

**Die transparente Wärmedämmung im  
Spannungsfeld Komfort-Energie  
und  
Leistungstest an einer transparenten  
Wärmedämmung aus einer Isolierverglasung**

Richard Maiwald

**Die transparente Wärmedämmung im  
Spannungsfeld Komfort-Energie  
und  
Leistungstest an einer transparenten Wärmedämmung  
aus einer Isolierverglasung**

zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

von der Fakultät Architektur der  
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Richard Maiwald

aus

Mannheim, Göttingen, Karlsruhe, Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung: 28.02.2000  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Lehmann  
Korreferent: Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner  
Vorsitzender: Prof. Walter Nägeli  
Weiters Mitglied: Prof. Dr. sc. techn. Niklaus Kohler

Eppelheim April 2000

Gewidmet meinen lieben Kindern Felix und Janis  
sowie meinen Eltern und Brüdern,  
die mich immer unterstützt haben

### Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Karlsruhe, Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau. An dieser Stelle möchte ich insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Lehmann, dem ehemaligen Lehrbereichsleiter und meinem Doktorvater, sowie Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner, dem jetzigen Leiter und Korreferenten, für ihre organisatorische und fachliche Unterstützung danken.

Mein Dank gilt auch der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Ein großer Teil der Forschungsarbeiten wurde im Rahmen zweier Forschungsvorhaben der DFG im Schwerpunktprogramm „Bauphysik der Außenwände“ durchgeführt.

In vielen sachlichen Diskussionen in freundschaftlicher Atmosphäre haben mir auch meine Arbeitskollegen am Institut zur Seite gestanden. Insbesondere Doris Buck, Harry Schindler, Tai Chen sowie Martin Albert danke ich für ihre tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung der Meßarbeiten und deren Auswertung. Gabi Hartlieb, unserer Sekretärin, danke ich für die formale Abwicklung der Forschungsprojekte sowie immer freundlicher Worte.

# Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
<b>1 Untersuchungen zur herkömmlichen transparenten Wärmedämmung</b>	<b>3</b>
1.1 Zur transparenten Wärmedämmung allgemein	3
1.2 Thermischer Komfort - Bewertungskriterien nach DIN EN ISO 7730 10	10
1.3 Untersuchungen zum thermischen Komfort in 5 TWD-Häusern	13
1.3.1 Meßaufbau in den Räumen und die Wetterstation	16
1.3.2. Randbedingungen bei den Messungen	17
1.3.3 Meßdatenaufbereitung	18
1.3.4 Meßergebnisse und deren Interpretation	18
1.4 Zusammenfassung 'thermischer Komfort in TWD-Gebäuden	34
1.5 Einfluß verschiedener Parameter auf den Komfort und Energiebedarf für den Raum in Kellern (Simulationsergebnisse)	35
1.6 Parameterstudien zur optimalen Planung von TWD-Wänden	41
1.6.1 Zur Dimensionierung einer TWD-Fläche	41
1.6.2 Zur Regelung des Wärmeeintrags der TWD-Wand - Einfluß auf den Heizwärmebedarf und den Komfort im Winter	45
1.6.3 Zur Regelung des Wärmeeintrags der TWD-Wand - thermisches Gebäudeverhalten im Sommer	49
1.6.4 Zur Regelung der Zusatzheizung	51
1.6.5 Zur Dimensionierung der Zusatzheizung	52
1.6.6 Die Nutzbarkeit der TWD-Gewinne	53
1.7 Zum Einfluß der Luft- und Strahlungstemperatur auf den Komfort	57
1.8 Energetischer Vergleich zwischen opaker Wand, Fenster und TWD	58
1.9 Kosteneffektivität der TWD im Vergleich zu anderen Maßnahmen	62
1.10 Zusammenfassung der Planungshinweise für TWD-Wände	66
<b>2 Untersuchungen zu einer neuen transparenten Wärmedämmung aus einer Verglasung</b>	<b>68</b>
2.1 Beschreibung	68
2.2 Messungen an einer Testzelle	70
2.3 Ergebnisse der Messungen an der Testzelle	73
2.4 Ausführung der Verglasungs-NTWD	78
2.4.1 Absorber	79
2.4.2 Material im Glasspalt	80
2.4.3 Rahmen	80
2.4.4 Randverbund	81
2.4.5 Kontakt zur Speicherwand	82
2.4.6 Verschattungseinrichtung	83
2.5 Tauwasserfreiheit	84
2.6 Kosten der Verglasung-TWD	84
2.7 Bestimmung des Wärmeleitwertes der Verglasungs-TWD	85
2.8 Physikalisch-mathematisches Modell der Verglasungs-TWD	86
2.9 FE-Berechnungen zum k-Wert der Verglasungs-TWD	90
2.10 Valuierung eines FORTRAN-Programms zur Simulation der Testzelle mit Verglasungs-TWD anhand der Meßdaten	93
2.11 Ergebnisse der Testzellensimulation	94



<b>3 Zusammenfassung</b>	<b>100</b>
<b>4 Literaturverzeichnis</b>	<b>103</b>
<b>5 Anhang</b>	<b>107</b>
5.1 Tabellen im Anhang	107
5.2 Bilder im Anhang	114
5.3 Abkürzungen	123
5.4 Formelgrößen	124
5.5 Indices	125
5.6 Beschreibung des TWD-Modells nach Kummer	126

## Einleitung

Die Wärmebereitstellung für Gebäudebeheizung und Warmwasserbereitung nimmt mit 30% am Endenergiebedarf der Bundesrepublik Deutschland einen großen Anteil ein [POSSBERG]. Auf Grund des in den letzten 30 Jahren gewachsenen Umweltbewußtseins verpflichteten sich auf der internationalen Klimakonferenz in Rio im Jahre 1993 die Industrienationen freiwillig, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahre 2010 um 25% zu senken.

Mit den Verschärfungen der Bestimmungen zum Wärmeschutz von Gebäuden (Wärmeschutzverordnung WSVO 1995 [WSVO95]) und der Heizanlagenverordnung im Jahr 1994 [HEIZANLV94] sowie der geplanten neuen Energiesparverordnung um 2000 sollte und soll diesem Rechnung getragen werden.

Auf dem Gebäudesektor konnte man in den letzten Jahren auch freiwillig deutliche Anstrengungen in die Richtung noch sparsamerer Gebäude sehen, angefangen bei den Niedrigenergiehäusern (NEH) mit einem Heizenergiebedarf von 30% unter der WSVO '95 zu Passivhäusern mit einem Heizenergiebedarf unter 15 kWh/m<sup>2</sup>a bis hin zu Nullheizenergiehäusern.

Bei den Strategien zur Heizenergieeinsparung lassen sich verlustmindernde und gewinnmaximierende unterscheiden, wobei der transparenten Wärmedämmung Funktionen zugeordnet werden können. Diese kann auch einen Beitrag zur Energieeinsparung leisten, wie schon mehrfach in Demonstrations- und privaten Bauvorhaben bewiesen.

Die Erfahrungen hieraus bezüglich der Energieeinsparung [BINE] sollen hier überprüft und die Auswirkungen auf den thermischen Komfort erstmals näher quantifiziert werden. Letztere gehen bisher lediglich auf subjektive Bewohnereinschätzungen zurück.

Nach einer Vorstellung der gängigen wie auch neuerer TWD-Systeme soll der erste Teil dieser Arbeit die Auswirkungen der TWD auf den Komfort und die Heizenergieeinsparung und deren Wechselwirkung darstellen.

Hierzu werden die Meßergebnisse eines Forschungsprojektes dargestellt und interpretiert, zusätzlich wurden mit dem Simulationsprogramm TRNSYS umfangreiche Parameterstudien durchgeführt und daraus Hinweise zur optimalen Planung von TWD-Außenwänden aufgestellt.

Die Kosteneffektivität der Maßnahme 'TWD anbringen' wurde in einem Vergleich unter mehreren Baumaßnahmen untersucht (ausgehend von einem Niedrigenergiestandard).

Es wurde eine neuartige Form der transparenten Wärmedämmung entwickelt, welche aus einer Verglasung mit integriertem Absorber besteht und ohne das herkömmliche transparente Dämmmaterial auskommt. Sie wird voraussichtlich kostengünstiger als die herkömmliche herstellbar sein.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde die Leistungsfähigkeit dieser transparenten Wärmedämmung im Betrieb an einer Testzelle untersucht und ein physikalisches Modell entwickelt, das in das Programmpaket TRNSYS implementiert wurde. Ein Vergleich mit der herkömmlichen TWD schließt sich an.

# 1 Untersuchungen zur herkömmlichen transparenten Wärmedämmung

## 1.1 Zur transparenten Wärmedämmung allgemein

Während opake Wärmedämmmaterialien lediglich den Wärmeverlust einer Außenwand reduzieren können, kann die transparente Wärmedämmung (TWD) den Wärmestrom umkehren und solare Wärmegewinne in ein Gebäude einbringen. Dabei gelangt die Sonnenstrahlung durch das TWD-Material hindurch auf den Absorber, wird in Wärme umgewandelt und durch die Außenwand zeitverzögert nach innen geleitet, wo sie der Raumheizung dient. Da im TWD-Material der Strahlungsaustausch reduziert und die Konvektion möglichst vermieden wird, wirkt die TWD auch als Wärmedämmung.

Neben der Anwendung als passive TWD-Massivwandsysteme (s. Bild 1) wird die TWD auch als direktgewinnendes Tageslichtelement mit lichtstreuender Wirkung (s. Bild 2) und als zusätzliche Dämmung in Solarkollektoren zum Erreichen hoher Wirkungsgrade bei hohen Temperaturen (s. Bild 3) eingesetzt. Bei einem hybriden System wird die Wärme, welche in TWD-Luftkollektoren erzeugt wird, in Hohldecken/-wände eingespeichert (s. Bild 4). Im Rahmen dieser Arbeit soll nur der Fall der passiven TWD-Massivwandsysteme betrachtet werden.

Die hierfür geeignetsten Materialien und Strukturen sind Kunststoff- oder Glas-Röhrchen (Kapillaren) oder -Waben, die senkrecht auf dem Absorber angeordnet sind und die Sonnenstrahlung auf diesen lenken. Bei einem günstigen Verhältnis von Zelllänge zu Zellweite wird die Konvektion in der Struktur ganz unterdrückt. Die charakteristischen Eigenschaften einer TWD werden durch den g-Wert (Gesamtenergiedurchlaßgrad) für die diffuse Einstrahlung sowie den k-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) beschrieben. Ersterer entspricht etwa dem mittleren g-Wert der TWD über alle Einstrahlungswinkel, letzter ist temperaturabhängig und wird z.B. für 10°C angegeben. Tabelle 1 zeigt diese Werte für verschiedene TWD-Materialien/ Systeme und im Vergleich dazu diejenigen guter Verglasungen. Diese Tabelle aus [BINE] wurde aktualisiert und um das Verhältnis  $g_{\text{diff}}/k_{10}$  sowie die in Kap. II.1 beschriebene Verglasungs-TWD und eine spezielle Dreifachwärmeschutzverglasung erweitert. Das Verhältnis  $g_{\text{diff}}/k_{10}$  gilt als Gütekriterium für passive Solarsysteme, da es als Faktor im Verhältnis der Wärmegewinne zu den Wärmeverlusten vorkommt (I Einstrahlung,  $\Delta t$  Temperaturdifferenz innen/außen,  $k_{\text{ges}}$ :Gesamtwärmedurchgangskoeffizient mit Wand):

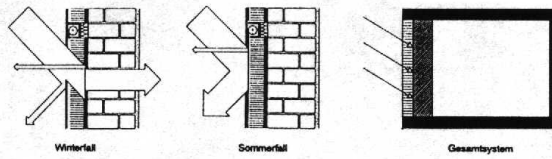


Bild 1: TWD-Massivwandsystem [BBB]

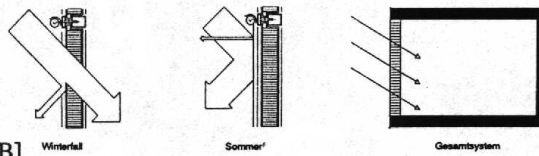


Bild 2: TWD-Tageslichtsystem [BBB]

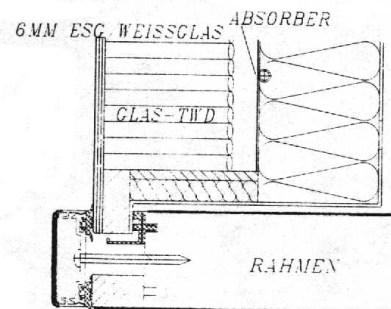


Bild 3 Sonnenkollektor mit Glas-TWD [ZAE1]

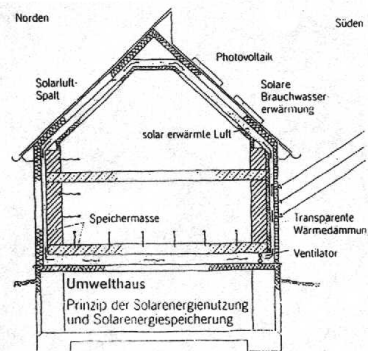


Bild 4: Hybridsystem mit TWD-Luftkollektoren und Wärmecinspeicherung in Gebäudemassen [BBB]

	Dicke [mm]	$k_{10}$ [W/m <sup>2</sup> K]	$g_{diff}$ [%]	$g_{diff}/k_{10}$ [m <sup>2</sup> K/W]
<b>Materialien</b>				
PMMA-Kapillaren	80	1,1	78	0,71
PC-Waben	100	0,9	82	0,91
<b>TWD-System</b>				
OKALUX Kapilux H	49	0,8	63	0,79
L.E:S.	62	1,1	50	0,45
Schott Helioran	90	1,1	67	0,61
Schweizer SolFas	131	0,8	59	0,74
STO Therm Solar	104	0,8	45-50	0,56-0,63
HLB	92	0,9	60	0,67
Verglasungs-TWD	15	1,15	84	0,73
<b>zum Vergleich</b>				
<i>Fenster-Wärmeschutzverglasungen (k-Wert in Scheibenmitte)</i>				
2-fach, Argon im SZR*	20	1,2**	49**	0,41
3-fach, Krypton im SZR*	32	0,7	51**/**	0,73
3-fach, Xenon im SZR*	32	0,4	35	0,88
3-fach, Xenon im SZR	32	0,4	51***	1,28

\*Scheibenzwischenraum

\*\* neuere Werte als in [BINE] von Herstellern,  $g_{diff}=85\%$  von  $g_0$

\*\*\*mit Spezial-low- $\epsilon$ -Beschichtung

Tabelle 1:  $g_{diff}$ - und  $k_{10}$ - Werte verschiedener TWD-Materialien/-Systeme und von Fenstern aus [BINE], aktualisiert mit [VEGLA]

Bild 5: Hermetisch abgeschlossenes  
TWD-Element [OKALUX]

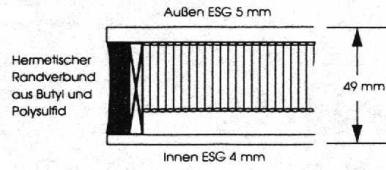


Bild 6: Verglasung-TWD

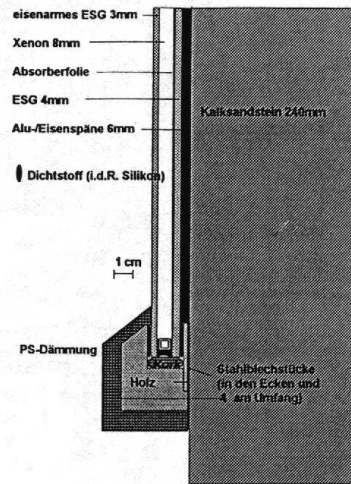


Bild 7: hinterlüftetes  
TWD-Massiv-  
wandsystem [BBB]

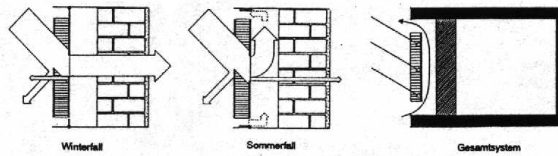
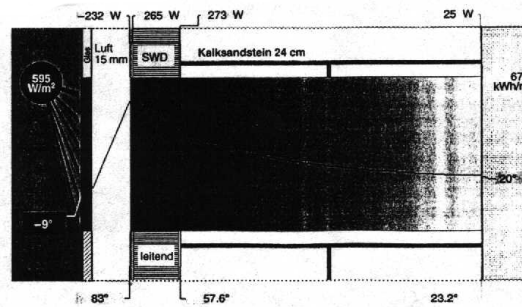


Bild 8: TWD-System  
mit Vakuum-  
paneel [ZAE1]



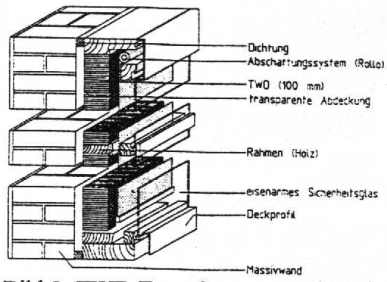


Bild 9: TWD-Fassadensystem mit Holz-/  
Alu-Rahmen und TWD-Elementen  
[BBB]

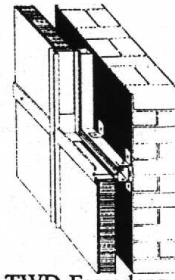


Bild 10: TWD-Fassadensystem mit  
TWD-Elementen in einer  
Pfosten-Riegel-Konstruktion  
[BBB]

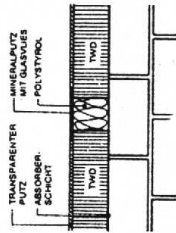


Bild 11: Transparentes Wärmedämm-  
verbundsystem (TWDVS)  
[BBB]

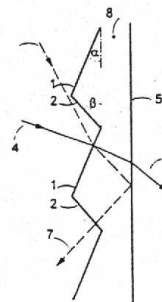


Bild 12: Prismenverglasung  
als Verschattungselement  
[ISFH]



Wärmegewinne sind:  $I \cdot g_{diff} \cdot \frac{k_{ges}}{k_{10}}$  mit  $g_{diff}$  als mittlerem g-Wert

Wärmeverluste sind:  $k_{ges} \cdot \Delta t$

Damit wird das Verhältnis Wärmegewinne zu Wärmeverluste:  $\frac{I}{\Delta t} \cdot \frac{g_{diff}}{k_{10}}$ ,

in welchem der erste Faktor die Klimakenngrößen beinhaltet, der zweite die TWD-Kenngrößen.

Nach Tabelle 1 sind hochwertige TWD-Systeme hochwertigen Dreifach-Wärmeschutzverglasungen vergleichbar. Die Dreifach-Wärmeschutzverglasung mit Xenon und spezieller Beschichtung ist durchaus technisch herstellbar und könnte sehr gute Kennwerte liefern. Die k-Werte der Wärmeschutzverglasungen beziehen sich auf die Scheibenmitte.

Die herkömmlichen TWD-Systeme bestehen aus dem TWD-Material zwischen 2 Glasscheiben, einer Rahmenkonstruktion und einer innenliegenden oder einer außenliegenden Verschattungseinrichtung. Den Absorber bildet i.d.R. der schwarze Anstrich der Außenwand. Das TWD-Element Kapilux H [OKALUX] ist eine hermetisch abgeschlossene und 49 mm dicke Einheit mit dem Aufbau Glasscheibe-Kapillarmaterial-Spalt-Glasscheibe, gefüllt mit Krypton (s. Bild 5). Sie ist sozusagen eine Vorstufe zu der in Kap. II.1 beschriebenen Verglasungs-TWD, die dank niedrig-emissiver Absorberfolie und dem Edelgas Xenon ganz ohne das TWD-Material auskommt und einen noch dünneren Aufbau besitzt (s. Bild 6).

Ein anderes System mit integriertem Absorber stellt ein konvektiv hinterlüftetes System dar, bei welchem die Wärme, wenn sie nicht benötigt wird, aus dem Spalt abgelüftet wird [CAPATECT] (s. Bild 7).

Ein weiteres neueres System im Entwicklungsstadium verzichtet ebenfalls auf die Verschattungseinrichtung, indem der Spalt zwischen Absorber und Mauerwerk mittels eines Vakuumpanels und der Wasserstofftechnologie auf wärmeleitend oder wärmedämmend geschaltet wird ([ZAE1], s. Bild 8).

Die transparente Wärmedämmung aus Papierwaben [PAPIERWABEN] ist eigentlich keine TWD, da die Sonnenstrahlung nur zu einem sehr geringen Teil auf die Hauswand fällt. Es wird größtenteils lediglich die Dämmung erwärmt und damit der Wärmeverlust reduziert.

Fassadensysteme bestehen aus vorgehängten Modulen in Holz-/Alurahmen (s. Bild 9) oder aus TWD-Elementen in einer Pfosten-Riegel-Konstruktion (s. Bild 10) oder werden als transparente Wärmedämmverbundsysteme (TWDVS)(s. Bild 11) mit einem schwarzen

Absorber-Klebeputz auf die Wand geklebt, mit einem transparenten Außenputz abgedeckt und in opake WDVS eingebettet [STO].

Bisher angewandte Verschattungseinrichtungen bestehen aus integrierten Rollos oder Plissee-Stores, innen- oder außenliegenden Lamellenjalousien oder Schiebeläden sowie auch aus starren Überhängen oder festen integrierten Lamellen. Neuere Systeme besitzen auch thermotrope oder elektrochrome Schichten. Erstere schalten als Polymerblends oder -gels je nach ihrer Temperatur durch Ver- bzw. Entmischen zweier Komponenten von transparent auf diffus streuend [SOLAROPT98], letztere können den Zustand per angelegter Kleinspannung wechseln [SOLAROPT94].

