übersicht der aussagekräftigsten Experimente

Zunächst werden in Abbildung 5.2 die Temperaturhübe (Differenz zwischen der Lufttemperatur am Austritt und am Eintritt des Kollektors, vgl. Abschnitt 5.1.1) bei allen Experimenten zwischen **Juli 2001** und **April 2002** ungeachtet des jeweils eingestellten Luftmassenstroms und der jeweiligen Matrixkonfiguration über der auf die Fassade einfallenden Gesamtstrahlung aufgetragen.

#### Einfluß der Solarstrahlung

Mit der solaren Einstrahlung steigt naturgemäß der Temperaturhub der Luft. Die große Bandbreite der erreichten Temperaturhübe insbesondere bei hoher Einstrahlung ergibt sich aus den unterschiedlichen **Luftmassenströmen**, aber auch aus den verschiedenen **Matrixkonfigurationen** wie Matrixanzahl und -position, die in den folgenden Unterkapiteln detaillierter betrachtet werden. Bei optimalen Randbedingungen wurden im Experiment Temperaturhübe zwischen 5 K (bei  $\dot{G}_{Fas} \approx 100 \text{ W/m}^2$ ) und 25 K (bei  $\dot{G}_{Fas} \approx 800 \text{ W/m}^2$ ) gemessen. Die relative Häufung von Datenpunkten bei 0 ... 200  $\text{W/m}^2$  und bei 500 ... 900  $\text{W/m}^2$  liegt an der Auswahl der Experimente: Diese Strahlungswerte kommen an einer Südfassade bei den für die Experimente bevorzugten stabilen Wetterbedingungen (bewölkt oder heiter) am häufigsten vor. Der dazwischen liegende Bereich (300 ... 500  $\text{W/m}^2$ ) liegt an einer Südfassade allenfalls bei selteneren Wetterlagen wie leichtem Hochnebel oder hoher sommerlicher Trübung vor, oder aber als Mittelwert bei stark wechselnden Bedingungen, die aber *nicht* als aussagekräftige Experimente ausgewertet wurden. Bei hoher sommerlicher Einstrahlung konnten die Temperaturhübe durch Anheben des Luftmassenstroms über 100 g/s auf unter

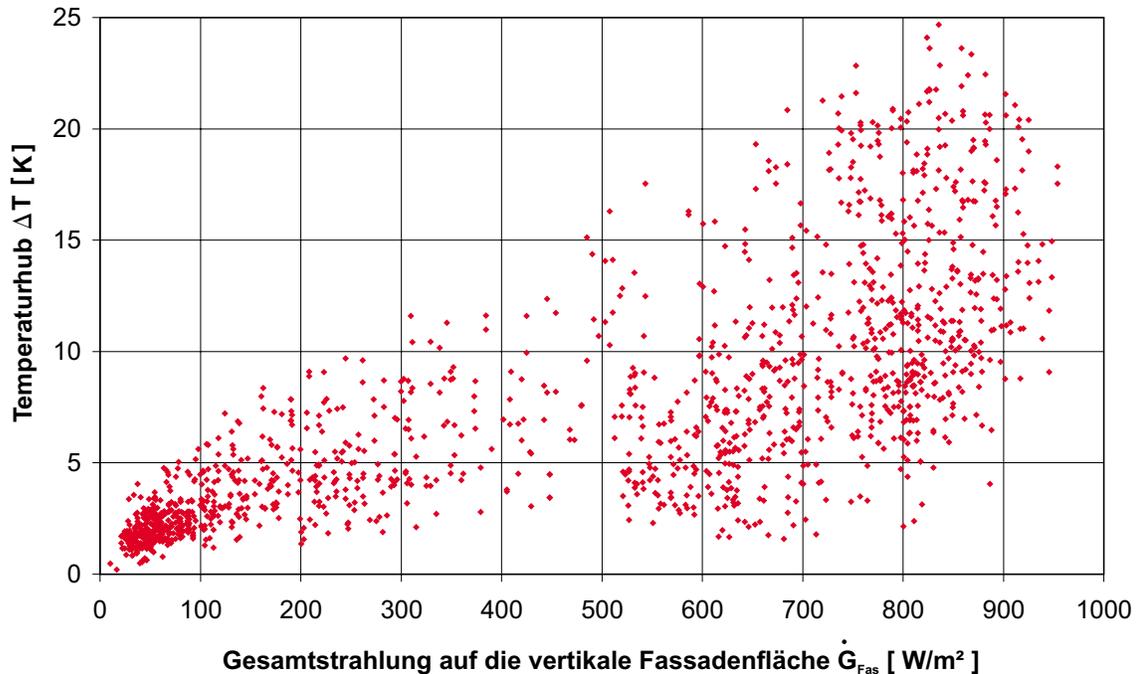


Abbildung 5.2: Temperaturhub in Abhängigkeit von der Gesamtstrahlung  $\dot{G}_{Fas}$  auf die vertikale Fassadenfläche aller aussagekräftigen Experimente zwischen Juli 2001 und April 2002

5 K begrenzt werden (Bereich rechts unten in Abbildung 5.2). Diese Datenpunkte werden bei der folgenden massenstromabhängigen Darstellungsweise nicht mehr berücksichtigt. Die Gesamtstrahlung auf die hier vorliegende vertikale Südfassade und damit auch die Datenpunkte der Experimente in Abbildung 5.2 können in folgende zeitliche Wertebereiche unterteilt werden, die in erster Linie mit der jahreszeitlich bedingten Sonnenbahn (hier Sonnenhöhe  $\gamma_S$  für den Standort München), aber auch mit der im Sommer und Winter unterschiedlichen Trübung der Atmosphäre korrespondieren:

- $\dot{G}_{Fas} = 500 - 700 \text{ W/m}^2$ : Juli und August  
(Sommer,  $\gamma_{S,max} \approx 50 \dots 65^\circ$ )
- $\dot{G}_{Fas} = 700 - 800 \text{ W/m}^2$ : September - Oktober und März - April  
(Übergangszeit,  $\gamma_{S,max} \approx 30 \dots 50^\circ$ )
- $\dot{G}_{Fas} = \geq 800 \text{ W/m}^2$ : November - Februar  
(Winter,  $\gamma_{S,max} \approx 20 \dots 30^\circ$ )

### Einfluß des Luftmassenstroms

Durch die Einteilung der Datenpunkte nach Abbildung 5.3 wird die Abhängigkeit des Temperaturhubes vom Luftmassenstrom sichtbar. Temperaturhübe über 20 bis 25 K sind demnach nur bei Massenströmen von 10 ... 15 g/s erreichbar, bei  $\dot{M} = 100$  g/s sind noch Temperaturhübe von 5 ... 10 K zu erwarten. Wird  $\dot{M}$  auf 50 g/s vermindert, werden Temperaturhübe von maximal 15 K bei bester Konfiguration erreicht. Deutlich höhere Temperaturhübe von bis zu 20 K und darüber treten erst bei einer weiteren Reduktion des Massenstromes auf 25 g/s und darunter auf. Gleichzeitig wird die Bandbreite der Versuchsergebnisse grösser, es sind bei  $\dot{M} = 10 \dots 15$  g/s durchaus auch einzelne Experimente mit  $\Delta T \leq 15$  K aufgetreten.

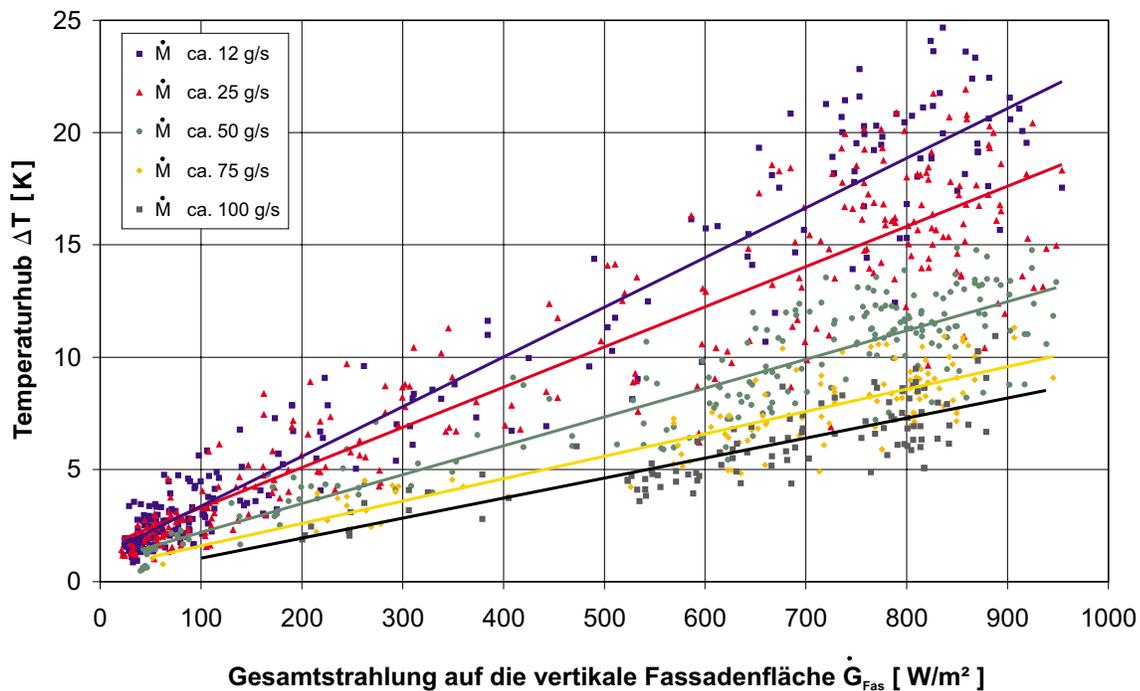


Abbildung 5.3: Temperaturhub in Abhängigkeit von Gesamtstrahlung  $\dot{G}_{Fas}$  und Luftmassenstrom  $\dot{M}$  aller aussagekräftigen Experimente zwischen Juli 2001 und April 2002

Die Schwankung innerhalb der untersuchten Massenstrombereiche beträgt bei gleicher Einstrahlung in der Regel ca.  $\pm 3$  K, bei starker Einstrahlung und kleinem Luftmassenstrom wie oben bereits erwähnt höher, bei abnehmender Einstrahlung und großem Luftmassenstrom etwas niedriger. Sie ist ausschließlich durch die verschiedenen Matrixkonfigurationen bedingt. Dies zeigt bereits deutlich, daß die exakte Matrixkonfiguration bei den hier untersuchten Varianten einen geringeren Einfluß auf den erreichbaren Temperaturhub hat als der durchgesetzte Luftmassenstrom. Dennoch soll der Einfluß der jeweiligen Matrixkonfiguri-

on auf den Temperaturhub noch detaillierter herausgearbeitet werden, was Gegenstand nachfolgender Unterkapitel ist. Es gilt herauszufinden, welche Matrixkonfigurationen sich am oberen und welche sich am unteren Ende der genannten Schwankungsbreite bei einem bestimmten Luftmassenstrom befinden. Nach Abbildung 5.3 bewegt sich der Temperaturhub beispielsweise bei einem Luftmassenstrom von 50 g/s und hoher Einstrahlung bei 10 bis 15 K, wobei dann eben interessant ist, mit welcher Konfiguration der höhere Wert erreicht worden ist.

In Abbildung 5.4 sind wiederum die Temperaturhübe aller aussagekräftigen Experimente aufgetragen, diesmal nach allgemein üblicher Darstellungsweise in reiner Abhängigkeit vom Luftmassenstrom. Abbildung 5.4 beinhaltet ausschließlich Versuchsergebnisse bei einer vertikalen Gesamtstrahlung von mehr als 500 W/m<sup>2</sup>. Zusätzlich sind die nach Abschnitt 5.1.1.1 berechneten zugehörigen Wirkungsgrade dargestellt, die mit zunehmendem Massenstrom und damit sinkenden Kollektortemperaturen erwartungsgemäß ansteigen.

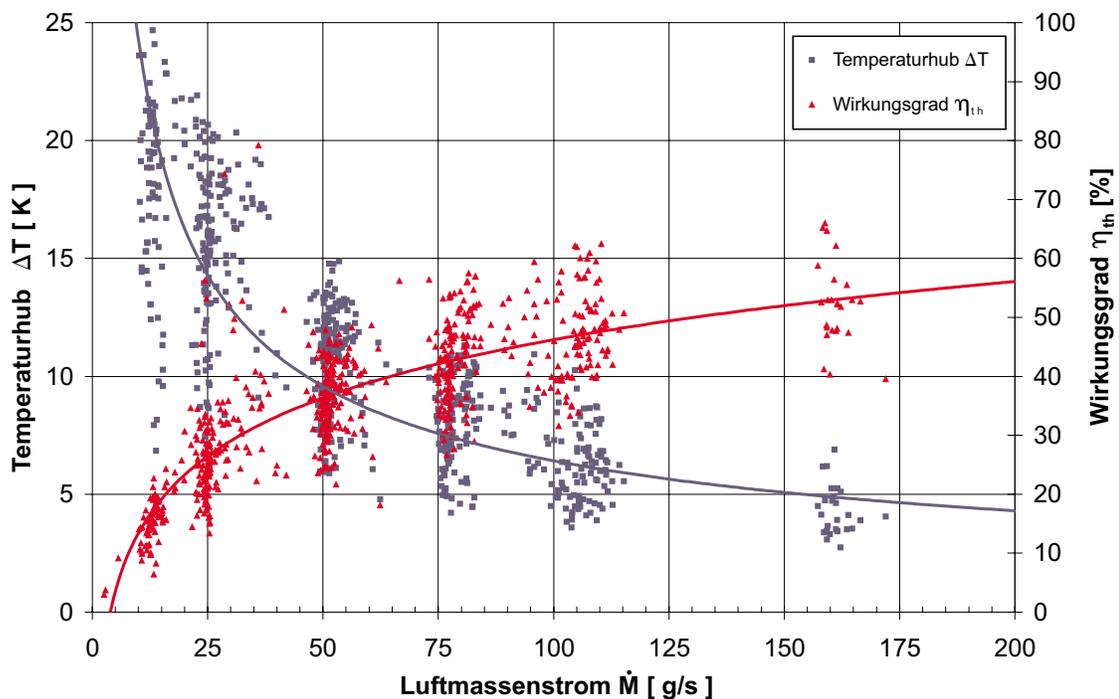


Abbildung 5.4: Temperaturhub  $\Delta T$  und zugehöriger Wirkungsgrad  $\eta_{th}$  aller aussagekräftigen Experimente zwischen Juli 2001 und April 2002 in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom  $\dot{M}$

Im Durchschnitt erreichen alle Variationen des Matrixkollektors maximal ca. 60% Wirkungsgrad bei entsprechend niedrigen Kollektortemperaturen. Einzelne Messungen ergaben auch geringfügig höhere Werte, allerdings nur für Massenströme oberhalb von 100 g/s. Die Mehrzahl aller Ergebnisse liegt für Luftmassenströme

im Bereich von ca. 25 bis 100 g/s zwischen 30 und 50% Wirkungsgrad. Bei noch kleineren Massenströmen unterhalb von 25 g/s fällt der Wirkungsgrad rapide ab und erreicht insbesondere bei kalten Außentemperaturen aufgrund der hohen thermischen Verluste nur noch etwa 20%, und im Einzelfall deutlich darunter. Gleichzeitig werden im Experiment natürlich genau dann die größten Temperaturhübe von bis zu 25 K erreicht, die für die winterliche Außenluft- oder Zuluftvorwärmung benötigt werden. Der Wirkungsgrad kann von daher in dieser Anwendung nicht als das zu optimierende Kriterium betrachtet werden. Vielmehr spielt der substituive und bifunktionale Charakter des in die Doppelfassade integrierten Matrixabsorbers in der Gesamtbewertung sicher die weitaus größere Rolle. Die Einordnung der energetischen Performance dieses speziellen Fensterkollektors in kommerziell eingeführte Luftkollektoren, die in Abschnitt 5.1.5 am Ende dieses Kapitels vorgenommen wird, erfordert dennoch die dimensionslose Bewertungsgröße des thermischen Wirkungsgrades.

In den folgenden Unterkapiteln werden die bisher getroffenen Aussagen anhand von Experimenten präzisiert, die gezielt zur Isolierung weiterer Einflußgrößen durchgeführt wurden. Abgesehen vom jeweils zu untersuchenden Parameter wurden die anderen Einflußgrößen innerhalb der in 4.4.3 angegebenen Grenzen „quasikonstant“ gehalten. Am Beispiel der nun folgenden Beschreibung des jahreszeitlichen Einflusses heißt das, daß eine identisch eingestellte Konfiguration (Darstellung der vermessenen Konfigurationen in Kapitel 4.4) jeweils an einem typischen Sommer-, Herbst- und Wintertag vermessen wurde.

### 5.1.2.2 Jahreszeitlicher Einfluß

Der Temperaturhub und der Wirkungsgrad eines Doppelfassaden-Matrixkollektors wird neben den jahreszeitlich schwankenden absoluten **Einstrahlungswerten auf die Fassade** (siehe Abschnitt 5.1.2.1) im Wesentlichen durch die jahreszeit-typischen **Außentemperaturen** und **Einstrahlwinkel** beeinflusst. Durch das richtungsabhängige Transmissionsvermögen der Sekundärverglasung trifft bei tiefstehender Sonne ein größerer Strahlungsanteil auf den Absorber als bei großer Sonnenhöhe (Sommerfall Südfassade, mittags). Daneben ist die durch opake Bereiche der Sekundärfassade verschattete Fläche von der Sonnenhöhe bzw. von der Tiefe des Luftzwischenraums abhängig. Von daher sind Absorberflächen, die so im Luftzwischenraum angebracht sind, daß sie zu einem Großteil verschattet werden, eher ungünstig, da dieser Anteil nur mit dem Diffusanteil der solaren Einstrahlung beaufschlagt wird. Das betrifft insbesondere Matrix-Konfigurationen mit positivem Neigungswinkel, da der obere Teil des Absorbergewebes in der hinteren, primärfassadennäheren Hälfte des Luftzwischenraums vor allem bei größeren Sonnenhöhen von darüberliegenden opaken horizontalen Trennelementen bzw.

Sekundärfassadenteilen verschattet wird. Um den Einfluß der jahreszeitlich bedingten Umgebungsverhältnisse zu isolieren, eignen sich demnach nur Matrix-Konfigurationen mit **vertikaler Anordnung** nahe an der Sekundärfassade oder mit **kleinem negativem Anstellwinkel**.

Weiterhin ist als Einfluß der Umgebungsbedingungen zu beobachten, daß der Kollektorwirkungsgrad mit steigender Einstrahlung fällt, weil dadurch die Wärmeverluste an die Umgebung durch die höheren Kollektortemperaturen ansteigen. Dennoch steigt der erreichbare Temperaturhub in diesem Fall an, da bei Frischluftbetrieb der für den Wärmeübergang maßgebliche Temperaturgradient zwischen Matrix und Luft größer ist. Dieser Temperaturgradient sinkt entsprechend bei steigender Kollektoreintrittstemperatur, wodurch wiederum der Wirkungsgrad abfällt. Nachdem der jahreszeitliche Einfluß auf die Versuchsergebnisse solchermaßen allgemein beschrieben wurde, sollen nun anhand der (-20°)-Konfiguration mit zwei Absorbergeweben unterschiedlicher Siebfläche ( $\psi_{M1} = 0.53$ ,  $\psi_{M2} = 0.31$ ) einige Meßergebnisse beschrieben werden.