Eine weitere Möglichkeit stellen die Prismenverglasungen dar, welche auf Grund ihrer Form die direkte Sonnenstrahlung bei hohem Sonnenstand total reflektieren. Diese wurden bisher nur kleinflächig im Format 20cm · 30cm ([ISFH], s. Bild 12) und als Mikrostruktur auf einem 1cm<sup>2</sup>-Muster [ZAE2] hergestellt, beide in PMMA-Glas. Die völlig wartungsfreien Prismenverglasungen können allerdings nur bei reiner Südorientierung (+/-30°) eingesetzt werden.

Eine weitere Neuentwicklung besteht aus einer Verglasungseinheit, in welche im Verschattungsfall ein im gesamten Spektrum absorbierendes Fluid eingepumpt wird, und soll speziell für den Geschoßbau mit TWD geeignet sein [LUDWIG].

Andere Aktivitäten zielen auch auf den Energiespeicher Außenwand: anstelle der Kalksandstein- oder Betonwand wird an der ETH Zürich ein Latentspeicher in Form von Kalzium-Chlorid-Hexahydrat in Glasbausteinen entwickelt [EMPA], der bei insges. 10cm Dicke eine 7 mal höhere Wärmespeicherkapazität besitzt als Beton derselben Dicke bei einer Erwärmung um 10 K. Tabelle 2 zeigt die Investitionskosten für verschiedene herkömmliche TWD-Systeme.

Konstruktion	Fassadenkosten in DM/m <sup>2</sup>
Holzelemente mit Unterkonstruktion	900÷1200
Aluminium-Fassadensysteme (Pfofen-Riegel)	1000÷1500
TWD-Verbundsystem (ohne Verschattung!)	450÷650
Bauglas-Elemente	200÷500
<i>Zum Vergleich:</i>	
Opakes Wärmedämmverbundsystem	140÷220
opake Glasfassade als Kaltfassade	700÷900

Tabelle 2: Gesamtinvestitionskosten verschiedener TWD-Fassadensysteme [BBB]

## 1.2 Thermischer Komfort - Bewertungskriterien nach DIN EN ISO 7730

M.E. ist die treffendste Definition der thermischen Behaglichkeit die von Rubner [RUBNER]:

"Thermische Behaglichkeit ist als Ausdruck einer geregelten körperlichen Wärmewirtschaft aufzufassen, die sowohl ohne Schweißsekretion als auch ohne Steigerung von Stoffwechsel und Wärmeproduktion auskommt."

Es gibt zahlreiche weitere Definitionen von Fanger, Kirsch, Grandjean, Frank u.a., die sich in der Sichtweise des Autors unterscheiden. Die Wärmeproduktion ist geprägt durch den Stoffwechsel, d.h. langsamen Verbrennungsvorgängen im Körper, insbesondere in der Muskulatur. Bei den Wärmeabgabevorgängen kann man unterscheiden:

- Wärmeabgabe trocken durch Strahlung, Konvektion, Leitung und sensible Atemwärme
- Wärmeabgabe latent durch Atmung und Schweißverdunstung

Hierbei ist eine Verschiebung der Wärmeabgabemechanismen ohne Einbuße an thermischen Komfort möglich, die Wirkung von Klimaänderungen kann in gewissen Grenzen kompensiert werden (z.B. erhöhte konvektive Wärmeabgabe durch erhöhte Strahlungswärmeaufnahme).

Daher werden in der Literatur Behaglichkeitsbereiche genannt. Neben den Faktoren, die die Wärmebilanz des gesamten Körpers beeinflussen, können örtliche Störungen, wenn sie nicht mehr kompensiert werden können, zu Unbehagen führen.

Bei den Einflußfaktoren auf den Wärmehaushalt kann zwischen physikalischen (Raumklima-) Parametern, intermediären und physiologischen Einflüssen unterschieden werden. Die physikalischen Größen Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Luftfeuchtigkeit und die Strahlungstemperatur (ergibt sich aus den Umschließungsflächentemperaturen) sowie die intermediären Faktoren Bekleidungs- und Aktivitätsgrad gelten als primäre Faktoren. Die weiteren sind in ihrer Wirkung nicht fundiert zu beurteilen oder vernachlässigbar.

Nach Fanger können z.B. Unterschiede im Alter auf die unterschiedliche Aktivität, Unterschiede im Geschlecht auf unterschiedliche Kleidungsgewohnheiten zurückgeführt werden. In der Literatur herrscht hier noch Uneinigkeit.

Neuere Untersuchungen deuten auf eine größere Adaptionfähigkeit des Körpers insbes. im Sommer hin, so daß es für sein Behaglichkeitsempfinden im Raum nicht gleich ist, ob es außen  $-10^{\circ}$  oder  $+30^{\circ}$  warm ist [NICOL]. Diese Unterscheidung wird z.B in der DIN1946, Teil 2 [DIN1946] gemacht.

Für die hier durchgeführten Messungen im Winter dürfte diese Anpassungsfähigkeit jedoch keine große Rolle spielen.

In der DIN EN ISO 7730 [ISO7730] werden Behaglichkeitskriterien aufgeführt, die auf den Untersuchungen von Fanger beruhen. Dieser hat die Haupteinflußfaktoren auf den Komfort untersucht, in zahlreichen Versuchsreihen das Warm-Kalt-Empfinden von Probanden analysiert und Behaglichkeitsgleichungen zur Voraussage eines mittleren Votums (Predicted Mean Vote PMV) aufgestellt. Daraus abgeleitet wird der Prozentsatz der Unzufriedenen (Predicted Percentage of Dissatisfied PPD). In seiner Bewertungsskala für den PMV-Wert von -3 (sehr kalt) über 0 (thermisch neutral, optimal behaglich) bis +3 (sehr warm) wird der Bereich von -0,5 bis +0,5 nach [ISO7730] als akzeptabel angesehen, wobei PPD=10%. In die sog. Komfort-gleichungen gehen die sechs zuvor genannten primären Parameter ein. Sie beschreiben den Wärmehaushalt des Menschen im thermisch neutralen Zustand empirisch.

Mit ihnen ist eine eindeutige Beurteilung des thermischen Empfindens möglich, sie sind auch in Diagrammform dargestellt worden. Zusätzliche Untersuchungen Fangers und Olesens befassen sich mit dem Einfluß örtlicher Ungleichgewichtszustände am Körper durch Strahlungsasymmetrie, örtliche konvektive Kühlung (Zug), Kontakt mit warmen/kalten Oberflächen und vertikalen Lufttemperatur- und Luftgeschwindigkeitsgradienten.

Die Behaglichkeitsgleichungen nach Fanger wurden in Tabellen umgesetzt und in [ISO7730] aufgeführt, einige der Kriterien für örtlichen Diskomfort hinzugenommen: Tabellarisch wird der PMV-Wert abhängig von der Bekleidung, vom Aktivitätsgrad und der operativen Temperatur angegeben. Als Parameter fließt noch die mittlere Luftgeschwindigkeit ein. Der im Lufttemperaturbereich von 19 bis 26°C ohnehin geringe Einfluß der Luftfeuchtigkeit wird nicht berücksichtigt, es wird mit einem Wert von konstant 50 % gerechnet. Bei niedrigen Luftgeschwindigkeiten <0,2 m/s wird die operative Temperatur gleichgewichtet aus der Luft und der Strahlungstemperatur ermittelt. Hiernach ist es gleich, ob die operative Temperatur von z.B. 20°C mit 19°C Luft- und 21°C Strahlungstemperatur oder mit 17°C und 23°C oder auch mit 21°C Luft- und 19°C Strahlungstemperatur gebildet wird, der Fehler ist aber gegenüber Fangers Rechnung gering. Der Ansatz in [ISO7730] ist graphisch in Bild 13 für Luftgeschwindigkeiten <0,2m/s wiedergegeben.

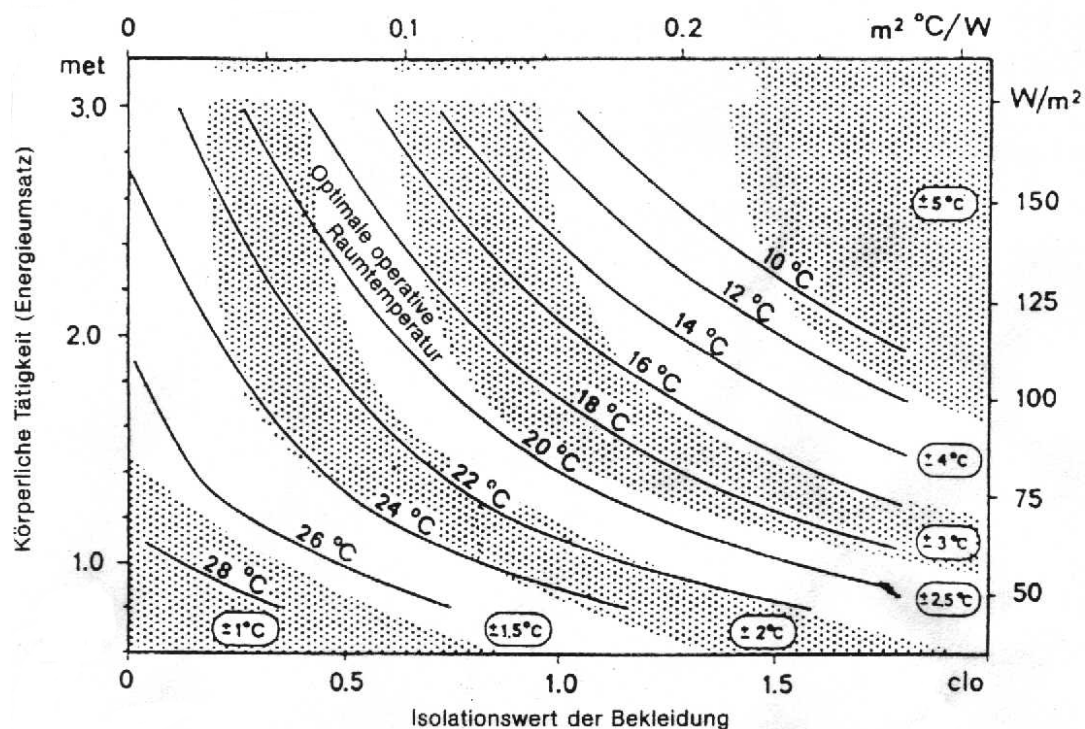


Bild 13: Optimale operative Temperatur und Behaglichkeitsbereich in Abhängigkeit des Bekleidungswiderstands und der Aktivität [ISO7730]

Die im folgenden angewandten Behaglichkeitskriterien sind:

1. Gesamtwärmehaushalt des Körpers, bewertet mit dem PMV-Index nach Fanger (DIN EN ISO 7730 [ISO7730]):  $-0,5 < \text{PMV}^* < +0,5$ . Ort: In Raummitte und vor der TWD. (i.d.R. wurden  $1,2 \text{ met} = 70 \text{ W/m}^2$  an menschlicher Wärmeproduktion sowie  $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2\text{K/W}$  an Bekleidungswiderstand angenommen. Dies entspricht einer leichten sitzenden Tätigkeit bei normaler Winterbekleidung mit Pullover. Bewertet wurde der PMV-Index nur in einer üblichen Nutzungszeit.
  
2. Strahlungsasymmetrie:    warme Wand:             $\Delta T_{\text{str}} < 19 \text{ K}$  [ISO 7730]  
                                 kalteWand:             $\Delta T_{\text{str}} < 8 \text{ K}$  [ISO 7730]
  
3.    Luftgeschwindigkeit: nach DIN 1946, T.2 [DIN1946T2] in Abh. von  $t_{\text{Raumluft}}$
4.    Luftfeuchtigkeit :    nach DIN 1946, T.2:  $30 < \phi < 65\%$ ,  $x < 11,5 \text{ g/kg}$   
(nur bewertet bei Nutzung des Raums)
5.    Fußbodentemperatur [ISO 7730]:  $19^\circ\text{C} < t_{\text{Fb}} < 26^\circ\text{C}$   
(nicht bewertet werden Temperaturerhöhungen über  $26^\circ\text{C}$  bei Sonneneinstrahlung)
6.    Lufttemperaturprofil: Differenz zwischen den Temperaturen in 0,1 und 1,1m Höhe  
(hier zwischen 0,1 und 1,2m)  $< 2\text{K}$  ([DIN1946T2])
- \*    Predicted Mean Vote (vorhergesagtes mittleres Urteil)=  
      Urteil einer Testgruppe in gleichem thermischem Umfeld.

Aus dem PMV-Maßstab folgt, daß bei normaler winterlicher Bekleidung (1 clo), sitzend bei leichter Aktivität (1,2 met) und bei geringen Luftbewegungen ( $< 0,2 \text{ m/s}$ ) minimal etwa  $19,3^\circ\text{C}$  und maximal  $23,7^\circ\text{C}$  als operative Temperatur akzeptiert werden, wenn 10% Unzufriedene zugelassen werden. Im Sommer kann von einem Bekleidungswiderstand von 0,5 clo ausgegangen werden (Shorts, T-Shirt), es ergibt sich eine obere Grenze von  $24,6^\circ\text{C}$ , wenn die Luftgeschwindigkeit unter  $0,2 \text{ m/s}$  liegt. Bei höheren Luftgeschwindigkeiten sind höhere operative Temperaturen tolerierbar.

### 1.3 Untersuchungen zum thermischen Komfort in 5 TWD-Häusern

Im Rahmen eines Forschungsprojektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) wurden Messungen in 5 TWD-Gebäuden unternommen. In jeweils einem Raum konnte die umfangreiche Meßeinrichtung aufgebaut werden. Das Ziel der Untersuchungen waren qualitative und auch quantitative Aussagen zum thermischen Komfort in den TWD-Räumen, welcher nach den Kriterien von Fanger und [DIN1946T2] beurteilt werden sollte, da es hierüber bisher keine detaillierten Untersuchungen gibt.

Zum Vergleich wurden für das Meßobjekt Keltern Simulationsrechnungen mit TWD und mit opaker Dämmung durchgeführt.

Die Meßobjekte waren (s. Bilder A1 bis A5 im Anhang; Meßräume mit Kreuz gekennzeichnet):

- Wohnhaus Bollin in Freiburg/Tiengen -> Arbeitszimmer im EG
- Wohn-und Bürohaus Abrecht in Keltern bei Pforzheim -> Kinderzimmer im DG
- Energieautarkes Solarhaus in Freiburg (ES, Wohnhaus) -> Vortragsraum im EG
- Reihenmittenhaus in Donaueschingen ('Auf der Staig') -> Kinderzimmer im DG
- Gästehaus der Jugendbildungsstätte des Kloster Windberg -> 4-Bettzimmer im EG

Die Messungen im Energieautarken Solarhaus wurden mit freundlicher Unterstützung des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (FhG-ISE) durchgeführt.

Während die Gebäude in Freiburg (ES) und Keltern (Haus Abrecht) als Passivhäuser mit minimalem Heizenergiebedarf bezeichnet werden können, sind die anderen Gebäuden zu den Niedrigenergiehäusern (ohne Lüftungswärmerückgewinnung) zu zählen.

Da sich die Randbedingungen bei den angetroffenen Meßsituationen bzgl. Gebäude, Nutzer, Witterung und Heizanlage u.U. voneinander erheblich unterschieden, kann natürlich kein direkter Vergleich der Meßsituationen erfolgen. Auch kann auf Grund der geringen Anzahl der Objekte keine Statistik erarbeitet werden.

Vielmehr wird jede Situation für sich bewertet und daraus mögliche Tendenzen zu richtiger oder falscher Bauplanung (weniger zur Baudurchführung) gewonnen werden. Insbesondere

die Dimensionierung der TWD und das Zusammenspiel mit der Anlagentechnik war hier von Interesse.

Wenn möglich wurde in einer sehr kalten strahlungsreichen Periode gemessen. Im nachhinein war es aber gut, auch trübe Wintertage einzubeziehen, da gerade an diesen Fehlplanungen deutlich wurden.

Tabelle A1 im Anhang zeigt eine Übersicht über die Meßperioden und die begleitenden Simulationsrechnungen zum Haus Abrecht, Tabelle A2 die Kenndaten der Meßräume und deren TWD-Wände, Tabelle A3 die Randbedingungen in den Meßsituationen.

Da hier nicht alle Details aufgezeigt werden können, soll auf den Abschlußbericht [THERMARK] verwiesen werden.

Beispielhaft werden ein Meßaufbau und die wichtigsten Ergebnisse erläutert.

Nach anderen Untersuchungen ist der Nutzereinfluß in Niedrigenergiehäusern (NEH) bedeutend [HEIDENHEIM]. Um bzgl. der freien Lüftung definierte Zustände zu haben, wurde in ungenutzten Räumen gemessen. Eine Ausnahme stellen die Messungen in Donaueschingen dar. In den anderen Fällen läßt sich der Luftaustausch genau genug abschätzen (geringe Infiltration/ definierte mechanische Lüftung). In jedem Fall muß das regulierende Verhalten der Nutzer in die weiterführenden Überlegungen einbezogen werden

Die Konstruktionen der TWD-Wände sind in folgender Tabelle aufgeführt:

Freiburg-Tiengen: (s. Bild A6)	Innenputz, 24cm Ziegel, Absorberputz, Luftspalt, Folie, 100mm PC-Waben, Luftspalt/Rollo, Normalglas
Keltern:	Innenputz, 30cm KSV, Luftspalt, Folie, 120mm PMMA-Kapillaren, Luftspalt/Plissee-Store, Normalglas
Freiburg: (s. Bild A7)	Innenputz, 30cm KSV, Absorberputz, 120mm PMMA-Kapillaren, Luftspalt/Rollo, 6mm eisenarmes ESG
Donaueschingen: (s. Bild A8)	Innenputz, 24cm KSV, Absorberputz, Luftspalt, Normalglas, 80mm PMMA-Kapillaren, Luftspalt/Plissee-Store, Normalglas
Windberg:	30cm KSV, Absorberputz, Luftspalt, Normalglas, 48mm PMMA-Kapillaren, Normalglas (äußere Verschattung)

Tabelle 3: Konstruktionen der TWD-Wände der Meßobjekte



Das thermische Verhalten opak gedämmter Außenwände und der angrenzenden Räume ist durch Rechnungen und Messungen hinreichend genau bekannt. Um einen direkten Vergleich zwischen TWD und opaker Dämmung zu erhalten, werden für das Haus Abrecht entsprechende Varianten bei dem gemessenen Wetter gerechnet (s. Kap. I.5).

### 1.3.1 Meßaufbau in den Räumen und die Wetterstation

Der Meßaufbau war in fast allen Räumen ähnlich, bis auf den im Raum im Haus Bollin, wo die Thermoelementschtung und die Wetterstation noch nicht zur Verfügung standen.

- Die Oberflächenthermoelemente wurden an allen Umfassungsflächen, mehrere davon an der TWD-Wand angebracht. Insbes. diejenigen an den Fensterscheiben wurden mit Aluminiumfolie vor direkter Einstrahlung geschützt. Aus den Oberflächentemperaturen wurde später zum einen unter Annahme eines Wärmeübergangskoeffizienten die Wärmeabgabeleistung der TWD-Wand ermittelt, zum anderen unter Zuhilfenahme eines PC-Programms die räumliche Verteilung der Strahlungstemperatur berechnet. Die Fühler waren an den Innenwänden in halber Raumhöhe, an den TWD-Wänden in ca. 60 cm und 150 cm Höhe angebracht (Genauigkeit +/- 0,2 K).
- In Raummitte und 1m vor der TWD-Wand befanden sich je ein Stativ mit je 5 Lufttemperaturfühlern zur Bestimmung des Höhenprofils. Die Sensoren waren in 0,1m, 0,6m, 1,2m, 1,8m und 2,3m Höhe befestigt (Genauigkeit +/- 0,2 K).
- Der Raumklimaanalysator (RKA) wurde in 1m Abstand zur TWD-Wand aufgestellt. Er mißt die Raumklimakomponenten
  - Lufttemperatur (Pt100, Genauigkeit +/- 0,2 K),
  - Luftfeuchtigkeit (Taupunktspiegel, +/- 0,5 K Taupunkttemperatur),
  - Luftgeschwindigkeit (Hitzdrahtanemometer, +/- 0,06 m/s)
  - Strahlungstemperatur (Strahlungsfühler für 2 Halbräume mit je 1 in schwarz und 1 in Gold eingelegtem Thermoelement, +/- 0,5 K).

Der Strahlungssensor wurde mit einem Halbraumfühler auf die TWD-Wand ausgerichtet, der andere war entgegengesetzt in den Raum gerichtet. Alle Sensoren des RKA befanden sich in 1,15m Höhe.

- Mit Hilfe der kleinen batteriebetriebenen Wetterstation wurden folgende Größen gemessen:
  - Einstrahlung in TWD-Wand-Richtung bzw. am Haus Abrecht die horizontale Globalstrahlung (Pyranometer, +/- 5%)
  - Außenlufttemperatur (Thermoelement, +/- 0,2 K)
  - Außenluftfeuchtigkeit (kapazitiver Feuchtesensor, +/- 2% rF)

Die Spannungen der ca. 45 Thermoelemente wurde in einem Meßdatenerfassungsgerät gespeichert, die Meßwerte des RKA mit einem Notebook online aufgezeichnet. Die Wetterstation hat eine eigene Meßdatenerfassung mit Speicher.

Beispielhaft zeigt Bild A9 den Meßaufbau im Energieautarken Solarhaus, die Bild A10 und Bild A11 zeigen Fotos des Vortragsraums und der Wetterstation.

### 1.3.2 Randbedingungen bei den Messungen

Die Meßdaten wurden automatisch 10-minütlich abgerufen. Der Meßzeitraum war je nach den vorliegenden Bedingungen unterschiedlich lang, da die Gebäude und in einem Fall auch der Meßraum bewohnt waren.

Dank der Mitarbeit des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme konnte im ES über sechs Wochen lang gemessen und weitere Daten der ISE-Meßdatenerfassung verwendet werden.

Im Haus Abrecht war die Fensterjalousie ständig offen, um den Nutzereffekt einer geschlossenen Jalousie auszuschalten und für die Simulation definierte Bedingungen zu haben.

Da der Raum in Donaueschingen bewohnt war, konnten hier keine festen Einstellungen bzgl. Fenster- und TWD-Verschattung und Lüftung vorgegeben werden, die Randbedingungen waren also unklar und sind nur qualitativ zu beschreiben.

Die TWD-Verschattungseinrichtungen waren bis auf einen Tag im ES tagsüber geöffnet, nachts dienten die innenliegenden Systeme als zusätzlicher temporärer Wärmeschutz, da in der Meßperiode zumeist Heizwärmebedarf herrschte. In den TWD-Gebäuden in Freiburg-Tiengen und Windberg war die TWD-Verschattung defekt und hochgefahren bzw. als äußerer Sonnenschutz immer offen.

### 1.3.3 Meßdatenaufbereitung

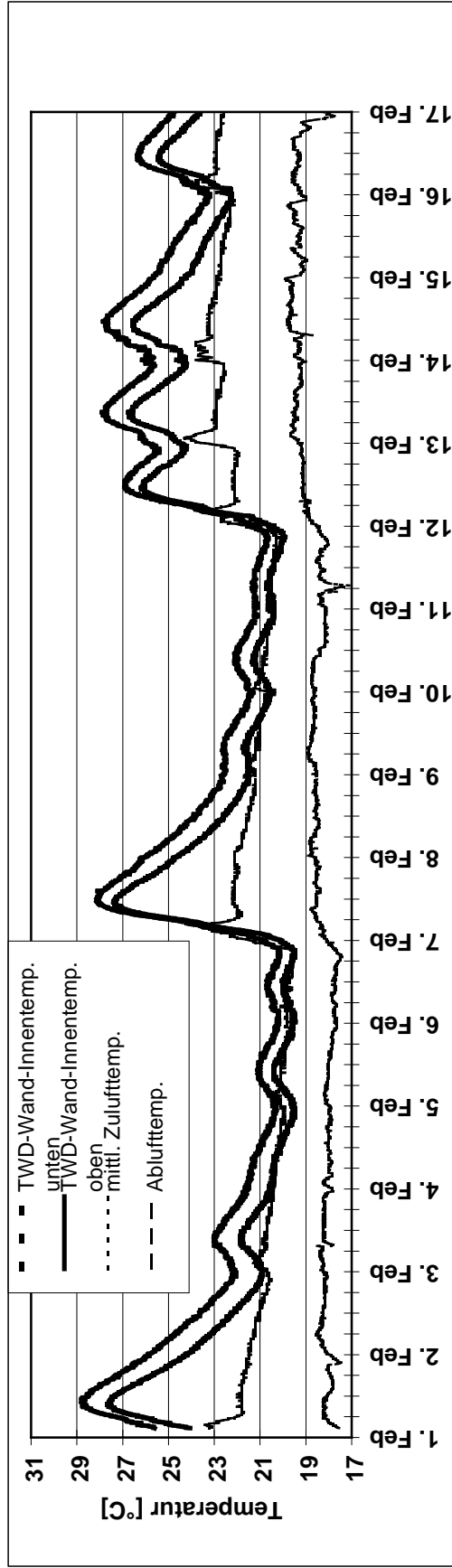
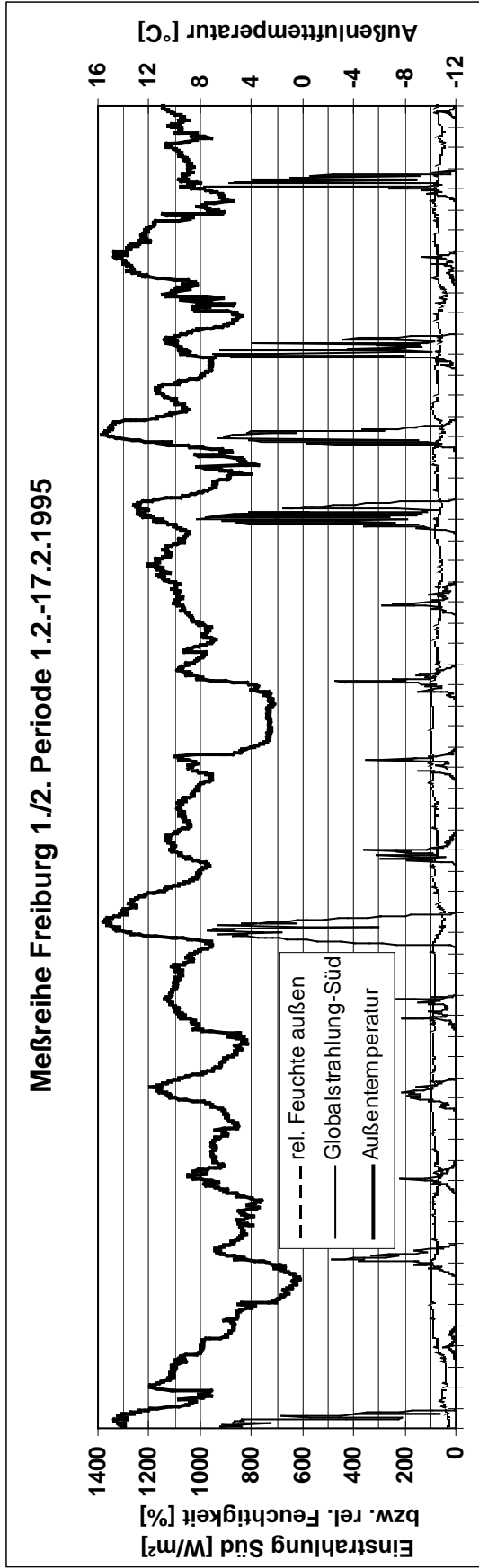
Ein am Institut entwickeltes Computerprogramm [BUCK1] berechnet aus den mittleren Oberflächentemperaturen für je 1 Wand die räumliche Verteilung der Strahlungs- bzw. operativen Temperatur sowie den zeitlichen Verlauf an einem beliebigen Punkt im Raum [BUCK2]. Die Bezugshöhe war hier stets die halbe Raumhöhe, welche etwa der Höhe des Körperschwerpunktes eines stehenden Menschen entspricht. Dazu werden die Wand-Einstrahlzahlen auf eine infinitesimal kleine Kugel bestimmt. Sowohl die Wände wie auch die Kugel werden als ideal schwarze Strahler betrachtet.

Für den zeitlichen Verlauf der Strahlungstemperatur vor der TWD konnte der Mittelwert der beiden gemessenen Halbraumstrahlungstemperaturen herangezogen werden, für diejenige in Raummitte wurde das obige Programm angewandt.

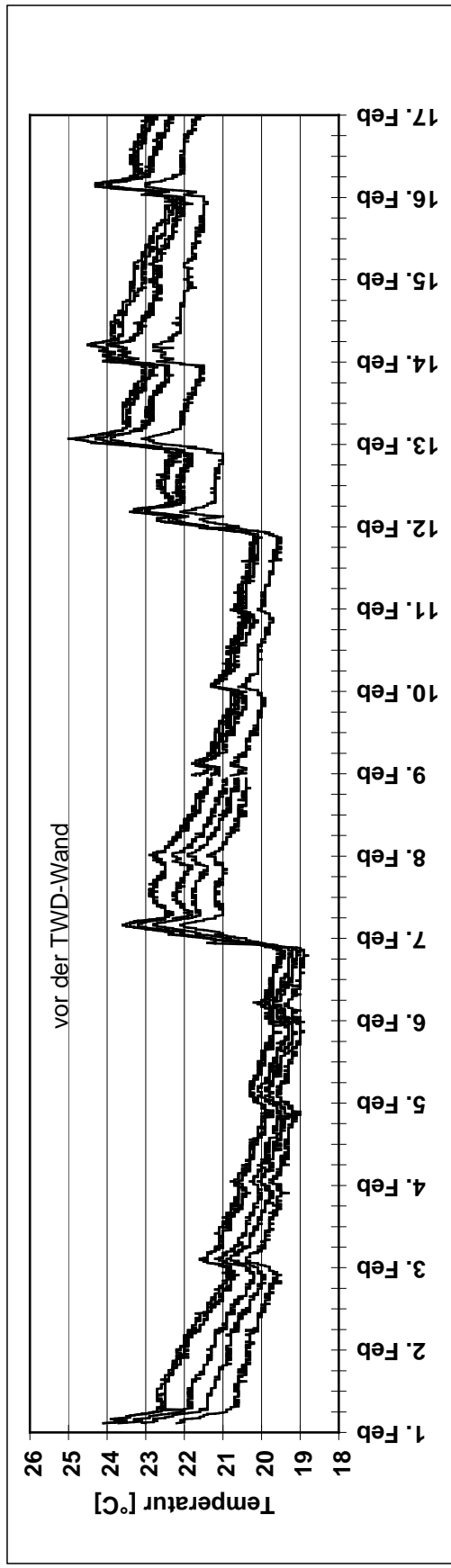
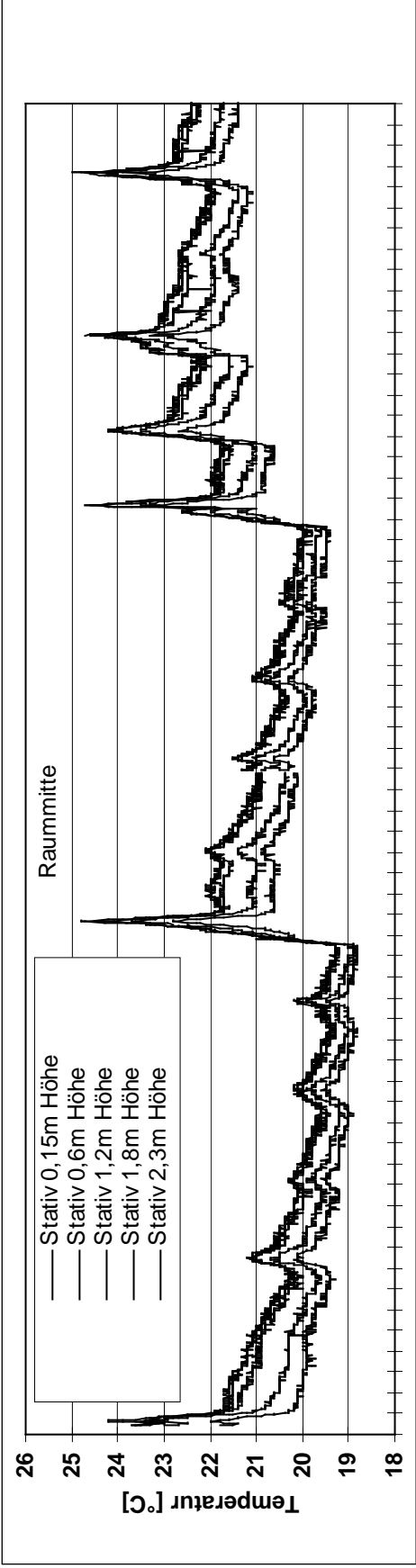
### 1.3.4 Meßergebnisse und deren Interpretation

Eine Übersicht über die Ergebnisse der Komfortmessungen zeigt Tabelle A4 im Anhang. Hier zunächst allgemeine Aussagen und Angaben zum Gesamtkomfort in den einzelnen Gebäuden: Die Bilder 14a÷f zeigen als Auswahl Meßergebnisse im ES mit großflächigen TWD-Wänden während einer milderen Februarperiode. Diese Ergebnisse zeigen am deutlichsten die Effekte der TWD.

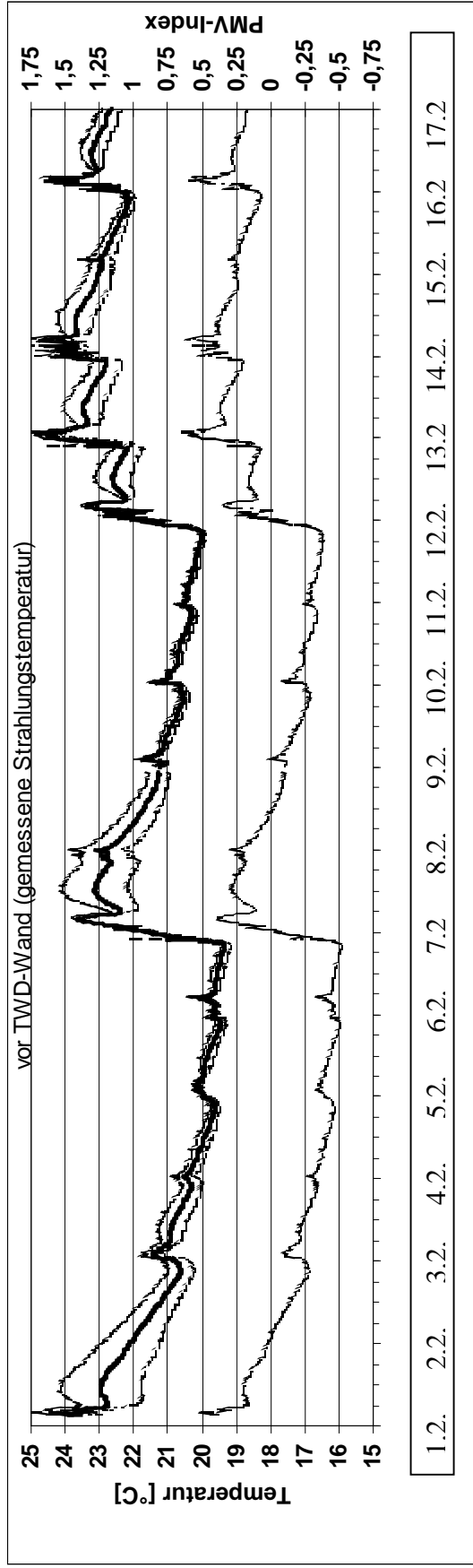
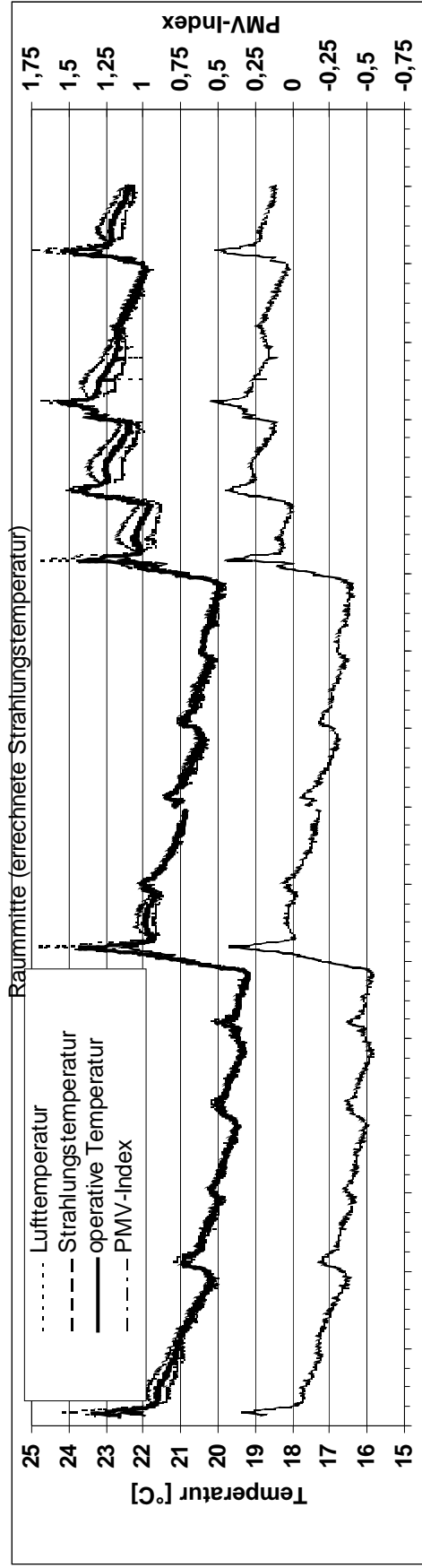
Es stellte sich heraus, daß der Komfort in südorientierten TWD-Räumen in **strahlungsreichen** Wetterperioden tagsüber von den Fenstergewinnen, abends und nachts von der TWD-Wand bestimmt wird. Während die direkten Gewinne z.T. unbehaglich hohe Temperaturspitzen verursachen, ist der Wärmeeintrag durch die TWD stark gedämpft und gegenüber dem Einstrahlungsmaximum um ca. 7,5 bis 9,5 Stunden in den Abend verschoben (bei 24 bzw. 30cm dicken Kalksandsteinwänden, s. Bilder 14b und 15b im ES). Vor der TWD-Wand herrschen dann angenehm hohe Strahlungstemperaturen. Günstig sind dementsprechend große zusammenhängende TWD-Wandflächen, die als opake Wandstücke die direkte Sonneneinstrahlung auf den Körper verhindern und abends und nachts wie eine großflächige Strahlungsheizung wirken (s. Bild 16 im ES).



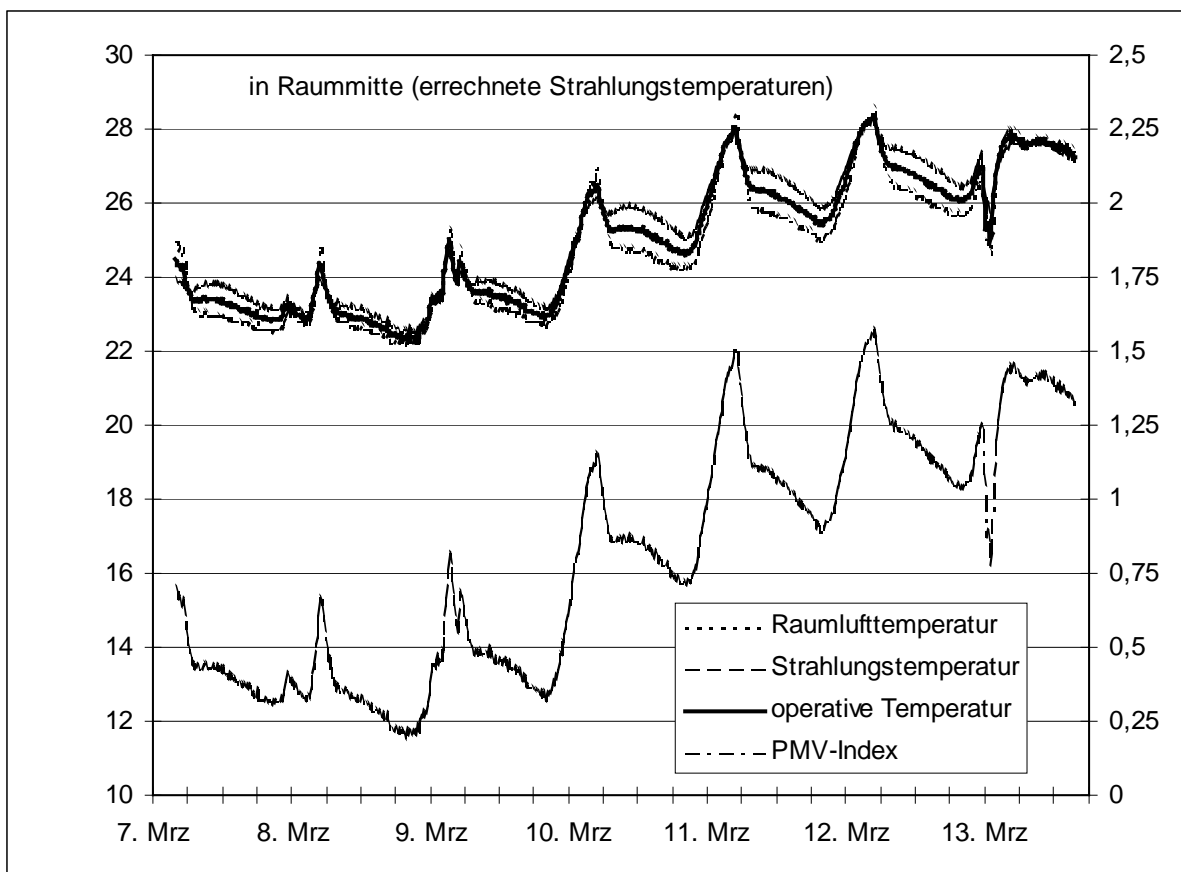
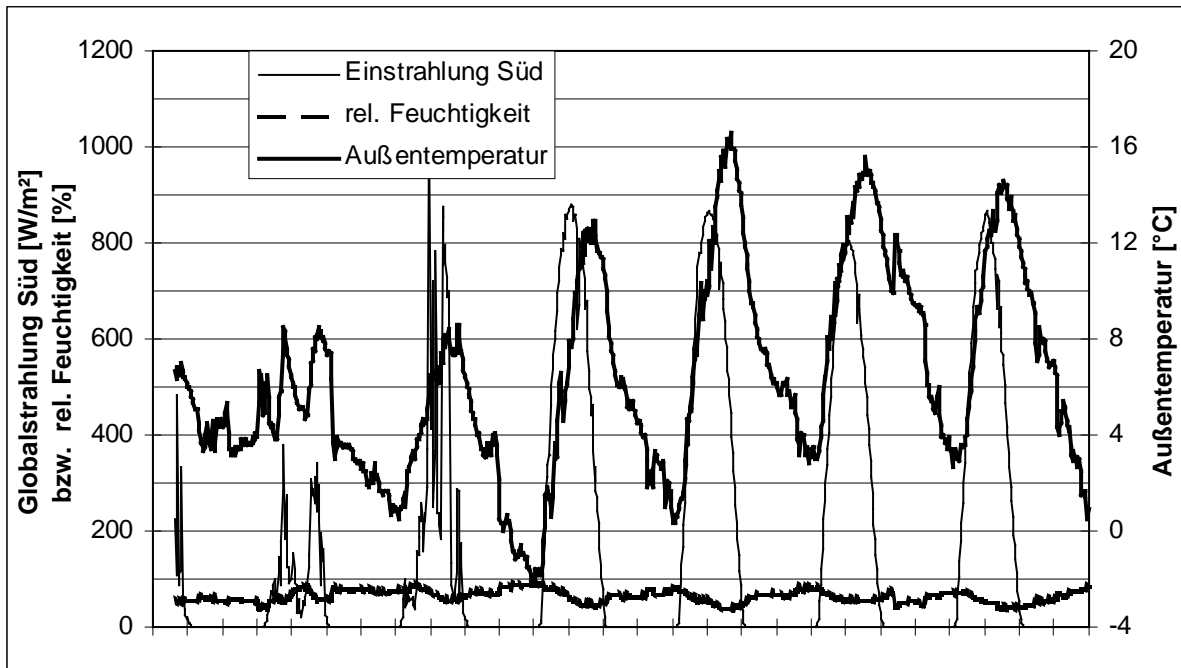
Bilder 14a,b: Meßperiode im ES 1.2.95-17.2.95: Wetterdaten (oben,a), TWD-Wandinnentemperaturen, Zu- und Ablufttemperaturen (unten,b)