Die jahreszeitlichen Vergleichsmessungen bei identischer Konfiguration zeigten bei einem Luftmassenstrom von  $\dot{M} \approx 25$  g/s die im Folgenden beschriebenen Unterschiede. Im **Winterfall** ( $\gamma_S \approx 17 - 20^\circ$ ,  $\dot{G}_{Fas} \approx 900$  W/m<sup>2</sup>,  $T_\infty \approx 0^\circ$ C) wurde ein Temperaturhub  $\Delta T$  von bis zu 19 K und ein Wirkungsgrad von etwa 25% erreicht. Bei den **Herbst**-Messungen wurden an der gleichen Konfiguration bei einer Einstrahlung von  $\dot{G}_{Fas} \approx 800$  W/m<sup>2</sup> ( $\gamma_S \approx 30 - 33^\circ$ ) und höheren Außentemperaturen  $T_\infty \approx 20^\circ$ C Temperaturhübe von etwa 13 - 15 K gemessen, bei Wirkungsgraden von 20 - 25%. Hierbei ist zu beachten, daß der Abfall des Wirkungsgrades aufgrund der höheren Lufteintrittstemperatur gegenüber dem Winterfall durch die geringere Gesamtstrahlung zum Teil wieder kompensiert wird. Im **Sommerfall** ergibt sich bei wiederum verminderter Einstrahlung von etwa  $\dot{G}_{Fas} \approx 700$  W/m<sup>2</sup> ( $\gamma_S \approx 50^\circ$ ,  $T_\infty \approx 25 - 30^\circ$ C) nur noch ein Temperaturhub  $\Delta T$  von etwa 10 K bei Wirkungsgraden von knapp 20%.

### 5.1.2.3 Einfluß der Matrixposition

Nachdem im vorangegangenen Unterkapitel der jahreszeitliche Einfluß auf den Matrixkollektor in der Doppelfassade für eine Konfiguration diskutiert wurde, werden in diesem Abschnitt die Auswirkungen unterschiedlicher Matrixanordnungen im Luftzwischenraum (Übersicht der Konfigurationen in Kapitel 4.4) für den **Winterfall** behandelt.

Bei Konfigurationen mit **positivem Anstellwinkel** ist bei hochstehender Sonne ein Großteil des Absorbergewebes verschattet und kann somit weniger direkte Solarstrahlung absorbieren. Zudem sind im Winterfall höhere Wärmeverluste zu

erwarten, da die Luft die Absorbermatrix von der Primärseite zur Sekundärverglasung hin durchströmt, wo sie Wärme an die kältere Außenscheibe verliert. Aus lufttechnischer Sicht wäre diese Konfiguration also sowohl bei Fensterlüftung (wegen der kalten Zuluft an der Primärseite) als auch bei mechanischer Lüftung (vor allem wegen der größeren Wärmeverluste) eher als ungünstig einzustufen. Wenn es darum geht, die Aufheizung des Luftzwischenraums zu begrenzen oder der betreffende Fensterkasten als **Abluftachse** (siehe Kapitel 3.1) betrieben wird, ist es am sinnvollsten diese Konfiguration einzustellen, da dann an der **Primärfassade** die **niedrigsten Lufttemperaturen** auftreten.

### Vergleich zwischen positivem und negativem Anstellwinkel der Matrix

Dennoch wurde die von vornherein für etwas ungünstiger gehaltene Konfiguration mit **positivem** Anstellwinkel im **Vergleich** mit dem **negativen Anstellwinkel** für den Herbst- und Winterfall vermessen. Die **Wintermessungen** ergaben bei gleichen Außentemperaturen von ca.  $5^\circ\text{C}$  und  $\dot{G}_{Fas} \geq 800 \text{ W/m}^2$  ( $\gamma_S \approx 20^\circ$ ) beim Einsatz von zwei Absorbergeweben für die positiv geneigte Matrix ( $\gamma_M = +20^\circ$ ) einen Temperaturhub von etwa 18 K ( $\eta_{th} \approx 0.35$ ), während sich bei  $\gamma_M = -20^\circ$  ein  $\Delta T$  von ca. 13 K ( $\eta_{th} \approx 0.25$ ) einstellte, jeweils bei einem Luftmassenstrom von  $\dot{M} \approx 35 \text{ g/s}$ . Der Vergleich dieser beiden Konfigurationen wird aufgrund des überraschenden Ergebnisses noch einmal für den **Herbstfall** ( $\dot{G}_{Fas} \approx 750 \text{ W/m}^2$ ) angestellt. Allerdings herrschten bei den vergleichbaren Experimenten Außentemperaturen von gut  $20^\circ\text{C}$ . Wiederum ergaben sich für  $\gamma_M = -20^\circ$  – zwar nur geringfügig, aber dennoch – kleinere Werte von ca. 16 K gegenüber dem positiven Neigungswinkel, diesmal bei  $\dot{M} \approx 25 \text{ g/s}$ .

Der direkte Vergleich von Experimenten mit  $\gamma_M = +20^\circ$  ergab fast identische Temperaturhübe von 18 K bei einem Massenstrom von ca. 30 g/s, obwohl die Oberflächentemperatur der Sekundärfassade innen aufgrund unterschiedlicher Außentemperaturen um über 15 K differierte. Die wesentlich *niedrigere Außentemperatur* wirkt sich also wider Erwarten *nicht gravierend* aus. Dies kann nur an der Art der Durchströmung der Matrixabsorber liegen, die wiederum vom absoluten Luftmassenstrom durch den Kollektor abhängt, wie in Abschnitt 5.1.3 noch zu zeigen sein wird. Deshalb wurden Vergleiche mit höheren als den bisher betrachteten Massenströmen angestellt. Bei Massenströmen zwischen 75 und 100 g/s ergaben sich aber tendenziell keine grundlegend anderen Ergebnisse, lediglich rückten die Werte bei vergleichbaren Bedingungen noch etwas näher zusammen.

### Vergleich zwischen Standard- und Sonderkonfigurationen

Im Vergleich zu den beiden geneigten Matrixpositionen zeigte die **vertikale** ( $0^\circ$ )-Konfiguration um 10 - 20% größere Temperaturhübe, insbesondere bei Massenströmen  $\dot{M} \leq 50 \text{ g/s}$ . Der Vergleich zwischen vertikaler und positiv angestellter ( $20^\circ$ ) Matrix ergibt bei  $\dot{M} = 25 \text{ g/s}$  beispielsweise einen etwas größeren Tempera-

turhub von ca. 17 K gegenüber 15 K für die 0°-Position.

Nachdem also die **Standard-Matrixkonfigurationen** im relevanten Massenstrombereich insgesamt eher **geringe Unterschiede** bezüglich des erreichbaren Temperaturhubs zeigen, gilt es jetzt noch, die Performance der lichttechnisch motivierten, sogenannten **Sonderkonfigurationen**, bei denen eine insgesamt nur kleinere Absorberfläche abgerollt ist, im Vergleich mit den bisher untersuchten zu beleuchten. Die bei tiefstehender Sonne aus Blendschutzgründen interessante Konfiguration mit negativem Neigungswinkel (-45°) und vertikaler Abspannung lieferte ähnliche Ergebnisse wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, die Absolutwerte fielen trotz der geringeren Absorberfläche kaum niedriger aus. Der Temperaturhub lag im Winterfall bei ca. 15 K, und damit nur um maximal 20% niedriger als bei komplett abgerollter Matrix im Neigungswinkel -20°, jeweils bei einem Luftmassenstrom von ca. 25 g/s.

Der Einfluß der Matrixposition auf den Temperaturhub wird auch zusammen mit der Besprechung der Temperaturverteilung auf den Absorbergeweben im Unterkapitel 5.1.3.2 ergänzend behandelt.

#### 5.1.2.4 Einfluß der Matrixanzahl

Aufgrund des **Strahlungsfalleneffektes** erfährt die den Luftzwischenraum durchströmende Luft auch ohne solare Einbauten einen bestimmten Temperaturhub, wie in Kapitel 3 bereits erwähnt wurde. Der Wärmetransport findet in diesem Fall ausschließlich zwischen den erwärmten Glasumschließungsflächen und der Luft im Luftzwischenraum statt. Um den Anteil der Matrixabsorber am jeweiligen Temperaturhub herauszuarbeiten, werden Ergebnisse mit und ohne Matrixabsorber einander gegenübergestellt.

Abbildung 5.5 zeigt für einen Tag in der **Übergangszeit**, daß der Temperaturhub mit zwei Matrixabsorbern in einem Neigungswinkel von  $\gamma_M = -20^\circ$  etwa um den Faktor 2 über dem Fall ohne Absorber liegt. Dies wurde unabhängig von Neigungswinkel und Jahreszeit für alle diesbezüglichen Vergleichsexperimente bestätigt gefunden, wenn auch auf unterschiedlichen Temperaturniveaus. Der hier nicht eigens dargestellte Temperaturhub mit nur einem engmaschigen Gewebe liegt hier nur um 1 bis 2 K unter dem mit zwei Absorbergeweben, was auch durch einen Vergleich bei positivem Anstellwinkel bestätigt wurde. Lediglich bei **vertikaler** Matrix liegt  $\Delta T$  für ein Gewebe gegenüber dem Fall mit zwei Geweben deutlich schlechter. Die zusätzliche Absorbermatrix (hier mit größerer freier Siebfläche) vergrößert hier den Temperaturhub um bis zu 50%. In den meisten Fällen konnte aber keine deutliche Steigerung des Temperaturhubes durch den Einsatz eines zweiten (grobmaschigeren,  $\psi = 0.53$ ) Gewebes erzielt werden.

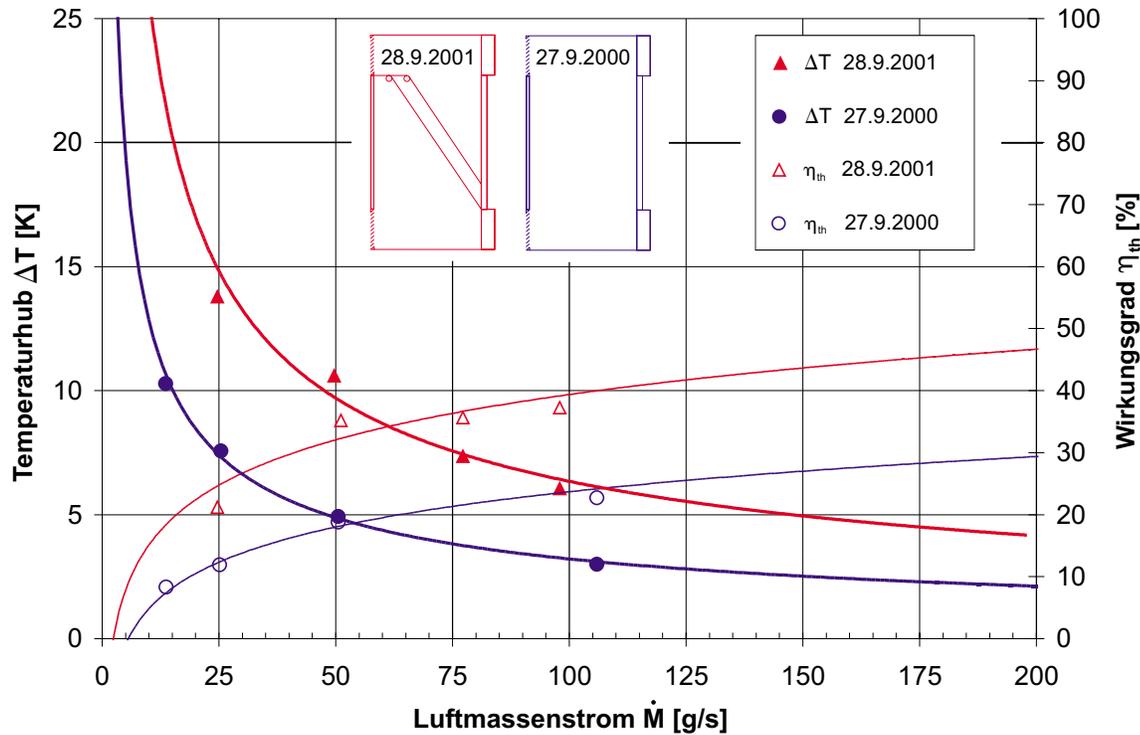


Abbildung 5.5: Temperaturhub  $\Delta T$  in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom  $\dot{M}$  im Vergleich mit und ohne Matrixabsorber

### 5.1.2.5 Einfluß der Matrixgeometrie

Der Einfluß der **freien Siebfläche** des Absorbergewebes wurde isoliert, indem zwei einzelne, unterschiedliche Matrixgewebe ( $\psi_{M1} = 0.53$ ,  $\psi_{M2} = 0.31$ ) unter ansonsten gleichen Bedingungen untersucht wurden. Der Vergleich bei vertikaler Einbauposition unter sommerlichen Bedingungen ergab um 10 bis 20% höhere Temperaturhübe für das engmaschigere, feinere Matrixgewebe M2. Die geringere Drahtstärke und Maschenweite von M2 bedeutet eine höhere spezifische Oberfläche des Gewebes (siehe Tabelle 4.4), die zu verbesserten Absorptions- und Wärmeübertragungseigenschaften führt. Das engmaschigere Gewebe zeigt darüber hinaus ein etwas anderes Durchströmungsverhalten, was mit Hinblick auf den folgenden Abschnitt an dieser Stelle erwähnt werden soll. Aufgrund der geringeren freien Siebfläche ist der Strömungswiderstand entsprechend höher, so daß bei freier Anströmung (als solche können die hier untersuchten Fälle aufgrund der Geometrieverhältnisse betrachtet werden) ein größerer Teil der Luft zur Seite bzw. nach oben abgelenkt wird, was wiederum zu einer anderen Temperaturverteilung auf der Matrix führt. Diese Zusammenhänge sind im nächsten Teilkapitel Gegenstand detaillierterer Untersuchungen. Die Gleichmäßigkeit der Durch-

strömung bei bestimmten Konfigurationen zu verbessern war ferner die Motivation, Luftleitbleche im Lufteintrittsbereich des Doppelfassadenkollektors zu testen, deren Einfluß im anschließenden Abschnitt behandelt wird.

#### 5.1.2.6 Einfluß von Luftleitblechen

Bei einigen Versuchsreihen mit der (+20°)-Konfiguration wurden Luftleitbleche eingesetzt. Insbesondere bei hohen Luftmassenströmen tritt der bereits aus vorhergehenden Untersuchungen an zwangsdurchströmten Doppelfassaden [122] bekannte Effekt auf, daß sich die Luftströmung bereits im unteren Drittel des Fensterkastens an die Primärfassade anschmiegt. Das würde beim Einsatz der Matrixabsorber in der obengenannten Position dazu führen, daß hauptsächlich der obere, primärfassadennahe Bereich der Matrixgewebe durchströmt würde, während der untere Teil kaum an der Durchströmung und damit am Wärmeübergang von der Matrix an die Luft teilhätte. Um diese ungleichmäßige Durchströmungssituation zu vermeiden, wurden drei Luftleitbleche an das Lufteintrittsgitter angeschlossen, die die einströmende Luft in drei etwa gleich großen Anteilen nach oben umlenkten und somit für eine gleichmäßigere Anströmung des Matrixabsorbers sorgten. Trotz dieser Vergleichmäßigung konnte aber **kein erhöhter Temperaturhub** für die Konfiguration mit Einsatz von Luftleitblechen gegenüber derjenigen ohne Luftleitbleche festgestellt werden. Inwieweit die Strömungssituation im Fensterkollektor überhaupt Einfluß auf die Wirkungsgrade und Temperaturhübe hat, wird im folgenden Teilkapitel behandelt.

### 5.1.3 Temperaturverteilung und Strömungsverhältnisse

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt die unterschiedlichen Einflüsse auf den erzielbaren Lufttemperaturhub und Wirkungsgrad eines Doppelfassaden-Matrixkollektors diskutiert wurden, sollen in diesem Unterkapitel die **Oberflächentemperaturen** der einzelnen am Wärmeübergang beteiligten Bauteile, insbesondere des Matrixabsorbers, untersucht werden. Wichtiger als das bloße Beobachten einer Differenz der Lufttemperatur zwischen Eintritt und Austritt ist für das Verständnis der thermischen Vorgänge im Kollektor die Kenntnis von Temperaturverteilungen im Inneren des Luftkollektors. Dies nicht nur, um den Effekt der Lufterwärmung zu erklären und zu analysieren, sondern im vorliegenden Fall auch, um daraus Folgerungen für die Eignung der Kollektorfassade in Verbindung mit bestimmten Lüftungsstrategien (z.B. Lüftung über die Primärfassade) abzuleiten.

### 5.1.3.1 Temperaturverteilung im typischen Winter- und Sommerfall

Zunächst wird die Temperaturverteilung im Luftzwischenraum der Doppelfassade für einen typischen Winter- und Sommerfall besprochen. Abbildung 5.6 zeigt den Temperaturverlauf über der Fassadentiefe für einen strahlungsreichen Winter- (links) bzw. Sommertag (rechts). Wenngleich der Einstrahlwinkel der Direktstrahlung auf die Fassade im Sommerfall bei über  $50^\circ$  gegenüber etwa  $20^\circ$  im Winter liegt, ergibt sich aufgrund der geneigten Matrix im Winterfall für beide Situationen ein vergleichbarer resultierender Einstrahlwinkel  $\gamma_T$  auf den Matrixabsorber. In beiden Fällen kamen identische Drahtgewebe zum Einsatz.

Die Absorbtemperaturen sind naturgemäß die höchsten Temperaturen im Luftzwischenraum. Im **Sommerfall** ist die treibende Temperaturdifferenz zwischen Absorber und Luft durch die hohen Außentemperaturen bedingt niedriger und damit auch der resultierende Temperaturhub der Luft vor und nach Durchströmung des Matrixabsorbers. Dennoch liegt das absolute Temperaturniveau sowohl bei kleinerem ( $\dot{M} \approx 25 \text{ g/s}$ ) als auch bei hohem Luftmassenstrom ( $\dot{M} \approx 75 \text{ g/s}$ ) so deutlich über der Außenlufttemperatur, daß eine Fensterlüftung in dieser Konstellation nicht in Frage kommt. Insbesondere bei kleinem  $\dot{M}$  ist deutlich zu sehen, daß bereits an der etwa 10 K über Außenlufttemperatur liegenden Sekundärscheibe eine Erhöhung der Lufttemperatur von  $35^\circ\text{C}$  auf über  $37^\circ\text{C}$  stattfindet. Nach Durchströmung der beiden Matrixabsorber, die eine Oberflächentemperatur von etwa  $50^\circ\text{C}$  aufweisen, beträgt die Lufttemperatur zwischen Absorber und Primärverglasung über  $45^\circ\text{C}$ . Dies ist zwar ein Wert, der bei schlecht dimensionierten und daher schlecht durchströmten Doppelfassaden ohne Einbauten durchaus übertroffen werden kann [122], aber natürlich viel zu hoch liegt, um Fenster in der Primärfassade öffnen zu können. Bei einer Erhöhung des Massenstroms auf  $75 \text{ g/s}$  verringern sich alle Oberflächentemperaturen deutlich, die primärfassadennahe Lufttemperatur beträgt aber immer noch knapp  $40^\circ\text{C}$ .

Der **Winterfall** ist insgesamt durch höhere treibende Temperaturdifferenzen, insbesondere zwischen Matrixabsorber und durchströmender Luft geprägt. Bei einem Luftmassenstrom  $\dot{M}$  von ca.  $28 \text{ g/s}$  wird die mit  $0^\circ\text{C}$  eintretende Luft bereits an der Sekundärverglasung ( $T_O \approx 13^\circ\text{C}$ ) auf gut  $5^\circ\text{C}$  erwärmt. An den beiden Absorbergeweben ( $T_{M1} \approx 37^\circ\text{C}$ ,  $T_{M2} \approx 30^\circ\text{C}$ ) findet eine weitere Temperaturerhöhung der Luft auf über  $20^\circ\text{C}$  statt. Diese auf Zimmertemperatur erwärmte Luft hinterhalb des Matrixabsorber kann direkt als Zuluft für den dahinterliegenden Raum dienen.