Bilder 14c,d: Meßperiode im ES 1.2.95-17.2.95: Lufttemperaturen in Raummitte (oben,c) und vor der TWD-Wand (unten,d)  
 (je höher der Meßort, desto höher die Temperaturen)



Bilder 14e,f : Meßperiode im ES 1.2.95-17.2.95: Luft-, Strahlungs- und operative Temperatur sowie PMV-Index in Raummitte (oben,e) und vor der TWD-Wand (unten,f)



Bilder 15a,b: Meßperiode im ES 7.3.95-15.3.95: Wetterdaten (oben,a), Luft-, Strahlungs- und operative Temperatur sowie PMV-Index in Raummitte (unten,b)

**Meßreihe Energieautarkes Solarhaus 9. 2. 95 - 17. 2. 95  
Strahlungstemperatur am 14. 2. 95, 21° Uhr in 1,2m Höhe**

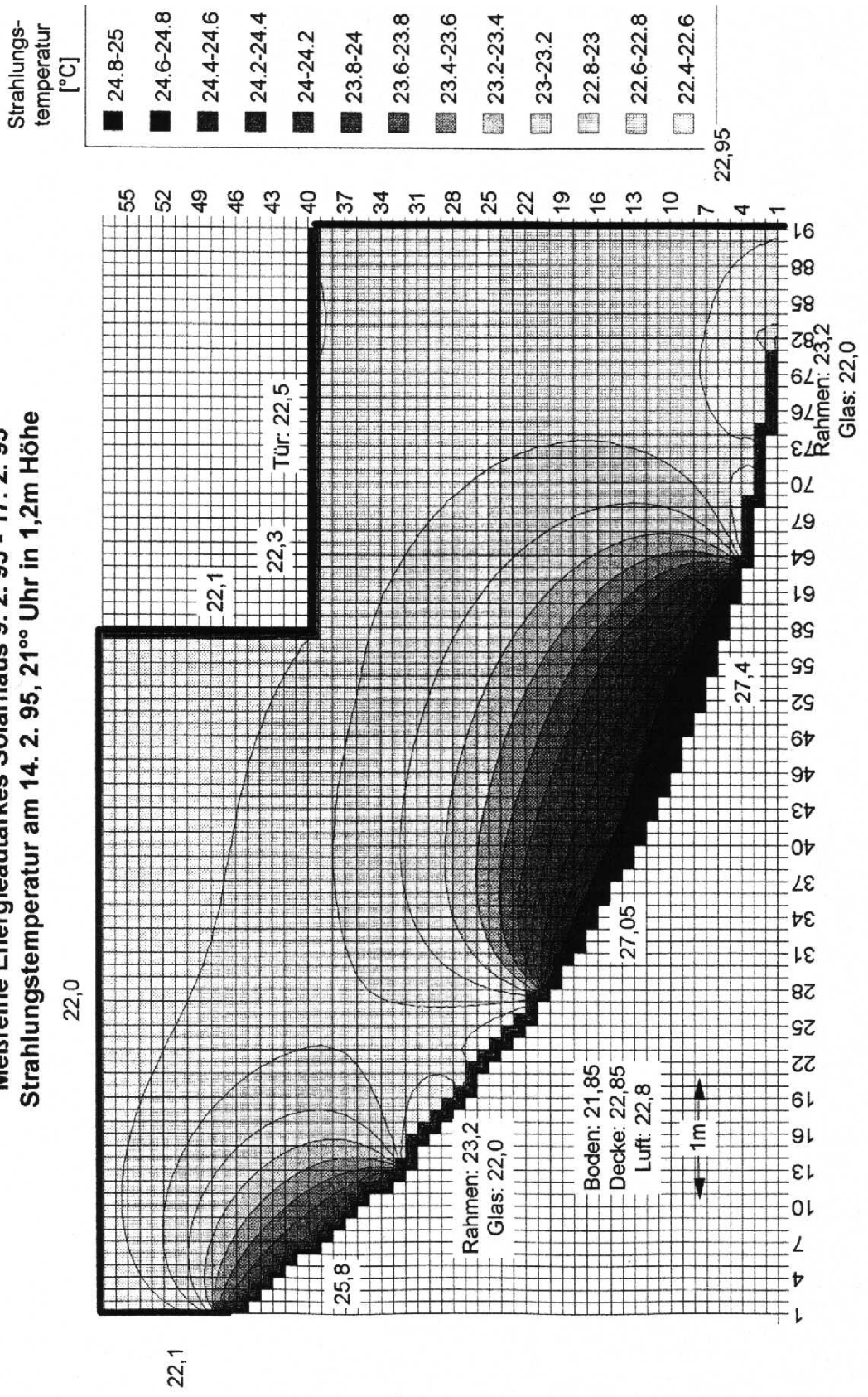


Bild 16: Räumliche Verteilung der Strahlungstemperatur im Vortragsraum des ES am Abend eines strahlungsreichen Tages (14.2.95, 21 Uhr)



**Meßreihe Energieautarkes Solarhaus 9. 2. 95 - 17. 2. 95  
Strahlungstemperatur am 11. 2. 95, 21<sup>00</sup> Uhr in 1,2m Höhe**

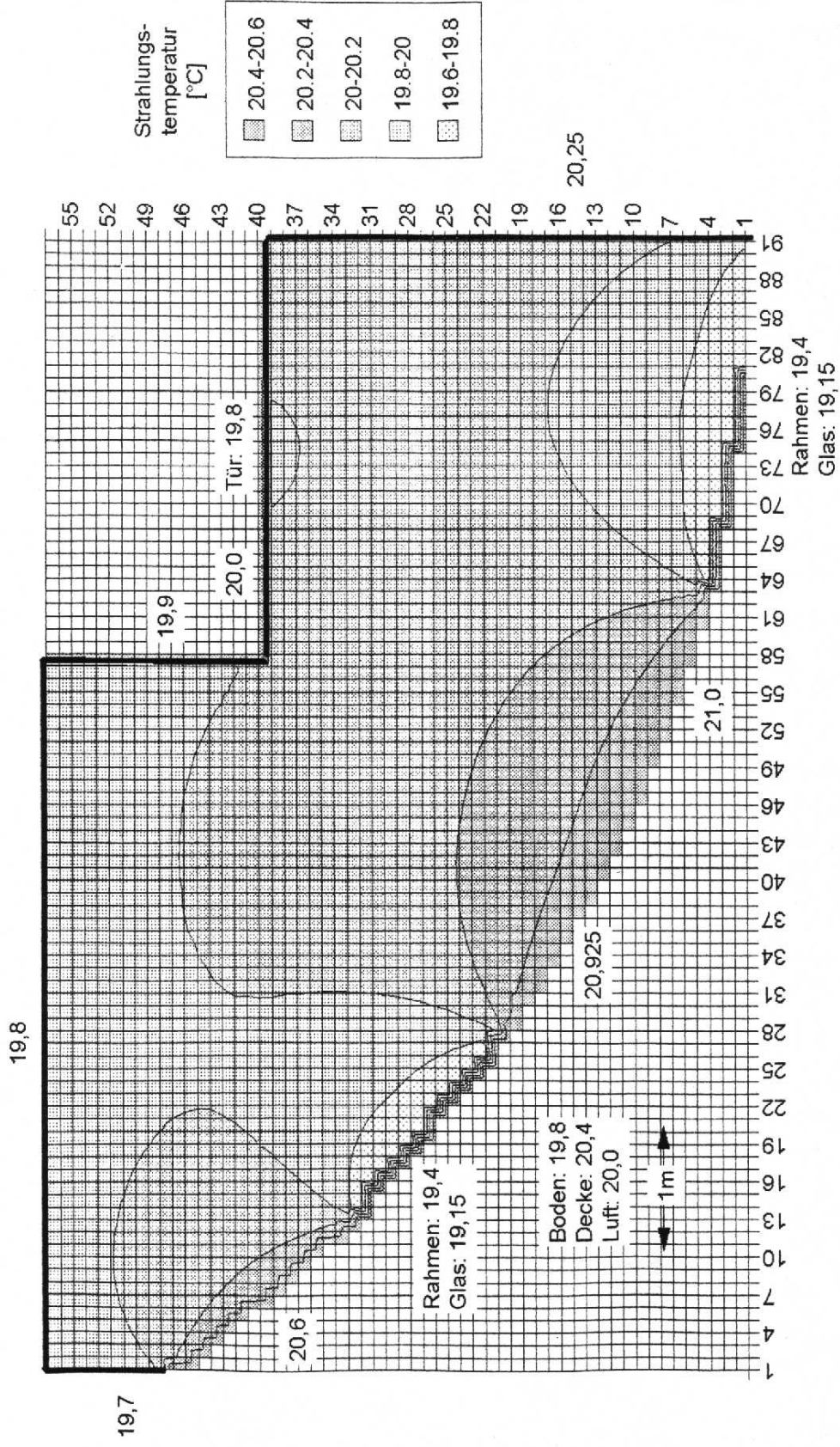
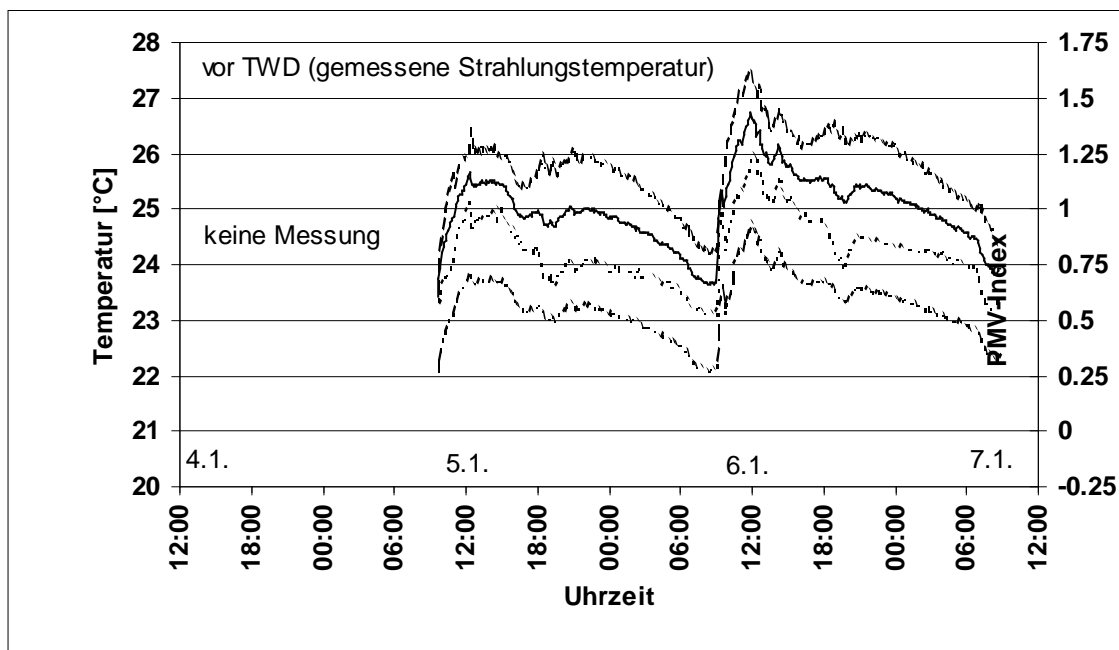
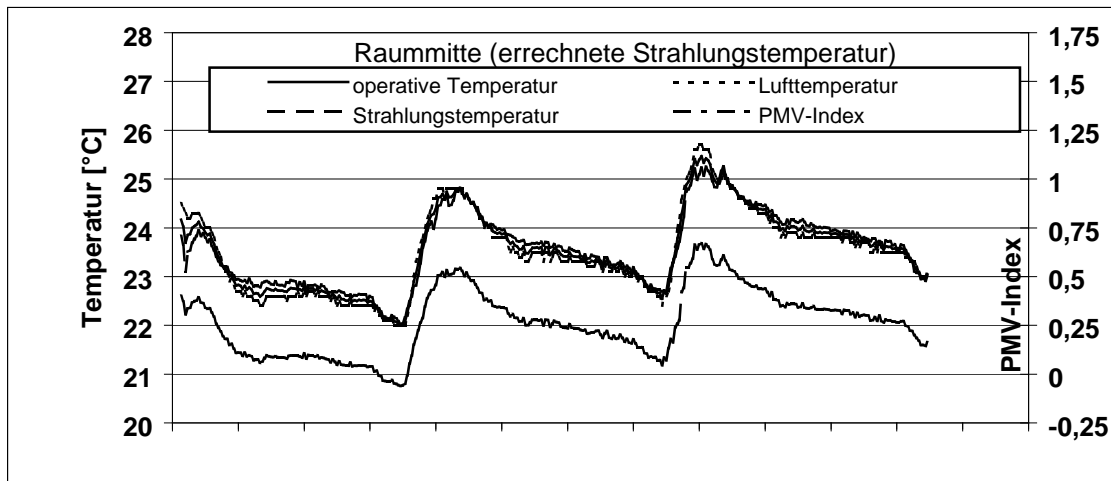
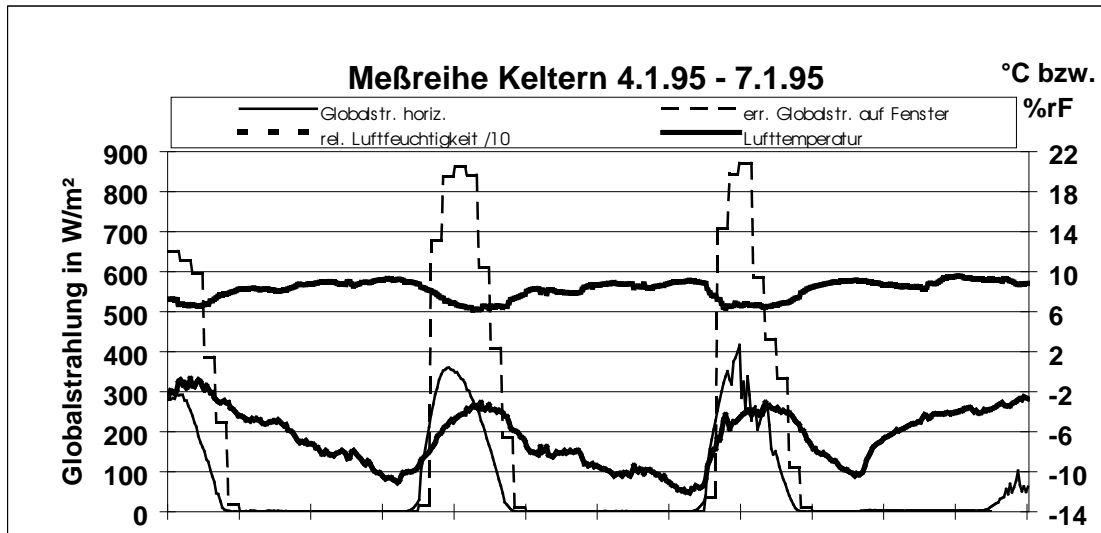
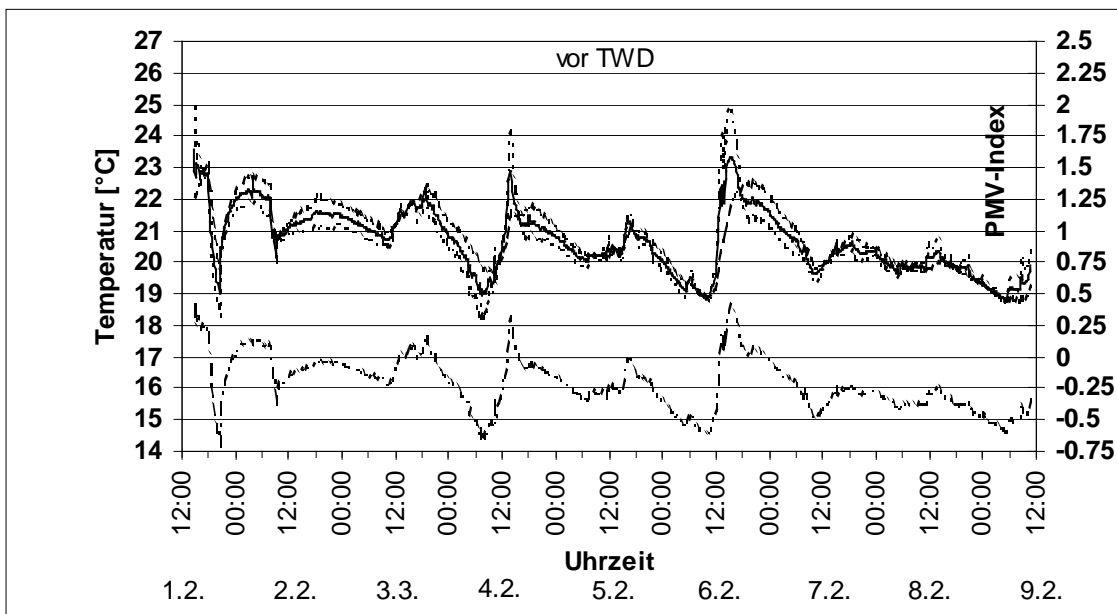
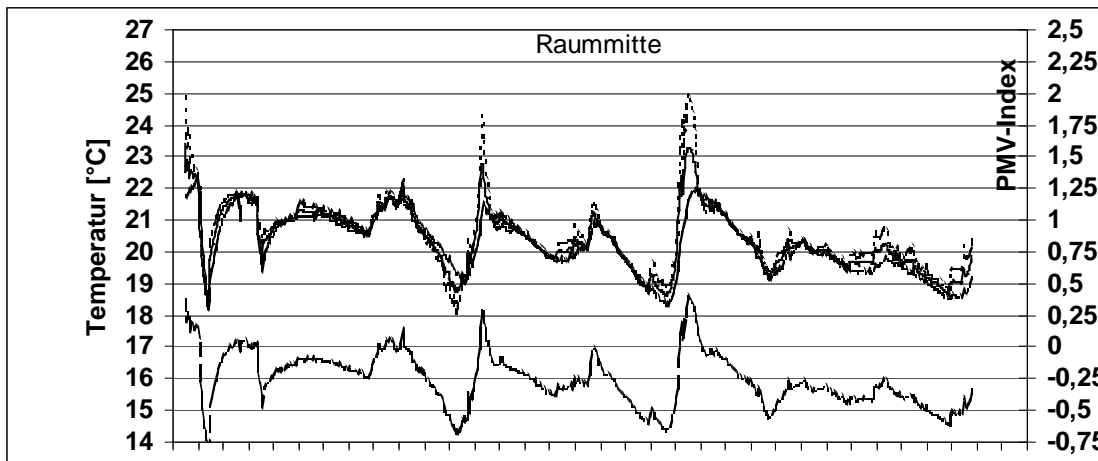
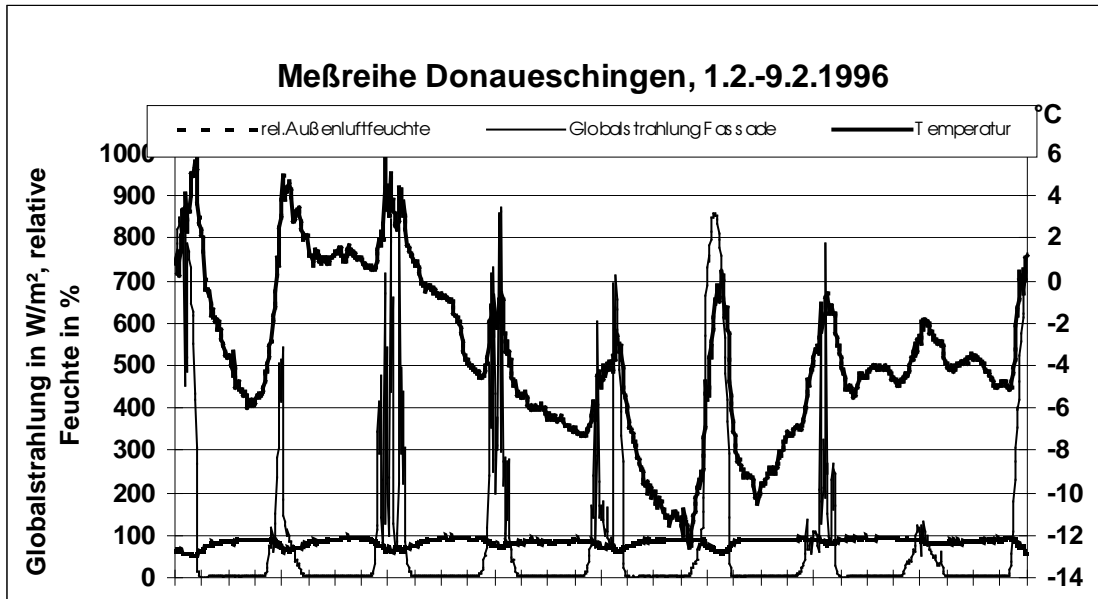


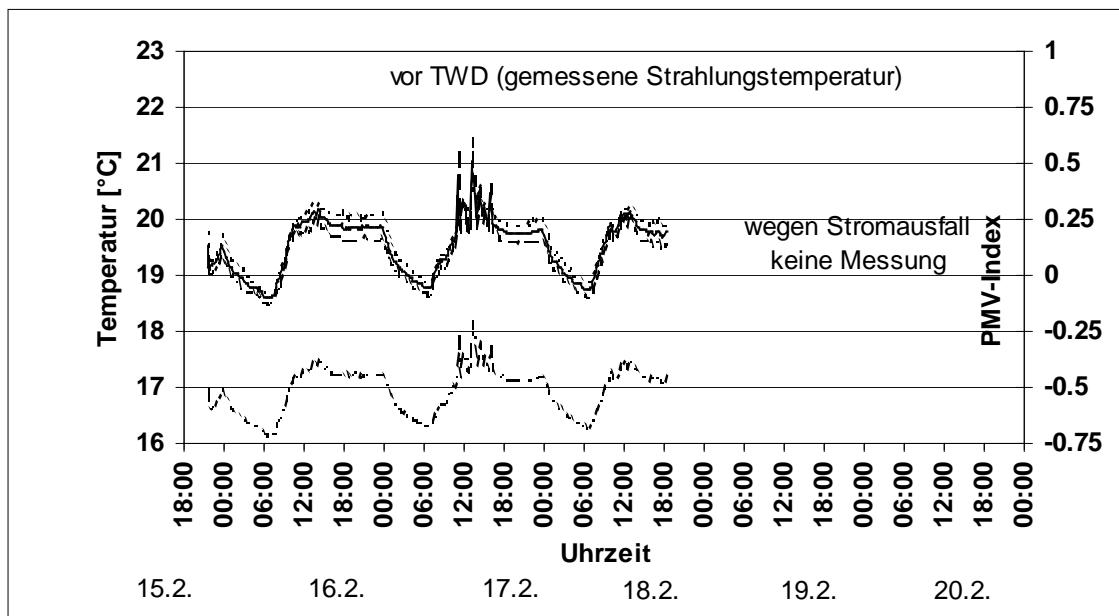
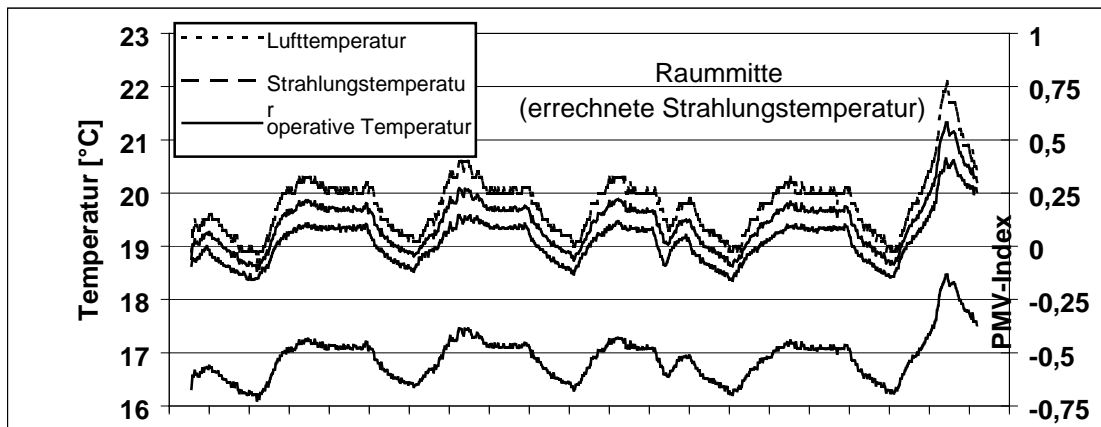
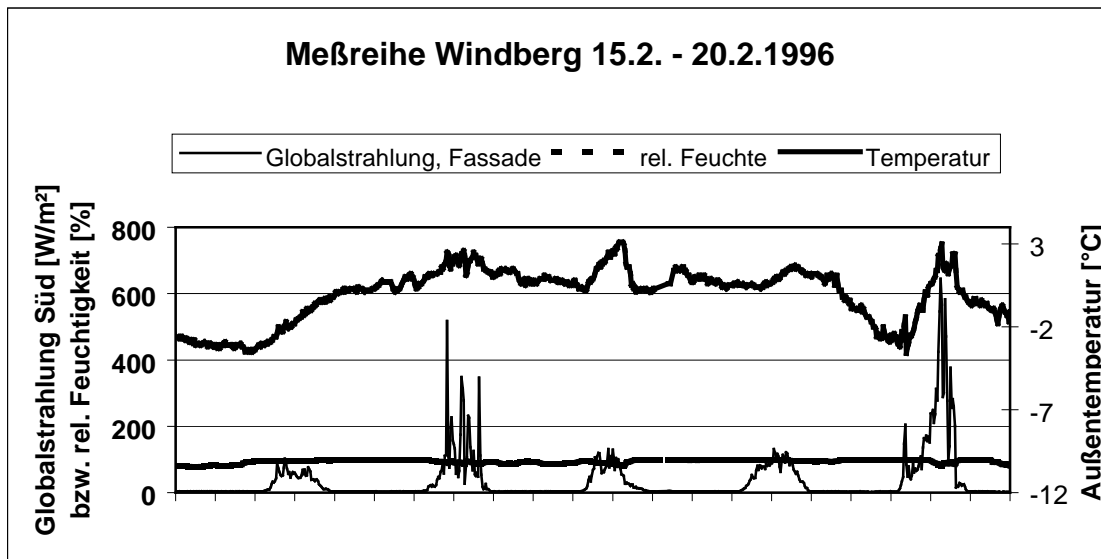
Bild 17: Räumliche Verteilung der Strahlungstemperatur im Vortragraum des ES am Abend eines trübten Tages (11.2.95, 21 Uhr)



Bilder 18a,b,c: Keltern 4.1.-7.1.95: Wetterdaten (a), Raumtemperaturen und PMV-Index in Raummitte (b) und vor der TWD-Wand (c)



Bilder 19a,b,c: Donaueschingen 1.2.-9.2.96: : Wetterdaten (a), Raumtemperaturen und PMV-Index in Raummitte (b) und vor der TWD-Wand (c)



Bilder 20a,b,c:    Windberg 15.2.-20.2.96: : Wetterdaten (a), Raumtemperaturen und PMV-Index in Raummittle (b) und vor der TWD-Wand (c)

Meßreihe Windberg 15.2. - 20.2.1996  
 Strahlungstemperatur am 17.2.1996, 21<sup>00</sup> Uhr in 1,2m Höhe

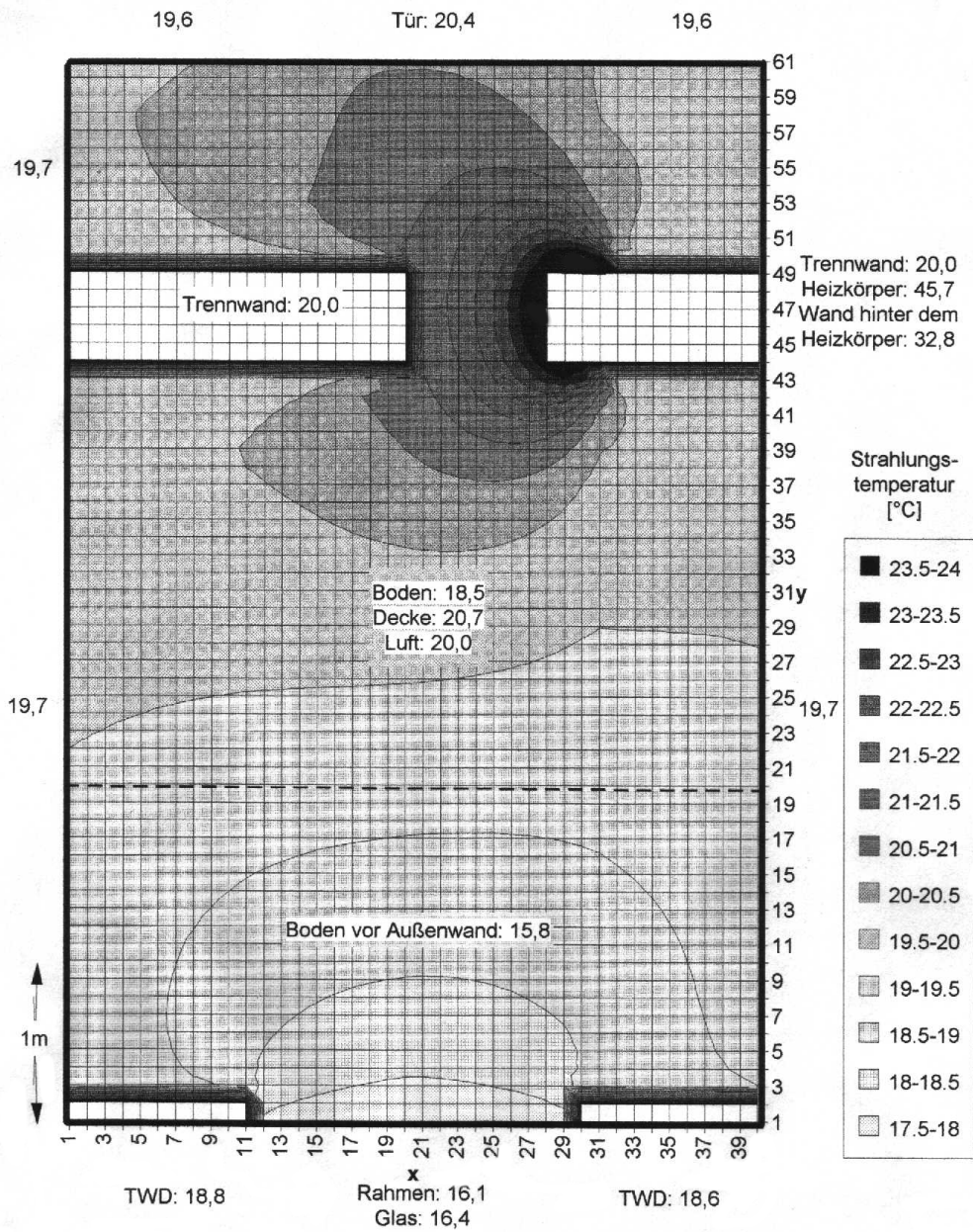


Bild 21: Räumliche Verteilung der Strahlungstemperatur in Gästehaus Kloster Windberg am Abend eines trübigen Tages (17.2.1996, 21 Uhr)

Die Strahlungstemperatur ist insbes. vor der TWD-Wand, aber auch in Raummitte in den Zeiten ohne Einwirkung der direkten Einstrahlung durch die Fenster höher als die Lufttemperatur. In trüben Perioden sinken diese für die Behaglichkeit maßgebenden Temperaturen ab und konvergieren. An strahlungsreichen Tagen steigen sie bedingt durch die direkte Einstrahlung zunächst an, sinken dann ab und steigen abends noch einmal an, wenn die TWD-Wand ihre Wärme abgibt. Dann fallen sie bis zum Morgen wieder ab. Das abendliche Temperaturmaximum ist von hohen Strahlungstemperaturen geprägt, die vor der TWD-Wand bis zu 2 K über der Lufttemperatur liegen können (s. Bilder 14f; 16). Bild 17 zeigt die räumliche Strahlungstemperaturverteilung im ES am Abend eines trüben Tages. Die Temperaturunterschiede sind sehr gering, die TWD-Wandtemperatur ist in diesem unbeheizten Raum die höchste. Auffällig ist auch, daß die größten Unterschiede zwischen Luft- und Strahlungstemperatur am Abend des ersten strahlungsreichen Tages nach einer trüben Periode auftreten. Dann kühlen die noch kalten inneren Speichermassen die Luft ab, während die Strahlungstemperatur durch die warme TWD-Wand erhöht wird. An diesem Tag ist auch der Zeitverzug zwischen Einstrahlung und Wandinnentemperaturmaximum am größten, da außer der TWD-Wand weitere kalte Bauteile wie die Erdgeschoßplatte durch 3-dimensionale Wärmeleitung z.T. mit erwärmt werden.

Die Bilder 18a,b,c bis 20a,b,c zeigen je den zeitlichen Verlauf der Wetterdaten (a) sowie der behaglichkeitsbestimmenden Temperaturen und des PMV-Wertes in den Meßräumen in Raummitte (b) und vor der TWD-Wand (c) in Keltern, Donaueschingen und Windberg.

In langen strahlungsarmen Perioden kann die Strahlungstemperatur auch unter der Lufttemperatur liegen (s. Bild 20b,c in Windberg), wenn ein Heizsystem mit hohem konvektiven Anteil in Betrieb ist. In dieser Zeit sind die TWD-Wände Verlustflächen.

Im Meßraum des Wohnhauses in **Freiburg-Tiengen** war der TWD-Einfluß auf das Raumklima kaum zu spüren, da die TWD nach Südosten orientiert und teilweise durch Nachbarbebauung bzw. einen Balkon verschattet war.

Im Meßraum in **Keltern** war die Zusatzheizung unnötigerweise in Betrieb, da mit der zentralen Luftherhitzung in der Lüftungsanlage keine Einzelraumheizungsregelung vorhanden war und andere Räume Heizwärmebedarf hatten (s. Bilder 18b,c). Das Temperaturniveau war insgesamt zu hoch. Die Nutzer verschatteten in dieser Zeit die Fenster der Nachbarräume und reduzierten dort ggf. die Warm-/Frischlufzufuhr per Hand am Luftauslaß.

Das Energieautarke Solarhaus (ES) in **Freiburg** ist energetisch optimiert, d.h. die Gewinne durch TWD und Fenster sind maximiert, die Verluste minimiert. Die Speichermasse ist sehr groß, trotzdem traten insbes. bei mildem sonnigen Wetter hohe Temperaturschwankungen auf (s. Bild 14 e,f), wie auch die Nutzer monierten. Zunächst war es nur in den Zeiten mit direkter Einstrahlung mittags zu warm, später im März jedoch schaukelte sich das Temperaturniveau auf Grund des ungenügenden Algorithmus für die TWD-Verschattungsregelung zu stark auf. Die Bilder 15a,b,c zeigen die Wetterdaten und den zeitlichen Verlauf der behaglichkeitsbestimmenden Temperaturen und des PMV-Wertes im ES in einer wärmeren Märzwoche. In der Praxis ist auch ein Eingreifen der Nutzer (Ablüften, Fensterverschattung, manuelle TWD-Verschattung) denkbar, wie es im Nachbarraum praktiziert wurde.

Bild 14b zeigt die TWD-Wand- und Zulufttemperaturen. Die TWD-Wandtemperaturen waren stets oben höher als im bodennahen Bereich. Die Ursache hierfür liegt zum einen in den unten kälteren Luftschichten (s.u.), aber auch in Wärmeabflüssen in die Erdgeschoßbodenplatte. Die Zulufttemperatur lag etwas unter der Raumlufttemperatur bei 16÷20°C.

An einem wärmeren Tag im März (s. Bilder 15a,b) wurde ca. 2 h per Fenster gelüftet, um die Raumtemperatur zu reduzieren. Tatsächlich verringerte sich die Lufttemperatur, die Strahlungstemperatur fiel jedoch nicht ab und nach Schließen der Fenstertür stieg auch die Lufttemperatur nahezu auf den alten Wert. In der TWD-Wand und den inneren Baumassen ist dann sehr viel Wärme gespeichert, welche kaum durch Ablüften abgeführt werden kann. Im Winter kann das Ablüften zu Zugerscheinungen im Raum führen, in der Übergangszeit müßte stundenlang gelüftet werden, um den gewünschten Kühleffekt zu erreichen. Daher ist die Möglichkeit der (auch manuellen) TWD-Verschattung wichtig.

In einem kleinen Meßraum (Reihenhaus **Donaueschingen** 'Auf der Staig') gab es an kalten strahlungsreichen Tagen tagsüber solare Gewinne durch Fenster, einen Wintergarten sowie eine Abseite mit Heizungsrohren, abends durch die TWD-Wand. Insgesamt wird zu viel Wärme eingebracht, welche durch verstärktes Lüften abgeführt werden muß (über das hygienisch notwendige Maß hinaus). Zusammen mit den anderen wärmegewinnenden Faktoren ist die TWD-Fläche daher überdimensioniert, Bedarfszeitpunkt (morgens) und Angebotszeitpunkt (abends/nachts) stimmen nicht überein (s. Bilder 19a,b,c).

In einem Raum mit qualitativ minderwertiger TWD (nur 48mm Dicke, im Gästehaus der Jugendbildungsstätte Kloster **Windberg**) ist die Wandoberflächentemperatur in trüben Wetterperioden deutlich kühler als die Lufttemperatur, so daß bei der dortigen Anordnung des Heizkörpers innen ein deutliches Temperaturgefälle zur TWD bzw. zum Fenster hin fühlbar

ist (s. Bilder 20a,b,c und 21). Morgens wurde die Heizung zu spät eingeschaltet, so daß die Soll-Lufttemperatur zu spät erreicht wurde. Insgesamt war es zu 76% der Meßzeit behaglich. Auf Grund der einigermaßen periodischen Wetterverhältnisse an den Meßtagen konnte hier der effektive k-Wert der TWD aus den Meßwerten berechnet werden:

$$k_{\text{eff}} = \alpha_i (t_{\text{oi}} - t_{\text{RL}}) / (t_{\text{RL}} - t_{\text{au}}) \quad \text{mit temperaturabhängigem } \alpha_i$$

Er betrug dort in der Zeit  $k_{\text{eff}} = 0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$  und war damit einiges schlechter als der gut opak gedämmter Wände.

Zu den Behaglichkeitsanforderungen bzgl. lokalem Diskomfort:

Die Luftgeschwindigkeiten 1 m vor der TWD-Wand in 1,15m Höhe lagen bei allen Messungen unter 0,12m/s und waren damit unkritisch bzgl. Zugscheinungen.

Die Strahlungsasymmetrie konnte direkt über die Differenz der zwei Halbraumstrahlungstemperaturen vor der TWD-Wand bestimmt werden. Sie betrug maximal 2,5 K (Keltern, Donaueschingen) bzw. im ES bis 4,5 K, in dessen Meßraum sich die großen und schweren, der TWD gegenüberliegenden Raummassen nur langsam erwärmten. Im Windberger Gästehaus traten Strahlungsasymmetrien von bis zu -1,8 K auf, da in der trüben Periode sowohl die Innenoberflächen der Fenster wie die TWD-Wand kälter als die inneren Raummassen waren. Diese Werte sind aber alle unkritisch.

Die Fußbodentemperaturen stiegen bedingt durch die direkte Sonneneinstrahlung zeitweise über 26°C. Zu kalte Fußbodentemperaturen gab es im Windberger TWD-Haus (Boden über Außenluft), kurzzeitig auch in Donaueschingen und im ES.

Das Bild 14c zeigt für das ES die Lufttemperaturen in verschiedenen Höhen in Raummitte, das Bild 14d diejenigen vor der TWD-Wand. Der Gradient zwischen 0,15 und 1,2m betrug bis zu 1,4 K (unkritisch). Dies ist zum einen auf die Art der Zuluftzuführung als Quelllüftung zurückzuführen, zum anderen auf die Strömungswalzen, die durch die Wärmeabgabe der TWD-Wände entstehen. Bedingt durch diese Strömungswalzen vor den TWD-Wänden waren die Lufttemperaturen dort bis auf die Zeiten mit direkter Einstrahlung höher als in Raummitte.

Der Lufttemperaturgradient war in Donaueschingen an einigen Tagen morgens zu hoch, da ein lüftungsbedingter Kaltluftsee die Lufttemperatur im Bodenbereich fallen ließ. Im Windberger Haus lag dieser Gradient mit bis zu 2,1 K an der Behaglichkeitsgrenze.



Die Luftfeuchtigkeit wurde nur im Donaueschinger Haus mit Nutzung des Raums bewertet, wo sie mit 33-56% akzeptabel war.

Insgesamt wurde also das Problem der Überhitzung deutlich. Wenn ein geringer Wärmebedarf herrscht und wenig Speichermasse zur Verfügung steht, kann ein Raum an sonnigen Tagen auch bei sehr niedrigen Außentemperaturen zur Überhitzung neigen. Er ist empfindlicher gegen die solare Einstrahlung als gegen Außentemperatureinflüsse. Hierbei kühlen die Raummassen nachts durch die TWD-Wärmeabgabe kaum ab, tagsüber erwärmen die direkten Gewinne durch das Fenster den Raum weiter über die Komfortgrenze. Dieses Problem kann im Winter i.d.R. durch offenstehende Innentüren, d.h. einem größeren Luftaustausch im Gebäude, gelöst werden. Bei richtig dimensionierter TWD-Fläche besteht es nur in den Übergangszeiten mit hoher Einstrahlung und geringen Wärmeverlusten, dieses ist ein regelungstechnisches Problem für die TWD-Verschattung.