In allen Fällen gilt gleichermaßen, daß die Temperatur der zweiten, von der Sonne abgewandten Matrix M2 niedriger liegt als die der vorderen Matrix M1, obwohl letztere bewußt eine größere freie Siebfläche ( $\psi_{M1} = 0.53$ ) aufwies als M2 ( $\psi_{M2} = 0.31$ ), um auch der zweiten Matrix noch genügend Direktstrahlung zuteil werden

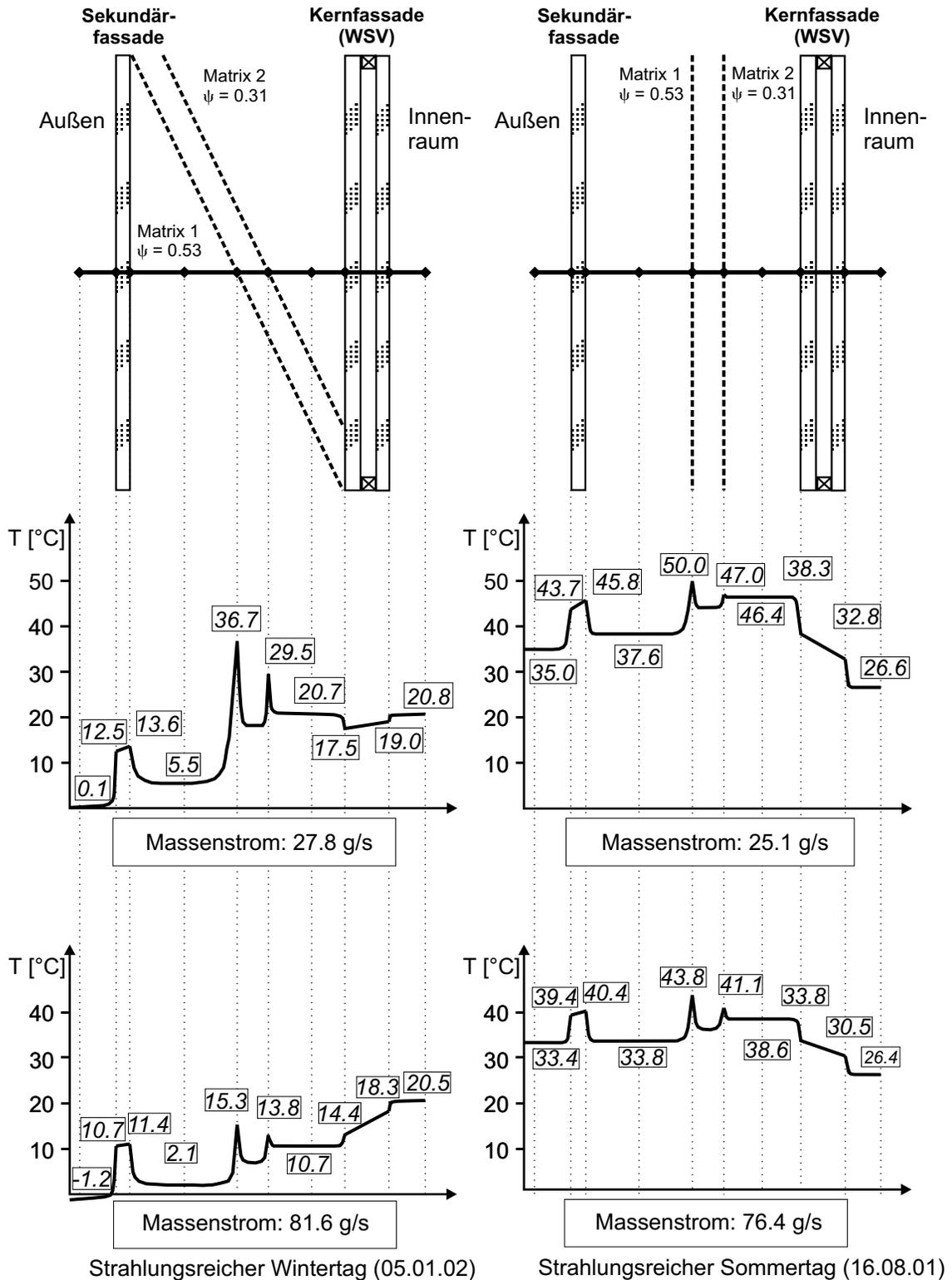


Abbildung 5.6: Temperaturverlauf im Doppelfassaden- Matrixkollektor an einem strahlungsreichen Winter- und Sommertag bei unterschiedlichem Luftmassenstrom, Durchströmung der Matrixabsorbe von unten nach oben bzw. von links nach rechts

zu lassen. Dennoch absorbiert Matrix M1 abhängig vom Einstrahlwinkel mindestens die Hälfte der pro Flächeneinheit auftreffenden Strahlung, der Rest erreicht Matrix M2, die aber entsprechend ihrer freien Siebfläche wiederum einen großen Teil der Einstrahlung passieren läßt. In beiden Fällen nach Abbildung 5.6 wird zuerst die höhertemperierte und erst anschließend die Matrix geringerer Temperatur durchströmt. Das bedeutet, daß an M1 die größtmögliche Temperaturdifferenz für den Wärmeübergang zur Verfügung steht. Gleichzeitig verringert sich die Temperaturdifferenz zwischen M2 und der von M1 vorgewärmten Luft, was zu einem verminderten Wärmeübergang an Matrix M2 führt. Das kann sogar dazu führen, daß sich die Luft beim Durchströmen der zweiten Matrix geringerer Temperatur wieder abkühlt. Dieser Effekt führt auch KHE [69] zu der Empfehlung, daß höchstens zwei oder drei Gewebe übereinander angeordnet werden sollten. Die dort getroffene Aussage, daß das obere, der Sonne zugewandte Gewebe eine höhere, das untere abgewandte eine niedrigere Lochfläche haben sollte, muß unter dem Eindruck der oben dargestellten Ergebnisse insofern für den hier vorliegenden Fall eines fassadenintegrierten Matrixabsorbers auf bestimmte Durchströmungssituationen eingeschränkt werden.

### **Folgerungen für die Reihenfolge der Anordnung**

Bei der in Abbildung 5.6 dargestellten Situation mit negativem Neigungswinkel würde ein Vertauschen der beiden Gewebe die Situation verschlechtern: Die vordere, zuerst durchströmte Matrix würde noch wärmer. Mit positiv geneigten, und somit genau in anderer Reihenfolge durchströmten Geweben dagegen sind prinzipiell im Bereich der hier betrachteten Siebflächen beide Anordnungen möglich. Dennoch ist vom Einsatz des feinmaschigeren Gewebes in sonnenzugewandter Position abzuraten, da beim ersten Gewebe aufgrund seiner niedrigen Temperatur kaum Wärmeübergang stattfindet und anschließend das demgegenüber sehr viel wärmere vordere Gewebe fast den gesamten Temperaturhub bewerkstelligt. In dieser Anordnung ist das hintere, grobmaschigere Gewebe überflüssig. Außerdem bewirkt das vordere feinmaschigere Gewebe insbesondere im Winterfall höhere Strahlungsverluste an die kältere Sekundärscheibe.

In der vertikalen Konfiguration gilt vergleichbares, wie das vorher für die negativ geneigten Matrixabsorber Gesagte. Eine zusätzliche feinmaschigere Matrix hinter einer bestehenden grobmaschigeren bringt bei einer Durchströmung von vorne nach hinten eine Verbesserung, die feinere Matrix vorne anzuordnen ist weniger sinnvoll. Dennoch sind bei der vertikalen Konfiguration die gegenüber der negativen Anstellung andersartigen Durchströmungsverhältnisse zu berücksichtigen, was Gegenstand detaillierter Betrachtung im nachfolgenden Unterkapitel ist.

Aus den bis hierher erläuterten Zusammenhängen lassen sich dennoch zwei bereits oben beschriebene Ergebnisse erklären: Zum Einen erklärt sich daraus,

warum die (20°)-Konfiguration wider Erwarten höhere Temperaturhübe aufweist. Bei ihr strömt die Luft nämlich zunächst durch die hintere, sonnenabgewandte Matrix geringerer Temperatur, um sich anschließend an der folgenden wärmeren Matrix weiter aufzuwärmen. Weiterhin läßt sich damit erklären, warum eine zusätzliche grobmaschigere Matrix vor einer engmaschigen Matrix in der (-20°)-Konfiguration keine weitere Verbesserung des Temperaturhubes bewirkt. Insgesamt ist also für einen möglichst effektiven Wärmeübergang an den Matrixabsorbentien der Schluß zu ziehen, abhängig von der Durchströmungsrichtung die Matrixabsorber so anzuordnen, daß außer im Fall der positiv geneigten Position, bei der sowohl den konvektiven als auch den radiativen Wärmeverlusten besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muß, grundsätzlich die **wärmere Matrix als zweite durchströmt** wird.

### 5.1.3.2 Einfluß der Matrixposition auf die Matrixtemperaturen und die Durchströmung

Die erreichbaren Temperaturhübe mit einer Matrix bewegen sich in der Übergangszeit (Meßzeitraum September/Okttober) zwischen 12 und 17 K bei kleinen Luftmassenströmen (25 g/s) und nehmen bei ca. 100 g/s bis auf etwa 6 K ab (untere Kurvenschar in Abbildung 5.7). Der größte Temperaturhub ergibt sich bei vertikaler Matrix, gefolgt von der (20°)- und der (-20°)-Konfiguration, wobei die Unterschiede mit zunehmendem Massenstrom abnehmen. Wie die Lufttemperaturhübe sinken auch die einzelnen Matrixtemperaturen mit ansteigendem Luftmassenstrom (vgl. obere Kurvenschar in Abbildung 5.7). Allerdings sind die auftretenden Änderungen stark von der jeweiligen Matrixposition abhängig: Während die Matrixtemperaturen bei der (-20°)-Konfiguration relativ moderat vom Massenstrom abhängen ( $T_M \approx 45^\circ$  bei 25 g/s bis  $T_M \approx 33^\circ$  bei 100 g/s), ist bei der (0°)- und der (20°)-Konfiguration der Temperaturabfall einzelner Matrixtemperaturen wesentlich höher. So nimmt beispielsweise die am oberen Ende gemessene Matrixtemperatur bei der (0°)-Konfiguration bereits zwischen 25 g/s und 50 g/s von 57°C auf 41°C ab. Bei der (20°)-Konfiguration ändern sich die Matrixtemperaturen allerdings bei einer Erhöhung des Luftmassenstroms auf über 75 g/s gar nicht mehr.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Konfigurationen nochmals eingehender betrachtet. Zur Interpretation werden zusätzlich die in Abbildung 5.8 dargestellten gemessenen örtlichen Luftgeschwindigkeiten herangezogen.

#### **(-20°)-Konfiguration**

Der Unterschied zwischen der am oberen und unteren Ende der Matrix gemessene-

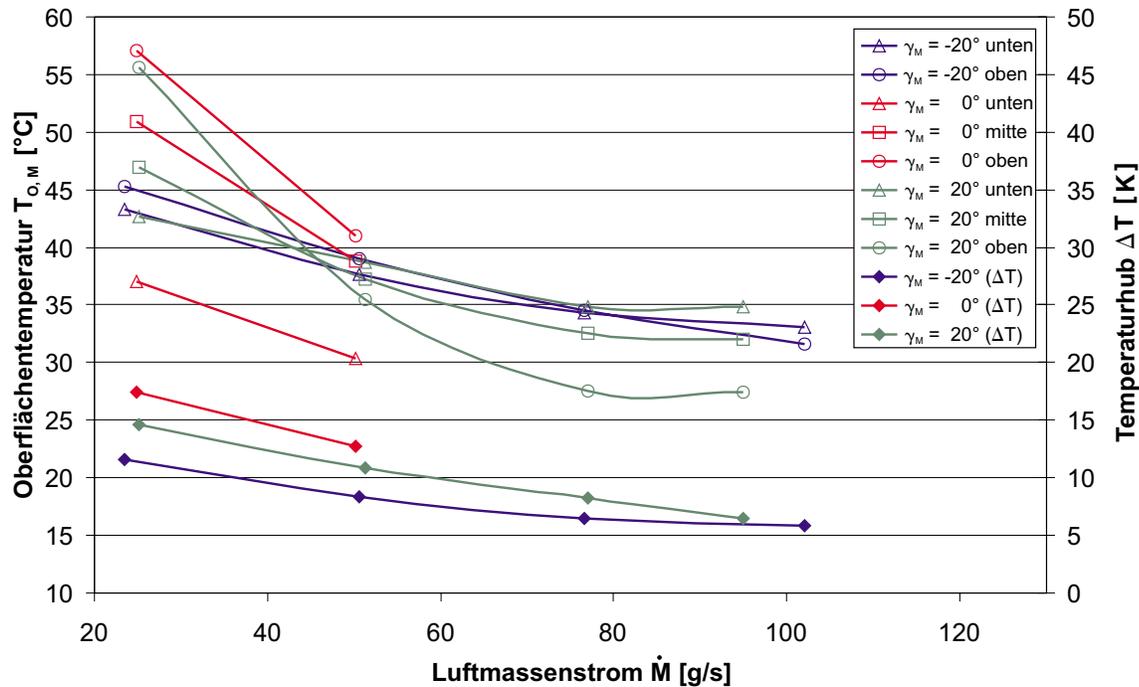


Abbildung 5.7: Temperaturhub und Matrixtemperaturen mit einer Matrix ( $w \times d = 0.14 \times 0.112$ ) in unterschiedlichen Positionen in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom, Übergangszeit

nen Temperatur beträgt bei dieser Konfiguration nach Abbildung 5.7 unabhängig vom Massenstrom weniger als 2 K, was auf eine gleichmäßige, flächige Durchströmung des Gewebes hindeutet. In der Tat zeigten Versuche, bei denen die Strömung mit Hilfe von Nebel sichtbar gemacht wurde (siehe Nebelversuche, Abbildungen 5.9, 5.10 und 5.11), daß selbst bei höheren Massenströmen die Luft nicht etwa das Gewebe bereits ausschließlich im unteren Drittel durchströmt, was aufgrund der in der Literatur [70] [62] angegebenen geringen Druckverlustwerte solcher Gewebe zu erwarten gewesen wäre. Vielmehr wird ein Großteil am Gewebe nach oben umgelenkt und strömt in der Folge sukzessive nach oben bzw. durchströmt die Matrix flächig. Das wird auch durch das gleichmäßige Bild der örtlichen Geschwindigkeiten bestätigt (siehe Abbildung 5.8 oben):  $\bar{v}_{SF,oben}$  und  $\bar{v}_{SF,mitte}$  zeigen einen vom Luftmassenstrom weitgehend unabhängigen Verlauf.  $\bar{v}_{SF,unten}$  hingegen steigt ab etwa 50 g/s signifikant an, was an der dann dort verstärkt auftretenden Wirbelbildung und Rückströmungen im unteren sekundärfassadennahen Bereich des Fensterkollektors liegt.

### (20°)-Konfiguration

Die Temperaturverteilung auf der Matrix nach Abbildung 5.7 zeigt gegenüber der (-20°)-Konfiguration einige gravierende Unterschiede: Während bei kleinen

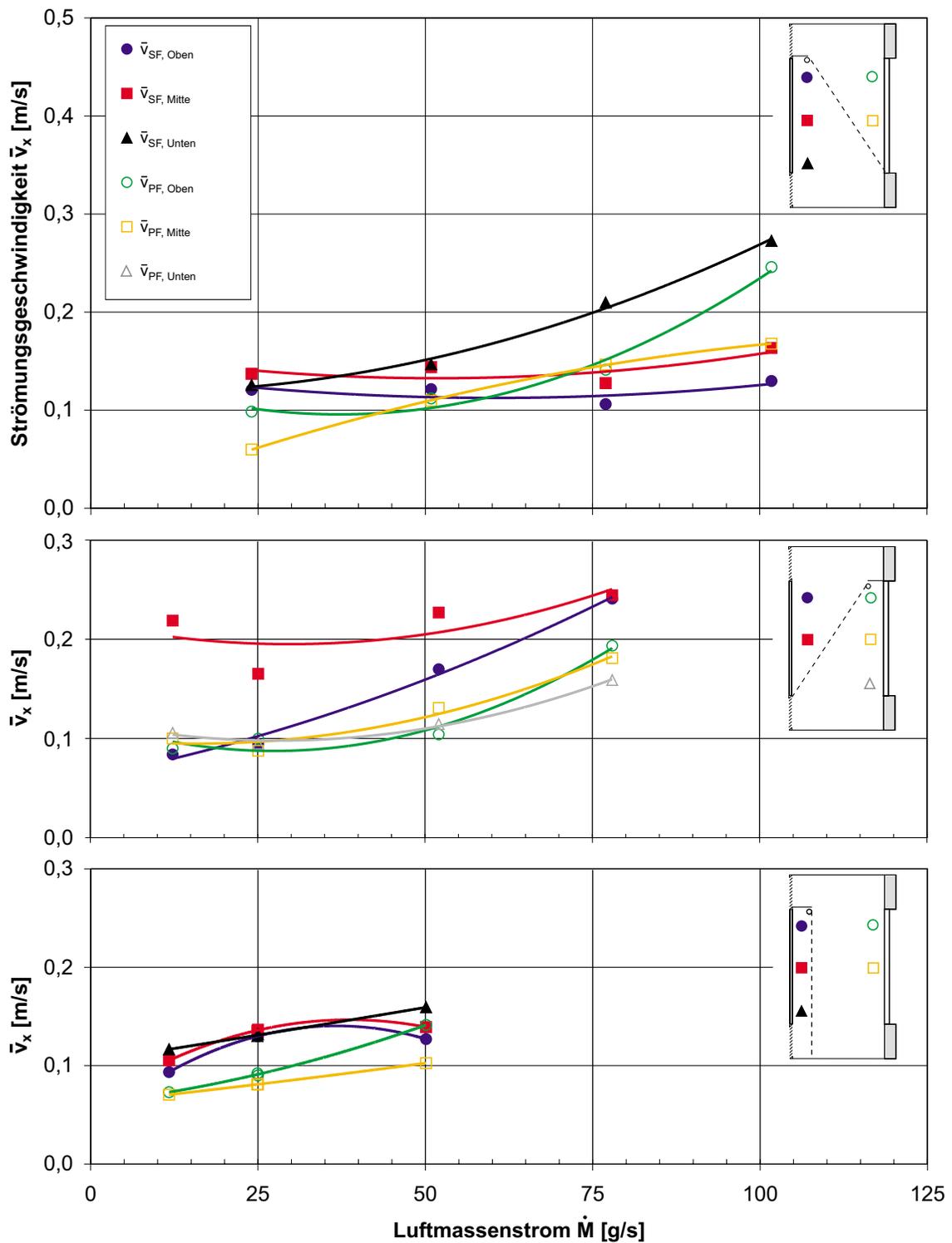


Abbildung 5.8: Mittlere örtliche Strömungsgeschwindigkeiten im Fensterkollektor mit einer Matrix in unterschiedlichen Positionen, Übergangszeit: 03.09.01 (oben), 17.10.01 (mitte) und 18.10.01 (unten)

Luftmassenströmen von 25 g/s die Matrixtemperatur von oben (56°C) nach unten (43°C) deutlich abnimmt, gleichen sich die Temperaturen mit zunehmendem Durchsatz an (bei 50 g/s:  $T_{M,oben} \approx 35^\circ\text{C}$ ,  $T_{M,unten} \approx 38^\circ\text{C}$ ). Ab 50 g/s kehrt sich der Temperaturverlauf sogar genau um, wobei der Temperaturunterschied zwischen oben und unten bis auf ca. 8 K anwächst ( $T_{M,oben} \approx 27^\circ\text{C}$ ,  $T_{M,unten} \approx 35^\circ\text{C}$ ). Luftmassenströme von mehr als 75 g/s (bis 100 g/s) haben keinen Einfluß mehr auf die Temperaturverteilung oder die absoluten Matrixtemperaturen. Die Erklärung für die oben beschriebenen Meßergebnisse liegt primär wiederum an der Durchströmung des Fensterkollektors, die sich bei dieser Konfiguration naturgemäß stark von der vorhergehenden (-20°)-Konfiguration unterscheidet. Die in den Fensterkollektor unten einströmende Luft bewegt sich (vgl. Abbildung 5.8, mitte) mit zunehmendem Massenstrom verstärkt an die Primärfassade, was sich in einem kontinuierlichen Anstieg der Meßwerte (von 0.1 m/s bei 25 g/s auf 0.2 m/s bei 75 g/s) der dort positionierten Anemometer zeigt. Das führt zu einer stärkeren Durchströmung und damit Kühlung des oberen Matrixbereiches, während die untere Matrixhälfte deutlich weniger Luft durchströmt.

### **(0°)-Konfiguration**

Die Matrixtemperaturen zeigen bei dieser Konfiguration eine ähnlich starke Abhängigkeit vom Luftmassenstrom (zwischen 25 und 50 g/s) wie die (20°)-Konfiguration (vgl. Abbildung 5.7). Allerdings liegen sie noch weiter auseinander (Matrixtemperaturen oben (57°C) bzw. unten (37°C bei 25 g/s)). Auch hier verringern sich die Unterschiede mit zunehmendem Massenstrom (Matrixtemperaturen oben (42°C) bzw. unten (30°C bei 50 g/s)), wenn auch nicht so stark wie bei der (20°)-Konfiguration. Die Temperaturverteilung auf der Matrix deutet auch hier auf eine von unten nach oben abnehmende Durchströmung des Matrixgewebes hin. Es muß bei dieser Konfiguration außerdem davon ausgegangen werden, daß gegenüber den anderen Konfigurationen die unten einströmende Luft grundsätzlich bereits im unteren Bereich die Matrix berührt und einen Temperaturhub erfährt. Ein Großteil der Luft strömt dann (bei kleinen Massenströmen) an der Matrix entlang unter weiterer Temperaturanhebung nach oben (bestätigt durch Nebelversuche). Auf diesem Weg wird das treibende Temperaturgefälle zwischen Matrix und Luft sukzessive kleiner, so daß sich von daher oben höhere Matrixtemperaturen einstellen als unten. Ferner fällt auf, daß die in der oberen Hälfte an der Sekundärfassade gemessenen Geschwindigkeiten im Bereich zwischen 10 g/s und 50 g/s fast identisch sind und jenseits 25 g/s nicht mehr ansteigen, während die Luftgeschwindigkeit unmittelbar über dem Eintritt mit dem Massenstrom stetig ansteigt. Bei  $\dot{M} \geq 25$  g/s nimmt der Luftstrom zwischen Matrix und Sekundärverglasung nicht mehr zu, was nur bedeuten kann, daß dann die Matrix bereits im unteren Teil der Matrix stärker durchströmt wird. Dies wiederum liegt an der hier nur relativ geringen Umlenkung eines einzelnen senkrechten Gewebes.

**Zusammenfassend** kann zu den **Standardkonfigurationen mit einer Matrix** gesagt werden, daß für den erreichbaren Lufttemperaturhub ein höheres Temperaturgefälle auf der Matrixoberfläche von Vorteil ist. Es wurden dann Temperaturhübe von 13 bis 18 K gemessen, während bei gleichmäßigerer Durchströmung ((-20°)-Konfiguration) nur maximal 11 K erreicht wurden (jeweils bei einem Luftmassenstrom von  $\dot{M} \approx 25$  g/s).

### 5.1.3.3 Standardkonfigurationen mit zwei Matrixgeweben

Im Folgenden werden die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen grundsätzlichen Matrixpositionen (-20°, 0°, 20°) relativ knapp bezüglich der Veränderungen beschrieben, die eintreten, wenn statt eines einzelnen nun zwei Matrixabsorber eingesetzt werden.

Die oben für *eine* Matrix gemachten Aussagen sind für *zwei* Matrixabsorber grundsätzlich ebenso gültig, allerdings treten die Effekte in etwas abgeschwächter Form auf. Bei der (20°)-Konfiguration ist nach wie vor auffälligstes Merkmal, daß die Luftgeschwindigkeiten an der Primärfassade mit steigendem Luftmassenstrom anwachsen, allerdings aufgrund des höheren Widerstandes der beiden hintereinander geschalteten Matrixabsorber nicht ganz so stark wie bei nur einem Gewebe. Das zusätzliche Gewebe bewirkt also eine **Vergleichmäßigung** der Durchströmung, auch die untere Hälfte der Matrixabsorber wird somit etwas stärker durchströmt. Bei der (0°)-Konfiguration mit zwei Matrixgeweben strömt weniger Luft direkt im unteren Bereich durch die Gewebe als bei nur einer Matrix, das Umlenkverhalten nach oben, also zwischen Sekundärfassade und Matrix 1 bzw. 2 ist auch noch bei etwas höheren Luftmassenströmen zu beobachten. Die (-20°)-Konfiguration schließlich, die auch mit nur einer Matrix bereits das gleichmäßigste Strömungsbild bot, zeigt bei zwei Geweben qualitativ keine Unterschiede dazu.

Zur Verdeutlichung der oben beschriebenen Strömungsverhältnisse werden in den folgenden Abbildungen exemplarisch die drei Standardkonfigurationen mit jeweils zwei Matrixabsorbern bei einer Durchströmung von  $\dot{M} \approx 25$  g/s dargestellt.

Abbildung 5.9 zeigt, daß bei positivem Neigungswinkel die in den Fensterkasten einströmende Luft sich zur Primärfassade hinbewegt und dort nach oben steigt. Bei nur einer Matrix im Fensterkasten tritt dieser Effekt verstärkt auf.

In Abbildung 5.10 ist die relativ gleichmäßige Durchströmung beider Matrixabsorber in vertikaler Position zu erkennen. Im unteren Viertel unmittelbar an den Einströmöffnungen strömt ein Teil der Luft direkt durch das Gewebe. Der weitaus größere Teil wird jedoch zunächst nach oben umgelenkt, bevor er flächig durch das Gewebe hindurchtritt.

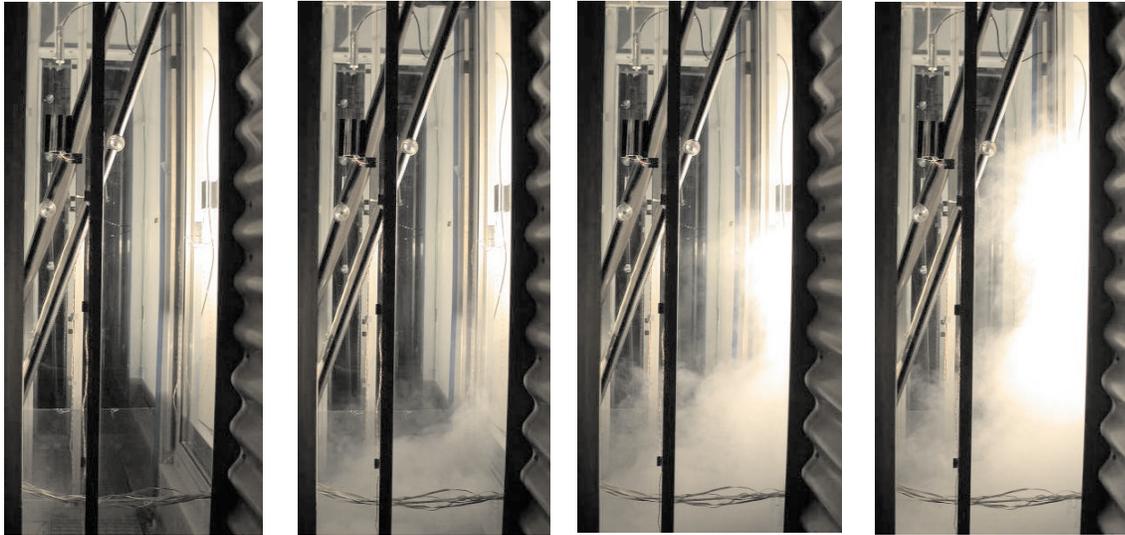


Abbildung 5.9: Strömungsvisualisierung bei positivem Neigungswinkel ((20°)-Konfiguration) zweier Matrixabsorber,  $\dot{M} \approx 25 \text{ g/s}$

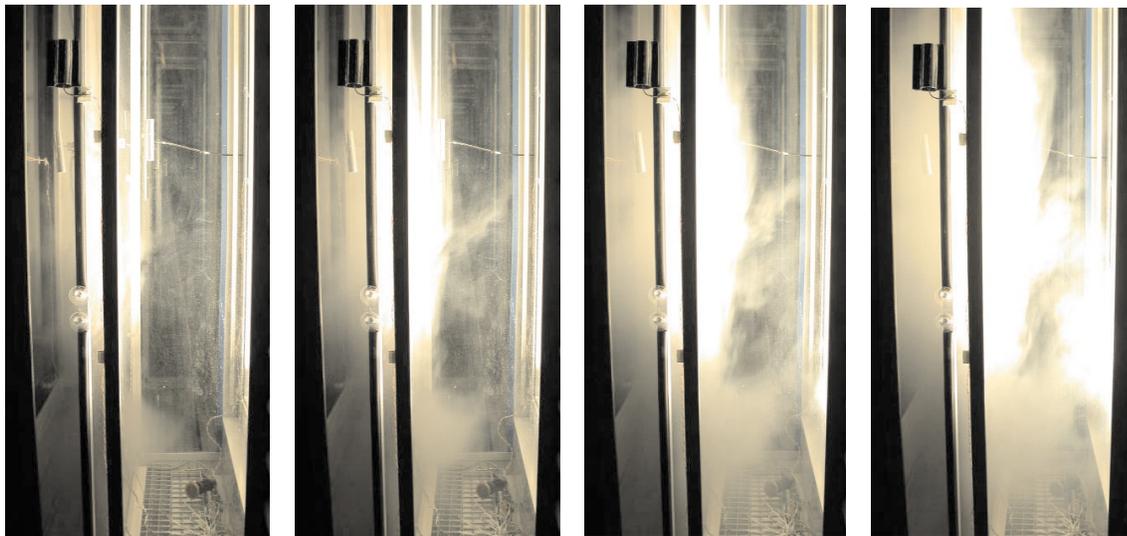


Abbildung 5.10: Strömungsvisualisierung bei vertikaler Position ((0°)-Konfiguration) zweier Matrixabsorber,  $\dot{M} \approx 25 \text{ g/s}$

Die gleichmäßigste Durchströmungssituation ist bei negativem Anstellwinkel der Matrixabsorber gegeben. In Abbildung 5.11 ist zu sehen, wie die Luft ähnlich wie bei der (20°)-Konfiguration zunächst zur Primärfassade strömt. Anschließend wird die Luft aber durch das dort gespannte Gewebe wieder von dort weggelenkt und strömt entlang des Matrixabsorbers nach oben. Währenddessen wird kontinuierlich Luft durch die Matrixgewebe nach oben abgesaugt.

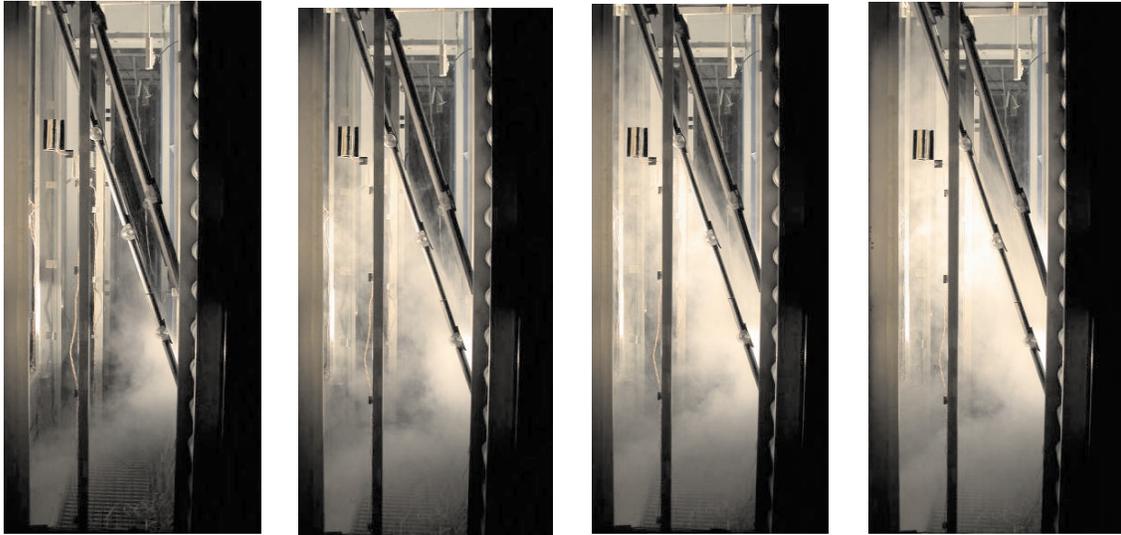


Abbildung 5.11: Strömungsvisualisierung bei negativem Neigungswinkel ( $-20^\circ$ -Konfiguration) zweier Matrixabsorber,  $\dot{M} \approx 25 \text{ g/s}$

#### 5.1.4 Mittlere Wärmeübergangskoeffizienten

Mittlere Wärmeübergangskoeffizienten im Luftzwischenraum sind sowohl für freie Konvektion als auch für Zwangskonvektion angegeben worden [122]. Da in der Literatur Wärmeübergangskoeffizienten für Drahtgewebe aber nur für bestimmte vom hier vorliegenden Fall abweichende Durchströmungssituationen (vgl. Abschnitt 5.1.3.2) angegeben werden, müssen sie hier halbempirisch aus den experimentellen Rohdaten näherungsweise mit der in Abschnitt 5.1.1.3 beschriebenen Methode bestimmt werden. Die daraus und aus der Auswertung der experimentellen Daten resultierenden Ergebnisse für den Wärmeübergang an den Bauteilen zeigen, wie stark sich die Luft anteilmäßig an den umfassenden Glascheiben bzw. am Matrixabsorber erwärmt.

Grundsätzlich richtet sich der jeweilige Anteil des Wärmeübergangs nach der eingestellten Matrixkollektor-Konfiguration und den jahreszeitlich und wetterbedingten Einflüssen. Durch die eingestellte Konfiguration wiederum wird die Durchströmung des Fensterkastens beeinflusst und je nachdem, an welchen wie temperierten Flächen die angesaugte Umgebungsluft bzw. die bereits erwärmte Luft vorbeiströmt, ergeben sich örtlich sehr unterschiedliche Wärmeübergangssituationen. Ohne diese örtlich schwankenden Wärmeübergänge im Einzelnen zu betrachten, zeigt Abbildung 5.12 die nach Abschnitt 5.1.1.3 näherungsweise bestimmten Verhältnisse des Wärmeübergangs an den begrenzenden Glasflächen des Fensterkollektors zum Wärmeübergang am Matrixabsorber.

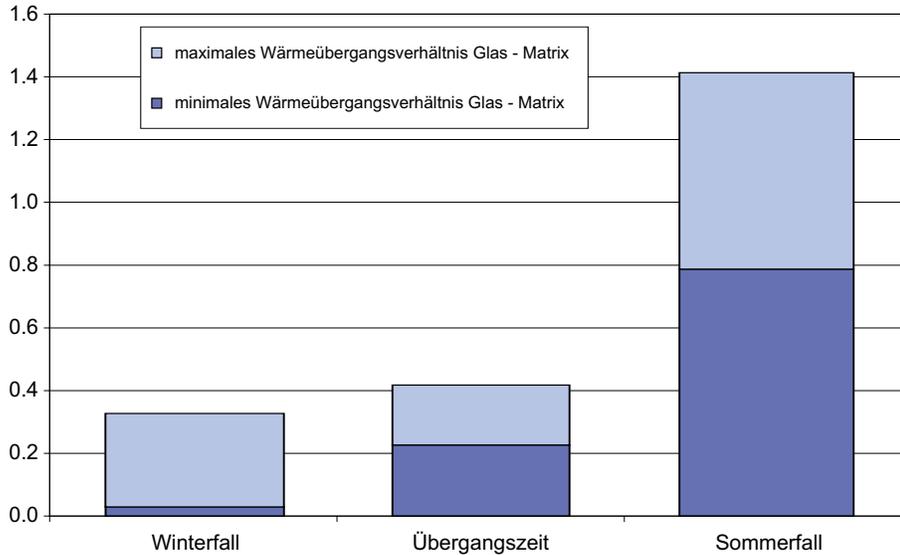


Abbildung 5.12: Wärmeübergang Glas-Luft an den begrenzenden Glasflächen des Fensterkastens im Verhältnis zum Wärmeübergang Matrix-Luft an den Matrixabsorbern

Im **Winter** tragen die Glasflächen am wenigsten zur konvektiven Wärmezufuhr an die Luft bei, maximal ein Drittel dessen, was über die Matrixabsorber übertragen wird. Bei sehr niedrigen Außentemperaturen, „ungünstiger“ Konfiguration und niedrigem Luftmassenstrom kann am Glas natürlich auch Wärme abgegeben werden. In der **Übergangszeit** erwärmt sich die Luft in der Regel bereits an den höher temperierten Glasflächen, die konvektive Wärmezufuhr beträgt dann zwischen 20 und 40% des Wärmegewinns der Absorber. Im **Sommerfall** findet der Wärmegewinn der Luft zu etwa gleichen Anteilen an den Glasflächen und an den Matrixabsorbern statt. Bei entsprechenden Verhältnissen wird die Luft sogar stärker an den Glasscheiben erwärmt als am Absorber. Gerade im Sommerfall gilt für die Südfassade, daß opake Bauteile der Sekundärfassade im Bereich oberhalb des Fensterkastens bei großer Sonnenhöhe zu einer weitgehenden Verschattung der Absorbergewebe führen, die dann – nurmehr diffuser Einstrahlung ausgesetzt – keine hohen Temperaturen mehr erreichen. Dies gilt vor allem für nahe der Primärfassade angebrachte Absorber. Die den beschriebenen Ergebnissen zugrunde liegenden Wärmeübergangskoeffizienten ergaben sich aus den oben beschriebenen Abschätzungen für die Glasflächen im Winterfall zu  $\bar{\alpha}_{G-L} \approx 2...3 \text{ W/m}^2\text{K}$ , im Sommer- und Übergangsfall zu  $\bar{\alpha}_{G-L} \approx 10...20 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Die dazugehörigen Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Matrix und durchströmender Luft lagen bei  $\bar{\alpha}_{M-L} \approx 5...10 \text{ W/m}^2\text{K}$  bzw.  $\bar{\alpha}_{M-L} \approx 10...20 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

### 5.1.5 Vergleich mit kommerziellen Luftkollektoren

Am Schluß dieses ersten der beiden Ergebnis-Teilkapitel soll der hier vorgestellte und untersuchte Doppelfassaden-Matrixkollektor bezüglich seiner thermischen Performance mit den am Markt verfügbaren Luftkollektoren verglichen werden. Es sei an dieser Stelle noch einmal bemerkt, daß der Matrixkollektor in der Doppelfassade nicht als reiner Luftkollektor konzipiert bzw. nicht als solcher optimiert wurde. Zudem ergeben sich aufgrund der Integration in den weitgehend aus Glas bestehenden Fensterkasten, und damit des Fehlens jeglicher Wärmedämmung, naturgemäß insbesondere im Winterfall hohe thermische Verluste. Deswegen kann der Vergleich des thermischen Wirkungsgrads mit anderen Fassaden-Luftkollektoren auch nur der groben Einordnung des hier vorgestellten neuartigen Kollektors innerhalb bestehender Systeme dienen.

Für diesen Vergleich ist in Abbildung 5.13 die mittlere Wirkungsgradkennlinie (vgl. Abbildung 5.3) aller durchgeführten Experimente und deren wiederum mittlere Schwankungsbreite in Abhängigkeit vom flächenspezifischen Luftmassenstrom zusammen mit den bekannten [34] Kennlinien verschiedener Luftkollektorbauarten aufgetragen worden. Die eingetragenen Kennlinien reichen von einfachen schwarz lackierten Plattenabsorbern mit Wirkungsgraden zwischen 30 und 40% im relevanten Massenstrombereich bis hin zu in jeder Hinsicht optimierten (Absorbergeometrie, Verglasung, selektive Beschichtung) Luftkollektoren, die bis zu 70% Wirkungsgrad erreichen.

Der Doppelfassaden-Matrixkollektor liegt aufgrund des oben Gesagten im direkten Vergleich mit konventionellen Luftkollektoren am unteren Ende der Skala und erzielte bei einem spezifischen Luftmassenstrom von  $\dot{m} = 100 \text{ kg/h m}^2$  (entspricht beim vorliegenden Testkollektor einem absoluten Wert von  $\dot{M} = 40 \text{ g/s}$ ) Wirkungsgrade zwischen 30 und 40%. Der Großteil der Luftkollektoren liegt im Bereich zwischen 30 und 55% Wirkungsgrad. Das grundsätzliche Potential von durchströmten Absorbern zeigt der einzige Kollektor mit porösem Textil-Absorber im Vergleich, der einen Wirkungsgrad von 50 bis 65% aufweist.