Der Wärmeeintrag durch die TWD erwärmt zunächst als Primärspeicher die TWD-Wand und dann durch Konvektion und Strahlung die Innenbauteile, die den Sekundärspeicher bilden. Dieser ist bei großflächiger TWD-Dimensionierung genauso wichtig wie die TWD-Wand, da der schon gedämpfte Wärmeeintrag an der TWD-Wand durch die Ein- und Ausspeichervorgänge an den Innenmassen noch einmal verzögert werden kann.

Die im Forschungsprojekt deutlich gewordenen Probleme lassen sich wie folgt zusammenfassen:

<u>Objekt</u>	<u>Komfort</u>	<u>Ursache</u>
Freiburg-Tiengen:	kaum Wirkung der TWD	Südostorientierung, Verschattung durch Nachbarbebauung, Balkon
Keltern:	insgesamt zu hohes Temperaturniveau, hohe Temperaturschwankungen	südorientierte TWD-Wand, keine Einzelraumheizungsregelung leichte Überdimensionierung
Freiburg:	z. T. mittags zu hohe Temperaturen, hohe -schwankungen, sonst hoher Komfort	südorientierte TWD-Wand, ungenügender Algorithmus der TWD-Verschattungsregelung
Donaueschingen:	Überhitzung wurde durch größeren Luftwechsel vermieden, morgens z.T. zu kühl, sonst hoher Komfort	rel. große südorientierte TWD-Wand, Fremdwärme auch durch Wintergarten, Abseite mit Heizungsrohren
Windberg:	Strahlungskälte von Fenster/ kalte TWD-Wand, morgens zu kühl	trübes Wetter, nur 48mm dicke TWD-Struktur, Heizkörper an Trennwand innen, falsche Heizungsregelung zentral

Tabelle 4: Komfortprobleme in den 5 Meßsituationen

#### 1.4 Zusammenfassung ‘thermischer Komfort in TWD-Gebäuden’

**Insgesamt hat eine große TWD-Wand einen sehr starken Einfluß auf das Raumklima. Auf Grund ihrer gedämpften, zeitverzögerten und großflächigen Wärmeabgabe ist sie großen Glasflächen hinsichtlich des Komforts deutlich überlegen. U.U. steht diesem Komfortgewinn aber ein Komfortverlust durch Überhitzung und hohe Temperaturschankungen gegenüber, wenn die Größe der TWD-Wand nicht sorgfältig auf den Wärmebedarf des Raums abgestimmt wird.**

In allen 5 Räumen wurden Planungsfehler gemacht, ohne diese wäre der Komfort sicher besser als der angetroffene. Aber auch richtig geplant bleibt auf Grund der unregelmäßigen Wärmeabgabe nach innen eine gewisse Überhitzungsgefahr in der Übergangszeit, die nur durch eine (bisher unübliche) vorausschauende automatische Regelung vollständig zu beherrschen wäre, ansonsten aber auch durch einen vorausschauenden manuellen Eingriff.

Überhitzung kann schon im Winter bei Überdimensionierung und fehlender Einzelraumheizungsregelung auftreten, so daß in der Planung auf diese Aspekte Wert gelegt werden muß. Die TWD ist auf Grund ihrer zeitverzögerten Wärmeabgabe schwer regelbar. In der Übergangszeit besteht daher das Problem der Verschattungsregelung. Andererseits ist der Wärmeeintrag stark gedämpft und wird nur in Verbindung mit den direkten Wärmegewinnen durch die Fenster kritisch. Mit Hilfe sofort wirkender Maßnahmen wie dem Ablüften oder dem Abschatten der Fenster kann der Überhitzung in der Übergangszeit wirksam begegnet werden. Längerfristig sollte dann die TWD verschattet werden, was vorausschauende Nutzereingriffe bzw. eine vorausschauende Regeleinrichtung (s.o.) erfordert.

Wichtig ist die Möglichkeit, die sehr einstrahlungsempfindliche TWD an warmen strahlungsreichen Übergangstagen und im Sommer ganz zu verschatten, da dann die Wärme nicht mehr abgelüftet werden kann.

## **1.5 Einfluß verschiedener Parameter auf den Komfort und Energiebedarf für den Raum in Keltern (Simulationsergebnisse)**

Ein Simulationsmodell für die herkömmliche TWD wurde von Kummer [KUMMER] für das Simulationspaket TRNSYS, Version 13 [TRNSYS13], erstellt und wird im Anhang V.6 erläutert. Bei einem Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Meßdaten vom Haus Abrecht stellte sich heraus, daß der Wärmegewinn mit diesem Modell überschätzt wird. Dies ist auf Randeffekte wie mehrdimensionale Wärmeleitung insbes. im Rahmenbereich zurückzuführen. Die Wärme floß z.T. nicht in den Raum, sondern über ein darüber liegendes opak gedämmtes Wandstück nach außen ab. Daneben gab es Kondensation an der äußeren Glasscheibe mit einer Reduktion des g-Wertes von bis zu 10% (Meßergebnisse des Fraunhofer-Instituts für solare Energiesysteme bei einer ähnlichen Konstruktion) und Verschattung durch den 20cm tiefen Rahmen sowie Verschmutzung der äußeren Scheibe. Erst durch eine Reduktion der Einstrahlungswerte um 25% konnten die Meßwerte reproduziert werden. Der Fehler im Wärmestrom betrug nach der Parameteridentifikation 6%.

Dies ist natürlich eine grobe Näherung. Andererseits wurden mit diesem Modell, modifiziert für die TWD-Konstruktion am ES, auch die Ergebnisse des ES nachsimuliert (14 Tage) und eine gute Übereinstimmung zwischen Meß- und Rechenergebnissen gefunden. Es existiert meines Wissens nach kein thermisches Simulationsprogramm, welches Wandeffekte innerhalb einer Gesamt-Raum-Simulation dreidimensional und instationär berechnet. Dies würde auch zu unverhältnismäßig langen Rechenzeiten führen.

Simulationsrechnungen wurden unternommen, um für das Haus Abrecht die Behaglichkeit bei idealer (d.h. hier nach der Raumlufttemperatur geregelter) Heizung zu bestimmen, da die Heizung in der Meßzeit oft unnötig in Betrieb war (s.u.). Des weiteren sollte der Einfluß der TWD herausgefiltert werden, indem die Ergebnisse mit denen bei einer opaken Dämmung verglichen werden.

Genauso wie bei den Meßergebnissen wird der zeitliche Verlauf der Luft-/Strahlungs- und operativen Temperatur sowie des PMV-Index dargestellt. Diese Größen wurden wieder mit dem Strahlungstemperatur-Programm ermittelt (s. Kap. I.3.3). Zunächst wurde das Simulationsmodell validiert. Kriterien zur Übereinstimmung waren die Wärmeströme an der TWD-Wand sowie der Lufttemperaturverlauf in Raummitte/halber Raumhöhe.

Auf Grund des Flächenmodells für Räume in TRNSYS können die Innenwandoberflächen-temperaturen nicht verglichen werden, da die Strahlungsverhältnisse nicht korrekt wiedergegeben werden. Die solare Einstrahlung durch die Fenster wird in diesem Modell je nach Produkt Absorption mal Fläche gewichtet auf die Flächen verteilt.

Somit kann der unterschiedliche Sonnenstand tagsüber nicht berücksichtigt werden und die Simulationsergebnisse sind in diesem Detail ungenügend. Die Temperaturen der TWD-Wand werden dagegen korrekt ermittelt.

Es ist jedoch anzunehmen, daß der Einfluß der direkten Einstrahlung auf die Innenwandtemperaturen abends und nachts, wenn die TWD-Wand ihre Wärme abgibt, weitgehend abgeklungen ist.

Insgesamt kann gesagt werden, daß sowohl das Programmmodul für den Raum [TRNSYS13] wie für die TWD [ISE-TWD] nur bedingt zur Beschreibung der thermischen Verhältnisse geeignet sind. Die vorherige Sichtung anderer Programme führte aber auf ähnliche Unzulänglichkeiten entweder im Raum-Strahlungsmodell oder im TWD-Modell.

In der **ersten Variante** wurde nun eine ideale Heizung angenommen (Einzelraumregelung) mit folgenden Solltemperaturen:

Gästezimmer, 1. Kinderzimmer, 2. Kinderzimmer(Meßraum):	7 bis 20 Uhr	20,0°C
Schlafzimmer	7 bis 9 Uhr, 22 bis 23 Uhr	20,0°C
In den sonstigen Zeiten betrug die untere Heizgrenztemperatur		17,0°C

Im Gegensatz zur realen Meßsituation wurden die Fenster in den Nachbarräumen als unverschattet angenommen. Die Randbedingungen waren:

	interne Lasten (W)	Luftwechsel (1/h)	Luftaustausch mit Flur(1/h)
Gästezimmer	0	0,14	0
Kinderzimmer 1	nachts 60/ tags 30	0,14	0
Kinderzimmer 2	nachts und tags 30 W	0,14	0
Schlafzimmer	nachts 160/ tags 0	0,14	0

Tabelle 5: Randbedingungen bei den vergleichenden Simulationsrechnungen Haus Abrecht

Die Bilder 22a,b,c zeigen die Raumlufthtemperaturen in den vier oberen Räumen und für den Meßraum die übliche Darstellung der Luft-/Strahlungs-/operativen Temperatur und des PMV-Indexes in Raummitte und vor der vom Raum aus gesehen rechten TWD-Wand (TWD2).

Aus diesen Simulationsergebnissen wird erkennbar, daß durch eine ideale Heizung die Überhitzung hätte vermieden werden können. Der Maximalwert der operativen Temperatur betrüge dann  $23,7^{\circ}\text{C}$  und wäre an der Grenze der Behaglichkeit. Nimmt man allerdings höhere interne Lasten als die 31 W der Meßeinrichtung an, so wäre sicher auch dann Überhitzung eingetreten. Daraus läßt sich auf eine wenn auch geringe Überdimensionierung schließen, da die Witterung in der Meßperiode extrem kalt und sonnig war und als Auslegungsfall für die TWD gelten könnte. Die Temperaturen fallen nachts stärker als im Referenzfall mit realer Heizung. Nur morgens am 4.1. und 5.1. muß noch geringfügig geheizt werden, sonst nicht.

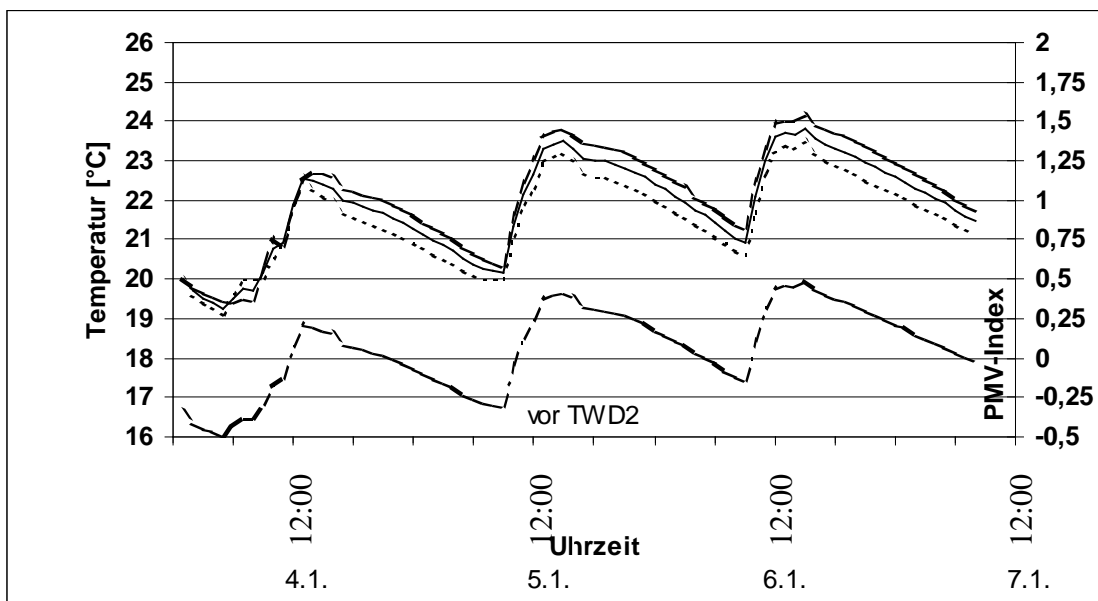
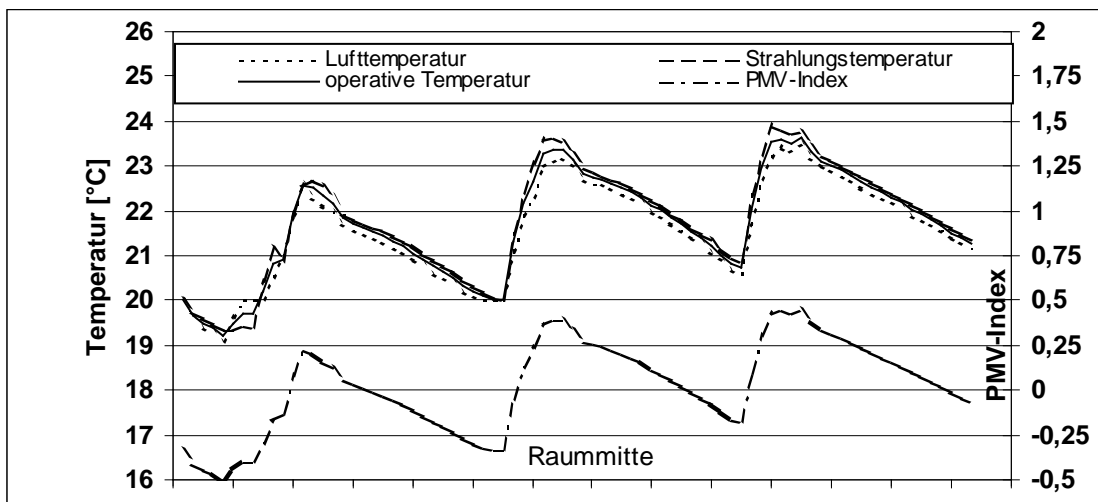
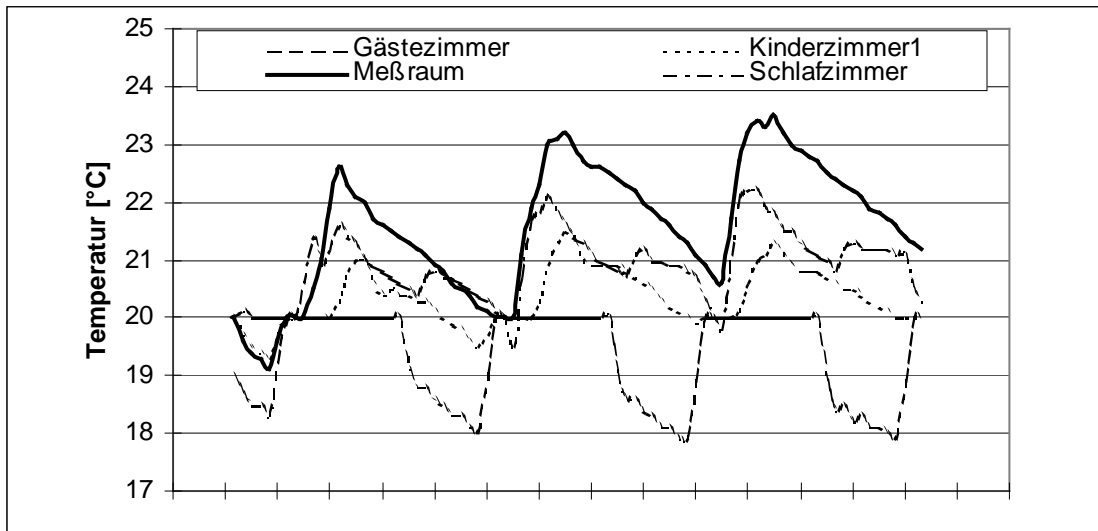
Eine ideale Heizung bedeutet hier neben der idealen Einhaltung des Sollwertes in der Heizzeit auch eine Heizung mit Einzelraumregelung, da die Nachbarräume nach den Simulationsrechnungen stark unterschiedliche Heizlasten haben.

Üblicherweise werden im Haus Abrecht an strahlungsreichen Tagen die Fenster mittels Jalousie verschattet (Jalousie zwischen 2 Scheiben), so daß Blendung und Überhitzung vermieden wird, gleichzeitig wird zentral geheizt, da in den unteren Räumen wegen Verschattung durch die Nachbarbebauung Heizwärmebedarf besteht.

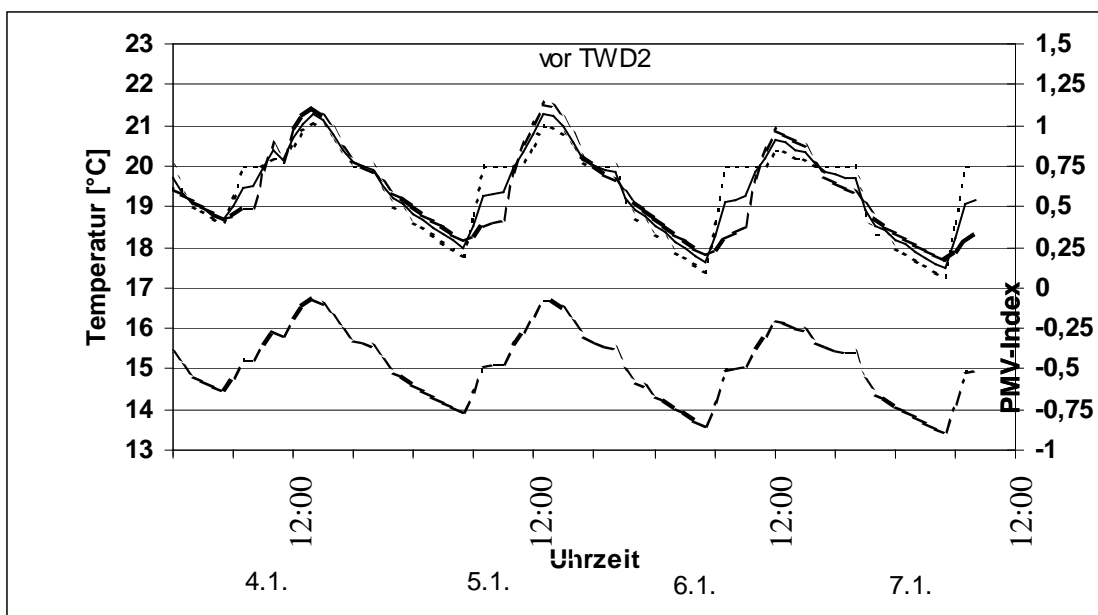
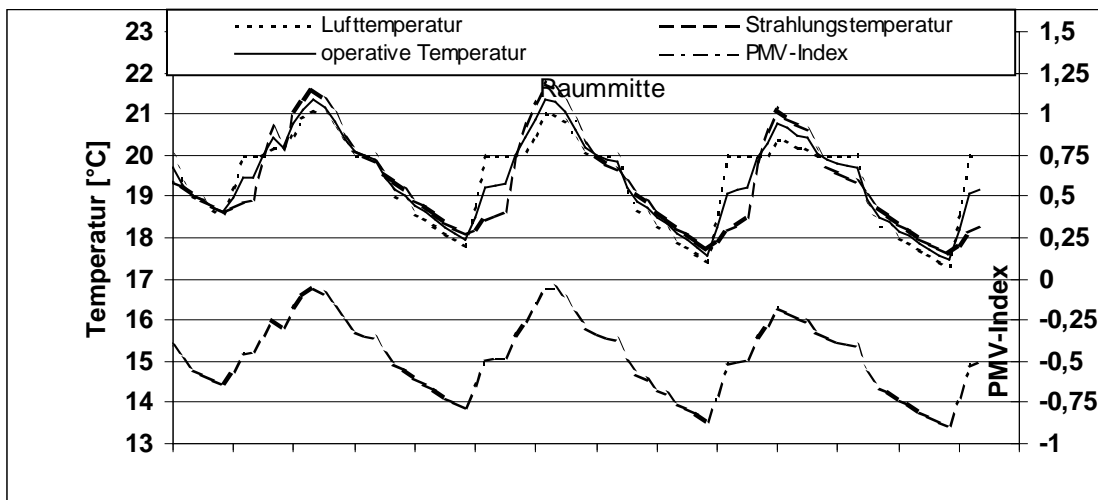
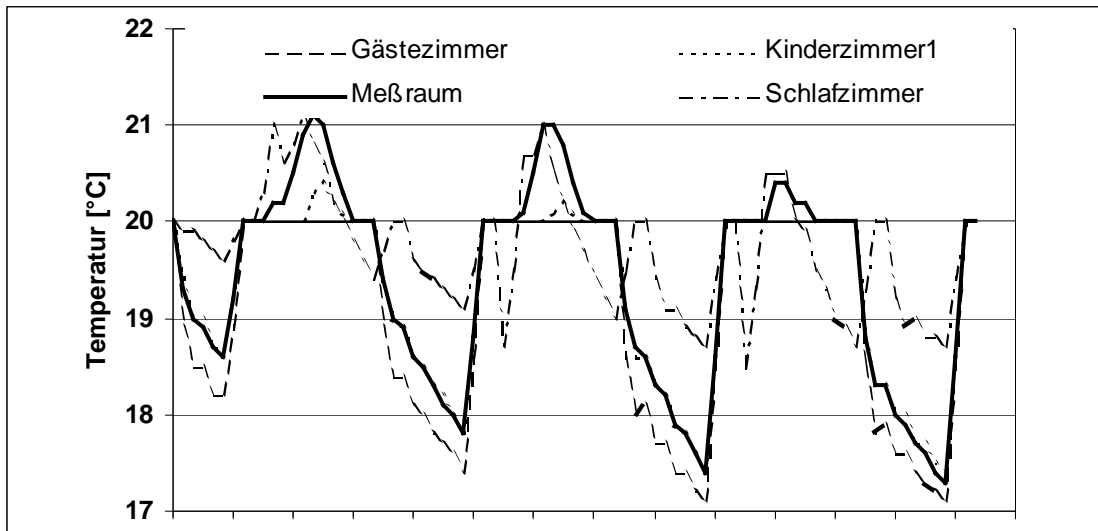
Eine **zweite Variante** zeigt das Verhalten des Raums bei opaker Dämmung (NEH-Standard) wieder mit idealer Heizung, alle Räume ohne Fensterverschattung.