Zum Teil liegt dieses Ergebnis sicherlich an der nicht optimalen Beschichtung des Testkollektors, die keine hohe Selektivität (siehe Kapitel 4.2.3.2) besaß. Berechnungen mit einem vorhandenen Modell [70] ergeben, daß sich durch diesbezüglich verbesserte Strahlungseigenschaften ein Doppelfassaden-Matrixkollektor ohne weiteres in den Wirkungsgrad-Bereich von Fassadenkollektoren einfacherer Bauweise und darüber positionieren läßt, wo er schon jetzt bei guten Randbedingungen landete. Im Hinblick darauf, daß es sich beim Doppelfassaden-Matrixkollektor um einen **bifunktionalen Fensterkollektor** handelt, der neben der Funktion Lufterwärmung bei weitestgehendem Erhalt der Durchsicht gleichzeitig auch Sonnenschutz- und Blendschutzfunktionen beinhaltet, dürfen diese

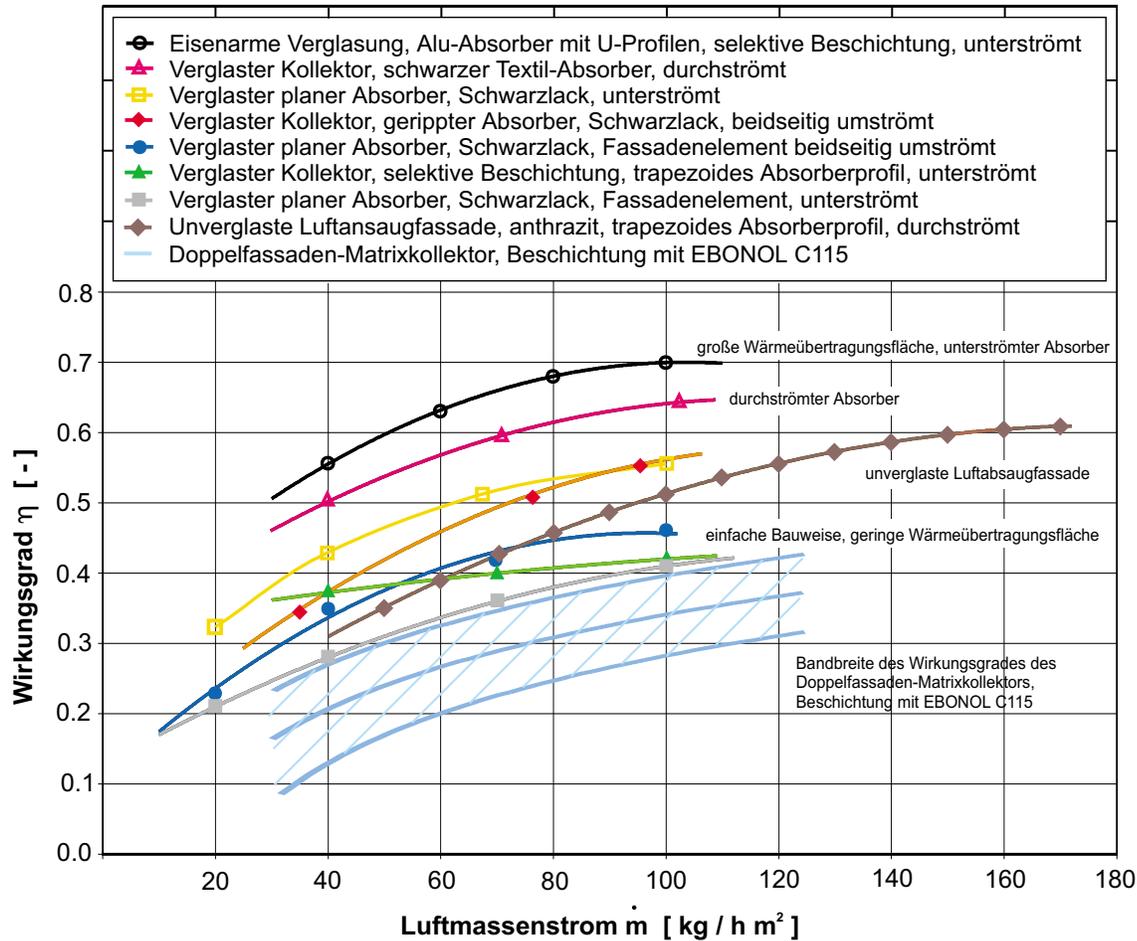


Abbildung 5.13: Wirkungsgradverlauf kommerzieller Luftkollektoren in Abhängigkeit vom Massenstrom bei Frischluftbetrieb ( $T_{F, \text{ein}} = T_{\infty}$ ) und einer Umgebungsluftgeschwindigkeit von 3 m/s, nach [34] im Vergleich zum Doppelfassaden-Matrixkollektor

zunächst ernüchternd wirkenden Ergebnisse durchaus als vielversprechend bezeichnet werden. Die experimentellen Ergebnisse in Bezug auf diese zusätzlichen lichttechnischen Funktionen des betrachteten Matrixkollektors werden im folgenden, zweiten Teilkapitel unter der Überschrift „Lichttechnische Ergebnisse“ behandelt.

## 5.2 Lichttechnische Ergebnisse

Bei der Darstellung der lichttechnischen Ergebnisse der hier erstmals in einer Doppelfassade eingesetzten Kupferdrahtgewebe geht es zunächst rein qualitativ um die optische Wirkung auf den Betrachter aus dem Innenraum. Das Erscheinungsbild von innen, aber auch das von außen wird abhängig von der jeweils eingestellten Position und Qualität der Matrixgewebe photographisch dargestellt und diskutiert. Darüberhinaus erfolgen quantitative Angaben über den vom Einfallswinkel abhängigen Transmissionsgrad im sichtbaren Wellenlängenbereich  $\tau_{vis}$  der Matrixgewebe, die unter Laborbedingungen (Ulbrichtkugel) ermittelt wurden. Der Transmissionsgrad der Matrixgewebe im gesamten Spektrum der Solarstrahlung  $\tau_{sol}$  – aufgrund der resultierenden äußeren einstrahlungsbedingten Kühllasten vorwiegend aus klimatechnischer Sicht interessant – wurde ebenfalls im Labor, darüberhinaus aber auch an der Testfassade selbst über zwei vor und hinter dem eingebauten Matrixgewebe angebrachten Strahlungspyranometer ermittelt (vgl. Abschnitt 4.2.3). Im Versuchsraum hinter der Testfassade wurden Leuchtdichtemessungen an den mit Matrixgeweben verschatteten Fenstern vorgenommen, für die hier die resultierenden Leuchtdichteverteilungen angegeben werden. Die Wirkung als Blendschutz wird neben der erreichten Leuchtdichtereduktion mit Fotoaufnahmen gezeigt.

### 5.2.1 Optische Wirkung der Matrixabsorber

#### 5.2.1.1 Durchsicht von innen nach außen

Prinzipiell bleibt die Durchsicht von innen nach außen bei ein bis zwei flächig im Fensterkasten gespannten Matrixgeweben im aufgrund der Fassadentiefe vorgegebenen Neigungswinkelbereich erhalten. Eine Ausnahme ist die gezielte Anbringung der Gewebe in einem aus der Sicht des Betrachters jenseits des Grenzwinkels liegenden Blickwinkel, um die Blendwirkung bestimmter Bereiche im Fenster (z.B. die tiefstehende Sonne) zu minimieren (siehe Abschnitt 5.2.3.2). Abhängig von der Anzahl der Gewebe, deren freier Siebfläche sowie Neigungswinkel ergeben sich unterschiedliche Wirkungen bezüglich der Durchsicht von innen nach außen, die im Folgenden diskutiert werden. Zunächst wird in Abbildung 5.14 eine Innenansicht mit drei unterschiedlichen Bereichen der Anordnung zweier Matrixabsorber (vorne bzw. sonnenzugewandt:  $\psi_{M1} = 0.53$ ; hinten:  $\psi_{M2} = 0.31$ ) in einem Fensterkasten dargestellt.

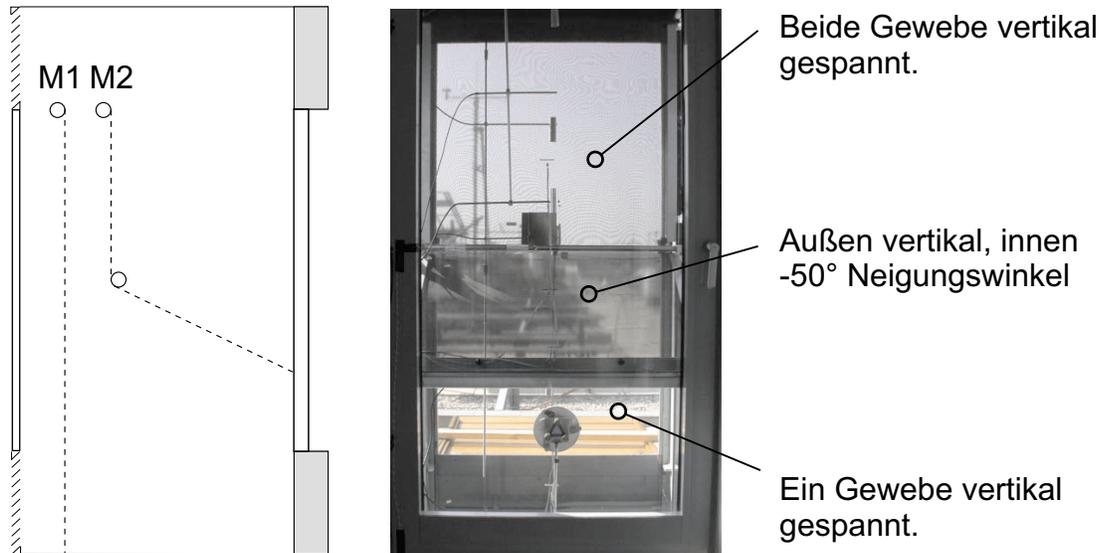


Abbildung 5.14: Innenansicht eines Fensterkastens mit unterschiedlichen Durchsichtsbereichen, Matrixkonfiguration entsprechend Skizze links

Grundsätzlich bleibt in allen drei Bereichen die Durchsicht erhalten, bei einer mit  $-50^\circ$  gespannten Matrix ( $\psi_{M2} = 0.31$ ) ist sie allerdings schon stark eingeschränkt. In der oberen Hälfte des Fensterkastens sind die beiden Matrixabsorber vertikal hintereinander gespannt, im unteren Viertel verbleibt noch die vordere Matrix ( $\psi_{M2} = 0.31$ ) in vertikaler Position.

### Einzelnes Gewebe

Ein einzelnes dunkel beschichtetes Gewebe, das vertikal oder mit geringem Neigungswinkel vor dem Fenster angebracht wird, wird bei *senkrechter Draufsicht* in normalem Aufenthaltsabstand von der Fassade kaum wahrgenommen. Erst im direkten Vergleich (Abbildung 5.15) wirkt der mit einer Matrix belegte Bereich etwas dunkler (umso dunkler je kleiner die freie Siebfläche). Verbunden damit ist eine Abnahme der Wahrnehmungsschärfe der außenliegenden Umgebung, was an den Streueffekten der verhältnismäßig engmaschigen Gewebe liegt.

Anders ist die Situation bei Betrachtungswinkeln, die wesentlich von der Normalen abweichen. Abbildung 5.16 zeigt, wie bereits mit einem relativ engmaschigen Gewebe die Helligkeit des betrachteten Fensterausschnitts zurückgeht. Der freisichtbare Himmelsausschnitt jeweils rechts oben wirkt deutlich heller. In Abbildung 5.16 ist weiterhin zu erkennen, daß das Gewebe an einem klaren Tag mit wenig Diffusstrahlungsanteil etwas dunkler wirkt als an einem Tag mit hohem Diffusanteil der Globalstrahlung, an dem die Helligkeit des Himmels natürlich insgesamt höher liegt.



Abbildung 5.15: Innenansicht eines Fensterkastens ohne (links) und mit (rechts) einzelner, hier nur teilweise abgesenkter Matrix



Abbildung 5.16: Innenansicht eines Fensterkastens einzelner Matrix ( $\psi = 0.31$ ) in negativem Neigungswinkel ( $-20^\circ$ ), links an einem klaren Tag, rechts an einem trüben bzw. diesigen Tag

Bezüglich der Wahrnehmung und Durchsicht von innen nach außen wurde beim Einsatz eines einzelnen Gewebes bei den freien Siebflächen ( $\psi_M \approx 0.3 \dots 0.5$ ) der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Absorbergewebe kein Unterschied festgestellt. Der quantitativen Betrachtung unter Ermittlung der Leuchtdichten im Fensterbereich ist ein späteres eigenes Unterkapitel gewidmet.

### Zwei Gewebe hintereinander

Ordnet man zwei Gewebe unterschiedlicher oder gleicher Geometrie hintereinander im Fensterkasten an, so ergeben durch die Wechselwirkung der beiden Gewebe für den Betrachter sogenannte Moiré-Muster (siehe Abschnitt 3.2.6.2). Die Ausprägung der Moiré-Muster hängt sowohl von der Art und Kombination der verwendeten Matrixgewebe als auch von deren Neigungswinkel ab. Wie in Abbildung 5.17 zu sehen, ergibt sich beim Einsatz zweier Gewebe unterschiedlicher freier Siebfläche ein wesentlich feineres und gleichmäßigeres Muster als bei zwei identischen Geweben (in vertikaler Lage).



Abbildung 5.17: Moiré-Muster bei unterschiedlicher Matrixgeometrie: zwei verschiedene (linkes Foto,  $\psi_{M1} = 0.53$ ,  $\psi_{M2} = 0.31$ ) und zwei identische Gewebe (rechtes Foto,  $\psi_{M3} = 0.38$ ), in beiden Fällen in vertikaler Anordnung

Die geometrisch unregelmäßigen Moiré-Muster stellen sich zunächst einmal als interessante optische Erscheinung dar. Im vorliegenden Fall hat man es jedoch mit dem Umfeld eines Büroarbeitsplatzes zu tun, und von daher bedürfen die Moiré-Muster sicherlich einer weiteren Betrachtung und Bewertung. Für den Betrachter können sie nämlich selbst bei kleinen Änderungen seiner Blickrichtung (z.B. bei unwillkürlichen Kopfbewegungen) eine zeitlich stark veränderliche Störung („unruhiges“ sekundäres Umfeld) darstellen.

Eine systematische Abhandlung dieses Effekts in Abhängigkeit von der jeweiligen Matrixkonfiguration ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

### 5.2.1.2 Außenwirkung

Die Außenwirkung des transparenten Bereichs einer Doppelfassade hängt zunächst von der außenliegenden Sekundärverglasung i.e. deren Färbung und Reflexionsgrad im sichtbaren Spektralbereich ab. Bei der an der Versuchsfassade eingesetzten Verglasung handelt es sich um 12 mm Floatglas-(ESG-)Scheiben, wie sie in Sekundärfassaden üblicherweise eingesetzt werden. Der Reflexionsgrad  $\rho_{vis}$  bewegt sich bei solchen Scheiben zwischen etwa 0.15 in der Normalen und 0.20 bei einem Einfallswinkel von  $50^\circ$ . Bei einer weiteren Erhöhung des Winkels steigt  $\rho_{vis}$  allerdings sehr stark an ( $\approx 0.7$  bei  $80^\circ$ ). Für die genauen spektralen optischen Eigenschaften der verwendeten Verglasungen sei auf [122] verwiesen. Bei der Verwendung davon abweichender spezieller Gläser kann natürlich das Erscheinungsbild der Fassade und die Wahrnehmung der integrierten Matrixabsorber in bestimmten Grenzen beeinflusst werden. Beispielsweise kann es durchaus erwünscht sein, die Farbneutralität und die Transmission für die kurzwellige Solarstrahlung durch die Verwendung einer eisenarmen Sekundärverglasung zu erhöhen.

Die Außenwirkung der beschichteten Metallgewebe selbst hängt neben den Eigenschaften der Beschichtung von deren Position im Luftzwischenraum, also der Matrixkonfiguration ab. Ein Abspannen der Gewebe im Luftzwischenraum über die gesamte transparente Höhe ergibt ein gleichmäßiges Erscheinungsbild, insbesondere bei vertikaler Position nahe der Sekundärfassade. Werden die Matrixgewebe in den obengenannten Sonderkonfigurationen mit Umlenkungen bzw. nur in Teilbereichen des Fensterkastens gespannt, stellt sich die Außenwirkung naturgemäß weniger homogen dar.

Abbildung 5.18 zeigt die beiden Fensterkästen der Testfassade mit unterschiedlichen Matrixkonfigurationen. Die mit EBONOL C 115 dunkelbraun bis schwarz beschichteten Kupfergewebe sind in Verbindung mit der hier eingesetzten Sekundärverglasung gut zu erkennen. Material und Färbung kommen umso mehr zur Geltung, je niedriger der Sonnenstand bzw. je weniger die Matrix verschattet wird. Bei der Durchsicht von außen nach innen gilt zunächst einmal bezüglich der Winkelabhängigkeit des Transmissionsgrades analog das bereits oben im Zusammenhang mit der Durchsicht von innen nach außen Gesagte. Allerdings ist der Grundsatz zu berücksichtigen, daß die Durchsicht von außen nach innen bei üblicher Tageslicht- oder Kunstlichtbelichtung aufgrund der stark differierenden Helligkeiten geringer ist als von innen nach außen. Mit den Matrixabsorbern kann die Durchsicht von außen nach innen, insbesondere beim Einsatz zweier hintereinander liegender Gewebe auf Null reduziert werden, während Bereiche ohne Matrix (siehe Abbildung 5.18, linker Fensterkasten unten) eine Restdurchsicht aufweisen.



Abbildung 5.18: Außenansicht der Testfassade bei unterschiedlicher Matrixkonfiguration in FK 1 (rechts, Standardkonfiguration mit  $\gamma_M = -20^\circ$ ) und FK 2 (links, Sonderkonfiguration mit  $\gamma_M = 0^\circ$  bzw.  $\gamma_M = -45^\circ$ )

## 5.2.2 Sonnenschutz – Transmissionsgrad der Matrixgewebe

### Meßtechnisch ermittelte Transmissionsgrade

An dieser Stelle sollen die mit Hilfe zweier Strahlungspyranometer gemessenen Transmissionsgrade der Matrixgewebe dargestellt und mit dem Berechnungsmodell (vgl. Kapitel 3.2.4) verglichen werden. Die in Abbildung 5.19 enthaltenen, im Versuchsstand gemessenen Transmissionsgrade zeigen eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Werten.

Bei Einstrahlwinkeln  $\gamma_T \geq 40^\circ$  liegen die berechneten Werte um höchstens 5% unter den am Versuchsstand gemessenen Transmissionsgraden, bei kleineren Winkeln beträgt die Abweichung maximal 10%. Die höheren Werte am Versuchsstand sind durch die in der Berechnung nicht berücksichtigte diffuse Einstrahlung zu erklären, die seitlich an den Geweben vorbei über die Glaslisenen automatisch mitgemessen wird. Dieser Effekt zeigt sich auch an der Tatsache, daß bei den kleinsten

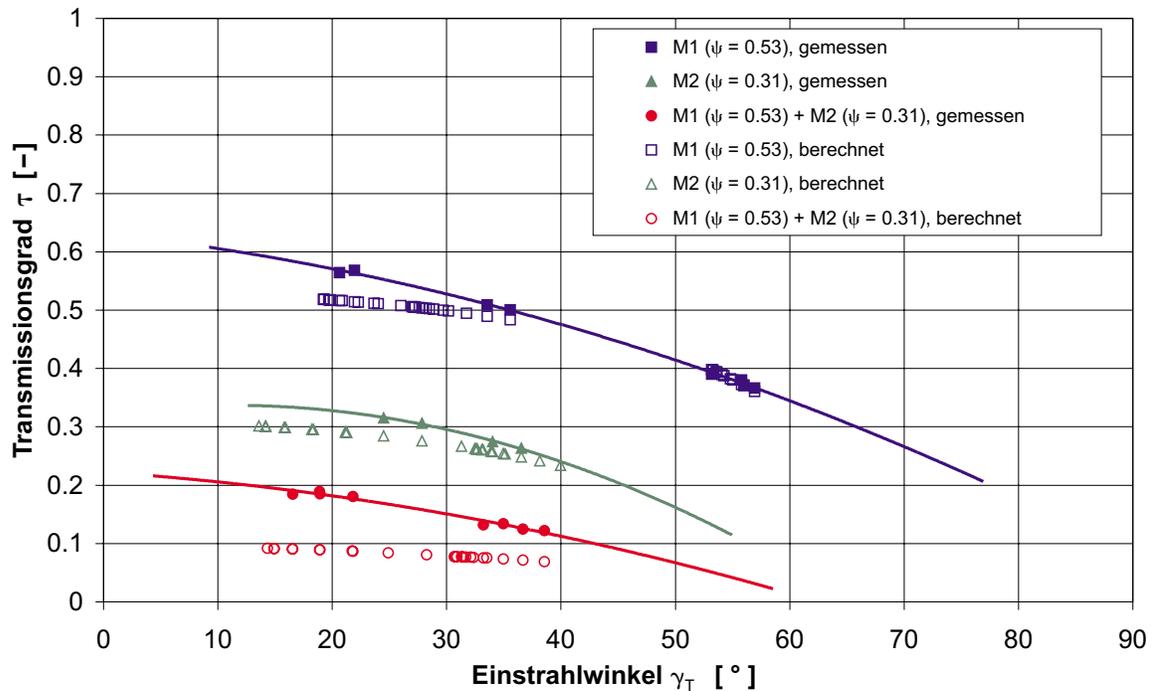


Abbildung 5.19: Im Versuchsstand gemessener winkelabhängiger Transmissionsgrad der Matrixabsorber im Vergleich zu den nach Abschnitt 3.2.4 berechneten Werten

hier vorkommenden Einstrahlwinkeln ( $\gamma_T = 15 \dots 20^\circ$ ) Transmissionsgrade ermittelt wurden, die oberhalb der jeweiligen freien Siebfläche liegen. Deutlich höhere Abweichungen der berechneten Transmissionsgrade von bis zu 50% gegenüber der Messung sind dagegen bei zwei hintereinanderliegenden Geweben festgestellt worden. Dies liegt zum Einen an dem relativ betrachtet wesentlich höheren Einfluß der seitlichen Diffusstrahlung, aber auch an der nur groben Näherungsberechnung bei der Kopplung mehrerer Gewebe (vgl. Kapitel 3.2.4).

### Einsatz als Sonnenschutz

Entsprechend dem direkten Transmissionsgrad kann auch nur der etwa gleich große Anteil der gesamten kurzwelligen Solarstrahlung in den Raum eindringen und dort absorbiert und als Kühllast wirksam werden. Der Strahlungsdurchgang an Doppelfassaden wird somit durch die Integration von Matrixabsorbern – wie bereits in Abbildung 3.1 im Abschnitt 3.1.1 dargestellt – im Sinne eines Sonnenschutzsystems ganz wesentlich reduziert. Je nach Transmissionsgrad des Gewebes wird der primäre Strahlungseintrag in den Raum gegenüber der Doppelfassade ohne Matrixabsorber verringert, im Beispiel nach Abbildung 3.1 mit einem Transmissionsgrad des Gewebes von 0.4 also von 32% auf 13%. Die Angabe des Gesamtenergiedurchlaßgrades dieses Matrixkollektorsystems würde eine detaillierte Un-

tersuchung des kombinierten Wärmetransports im Fassadenkollektor erfordern, um die Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten Primärfassade, Matrixabsorber und Sekundärverglasung sowie sämtliche Wärmeübergangskoeffizienten zu erfassen. Dies sowie die daraus mögliche Ableitung empirischer Korrelationen zur rechnerischen Ermittlung der g-Werte eines Doppelfassaden-Matrixkollektors ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

### 5.2.3 Leuchtdichten

Ein zentraler Gesichtspunkt der lichttechnischen Untersuchungen ist die Wirkung der Matrixabsorbergewebe im hinter der Doppelfassade liegenden Aufenthaltsraum (in der Regel Büroraum). Die Leuchtdichteverteilung im sogenannten *Umfeld* spielt aus physiologischer Sicht (siehe Abschnitt 3.2.3.2) eine entscheidende Rolle. Matrixabsorber im Luftzwischenraum tragen zur Vergleichmäßigung der Leuchtdichten im Umfeld insofern bei, als sie die am Fenster - in der Regel mit den höchsten Werten - auftretenden Leuchtdichten reduzieren, ähnlich wie andere ausschließlich als Sonnen- bzw. Blendschutz eingesetzte *Screens*.

Abbildung 5.20 zeigt den Arbeitsplatz im Versuchsraum bei unterschiedlichen Matrixkonfigurationen. Die Wirkung der hier eingesetzten Matrixgewebe kann neben der oben beschriebenen Absenkung der Leuchtdichte des Fensters selbst auch in einem hier als *indirekt* bezeichneten Blendschutz bestehen. Wie in Abbildung 5.20 bereits implizit enthalten, wird darunter die Reduzierung der Leuchtdichte bzw. der Beleuchtungsstärke der Arbeitsfläche als Infeld bzw. unmittelbarem Umfeld verstanden. Abhängig von Matrixanzahl, -geometrie und -konfiguration sowie den Winkelverhältnissen wird nur ein Teil der einfallenden Sonnenstrahlung transmittiert, womit auch nur der entsprechende Anteil des sichtbaren Strahlungsspektrums zur Belichtung in den Raum gelangt. Während ein einzelnes Gewebe noch hohe Leuchtdichtekontraste im Infeld ( $L_i$ ) und im primären Umfeld ( $L_u$ ) zulässt (Leuchtdichtedifferenzen bei Faktor 20 und höher), ist bei geeigneter Matrixkonfiguration eine erhebliche Reduktion und Vergleichmäßigung der Leuchtdichten ( $L_u/L_i \leq 20$ ) möglich. Im sekundären und tertiären Umfeld (Fensterbereich) sind die Leuchtdichten nach wie vor am höchsten. Sie hängen in erster Linie von der eingestellten Matrixkonfiguration ab, was Gegenstand weiterer Betrachtungen in den folgenden Unterkapiteln ist. Je nach Blickwinkel vom Arbeitsplatz aus sollten auch die angrenzenden Fensterkästen mit berücksichtigt werden (bei transparenten Glaslisenen).

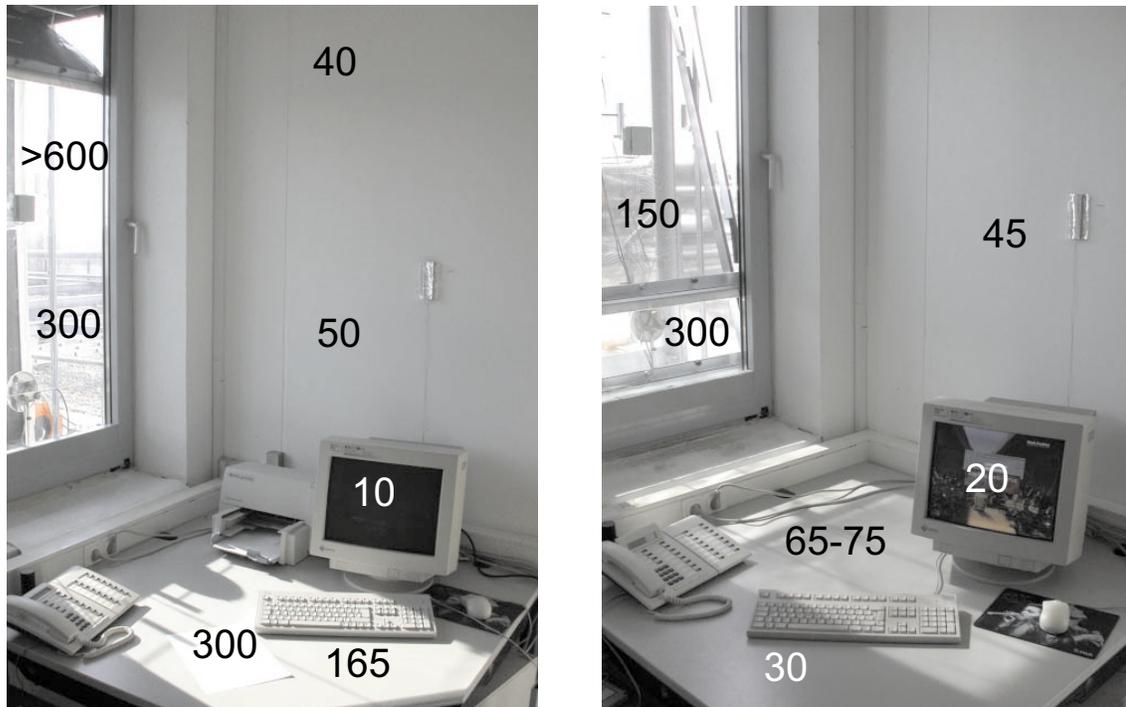


Abbildung 5.20: Leuchtdichten am Arbeitsplatz im Versuchsraum: Im linken Bild ist nur Matrix M1 ( $\psi_{M1} = 0.53$ ) völlig abgesenkt (vertikale Position), rechts sind beide Matrixabsorber ( $\psi_{M1} = 0.53$ ,  $\psi_{M2} = 0.31$ ) in negativem Neigungswinkel ( $\gamma_M = -20^\circ$ ) positioniert

### 5.2.3.1 Leuchtdichtereduktion durch Doppelfassaden-Matrixabsorber

Nach der Darstellung der Leuchtdichteverteilung im In- und Umfeld eines Büroarbeitsplatzes im vorigen Abschnitt wird nun auf die Leuchtdichten bei direkter (senkrechter) Betrachtung eines mit Matrixabsorbern bestückten Fensterkastens eingegangen. Zunächst wird der Fall betrachtet, daß die Sonne durch die Fassadenkonstruktion verschattet wird, somit nicht im Fenster sichtbar ist und zu keiner Direktblendung führt. Der Fall der Direktblendung wird im folgenden Unterkapitel eigens besprochen. Zur Erfassung der Leuchtdichtewerte wurde der durch das Fenster und die Matrixgewebe sichtbare Himmelsausschnitt mit einem Leuchtdichtemeßkopf abgefahren und die eingescannten Meßpunkte anschließend gemittelt. Zum Vergleich wurde der gleiche Himmelsausschnitt zum gleichen Zeitpunkt an einem benachbarten Fenster ohne Matrixabsorber aufgenommen. Aus der Differenz der beiden Mittelwerte wurde dann die mit Hilfe der Matrixgewebe erreichte Leuchtdichtereduktion ermittelt.

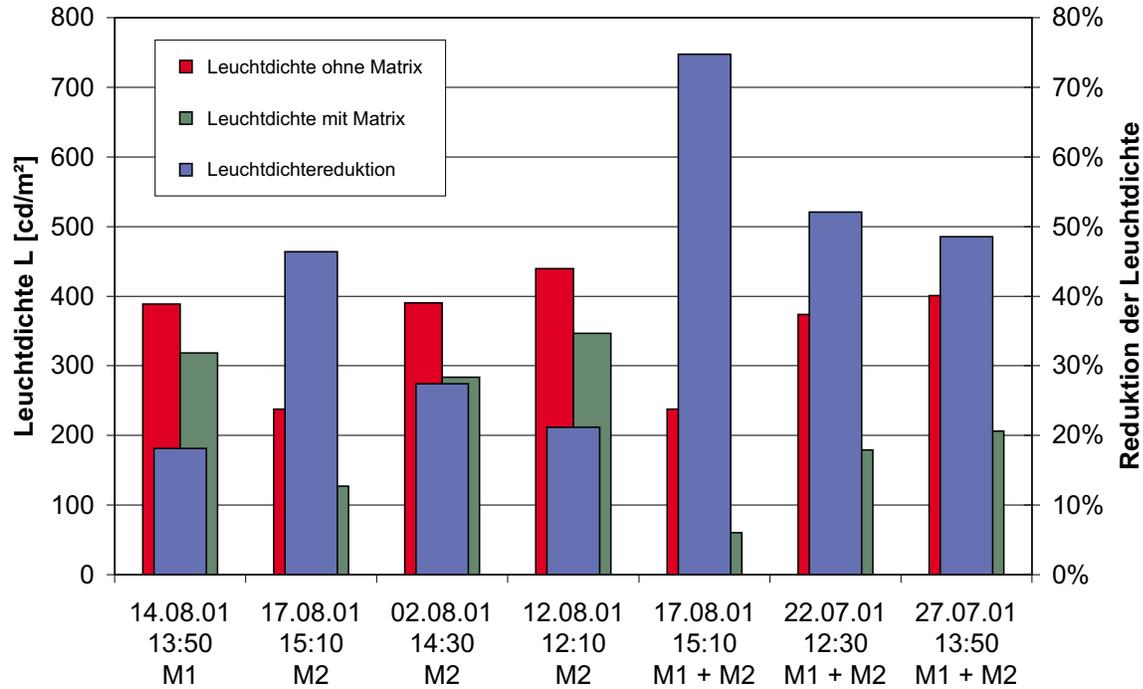


Abbildung 5.21: Leuchtdichtereduktion in Abhängigkeit von Matrixgeometrie und -anzahl, immer in vertikaler Matrixposition

Abbildung 5.21 zeigt für die Matrixgewebe M1 ( $\psi_{M1} = 0.53$ ) und M2 ( $\psi_{M2} = 0.31$ ) in vertikaler Position ( $\gamma_M = 0^\circ$ ) die an verschiedenen Meßtagen bestimmten Leuchtdichten des betrachteten Himmelsausschnitts im Vergleich. Die erreichte Leuchtdichtereduktion liegt bei Matrix M2 aufgrund der kleineren freien Siebfläche erwartungsgemäß höher (bei 20 bis 30%), allerdings nicht wesentlich (ca. 20% bei Matrix M1). Eine stärkere Reduktion von etwa 50% ergibt sich erst durch Kombination der beiden Gewebe. Die größten relativen Reduktionen der Leuchtdichte waren an Tagen zu verzeichnen, bei denen die Leuchtdichte des freien Fensters aufgrund der Witterung ohnehin schon auf einem niedrigeren Niveau lag.

### 5.2.3.2 Einsatz als direkter Blendschutz

Blendschutz gegen die direkt blendende Sonne ist dann notwendig, wenn die Sonne vom Ort des Betrachters aus gesehen innerhalb der Fensterfläche erscheint. Dies hängt, wie in Kapitel 3 beschrieben, neben der momentanen Sonnenposition in Bezug auf die Fassade auch von der Position des Betrachters und der Fassadengeometrie ab. Zunächst sind also die relevanten Zeiten zu bestimmen, in denen Direktblendung durch die Sonne überhaupt auftritt. Bei der hier vorliegenden, rein südorientierten Testfassade (Geometrie siehe Kapitel 4) und einem angenommenen mittleren Abstand des Betrachters zur Sekundärfassade von etwa 2 m ist

die Sonne von Mitte Oktober bis Ende Februar im Jahresverlauf und von jeweils etwa 11 bis 13 Uhr wahrer Ortszeit (WOZ) im Fenster sichtbar. In den genannten Zeiträumen bewegt sich der Sonnenhöhenwinkel  $\gamma_S$  zwischen  $17^\circ$  und  $31^\circ$ , der Sonnenazimutwinkel  $\alpha_S$  zwischen  $165^\circ$  und  $195^\circ$ .

Um die Sonne auszublenden, können zwischen ihr und dem Betrachter die Matrixgewebe in einem geeigneten Neigungswinkel  $\gamma_M$  gespannt werden.

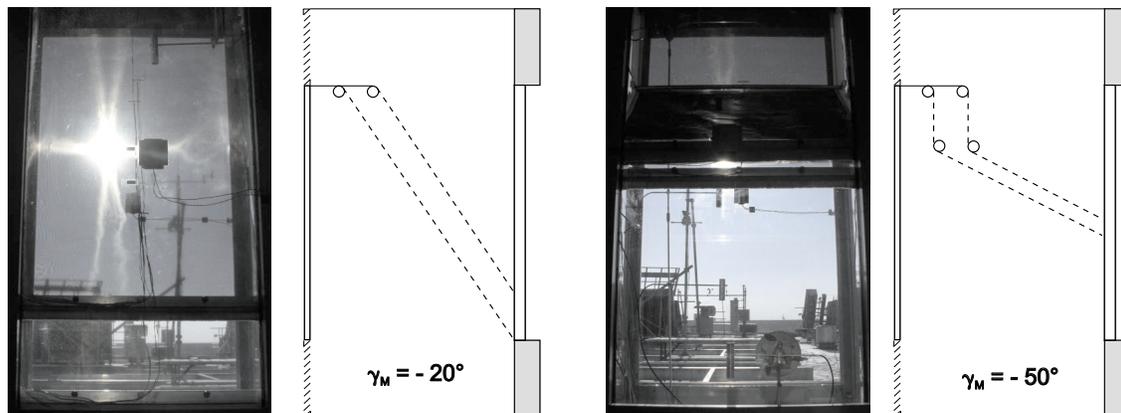


Abbildung 5.22: Wirkung des Matrixgewebes als Blendschutz (rechts)

Ein Neigungswinkel von  $\gamma_M = -20^\circ$  reicht nach Abbildung 5.22 (linkes Bild) bei weitem nicht aus, um die direkt blendende Sonne zu verschatten. Im Gegensatz dazu kann durch die stärkere negative Neigung der Matrixgewebe auf hier  $\gamma_M = -50^\circ$  (rechtes Bild) die Sonnenblendung fast völlig ausgeschaltet werden. Allerdings weist der unterhalb der Matrix liegende Bereich eine größere Helligkeit auf, da sich beide Gewebe in der oberen Hälfte des Fensters in der Blendschutzposition befinden. Im Gegensatz zu den Standardkonfigurationen mit vertikaler oder schwach geneigter Matrixposition können beim Einsatz als Blendschutz auch Gewebe mit identischer freier Siebfläche verwendet werden, ohne daß sich störende optische Effekte (vgl. Abschnitt 5.2.1.1) bemerkbar machen. Bei sehr geringen Sonnenhöhen  $\gamma_S$ , wie sie an Ost- und Westfassaden oder in nördlicheren geographischen Breiten vorkommen, muß jedoch berücksichtigt werden, daß der obere, vertikal abgespannte Teil der Gewebe wesentlich größer ausfällt. Somit gilt in diesen Fällen bezüglich des Moiré-Effekts das in Abschnitt 5.2.1.1 Gesagte. Die aus den Blendschutz-Konfigurationen resultierenden Leuchtdichten am Fenster werden im Folgenden untersucht.

Zur Verdeutlichung der Wirkungsweise wurden Blendschutz-Konfigurationen zu unterschiedlichen Zeitpunkten vermessen. Der notwendige Neigungswinkel der Matrixgewebe wurde dem jeweiligen Sonnenstand angepaßt, um eine möglichst gute Verschattung zu erreichen. In Abbildung 5.23 werden exemplarisch drei Meß-

tage einander gegenübergestellt. Die Aufnahmen wurden jeweils zwischen 12:15 und 12:30 Uhr MEZ gemacht und zeigen die Innenansicht eines Fensterkastens an drei verschiedenen Tagen (11.01.02, 02.02.02 und 18.02.02) mit den entsprechenden Sonnenhöhen  $\gamma_S$  von  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  und  $30^\circ$ .