Die Bilder 23a,b,c zeigen wieder die Raumlufthtemperaturen in den vier oberen Räumen und für den Meßraum die übliche Darstellung der Luft-/Strahlungs-/operativen Temperatur und des PMV-Indexes in Raummitte und vor der TWD rechts von innen.

Deutlich wird, daß weitaus mehr geheizt werden muß, morgens und abends an allen Tagen. Die operative Temperatur in Raummitte steigt bis auf max.  $21,4^{\circ}\text{C}$  gegenüber  $23,7^{\circ}$  im Fall mit TWD. Die Lufttemperaturen werden zwar tagsüber auf mindestens  $20^{\circ}\text{C}$  gehalten, durch Strahlungsaustausch mit den kalten Außenwandflächen sinkt die Strahlungstemperatur aber, so daß es am 6.1. morgens leicht zu kalt ist.



Bilder 22a,b,c: Simulation Keltern, mit TWD, idealer Heizung, ohne Fensterverschattung::  
 a) Raumlufttemperaturen in der 4 Haupträumen im 2.OG (a)  
 b) Raumtemperaturen und PMV-Index im Meßraum in Raummitte  
 c) Raumtemperaturen und PMV-Index im Meßraum vor der TWD-Wand links



Bilder 23a,b,c: Simulation Kelttern, ohne TWD, mit idealer Heizung, ohne Fensterversch.:  
 a) Raumlufttemperaturen in der 4 Haupträumen im 2.OG  
 b) Raumtemperaturen und PMV-Index im Meßraum in Raummitte  
 c) Raumtemperaturen und PMV-Index im Meßraum vor der TWD-Wand links



Darüber hinaus wurde der Jahresheizwärmebedarf für obige Räume ermittelt. Das Wetter entstammte dem Würzburger Testreferenzjahr [TRY05]. Neben der TWD-Variante wurde eine opak gedämmten NEH-Variante ( $k_{Fe}=1,21 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $k_{AW}=0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $k_{Dach}=0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) und eine sehr gut gedämmte Passivhaus-Variante durchgerechnet ( $k_{Fe}=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $k_{AW}=0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $k_{Dach}=0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Die TWD-Variante ist in den übrigen Bauteilen wie ein NEH gedämmt. In allen Varianten wurde mit der vorhandenen Lüftungswärmerückgewinnung, idealer Heizung und unverschatteten Fenstern gerechnet. Das Simulationsmodell beinhaltete die vier achteckförmigen Zimmer im DG.

Einheit->	kWh/m <sup>2</sup> <sub>WFÄ</sub>					h
	Gäste-Zi.	K1	K2	Schlaf-Zi.	<b>Mittel</b>	Überhitzung
TWD-Version	23,8	19,0	19,1	8,4	<b>17,6</b>	125
NEH-Version	29,4	26,2	26,7	10,9	<b>23,3</b>	104
Passivhaus-Version	17,1	14,7	17,7	4,0	<b>13,4</b>	220

Tabelle 6: Meßobjekt Keltern: Heizwärmebedarf der 4 oberen Wohnräume nach Simulationsrechnungen für verschiedene Dämmstandards (1.Okt.-30.April)  
Die Überhitzungsstunden beziehen sich auf den Meßraum K2.

Der Raum K2 war der Meßraum. Die Regelungsstrategie in der Simulation sah ab 25°C Raumlufttemperatur eine Kühlung mit Außenluft vor, diese Stunden mit Ablüften werden als Überhitzungsstunden gezählt.

Daß in diesem Fall die Passivhausversion etwas energiesparender als die TWD-Version ist, liegt vor allem an der von Süden abweichenden Orientierung dreier Räume. Außerdem entspricht der Wärmedämmstandard der übrigen Bauteile (insbes. Dach und Fenster) in der TWD-Version dem NEH-Standard. Ein weiterer Grund ist in der kurzen täglichen Heizdauer zu sehen, die in der Nutzung der Räume als Schlaf-/Kinderzimmer begründet ist.

In der Passivhaus-Version muß zwar an den strahlungsreichen Tagen mehr als in der TWD-Version geheizt werden, dafür ist die Passivhaus-Version aber an den im Winter häufigen bedeckten Tagen sparsamer, da der effektive k-Wert der TWD-Wand für eine etwa periodische trübe Peroide 'nur' im Bereich einer einigermaßen guten opaken Dämmung

(NEH) liegt. Das Niveau liegt aber insgesamt sehr niedrig, da die Lüftungswärmerückgewinnung in jedem Fall berücksichtigt wurde.

Bei den obigen Berechnungen neigt der Passivhausstandard allerdings eher als die TWD-Version zu Überhitzungen in der Übergangszeit. Beim Passivhausstandard verursachen die direkten Wärmegewinne durch die Fenster in Verbindung mit den minimalen Wärmeverlusten öfter hohe Raumtemperaturen, währenddessen der sanfte Wärmeeintrag durch die TWD seltener kritisch ist (bei idealer Heizung und sonst schlechterem Wärmedämmstandard).

## **1.6 Parameterstudien zur optimalen Planung von TWD-Wänden**

### **1.6.1 Zur Dimensionierung einer TWD-Fläche**

Die Dimensionierung einer TWD-Wandfläche sollte maximal nach dem Wärmebedarf in einer sehr kalten aber strahlungsreichen Wetterperiode erfolgen. Dann deckt die TWD einen großen Teil der Verluste, führt aber zumindest im Winter nicht zur Überhitzung. In längeren strahlungsarmen Perioden (eingeschwungener Zustand) bei 0°C Außentemperatur und einer Einstrahlung von 230 Wh/m<sup>2</sup>d liegt der effektive k-Wert der gesamten Wand mit einer 12cm dicken TWD-Struktur unter Berücksichtigung der Rahmenverluste im Bereich von 0,36 W/m<sup>2</sup>K, also einer opaken 10cm dicken Wärmedämmung auf einem 17,5 cm dicken KS-Mauerwerk.

Für den Meßraum im Haus Abrecht wurden thermische Simulationsrechnungen unter idealen Randbedingungen durchgeführt, d.h. mit unverschatteter TWD, einer idealen (Luft-)Heizung sowie ohne Fensterverschattung und mit geschlossener Innentür in der gemessenen klaren und sehr kalten Wetterperiode (s. Kap. I.5). Es zeigt sich, daß keine Überhitzung eingetreten wäre, wenn die Raumtemperatur ideal geregelt worden wäre. Die Überhitzung lag hier an der ungenügenden Zusatzheizungsregelung. Aber auch bei idealer Heizungsregelung wäre der Komfort dann nicht mehr gewährleistet, wenn etwas höhere interne Lasten aufgetreten wären.

Für eine hochwertige TWD wie sie im Haus Abrecht eingesetzt wurde (120mm TWD-Material) und eine durch den Horizont unverschattete Südorientierung wurden daraufhin Parameterstudien angefertigt, um den optimalen TWD-Anteil bei unterschiedlichem Wärmedämmstandard zu ermitteln, d.h. wieviel TWD-Fläche bzw. -gewinne ein gegebener Raum „verträgt“ bzw. ob die Faustregel 2/3 TWD-Fläche, 1/3 Fensterfläche im Winter zu Überhitzung führt. Es wurden charakteristische Parameter des Raums (Verlustfaktor und

Speicherfähigkeit) herangezogen und auf den Solargewinnfaktor (s.u.) bezogen, um für ähnliche Verhältnisse Aussagen zum Komfort zu erhalten.

Bei den zahlreichen Rechnungen stellte sich heraus, dass bei allen Varianten mit NEH-Standard oder schlechter im Winter keine Überhitzung auftritt. Lediglich in der sehr gut gedämmten Passivhausvariante kann dies in speziellen Fällen eintreten. Deshalb wurde nur dieser Fall mit sehr gutem Wärmedämmstandard und Lüftungswärmerückgewinnung weiter betrachtet. Das Wetter stammt aus dem als Mittel für Deutschland oft verwendeten Würzburger Testreferenzjahr [TRY05], es wird die sehr kalte und strahlungsreiche 1. Januarwoche verwendet.

Der Beispielraum ist 4m (Außenwand Süd) breit und 5m tief, hat eine Bruttogeschosshöhe von 2,8m, eine lichte Höhe von 2,5m und 30% Fensterflächenanteil an der Südfassade sowie KS-Wände. Der nördlich angrenzende Flur wird auf 20°C temperiert, ansonsten sind die Randbedingungen adiabatisch.

Um eine Einordnung verschiedener Räume zu gewährleisten, wird der Beispielraum nach den wichtigsten Parametern klassifiziert:

$$\text{Verlustkoeffizient} \quad V = \sum kA + (\rho c_p V)_L n \quad [\text{W/K}] \quad /1/$$

$$\text{Speicherfähigkeit} \quad S_p = \sum m c_p \quad [\text{Wh/K}] \quad /2/$$

Die solaren Gewinne werden im Solargewinnfaktor S dargestellt

$$\text{Solargewinnfaktor} \quad S = \sum A_{\text{Apertur}} g = \sum A_{\text{Fe}} \cdot f_{\text{Fe-Ra}} \cdot g_{\text{diff,Fe}} + A_{\text{TWD}} \cdot f_{\text{TWD-Ra}} \cdot g_{\text{diff,TWD}} \quad [\text{m}^2] \quad /3/$$

und errechnen sich (70% TWD-Belegung, 30% Fenster) zu:

$$S = 3,36 \text{m}^2 \cdot 0,65 \cdot 0,341 + 7,84 \text{m}^2 \cdot 0,9 \cdot 0,62 = 5,12 \text{m}^2$$

Für den ausgewählten Raum wurde eine Massivkonstruktion angenommen, wie sie zumeist im Wohnungsbau üblich ist und für eine TWD-Wand geeignet ist. Die Verluste entsprechen einem Niedrigenergie- bzw. Passivhaus-Wärmedämmstandard, ein schlechterer Wärmedämmstandard ist somit unkritischer. Die internen Wärmegegewinne wurden mit 4 W/m<sup>2</sup> angesetzt, angelehnt an [WSVO95] mit 4,3 W/m<sup>2</sup>, einem eher zu hohen Wert. Die Innentür des Raums war stets geschlossen.

In der Variationsreihe 1 wurde nur die Raumtiefe und damit die Speichermasse variiert. Die Außenluftmenge (effektiv 10m<sup>3</sup>/h nach Wärmerückgewinnung) wie die internen Gewinne blieben absolut konstant.

	Tiefe	V	Q <sub>intGew</sub>	Speicherfähigkeit	n <sub>äq</sub>	max. operative Temperatur
	m	W/K	W	Wh/K	1/h	°C
V5	5	5,65	80	4801	0.20	22,9
V4	4	5,65	80	4060	0.25	23,3
V3	3	5,65	80	3319	0.33	23,9

Tabelle 7: Raumkenndaten und maximale operative Temperatur für die erste Variationsreihe

In der Variation 2 wurde die Raumtiefe und der Luftstrom wie die internen Gewinne entsprechend linear zur Tiefe geändert.

	Tiefe	V	Q <sub>intGew</sub>	Speicherfähigkeit	n	max. op. Temperatur
	m	W/K	W	Wh/K	1/h	°C
V5	5	5,65	80	4801	0.20	22,9
V4X	4	4,97	64	4060	0.20	23,4
V3X	3	4,29	48	3319	0.20	24,0

Tabelle 8: Raumkenndaten und maximale operative Temperatur für die zweite Variationsreihe

Randbedingungen: Passivhausstandard, Lüftungswärmerückgewinnung

(äquivalenter Luftwechsel  $n_{\text{äq}} = n_{\text{inf}} + (1 - \eta_{\text{WRG}}) \cdot n_{\text{mech}} = 0,1 + (1 - 0,8) \cdot 0,5 = 0,2/\text{h}$ , /4/

$g_{\text{diff,Fe}} = 0,34$ ,  $g_{\text{diff,TWD}} = 0,62$ .  $k_{\text{verg}} = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $k_{\text{FE-Ra}} = 0,61 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

### **Fazit:**

Für die meisten Raumgeometrien und Wärmedämmstandards geben sich in kalten sonnigen Winterperioden keine Überhitzungsprobleme. Lediglich in Extremfällen mit niedrigstem Wärmebedarf (Passivhausstandard mit guter Lüftungswärmerückgewinnung) kann es zu unbehaglichen Zuständen führen, wenn der Raum nur eine südorientierte Außenwand mit 30% Fenster und 70% TWD hat und weniger als ca. 4m tief ist. Die Überhitzungsgefahr ist - bei konstantem Fensterflächenanteil und TWD-Qualität - sehr stark von der Raumtiefe abhängig: Mit größerer Raumtiefe steigt der Lüftungswärmebedarf (in der Annahme linear), die Speichermasse fast linear, aber auch die internen Gewinne nehmen in der Annahme linear zu. Insgesamt sinkt die Überhitzungsgefahr. Nur der 3m tiefe Raum führt zu unbehaglichen Zuständen (operative Temperatur  $>23,7^{\circ}\text{C}$ ).

**Die Faustregel 2/3 TWD-Fläche, 1/3 Fensterfläche führt also normalerweise im Winter nicht zu Überhitzung.**

Somit ist der obige kritische Fall bei den üblichen Bedingungen auch wirklich konservativ abgeschätzt, es sei denn, es lägen deutlich höhere interne Lasten bzw. zusätzliche andere Wärmequellen vor oder es handelte sich um einen Leichtbau. Fälle mit besonderen zusätzlichen Gewinnen wie von einem Wintergarten oder von Heizungsräumen (s. Haus Donaueschingen) sind hier nicht berücksichtigt und müssen extra dynamisch simuliert werden.

Bei geöffneter Innentür ist auch bei einem 3m tiefen Raum keine Überhitzung zu erwarten (s. Kap. I.5). Hierbei strömen nach eigenen Berechnungen mit einem Strömungsmodell nach [ERL] Volumenströme von bis zu 368 m<sup>3</sup>/h durch eine Tür, es werden bis zu 333 W (bei 2,6 K Temperaturunterschied) übertragen. Damit wird der Flurbereich sozusagen thermisch an den Raum angekoppelt, die Flurspeichermasse wird hier quasi als unendlich angenommen, da die Flurtemperatur als konstant 20°C angesetzt wurde.

Mit dieser Verschiebemöglichkeit solarer Warmegewinne kann also auf ein extra Wärmeverteilsystem im Haus verzichtet werden. Trotzdem sollte die TWD-Wand m.E. für den Fall mit geschlossener Innentür dimensioniert werden, da die Überhitzungsgefahr in der Übergangszeit stark zunimmt, wenn auch der Flur wärmer ist.

Es ist anzunehmen, daß diese Gewinne bei geringen Verlusten eine große Rolle spielen und dann leicht zu Überhitzung führen (Meßergebnisse Donaueschingen).

### 1.6.2 Zur Regelung des Wärmeeintrags der TWD-Wand - Einfluß auf den Heizwärmebedarf und den Komfort im Winter

Hier wurde eine äußere Verschattungseinrichtung betrachtet. Südorientierte Räume mit richtig dimensionierter TWD-Wandfläche (s.o.) neigen lediglich in der Übergangszeit (und ohne Verschattung im Sommer) zu Überhitzung, wenn die Einstrahlung hoch und die Wärmeverluste gering sind. In diesem Fall tritt oft zunächst mittags bedingt durch den kritischen direkten Wärmeeintrag durch die Fenster Überhitzung auf. Abends und nachts sinkt die Raumtemperatur kaum ab, da die TWD Wärme in den Raum abstrahlt. Auf diesem hohen Niveau aufbauend steigen die mittäglichen Temperaturen am nächsten Tag weiter an u.s.w.. Die unbehaglichen Spitzen der PMV-Werte treten daher auch mittags auf (s. Bild 14e,f) und es gilt diese zu kappen. Erst nach längeren strahlungsreichen Perioden in der Übergangszeit kann sich das Niveau auf insgesamt zu hohe Temperaturen aufschaukeln und die TWD muß verschattet werden (im ES im März, Bilder 152b,c).

Zur Behebung des mittäglichen Diskomforts muß kurzfristig die Wärme abgelüftet oder müssen die Fenster verschattet werden, was beides i.d.R. manuell geschieht. Wenn dies nicht ausreicht, muß die TWD längerfristig verschattet werden, d.h. wenn voraussichtlich ist, daß der Wärmebedarf längere Zeit ohne TWD-Gewinne gedeckt werden kann. Nach Aussagen der Nutzer wird allerdings die TWD-Wärme auch genutzt, um in der Übergangszeit ohne Komfortverlust mehr Lüften zu können und damit die Luftqualität zu verbessern. Bei großen Luftwechseln verbessert sich die Luftqualität allerdings nur noch geringfügig.

Wilke [WILKE] schlägt eine Regelstrategie vor, welche die Raumtemperaturerhöhung auf Grund der direkten Gewinne zur Vorhersage der Wärmebedarfs heranzieht und damit die TWD-Verschattung regelt. Aber auch bei einer solchen Regelung kann es schon durch die Fenstergewinne zu Überhitzung kommen, auch ohne TWD-Gewinne, d.h. das kurzfristige Reagieren seitens des Nutzers ist notwendig. Damit wird aber das längerfristige Bedienen der TWD-Verschattung weniger dringend und kann auch manuell erfolgen, wodurch sich die Systemkosten reduzieren lassen. Energetisch und vom Komfort her ideal ist eine Lüftung, welche gerade soviel Wärme ablüftet, daß die obere Komfortgrenze von 23,7°C operative Temperatur im Winter (nach [ISO7730]) nicht überschritten wird. Die TWD-Wand ist hierbei immer unverschattet. Damit wird immer das maximal mögliche Potential genutzt. Dies funktioniert natürlich nur, wenn die Außentemperatur unter der Innentemperatur liegt, so daß ein Kühleffekt möglich ist. Hierzu wäre auch ein dezentrales Lüftungsgerät, evtl. mit

schaltbarer Wärmerückgewinnung, geeignet, welches entsprechend geregelt wird [REGLÜ]. Eine solche ideale Raumtemperaturregelung liegt den Untersuchungen zur TWD-Dimensionierung und der Nutzbarkeit der TWD-Gewinne zugrunde.

Folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse verschiedener Strategien gegen die Überhitzung:

	Heizwärme- bedarf	Über- hitzung	mittl T <sub>op</sub>	Einspa- rung	Einsparung pro m <sup>2</sup> <sub>TWD</sub>
Variante	kWh/m <sup>2</sup> a	h	°C	%	kWh/m <sup>2</sup> a
1. NEH, ohne TWD, 20±24°C (Heizen/Ablüften)	47,1	26	19,9	-	-
2. NEH, mit 70%TWD, 19.8±24°C, TWD unverschattet	28,2	917	21,1	-40,1	-48,2
3. NEH, mit 70%TWD, 19.8±24°C, Überhang 1m	30,5	534	20,9	-35,2	-42,3
4. NEH, mit 70%TWD, 19.8±24°C, Verschattung ab 23°C	29,0	139	20,7	-38,4	-46,2
5. NEH, mit 70%TWD, 19.8±24°C, Verschattung ab 22°C	29,4	49	20,4	-37,6	-45,2
6. NEH, mit 70%TWD, 19.8±25°C, TWD unverschattet	28,1	763	21,4	-40,3	-48,5
7. NEH mit 70% TWD, >19,8°C außentemperaturgeregelt (9°C)	29,8	97	20,4	-36,7	-44,1
8. NEH mit 70% TWD, >19,8°C außentemperaturgeregelt (10°C)	28,9	222	20,6	-38,6	-46,4

Tabelle 9: Heizwärmebedarf, Überhitzungsstunden und Energieeinsparung bei verschiedenen Regelungsstrategien für die TWD-Verschattung

Die Überhitzungsstunden beziehen sich nur auf die Heizzeit (1.10.-30.4. im NEH). Der Raum hat die geometrischen Abmessungen 4m·5m·2,5m mit einer 4m breiten Südfassade mit 30% Fenster und 70% TWD und einer 5m breiten opak (NEH) gedämmten Westfassade, der Flur ist 20°C warm, die weiteren Flächen werden adiabat gerechnet. Der Raum wird frei belüftet (0,7-facher stündlicher Luftwechsel).

Hierbei beträgt die Mindestlufttemperatur ohne TWD 20°C, mit TWD 19,8°C, um die unterschiedlichen Strahlungstemperaturen zu berücksichtigen. Diese sind bei TWD-Räumen **in Raummitte** im Mittel ca. 0,4°C höher als in opak (NEH) gedämmten Räumen, d.h. die operative Temperatur 0,2°C höher. Eine Regelung nach der operativen Temperatur ist heute nicht üblich, außerdem aufwendig, es wird also auch in der Simulation nach der Lufttemperatur geregelt.

Bei allen Strategien bis auf V6, V7 und V8 wurde ab 24°C Raumlufttemperatur abgelüftet, dies entspricht etwa der oberen Behaglichkeitsgrenze. In der 6. Variante betrug diese Temperatur 25°C, um den Einfluß dieser oberen Grenze abzuschätzen. Die Varianten V7 und V8 zeigen die Resultate einer Außentemperaturregelung (Schaltkriterium Außentemperatur-Tagesmittel > 9 bzw. 10°C ).