Abbildung 5.23: Typische Leuchtdichten bei Blendschutz-Konfigurationen mit zwei identischen Matrixgeweben ( $\psi = 0.38$ ) unter Variation der Sonnenhöhe  $\gamma_S$  ( $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ) und des darauf eingestellten Neigungswinkels der Matrixgewebe  $\gamma_M$  ( $-55^\circ$ ,  $-50^\circ$ ,  $-40^\circ$ ), jeweils von links nach rechts

Die Abbildung 5.23 zeigt die zur Verschattung jeweils notwendigen Matrixpositionen bei den hier eingesetzten Matrixgeweben mit einer freien Siebfläche von  $\psi = 0.38$ . Die absolute Höhenlage des geneigten unteren Matrixabschnitts muß mit steigender Sonnenhöhe  $\gamma_S$  nach oben verschoben werden. Gleichzeitig wird bei identischer Betrachterposition der Neigungswinkel sukzessive mit steigendem  $\gamma_S$  verringert, bis die Sonne von der Sturzkante der Sekundärfassade ohnehin verschattet wird. Die typischen Leuchtdichteverteilungen zeigen, daß eine konsequente Verschattung der Sonne durch eine entsprechende Matrixpositionierung am vorliegenden Versuchsstand möglich ist. Die sonst bei mehreren Tausend Candela pro Quadratmeter liegenden Leuchtdichten der Sonne können auf einen Restwert von 30 bis  $60 \text{ cd/m}^2$  gesenkt werden. Ist ein vertikal nach unten gespannter Matrixbereich notwendig, so liegt die Leuchtdichte hier etwas höher (zwischen  $100$  und  $200 \text{ cd/m}^2$ ), da das Gewebe beim daraus resultierenden Einstrahlwinkel teiltransparent ist. Die Leuchtdichten der unterhalb der Matrixgewebe liegenden, völlig unverschatteten Fensterhälfte liegen naturgemäß wesentlich darüber. Je nach Solarstrahlungssituation ergaben sich hierfür Leuchtdichten im Bereich von bis zu  $1000 \text{ cd/m}^2$  bei klarem Himmel. Ist der Diffusstrahlungsanteil sehr hoch (an eher diesigen oder wolkigen Tagen), wurden auch Werte von bis zu  $1500 \text{ cd/m}^2$  gemessen (z.B. Abbildung 5.23 links).

### Abhängigkeit von der Betrachterposition

Die Wirkung des als Blendschutz angebrachten Matrixgewebes hängt aufgrund seines winkelabhängigen Transmissionsgrades wie bereits erwähnt auch von der Betrachterposition im Raum ab. Die in Abbildung 5.24 mittlere Darstellung zeigt den optimalen Blendschutz bei einer Augenhöhe von 1.40 m, während links die Matrixposition zu hoch und rechts zu niedrig eingestellt ist. Das bedeutet, daß ein solcher Blendschutz sehr genau auf die Position des Betrachters bzw. dessen Arbeitsplatz abgestimmt werden muß. Im vorliegenden Beispiel liegen die Grenzen der Wirksamkeit des Blendschutzes vertikal knapp einen halben Meter auseinander, was etwa dem Unterschied zwischen sitzender und stehender Position entspricht.



Abbildung 5.24: Blendschutz-Konfiguration unter verschiedenen Blickwinkeln, bedingt durch eine unterschiedliche Aufnahmehöhe: links 1.10 m, mitte 1.40 m, rechts 1.60 m, jeweils im Abstand von 1.70 m von der Primärfassade

### Weitere Variante zu Blendschutz und Leuchtdichtereduzierung

Wie die vorhergehenden Darstellungen zeigen, bedeutet das Ausblenden der Sonne eine sehr stark verminderte Leuchtdichte in diesem Bereich, während der darunterliegende Fensterbereich ohne Matrix nach wie vor sehr hohe Leuchtdichten aufweist. Zwar ist die direkte Blendquelle dann ausgeblendet, und damit das eigentliche Ziel erreicht, allerdings sind die Leuchtdichtedifferenzen innerhalb des Fensters mitunter sehr hoch. Aus diesem Grund sind Kombinationen der bisher besprochenen Konfigurationen ein interessanter Ansatzpunkt, die beiden Ziele *Direktblendschutz* und *gleichmäßige Leuchtdichteverteilung* mit zwei Matrixgeweben zu bewerkstelligen.

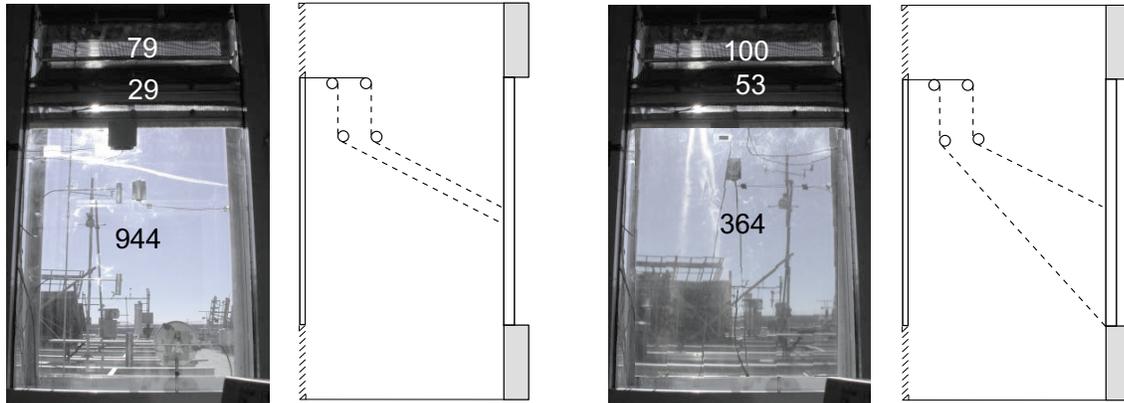


Abbildung 5.25: Leuchtdichten bei zwei unterschiedlichen Blendschutzeinstellungen (links: beide Gewebe  $\gamma_M = -50^\circ$ ; rechts:  $\gamma_{M1} = -25^\circ$  und  $\gamma_{M2} = -50^\circ$ ), aufgenommen am 03.02.02, 12.20 Uhr,  $\gamma_S = 25^\circ$

Abbildung 5.25 zeigt für die Konfiguration, bei der eines der beiden Gewebe in einem kleineren negativen Winkel bis zur Fensterunterkante gespannt wird, eine wesentlich gleichmäßigere Verteilung der Leuchtdichten im Fensterbereich. Insbesondere der untere Bereich konnte durch die Matrix in seiner Leuchtdichte um etwa 60% reduziert werden. Gleichzeitig nimmt die Leuchtdichte im eigentlichen Blendschutz darüber etwas zu, da hier nicht mehr beide Gewebe im dafür optimalen Anstellwinkel übereinander liegen. An diesem Beispiel wird auch noch einmal die wesentlich größere Flexibilität beim Einsatz zweier vollbeweglicher Gewebe deutlich. Je nach Situation und Einsatzfall kann die jeweils geeignetste Position angefahren werden.

# Kapitel 6

## Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand der vorliegenden Arbeit war die experimentelle und theoretische Untersuchung der thermischen Eigenschaften eines luftdurchströmten Doppelfassaden-Matrixkollektors. Daneben wurden lichttechnische Aspekte zur Blendschutzwirkung eines solchen neuartigen Fensterkollektors diskutiert. Da das Verhalten des Doppelfassaden-Fensterkollektors unter möglichst praxisnahen Bedingungen erfaßt werden sollte, wurde ein mit Unterstützung der ALU-SOMMER GMBH errichteter Outdoor-Versuchstand auf dem Solaren Forschungsfeld der TU München mit abrollbaren und in verschiedenen Positionen justierbaren Matrixabsorbern bestückt.

Die Motivation für den Einsatz von Matrixgeweben im Luftzwischenraum von Doppelfassaden besteht in der Kombination der Vorteile doppelschaliger Fassaden insbesondere bei wind- und schallexponierten hohen Gebäuden mit der Möglichkeit einen Sonnen- bzw. Blendschutz einzusetzen, der gleichzeitig die thermische Nutzung der auf die Fassade auftreffenden Strahlung erlaubt und somit die winterlichen Lüftungseigenschaften weiter verbessert, ohne die sommerlichen Verhältnisse zu verschlechtern. Die einstrahlwinkelabhängige Transparenz der eingesetzten Gewebe kann in Luftzwischenräumen ausreichender Tiefe (mindestens 60 cm) für unterschiedliche Blendschutz- und Verschattungsaufgaben ausgenutzt werden, während das Gewebe zusätzlich als Solarabsorber wirkt, der von der ihn durchströmenden Luft unter Zwangskonvektion gekühlt wird. Das Ziel der theoretischen und experimentellen Untersuchungen war die Bestimmung geeigneter Matrixkonfigurationen hinsichtlich ihrer Geometrie, Anzahl, Position und Neigungswinkel im Luftzwischenraum aus thermischer und lichttechnischer Sicht. Dazu wurden bei den jeweils justierten Matrixkonfigurationen und Luftmassenströmen die resultierenden Temperaturhübe in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen erfaßt, um daraus Planungsgrundlagen für die Umsetzung von Matrixkollektoren in Doppelfassaden abzuleiten. Darüberhinaus wur-

den lichttechnisch relevante Matrixkonfigurationen auf ihre Verschattungs- und Blendschutzfunktion hin untersucht, um Aussagen über lichttechnisch sinnvolle Positionen der Gewebe im Luftzwischenraum zu erhalten.

In einer einführenden Literaturstudie wurde zunächst im ersten Teil ein Überblick über Fassaden hoher Häuser mit dem Schwerpunkt auf zwangsdurchlüfteten Doppelfassaden gegeben. Der zweite Teil der Literaturrecherche besteht aus einer Herleitung und Klassifizierung aktiver solarer Fassadenluftkollektoren, gefolgt von einigen Ansätzen, gebäudetechnische Anlagenkomponenten in die Fassade zu integrieren. Dabei wurde festgestellt, daß der Ansatz, transparente Solarabsorber zur thermischen Nutzung im Fensterbereich zu nutzen – abgesehen von einigen Fensterkollektoren auf der Basis von Jalousiesystemen – im Gegensatz zu der Entwicklung in der Photovoltaik bisher fehlt. Im darauffolgenden Kapitel wurde deshalb daran anknüpfend ein Konzept für einen in die Doppelfassade integrierten Matrixkollektor vorgeschlagen. Dazu wurden wichtige Grundlagen und Definitionen gegeben, auf deren Basis ein mathematisches Modell zur Berechnung des richtungsabhängigen Transmissionsgrades der einzusetzenden Matrixabsorber entwickelt wurde, mit dem typische Tagesverläufe der Strahlungstransmission für unterschiedliche Fassadenorientierungen und Matrixkonfigurationen angegeben werden konnten. Allgemeine Überlegungen und Abschätzungen zum energetischen und lichttechnischen Verhalten des Doppelfassaden-Matrixkollektors mit dem Ziel, eine Auswahl der zu untersuchenden Matrixkonfigurationen zu treffen, schließen das Kapitel ab.

Die Experimente wurden unter meßtechnischer Aufnahme der relevanten Luft- und Oberflächentemperaturen, der Umgebungsbedingungen sowie der eingestellten Luftmassenströme und der daraus resultierenden örtlichen mittleren Luftgeschwindigkeiten an der in Kapitel 4 beschriebenen Outdoor-Versuchsfassade von Juli 2001 bis April 2002 durchgeführt. Diese Messungen lieferten – in Abhängigkeit vom Luftmassenstrom und der Matrixkonfiguration – erreichbare Temperaturhübe, Temperaturverteilungen, sowie Aussagen über die Durchströmungszustände im Doppelfassaden-Matrixkollektor (untermauert durch Versuchsreihen, bei denen die Strömungsverhältnisse durch Nebelbeimischung visualisiert wurden), aus denen praxisrelevante Empfehlungen abgeleitet wurden. Ferner wurden lichttechnische Messungen und Bewertungen durchgeführt, die sowohl durch Fotoaufnahmen als auch durch die Bestimmung der relevanten Leuchtdichten dokumentiert wurden. Sie zeigen die Verschattungseigenschaften der in verschiedenen Neigungswinkeln eingesetzten Metallgewebe und deren Wirkung im dahinterliegenden Raum.

Aus den experimentellen Untersuchungen konnten Kenntnisse über die Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilungen im Doppelfassaden-Matrixkol-

lektor gewonnen werden, woraus Präferenzen für die Matrixkonfiguration im Sommer-, Winter- und Übergangszeitfall abgeleitet wurden. Der Temperaturhub im Luftkollektor als wichtigste thermische Kenngröße hängt unerwartet wenig von der jeweils eingestellten Matrixkonfiguration ab. Der weitaus gewichtigere Einflußfaktor ist neben dem einzustellenden Luftmassenstrom die Gesamtstrahlung auf die vertikale Fassadenfläche und der Einstrahlwinkel, mit dem die Direktstrahlung auf die Fassade trifft. Dadurch wird nicht nur der durch die Sekundärverglasung transmittierte, auf den Absorber auftreffende Strahlungsanteil beeinflusst, sondern je nach Fassadengeometrie und Matrixposition auch ein teilweise erheblicher Flächenanteil des Absorbers durch die Fassadenkonstruktion selbst verschattet. Dem ist durch eine entsprechend abgestimmte Fassadengliederung – gegebenenfalls unterschiedliche Gliederung von Primär- und Sekundärfassade – Rechnung zu tragen. Trotzdem erreicht beispielsweise die Konfiguration mit positivem Neigungswinkel der Matrix nicht so viel niedrigere Temperaturhübe wie aufgrund der teilweisen Absorberschattung bei hohen Sonnenständen und der höheren Wärmeverluste an der Sekundärscheibe im Winterfall erwartet. Überraschenderweise konnte in den meisten Fällen keine deutliche Steigerung des Temperaturhubs durch den Einsatz einer zweiten (grobmaschigeren,  $\psi = 0.53$ ) Matrix gegenüber einer einzelnen Matrix ( $\psi = 0.31$ ) erzielt werden, wobei hier die Reihenfolge der Durchströmung eine wesentliche Rolle spielt. Sind optische Effekte, wie sie bei der Kombination zweier Gewebe – in Form des Moiré-Effektes – in unterschiedlich starker Ausprägung auftreten, unerwünscht, kann daher oft auf ein einzelnes, engmaschiges Gewebe zurückgegriffen werden. Für eine Optimierung aus thermischer Sicht sind aber dennoch zwei, in der geeigneten Reihenfolge hintereinanderliegende Matrixabsorber zu bevorzugen.

Insbesondere der Neigungswinkel der jeweiligen Matrixkonfiguration hatte großen Einfluß auf die Strömungsverhältnisse im Fensterkollektor. Zunächst gilt es festzustellen, daß die Strömungsverhältnisse in einem mit Matrixabsorbern bespannten Fensterkasten trotz der rechnerisch sehr kleinen Druckverlustbeiwerte der verwendeten Drahtgewebe von denen in einem „leeren“ Fensterkasten abweichen. Daraus resultieren Folgen für das Lüftungskonzept: Möchte man den Doppelfassaden-Matrixkollektor beispielsweise in Kombination mit Fensterlüftung über die Primärfassade betreiben, ist die Temperaturverteilung und die Frage der Durchströmung im Fensterkasten bzw. Luftzwischenraum speziell zu berücksichtigen und in die Wahl der jeweils geeigneten Matrixkonfiguration mit einzubeziehen. Der Einsatz von Luftleitblechen führt zwar zu gleichmäßigerer Durchströmung des Fensterkollektors, allerdings war damit keine höhere thermische Effizienz verbunden.

Die seitliche Abdichtung zwischen Matrixabsorber und Glaslinsen spielt eine untergeordnete Rolle, zumal die Glasflächen temporär nicht unwesentlich zur Luft erwärmung beitragen. Der Wegfall seitlicher Abdichtungen hätte vor allem starke Vereinfachungen bei der praktischen Umsetzung abrollbarer Matrixabsorber zur Folge.

Die experimentellen Untersuchungen ergaben im Einzelnen folgende wesentliche thermische Erkenntnisse:

- Die Temperaturhübe im untersuchten Spektrum des Luftmassenstroms lagen je nach Matrixkonfiguration und Umgebungsbedingungen zwischen 5 und 25 K.
- Bei ausschließlich diffuser Einstrahlung und Luftmassenströmen  $\leq 50$  g/s wurden Temperaturhübe bis zu 10 K gemessen.
- Die resultierenden thermischen Wirkungsgrade betragen je nach Luftmassenstrom und Konfiguration ca. 30 bis 40%
- Der Einfluß der jeweiligen Matrixkonfiguration auf den zu erreichenden Temperaturhub lag bei ca.  $\pm 3$  K, bei starker Einstrahlung und kleinem Luftmassenstrom etwas höher, bei abnehmender Einstrahlung und großem Luftmassenstrom etwas niedriger.

Insgesamt bedeutet das oben Gesagte beim hier eingesetzten Absorbermaterial, daß die Optimierung primär in Bezug auf die lichttechnischen Eigenschaften erfolgen kann, insbesondere wenn die erwärmte Luft aus dem Luftzwischenraum über ein mechanisches Lüftungssystem den Innenräumen zugeführt wird. Die Dimensionierung der Tiefe des Luftzwischenraums beispielsweise richtet sich damit auch nach lichttechnischen Kriterien.

- Die Geometrie, Anordnung und Reihenfolge der Gewebe hat großen Einfluß auf sich ergebende optische Effekte, Gewebe mit unterschiedlicher freier Siebfläche sind grundsätzlich zu bevorzugen.
- Der Luftzwischenraum sollte beim Einsatz der Absorbermatrix als Blendenschutz so tief bemessen sein, daß der geographischen Breite und der Geometrie im Innenraum entsprechende Anstellwinkel einstellbar sind.
- Der Tiefe des Luftzwischenraums sind nach oben hin Grenzen gesetzt, da bei einem bestimmten Luftmassenstrom die Luftgeschwindigkeiten zu niedrig werden, um eine Zwangsdurchströmung ohne zu starke Effekte durch Mischkonvektion gewährleisten zu können.

In der vorliegenden Arbeit wurden die wichtigsten praxisrelevanten Aspekte eines Doppelfassaden-Matrixkollektors angesprochen. Dabei konnten viele Themen nur angerissen werden und bedürfen einer vertieften Betrachtung. Für eine Umsetzung in die Baupraxis und eine optimierte Betriebsweise des Kollektors wäre die Bearbeitung folgender weiterführender Aufgaben wünschenswert:

- Die Performance des Fensterkollektors kann verbessert und optimiert werden, indem Kupfergewebe mit hochselektiven Beschichtungen wie TiNO<sub>x</sub> ausgerüstet werden.
- Mögliche Kombination mit dezentralen Haustechnikkomponenten und dazugehörige Optimierung des Doppelfassaden-Matrixkollektors
- Detaillierte Betrachtung der Strömungsverhältnisse im Kollektor
- Verhalten der Matrixabsorber in mehrgeschossigen Fassadenschächten
- Untersuchung rein solarinduzierter Entlüftung



# Literaturverzeichnis

- [1] O. P. Agnihotri und B. K. Gupta. *Solar Selective Surfaces*. John Wiley & Sons, New York (1981).
- [2] K. Altfeld, W. Leiner und M. Fiebig. *Exergetische Optimierung von flachen solaren Lufterhitzern*. Heizung, Lüftung/Klima, Haustechnik (HLH) **36** (1985) 2, 68–72.
- [3] N. K. Bansal, A. Boettcher und R. Uhlemann. *Vergleich von solaren Luft- und Wasserkollektoren aus verschiedenen Kunststoffen*. in *4. Internationales Sonnenforum*, (1982), S. 401–407.
- [4] C. Bartenbach und W. Witting. *Visuelle Optimierung von Bildschirmarbeitsplätzen*. in *1. Innsbrucker Innovations-Forum „Neue Licht- und Gebäudekonzepte 2000+“*, Akzente Studiengemeinschaft (1999), S. 1–20.
- [5] T. Beikircher und W. Schölkopf. *Untersuchungen zu Wärmeübergängen in einem Fassadenluftkollektor*. in *Zehntes Symposium thermische Solarenergie*, OTTI, Staffelstein (2000), S. 211 – 216.
- [6] M. A. Bernier und E. G. Plett. *Thermal Performance Representation and Testing of Solar Air Collectors*. Journal of Solar Energy Engineering **110** (1988), 74–81.
- [7] A. Betz und R. Ritter. *Grundlagen der Moiré-Technik*. in *Einführungsvortrag auf der Sitzung des GESA-Arbeitskreises „Optische Verfahren“*, TU München (1980), S. 2–10.
- [8] R. W. Bliss. *Solar House Heating – A Panel*. in *Proceedings of the World Symposium On Applied Solar Energy*, Phoenix, Arizona (1955), S. 151–158.
- [9] H.-J. Blum und andere. *Doppelfassaden*. Verlag Ernst und Sohn, Berlin (2001).
- [10] W. Bohl. *Technische Strömungslehre*, 3. Aufl. Vogel-Verlag, Würzburg (1978).
- [11] P. O. Braun. *Solare Fassadensysteme*. BbauBl (1995) 5, 374–379.

- [12] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen. *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV)*, 2002.
- [13] J. P. Chiou. *Heat Transfer and Flow Friction Characteristics of Metallic Foil Matrices Using Radiation as the Heat Source (and their Application to the Design of Solar Collectors)*. Dissertation, University of Wisconsin, 1964.
- [14] J. P. Chiou, M. M. El-Wakil und J. A. Duffie. *A Slit-and-Expanded Aluminium-Foil Matrix Solar Collector*. *Solar Energy* **9** (1965) 2, 73–80.
- [15] C. Choudhury und H. P. Garg. *Evaluation of a Jet Plate Solar Air Heater*. *Solar Energy* **46** (1991) 4, 199–209.
- [16] A. Compagno. *Intelligente Glasfassaden*, 4. Aufl. Birkhäuser, Basel (1999).
- [17] Le Corbusier. *1929. Feststellungen zu Architektur und Städtebau*, (1964).
- [18] D. Danner, F. H. Dassler und J. R. Krause (Hrsg.) . *Die klima-aktive Fassade*. Verlagsanstalt Alexander Koch, Leinfelden-Echterdingen (1999).
- [19] M. R. Diab. *Experimental and Analytical Study of Heat Transfer Characteristics of Solar Air Heater Incorporating a Finned Absorber*. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 1981.
- [20] R. Digel. *Optimierung eines hocheffizienten Sonnenflachkollektors mit luftdurchströmter, transparenter Kapillarstruktur*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994.
- [21] DIN 4757. *Sonnenheizungsanlagen mit Wasser oder Wassergemischen als Wärmeträger*, 1980.
- [22] DIN 5034. *Tageslicht in Innenräumen – Teil 2: Grundlagen*, 1985.
- [23] DIN EN 12975. *Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kollektoren*, 2001.
- [24] DIN ISO 4782. *Metalldraht für industriell genutzte Siebgewebe*, 1993.
- [25] DIN ISO 9044. *Industriedrahtgewebe – Technische Anforderungen und Prüfung*, 2001.
- [26] DIN V 4757-4. *Solarthermische Anlagen – Teil 4: Sonnenkollektoren - Bestimmung von Wirkungsgrad, Wärmekapazität und Druckabfall*, 1995.
- [27] W. Dotzler und S. Schröpf. *Solar-Luft-Systeme in der Fassade*. in *Neuntes Symposium thermische Solarenergie*, OTTI, Staffelstein (1999), S. 198–202.

- [28] J. A. Duffie und W. A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2. Aufl. John Wiley & Sons, New York (1991).
- [29] U. Eicker. *Solare Technologien für Gebäude*. B. G. Teubner, Stuttgart / Leipzig / Wiesbaden (2001).
- [30] J. Ernst. *Doppelfassaden sowie Fassadenbauarten, Heizen und Kühlen mit Fassadenbauteilen*. in *Veranstaltungsunterlagen des Seminars „Doppelfassaden sowie Heizen und Kühlen mit Decken, Fassaden und Fußböden“ am 2.11.1999*, Berlin (1999).
- [31] EVERS Ingenieurgesellschaft. *3x – Architektur Ökonomie Technik*. Broschüre, D-63225 Langen (2001).
- [32] M. F. M. Fahmy und A. M. Labib. *Exact Solution of a Model for Dynamic Behavior of a Matrix Solar Air Heater*. *Energy Conv. & Mgmt.* **32** (1991) 1, 35–42.
- [33] A. P. Faist (Hrsg.). *La Facade double-peau*. Technical Report Band 1-6, EPF Lausanne, (1998).
- [34] H. Fechner. *Investigations on Series Produced Solar Air Collectors – Final Report*. Technical Report IEA TASK 19, Solar Air Systems, arsenal research – Austrian Center for Research and Testing, Wien (1999).
- [35] Ch. Filleux. *Passive Sonnenenergienutzung mit konvektiven Systemen*. Schweizer Ingenieur und Architekt (1988) 21, 644–646.
- [36] N. M. Fisch. *Systemuntersuchungen zur Nutzung der Sonnenenergie bei der Beheizung von Wohngebäuden mit Luft als Wärmeträger*. Dissertation, Universität Stuttgart, 1984.
- [37] K. Fitzner. *Wie werden wir lüften? – Wandlung der Lüftungskonzepte durch verringerte thermische Lasten*. in *Symposium „future office“ am 12. April 2002*, Literaturhaus München (2002), S. 1–25.
- [38] I. Flagge, V. Herzog-Loibl und A. Meseure (Hrsg.) . *Thomas Herzog - Architektur + Technologie*. Verlag Prestel, München / London / New York (2001).
- [39] FSL – Fenster System Lüftung GmbH. Herstellerinformation, (1999).
- [40] K. Gertis. *Sind neuere Fassadenentwicklungen sinnvoll? Teil 2: Glas-Doppelfassaden*. *Bauphysik* **21** (1999) 2, 54–66.
- [41] R. Gfeller Corthésy (Hrsg.) . *Bartenbach LichtLabor – Bauen mit Tageslicht – Bauen mit Kunstlicht*. Vieweg & Sohn, Braunschweig / Wiesbaden (1998).

- [42] GRAMMER KG Solar-Luft-Technik. Herstellerinformation, (1999).
- [43] J. Gronau und G. Lindner. *Die Evaluierung eines Doppelhauses mit solarer Heizungsunterstützung*. Bauphysik **18** (1996) 4, 114–120.
- [44] L. H. Gunnewiek, E. Brundrett und K. G. T. Hollands. *Flow Distribution in Unglazed Transpired Solar Air Heaters of Large Area*. in *ISES Solar World Congress*, Harare (1995).
- [45] D. Gupta, S. C. Solanki und J. S. Saini. *Heat and Fluid Flow in Rectangular Solar Air Heater Ducts Having Transverse Rib Roughness on Absorber Plates*. Solar Energy **51** (1993) 1, 31–37.
- [46] GWG Gemeinnützige Wohnstätten- und Siedlungsgesellschaft mbH und Landeshauptstadt München. *Geförderter Wohnungsbau in München – Niedrigenergiehaus Baumgartner-/ Ganghoferstraße*. Informationsbroschüre, D-80331 München (1997).
- [47] F. Haferland. *Sonnenenergie zur Heizung und Nachtluft zur Kühlung von Gebäuden – 1. Teil*. Heizung, Lüftung/Klima, Haustechnik (HLH) **36** (1985) 8, 393–399.
- [48] F. Haferland. *Sonnenenergie zur Heizung und Nachtluft zur Kühlung von Gebäuden – 2. Teil*. Heizung, Lüftung/Klima, Haustechnik (HLH) **36** (1985) 9, 469–476.
- [49] F. Haferland. *Kühl- und Wärmeenergiespeicherung in durchlüfteten Baukonstruktionen*. Bauphysik **12** (1990) 5, 151–156.
- [50] A. Haller, O. Humm und K. Voss (Hrsg.) . *Renovieren mit der Sonne*. ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg (2000).
- [51] R. Hastings (Hrsg.) . *Solar Air Systems – Built Examples*. James & James Ltd, London (2000).
- [52] G. Hauser. *Energetische Wirkung einer durchströmten Glasfassade*. TAB Technik am Bau **20** (1989) 4, 329–338.
- [53] G. Hauser und B. Heibel. *Bemessungsgrundlagen für Zuluftfassaden*. Bauphysik **20** (1998) 3, 74–79.
- [54] G. Hausladen. *Innovative Gebäude-, Technik- und Energiekonzepte*. Oldenbourg Verlag, München (2001).

- [55] G. Hausladen und M. de Saldanha. *light-tech twin-tower – Energie- und Raumlufttechnik für ein Hochhaus mit minimierter Technik*. Bauzeitung **56** (2002) 1-2, 48–54.
- [56] G. Heinrich und U. Franzke (Hrsg.) . *Sorptionsgestützte Klimatisierung - Entfeuchtung und DEC in der Klima-Kälte-Technik*. C.F. Müller Verlag, Heidelberg (1997).
- [57] H.-M. Henning. *Sonnenenergie für die Gebäudeklimatisierung*. Sonnenenergie **24** (1999) 1, 28–31.
- [58] C. S. Herrick. *An Air-Cooled Solar Collector Using All-Cylindrical Elements in a Low-Loss Body*. Solar Energy **31** (1983) 1, 217–224.
- [59] T. Herzog (Hrsg.) . *Solar Energy in Architecture and Urban Planning*. Verlag Prestel, München / London / New York (1995).
- [60] C. Hindenburg, H.-M. Henning und T. Erpenbeck. *Kühlen mit Luft - Solare sorptionsgestützte Klimatisierung mit Feststoffsorbentien*. Sonnenenergie **24** (1999) 1, 39–41.
- [61] M. H. Huenchunir Bustos. *Sonnenenergiegewinnung unter besonderer Berücksichtigung von Sonnenkollektoren – dargestellt am Beispiel der Integration von Luftkollektoren im mehrgeschossigen Wohnungsbau in Mittel-Chile (Santiago)*. Dissertation, Universität Hannover, 1997.
- [62] I. E. Idelchik und E. Fried. *Flow Resistance: A Design Guide For Engineers*. Hemisphere Publishing Corporation, New York (1989).
- [63] F. P. Incropera und De Witt D. P. *Fundamentals Of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons, (1990).
- [64] ISO 9806. *Test Methods for Solar Collectors*, 1994.
- [65] F. Issacci, Y. Zvirin und G. Grossman. *Heat Transfer Analysis of a Finned Solar Air Heater*. Journal of Solar Energy Engineering **110** (1988), 145–155.
- [66] A. E. Kabeel und K. Mecárik. *Shape Optimization for Absorber Plates of Solar Air Collectors*. Renewable Energy **13** (1998), 121–131.
- [67] B. Kamp. *Vergleich von Verfahren zur Moiré-Bildauswertung bei Bildvorlagen mit langwelligen Moiré-Strukturen*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1992.
- [68] W. M. Kays und A. L. London. *Compact Heat Exchangers*, 3. Aufl. McGraw-Hill, (1984).

- [69] C. V. Khe und S. M. Henderson. *Performance of a Matrix Solar Collector for Heating Air*. Transactions of the ASAE (1977), 558–561.
- [70] A. Kolb. *Theoretische und experimentelle Untersuchungen an einem neuen solaren Luftkollektor mit durchströmtem Absorber*. VDI-Fortschrittberichte Reihe 6 Nr. 356. VDI-Verlag, Düsseldorf (1997).
- [71] C. F. Kutscher, C. B. Christensen und G. M. Barker. *Unglazed Transpired Solar Collectors: Heat Loss Theory*. Transactions of the ASME **115** (1993) 8, 182–188.
- [72] W. Lang. *Zur Typologie mehrschaliger Gebäudehüllen aus Glas*. Detail (1998) 7, 1225–1232.
- [73] W. Lang. *Typologische Klassifikation von Doppelfassaden und experimentelle Untersuchung von dort eingebauten Lamellensystemen aus Holz zur Steuerung des Energiehaushaltes hoher Häuser unter besonderer Berücksichtigung der Solarenergie*. Dissertation, Technische Universität München, 2000.
- [74] M. K. Löffler. *Integration eines durchströmten Sonnenkollektors in eine Gebäudeaußenwand*. VDI-Fortschrittberichte Reihe 6 Nr. 423. VDI-Verlag, Düsseldorf (1999).
- [75] T. Lützkendorf. *Werkzeuge zur ökologisch-ökonomischen Bewertung von Bauwerken im Planungsprozeß*. in *3. Passivhaus-Tagung*, Bregenz, Vorarlberg (1999), S. 65–79.
- [76] S. M. Macro und L. S. Han. *An Investigation of Convection Heat Transfer in Porous Medium*. Technical Report 55-A-104, ASME, (1955).
- [77] A. Marko und P. Braun. *Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden*. Springer-Verlag, Berlin (1997).
- [78] F. Mayinger und J. Straub. *Wärme- und Stoffübertragung*. Arbeitsunterlagen zu Vorlesung und Übung, Technische Universität München, Lehrstuhl A für Thermodynamik (1988).
- [79] S. Meyer. *Wirkung eines hybriden Doppelfassadensystems auf die Energiebilanz und das Raumklima der dahinterliegenden Räume*. Dissertation, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2001.
- [80] J. Morhenne. *Solare Lufterwärmung - eine bisher unzureichend genutzte Möglichkeit der Energieeinsparung*. in *Vorarlberger Solarsymposium*, Bregenz, Vorarlberg (1996), S. 40 – 49.
- [81] E. S. Morse. *Warming and Ventilating Apartments by the Sun`s Rays*. Technical Report Patent No. 246 626, United States Patent Office, (1881).

- [82] N. N. *Verwaltungsgebäude der Götz GmbH in Würzburg*. TAB Technik am Bau **27** (1996) 7, 17–28.
- [83] D. A. Neeper. *Analysis of Matrix Air Heaters*. Technical Report LA-UR-79-1318, Los Alamos Sc. Lab., New Mexico (1979).
- [84] C. Nolte. *Zum Lüftungsverhalten von Doppelfassaden*. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Essen, 1999.
- [85] E. Oesterle, R.-D. Lieb, Lutz und Heusler. *Doppelschalige Fassaden*. Callwey-Verlag, München (1999).
- [86] P. Oswalt (Hrsg.) . *Wohltemperierte Architektur: Neue Techniken des Energiesparenden Bauens*, 2. Aufl. C.F. Müller Verlag, Heidelberg (1995).
- [87] K. Petzold. *Die energetische Wirksamkeit 2-kanaliger lüftungstechnisch angekoppelter Außenbauwerksteile; Teil 3: Luftkollektoren*. Luft- und Kältetechnik (1986) 3, 150–154.
- [88] K. Petzold. *Heizenergetische Optimierung lüftungstechnisch angekoppelter Außenbauwerksteile; Teil 4: Optimale Parameter der Luftkollektoren*. Luft- und Kältetechnik (1988) 4, 197–199.
- [89] K. Petzold und F. Lobers. *Sonnenkollektoren mit Umluftbetrieb*. Bauphysik **18** (1996) 3, 65–73.
- [90] Philipp Holzmann AG (Hrsg.) . *Gebäude von morgen - Forschungsbericht*. Beton-Verlag, Düsseldorf (1997).
- [91] Y. Piao, E. G. Hauptmann und M. Iqbal. *Forced Convective Heat Transfer in Cross-Corrugated Solar Air Heaters*. Journal of Solar Energy Engineering **116** (1994), 212–214.
- [92] D. Polikakos und K. Renken. *Forced Convection in Channel Filled With Porous Media*. J. of Heat Transfer **109** (1987) C, 880–888.
- [93] K. Pottler. *Energetische Optimierung von Solar-Luft-Kollektoren*. VDI-Fortschrittberichte Reihe 6 Nr. 442. VDI-Verlag, Düsseldorf (2000).
- [94] B. N. Prasad und J. S. Saini. *Effect of Artificial Roughness on Heat Transfer and Friction Factor in a Solar Air Heater*. Solar Energy **41** (1988), 555–560.
- [95] U. Renz und D. Müller. *Strömung und Wärmeübertragung in Doppelfassaden*. in *Tagungsband „Doppelfassaden und Technische Gebäudeausrüstung“*, Selbstverlag Fachinstitut Gebäude-Klima e.V., Bietigheim-Bissingen (1997), S. 125 – 132.

- [96] S.J. Rhee. *Effect of Wall Suction on Laminar Entrance Flow with Application to Solar Air Heaters*. Dissertation, University of California, 1980.
- [97] H. R. Ris. *Beleuchtungstechnik für Praktiker*, 2. Aufl. VDE-Verlag, Berlin / Offenbach (1997).
- [98] L. Rouvel und S. Kolmetz. *Thermische Bewertung von Gebäuden unter sommerlichen Randbedingungen*. Gesundheitsingenieur **118** (1997) 2, 65–74.
- [99] L. Rouvel, H. Schaefer und U. Wagner. *Nutzung regenerativer Energien*, 9. Aufl. Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik TUM, (1999).
- [100] Ch. Schittich, G. Staib, D. Balkow, M. Schuler und W. Sobek. *Glasbau-Atlas*. Birkhäuser, Basel (1998).
- [101] A. Schneider (Hrsg.) . *Solararchitektur für Europa*. Birkhäuser Verlag, Basel Boston Berlin (1996).
- [102] SCHÜCO International KG. *Concept-Fassade*. Produktinformation, . Glas 3/99, S. 48–50.
- [103] A. J. Schwab. *Wärmeübertragung bei Mischkonvektion in luftdurchströmten Fassaden*. Dissertation, Technische Universität München, 1993.
- [104] R. Seidemann. *Fassaden-Solarluftheizung im Gewerbe- und Wohnungsbau*. Heizung, Lüftung/Klima, Haustechnik (HLH) **47** (1996) 3, 62–63.
- [105] M. Stahl. *Zuluft aus dem Doppelschacht*. Clima Commerce International (CCI) **32** (1998) 14, 33–34.
- [106] F. Steimle. *Sorptionsgestützte Klimatisierung*. in *Dresdner Kolloquium*, Fachinstitut Gebäude-Klima e.V., Bietigheim-Bissingen, 10/1997 (1997).
- [107] D. Thiel. *Doppelfassaden – Ein Bestandteil energetisch optimierter und emissionsarmer Bürogebäude*. in *Innovative Fassadentechnologie*, Tagung am ILB der FH Köln (1994).
- [108] D. Thiel und B. Döring. *Dezentrale Raumklimatisierung durch die Fassade*. TAB Technik am Bau **32** (2001) 3, 67–76.
- [109] L. S. Tong und A. L. London. *Heat Transfer and Friction Flow Characteristics of Woven Screen and Crossed Rod Matrices*. J. of Heat Transfer **79** (1957), 1158–1170.

- [110] F. Trombe und andere. *Étude sur le chauffage des habitations par utilisation du rayonnement solaire*. Revue générale de Thermique **IV** (1965) 48.
- [111] <http://www.gkd.de>. Gebr. Kufferath AG, Metallweberstr. 46, 52353 Düren, (2002).
- [112] <http://www.grammer-solar.de>. GRAMMER SOLAR + BAU, Wernher-von-Braun Str. 6, 92224 Amberg, (2002).
- [113] <http://www.polytherm.de/infoservice>. Innovatives Energiekonzept am Beispiel Post-Tower in Bonn, (2001).
- [114] <http://www.solarwall.de>. SOLARWALL International, D-37079 Göttingen, (2002).
- [115] K. Vafai und S. Kim. *Forced Convection in a Channel Filled With a Porous Medium: An Exact Solution*. J. of Heat Transfer **111** (1981), 1103–1106.
- [116] VDI Verein Deutscher Ingenieure. *VDI-Wärmeatlas*, 6. Aufl. VDI-Verlag, Düsseldorf (1991).
- [117] N. E. Wijesundera, L. L. Ah und L. E. Tijoe. *Thermal Performance Study of Two-Pass Solar Air Heaters*. Solar Energy **28** (1982) 5, 363–370.
- [118] O. A. Zeidler. *Grenzen der thermischen Last bei Fensterlüftung in Bürogebäuden*. VDI-Fortschrittberichte Reihe 19 Nr. 134. VDI-Verlag, Düsseldorf (2001).
- [119] T. Zekorn. *Betriebsverhalten einer Wärmepumpenanlage mit Luftkollektor und Erdspeicher*. Dissertation, Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1982.
- [120] T. Zekorn. *Umweltwärme zum Heizen kombiniert*. Heizung, Lüftung/Klima, Haustechnik (HLH) **37** (1986) 9, 462–466.
- [121] C. Ziller. *Modellversuche und Berechnungen zur Optimierung der natürlichen Lüftung durch Doppelfassaden*. Dissertation, Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1999.
- [122] A. Zöllner. *Experimentelle und theoretische Untersuchung des kombinierten Wärmetransports in Doppelfassaden*. Dissertation, Technische Universität München, 2001.