Die Überhitzungsstunden zeigen an, wie lange man ablüften muß und ist daher ein Maß für den Bedienaufwand der Fensterlüftung.

Man sieht, daß der Heizwärmebedarf bei einer Regelung nur über ideales Ablüften (V2/V6) am geringsten ist, allerdings sind die Unterschiede bei allen TWD-Varianten gering. Erfolgt das Ablüften manuell, so ist ein ständiger Bedienaufwand erforderlich. Der Überhang (1m) bewirkt eine gewisse Besserung in dieser Hinsicht, es muß weniger abgelüftet werden, wobei aber auch der Heizwärmebedarf um 8% ansteigt. Ein guter Kompromiß ist eine einfache Raumtemperaturregelung (Schaltpunkt 22 (V4)÷23°C(V5)) für die TWD-Rollo-Verschattung, so daß kaum mehr Überhitzung als im Fall ohne TWD stattfindet. Für diesen Raum liegt der Grenzwert optimal bei 22°C, zwar sind die Wärmegewinne leicht geringer als bei 23°C, dafür gibt deutlich weniger Überhitzungssituationen. Der Heizenergiebedarf ist dabei ca. 4% höher als im energetisch idealen Fall V2 ohne jegliche Verschattung.

Der Einfluß der oberen Grenztemperatur zum Ablüften mit 25°C (V6) anstatt 24°C in der 2. Variante auf den Heizwärmebedarf ist hiernach sehr gering. Der Bedienaufwand zum Ablüften wird etwas geringer als in Variante V2. Mit einer höheren Toleranz gegen hohe Temperaturen kann also praktisch keine Heizenergie eingespart werden.



Die Außentemperaturregelung ist etwas ungünstiger:als die Raumtemperaturregelung.

Sicher könnte auch durch einen prediktiven Regler Zahl der Überhitzungsstunden gegenüber dem unverschatteten Fall reduziert werden. Der Heizwärmebedarf muß allerdings über demjenigen liegen. Hierzu wurden keine Berechnungen durchgeführt. M.E. dürfte der Wärmebedarf auch im Bereich der übrigen Varianten 4 bis 8 liegen.

Da es auch in der Übergangszeit bei mittlerem Sonnenstand warm und sonnig werden kann, neigen sonnenstandsabhängige Verschattungssysteme wie die Prismenverglasung in dieser Zeit zur Überhitzung. Ist die Prismenverglasung auf niedrigere Sonnenstände eingestellt, so wird ein Teil der Sonnenenergie in der Übergangszeit nicht genutzt.

Bei den thermotropen Schichten besteht das Problem, daß die Temperatur dieser Schicht nicht unbedingt den Heizwärmebedarf des dahinterliegenden Raums repräsentiert. Zwar ist diese Temperatur über das Mischungsverhältnis der Komponenten einstellbar und kann auf die Eigenschaften des Raums abgestimmt werden, eine genaue Ausregelung der vielen Störgrößen ist allerdings nicht möglich.

Diese beiden neuen Systeme sollten eher auf den maximalen Bedarfsfall ausgelegt werden und die Überhitzung ggf. durch Ablüften und Fensterabschatten verhindert werden, wobei sicher öfter Diskomfort auftritt als im Fall mit frei betätigbarer und richtig genutzter Außenjalousie.

Die teuren elektrochromen Schichten lassen sich wie ein Rollo regulieren oder manuell bedienen, haben aber in der jetzigen Entwicklungsphase eine noch zu große Strahlungstransmission im verschattenden Zustand (40%), so daß der sommerliche Überhitzungsschutz nicht gegeben ist.

Zur Berechnung der neuen Systeme und genaueren Beurteilung fehlen hier die Rechenalgorithmen.

Zur näheren Bestimmung der Heizlast eines TWD-Raums im Vegrleich zu der eines NEH-Raums wurde die Jahresdauerlinie dieser Räume ermittelt. Aus Bild 24 ist zu ersehen, daß die maximale Heizlast im TWD-Raum nur wenig (8%) geringer ist als im NEH-Raum. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die TWD-Wand in klaren und sehr kalten Nächten nach trüben Perioden relativ kalt ist und die Heizung den Raum aufheizen muß. Daher können die Heizflächen in einem TWD-Raum auch nur geringfügig kleiner ausgelegt werden als im NEH-Raum.

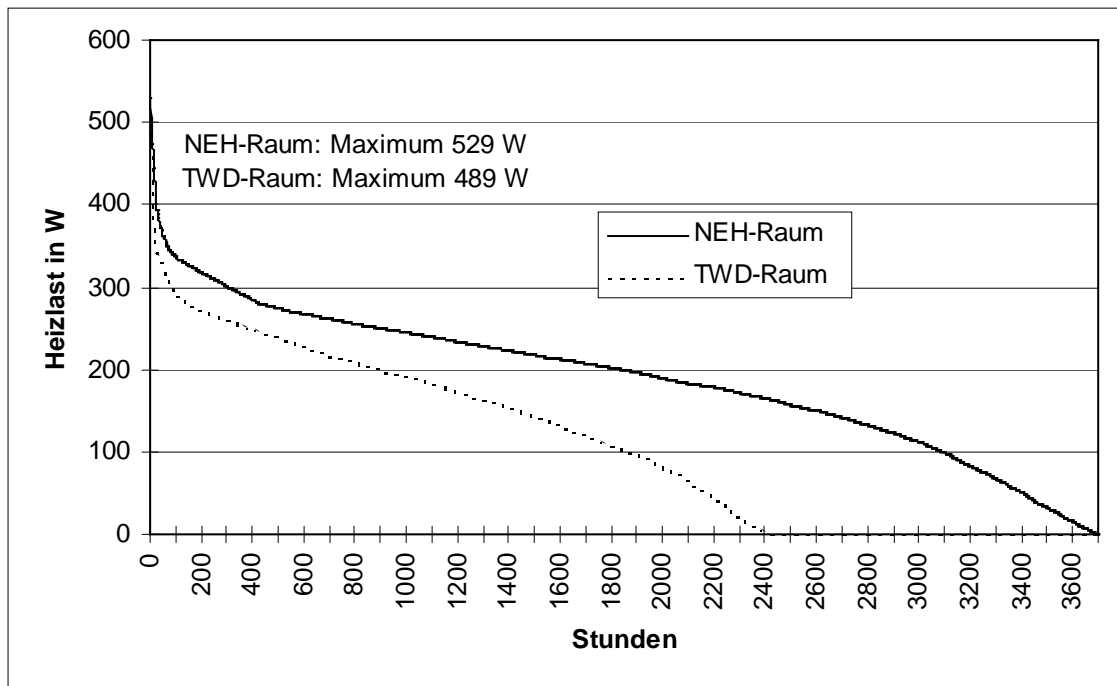


Bild 24: Jahresdauerlinie der Heizlast eines NEH-Raums und eines TWD-Raums  
(Randbedingungen siehe Text)

Aus Bild 24 ist auch zu ersehen, welcher großen Einfluß die TWD auf die Dauer der Heizperiode hat: In obigem Fall verkürzt sich die Heizperiode in der Gesamtdauer um 1/3, wobei aus den Simulationsergebnissen abzulesen ist, daß auch in den Monaten März und April noch einzelne Heiztage auftreten.

### 1.6.3. Zur Regelung des Wärmeeintrags der TWD-Wand - thermisches Gebäudeverhalten im Sommer

Hierzu wurden die Raumlufttemperaturen des obigen Raums im Sommer bei verschiedenen Wärmedämmstandards bzw. TWD-Verschattungsstrategien berechnet:

- nach NEH-Standard gedämmt
- nach Passivhausstandard gedämmt
- im Süden mit TWD (70%) gedämmt, per Außenjalousie ganz verschattet
- im Süden mit TWD (70%) gedämmt, per kleinem Überstand (1m) verschattet
- im Süden mit TWD (70%) gedämmt, per großem Überstand (1,4m) verschattet

Das Fenster hat in allen Varianten einen 1m-Überstand, der die direkte Einstrahlung gut reduziert.

Die Variante mit ganz verschatteter TWD (geschlossene Jalousie) ist am wenigsten überhitzungsgefährdet, die Varianten ohne TWD in NEH-Standard und in Passivhausstandard geringfügig mehr.

Kriterium der Überhitzung sind hier eine operative Temperatur über 24,6°C (10% Unzufriedene bei leichter Bekleidung 0,5 clo, leichter Aktivität 1,2 met nach [ISO7730]).

Deutlich höher ist die Überhitzungsgefahr bei den Varianten mit dem TWD-Überhang. Hier reicht schon die diffuse Einstrahlung aus (größerer Überstand), bei kleinerem Überstand lassen die Direktanteile im August/ September den Raum deutlich (bis 4 K) wärmer als die Referenz ohne TWD werden.

Variante	Überhitzungsstunden (op. Temp. >24,6°C)
NEH ohne TWD	48
Passivhaus ohne TWD	111
NEH+TWD, Rollo immer geschlossen	38
NEH+TWD, kl. Überhang (1m)	2310
NEH+TWD, gr. Überhang (1,4m)	1868

Tabelle 10: Zahl der Überhitzungsstunden bei unterschiedlichem Wärmedämmstandard bzw. TWD-Verschattungseinrichtung

Im Gegensatz zum Winterfall kann die Wärme hier nicht mehr durch Ablüften abgeführt werden, es tritt wirklich Überhitzung auf.

Da die mittlere Außentemperatur über längere Perioden unter der maximalen operativen Temperatur von 24,6°C liegt, findet im Mittel ein Wärmestrom nach außen statt, der durch die Wärmedämmung reduziert wird. Damit ist die größere Überhitzungsneigung besser opak gedämmter Versionen erklärbar. Die immer ganz verschattete TWD-Version besitzt einen k-Wert bei 0,57 W/m<sup>2</sup>K, d.h. einen geringeren Wärmedämmwiderstand und ist daher weniger überhitzungsgefährdet als die vorigen Varianten. An sehr heißen Sommertagen liegt die mittlere Außentemperatur auch um diese obere Behaglichkeitsgrenztemperatur, so daß sich bei verschwindender Temperaturdifferenz diese Varianten kaum unterscheiden.

Die Versionen mit einer durch einen Überhang verschatteten TWD erhalten noch soviel Energie, daß sich der Wärmestrom oft umkehrt, wodurch die Überhitzungsneigung erklärt werden kann. Des weiteren wird im Winter die Einstrahlung gemindert und damit der Ertrag geschmälert (s.o.), so daß eine qualitativ hochwertige TWD wie die untersuchte nicht mit einem Überstand zu empfehlen ist.

Es ist somit die große Empfindlichkeit eines TWD-Systems gegenüber der geringen Einstrahlungsmengen wie der diffusen Einstrahlung zu erkennen. Großflächige TWD-Systeme sollten daher im Sommer abzuschatten sein, die Verschattung sollte im geschlossenen Zustand einen g-Wert von weniger als 10% haben.

#### 1.6.4 Zur Regelung der Zusatzheizung

Die Regelung der Zusatzheizung sollte in jedem Fall raumweise nach der Raumlufttemperatur oder der operativen Temperatur geschehen, um den unterschiedlichen Wärmebedarf zu berücksichtigen. Dieser tritt aufgrund unterschiedlicher Orientierung bzw. Fremd- oder Eigenverschattung von TWD-Flächen sowie durch die Nutzung (interne Wärmegewinne) auf. Eine unnötige Zusatzheizung erhöht den Heizwärmebedarf und auch die Überhitzungsgefahr, so daß es auch im Winter zu unkomfortablen Temperaturen kommen kann (s. Haus Abrecht, Bilder 18b,c).

Nach [EISENMANN] ist gerade in gut wärmegeprägten Gebäuden der Einfluß der Raumtemperaturregelung und der Trägheit des Heizsystems (zusammengefaßt im Bereich „Wärmeübergabe“) ein sehr wichtiger Verlustfaktor neben den bisher in Rechnung gestellten Verlusten im Wärmeerzeuger und in der Wärmeverteilung. Im Bereich Wärmeübergabe können insbesondere in gut wärmegeprägten Gebäuden bis zu 35% höhere Verluste gegenüber dem Fall einer idealen Raumtemperaturregelung auftreten, wenn hierbei die inneren und äußeren Wärmegewinne nicht richtig genutzt werden können. Es macht also wenig Sinn, eine teure TWD zu installieren, wenn das Heizsystem nicht darauf angepaßt ist. Natürlich treten in opak gedämmten NEH auch solche Verluste auf, bei TWD-Räumen kommt aber zu den Fenstergewinnen der Anteil der TWD-Gewinne hinzu, der Teillastfall tritt häufiger ein, den die Regelung beherrschen können muß.

Eine Regelung nach der operativen Temperatur wäre denkbar, um die Strahlungstemperatur zu berücksichtigen. Die TWD-Wand gibt vor allem am Abend nach strahlungsreichen Tagen

viel Strahlungswärme ab, in trüben Perioden treten aber auch Strahlungsverluste zur TWD-Wand auf. Andererseits ist der Einfluß der TWD in Raummitte nicht mehr groß, die Strahlungstemperatur liegt nur noch wenige Zehntelgrad über bzw. im Fall ohne Strahlungsausgleich der Fenster und im Heizbetrieb mit hohem Konvektivanteil auch etwas unter der Lufttemperatur. Daher genügt m.E. eine Lufttemperaturregelung (einfacher Sensor), der Sollwert kann ggf. niedriger als in opak gedämmten Gebäuden eingestellt werden.

Eine Luftheizung ist aufgrund der fehlenden Einzelraumregelung also weniger für TWD-Räume geeignet, auch wenn die schnell reagierende konvektive Wärmeübergabe gut zur Strahlungswärmeabgabe der TWD-Wand paßt.

Die Platzierung der Heizflächen sollte wie im NEH abhängig von der Fensterqualität erfolgen, da die Oberflächentemperaturen der TWD-Wand in längeren trüben Perioden im Bereich der derjenigen einer opaken Dämmung liegen: Zwar treten bei den neuen wärmeschutzverglasten Fenster keine Komfortprobleme mehr bzgl. einem Strahlungsungleichgewicht auf, bei raumhohen Fenstern mit k-Werten über  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  sollte nach [NEFF] eine Kompensation des Kaltluftabfalls stattfinden, d.h. es sollten Heizflächen unter dem Fenster platziert werden.

#### 1.6.5 Zur Dimensionierung der Zusatzheizung

Ein TWD-Raum reagiert empfindlicher auf die solare Einstrahlung als auf die Außenlufttemperaturschwankungen. Daher sind es auch nicht die sehr kalten Wintertage, die in Hochdrucklagen auch klar und sonnig sind, sondern die weniger kalten trüben Perioden, in welchen die maximalen Heizlastwerte erreicht werden [VOSS]. Die Temperaturen liegen dann in Deutschland meist bei einigen wenigen °C unter Null, in Freiburg sind es minimal ca.  $-2^\circ\text{C}$ . Zur Dimensionierung könnte man die Minimaltemperaturen einer längeren Trübperiode heranziehen, so daß ein quasistationärer Zustand eingetreten ist, dann genügt auch ein einfaches statisches Rechenverfahren wie die DIN 4701, Teil 1 [DIN4701T1]. Die Daten für die Außenlufttemperatur müßten statistisch abgesichert werden. Die TWD-Wand kann dann mit ihrem effektiven k-Wert für die trübe Periode gerechnet werden (s. Kapitel I.8), wobei alle Wärmegewinne als nutzbar angenommen werden können.

Beispielsweise beträgt der effektive k-Wert einer 12cm dicken TWD-Struktur in einer längeren trüben Periode im eingeschwungenen Zustand ca.  $0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$  (incl.

Rahmenverluste und Verschmutzung, ohne äußere Verschattung, bei  $0^\circ\text{C}$  Außentemperatur,  $230 \text{ Wh/m}^2\text{d}$ , errechnet mit dem TRNSYS-Simulationsmodell).

### 1.6.6 Die Nutzbarkeit der TWD-Gewinne

Die Wärme einer TWD-Wand ist nie zu 100% nutzbar. Derjenige Anteil der TWD-Wärme, der zu einer Raumtemperatur über der unteren Behaglichkeitsgrenze führt, ist nicht nutzbar. Z.T. wird diese Wärme jedoch in die Baumassen eingespeichert und später der Raumluft wieder zugeführt.

Für denselben Raum wie oben (4m x 5m x 2,5m) wurde die TWD-flächenspezifische Heizenergieeinsparung ermittelt - abhängig vom Verlustfaktor  $v$ . Nach Bild 25 zeigt sich, daß diese Einsparung drastisch sinkt, wenn anstatt einem Wärmedämmstandard nach der WSVO'95 (mit 2. Außenwand) ein NEH-Standard vorausgesetzt wird. Maßgeblich für den Verlustfaktor  $v$  ist dann die Fensterverglasungs- und -rahmenqualität sowie die effektive Luftwechselrate. Bei der TWD-Wand wurden zwar die Rahmenverluste und die Verschmutzung berücksichtigt (zusammen Faktor 0,75), nicht aber eine äußere Verschattung durch den Horizont. Die eingesparte Energie ist stark von der Belegungsichte (hier 9 bzw. 70% TWD) sowie der thermischen Ankopplung an den Flur bestimmt. Die Nutzungszeit erstreckte sich von 7 bis 22 Uhr mit inneren Lasten von 4 W/m<sup>2</sup>, der Luftwechsel betrug 0,7/h (WSVO95 und NEH) bzw. 0,2/h als effektiver Luftwechsel im Passivhaus.

Während bei der WSVO'95-Version mit 2. Außenwand noch 60 bis 95 kWh/m<sup>2</sup><sub>TWDa</sub> eingespart werden können, sind es beim NEH-Standard nur noch 35 bis 80 kWh/m<sup>2</sup><sub>TWDa</sub> und beim Passivhaus 2 bis 70 kWh/m<sup>2</sup><sub>TWDa</sub>. Der obere Wert ist eher theoretisch und gilt, wenn auch in der Übergangszeit die TWD-Wärme durch geöffnete Innentüren in Flurbereiche verschoben und dort auch genutzt werden kann. Sehr gut gedämmte Südzimmer mit 70% TWD sind dann über das Jahr gerechnet Gewinnräume für die anderen Bereiche. Aber auch der Flur wird in der Übergangszeit irgendwann auf 20°C aufgewärmt sein, außerdem ist der Flur kein Daueraufenthaltsraum und braucht nicht so warm zu sein. Insbesondere für das Passivhausversion trifft ersteres zu, so daß die Heizwärmeeinsparung aufgrund geringer Nutzbarkeit eher im unteren Bereich liegen wird. Bei einer von Süden abweichenden Orientierung bzw. Horizontverschattung ist auch ein Mehrverbrauch der TWD-Version möglich (s. Kap. I.5).

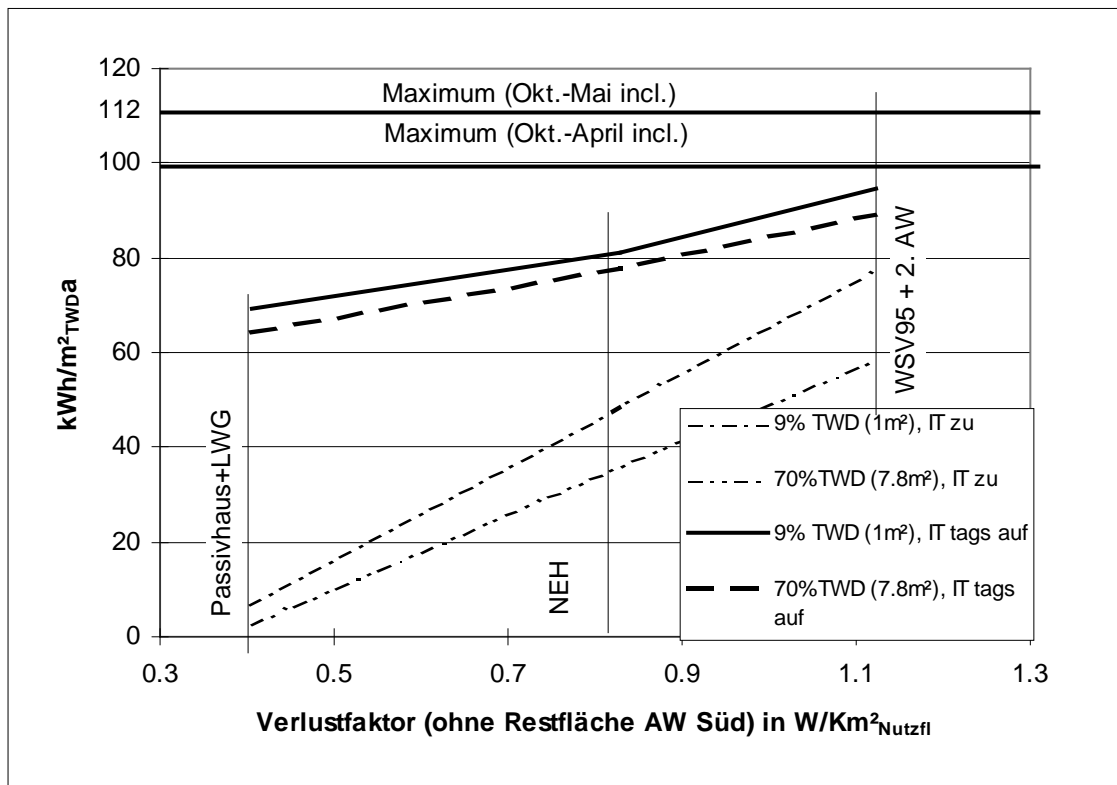


Bild 25: Heizeregieeinsparung durch TWD bei verschiedenem Wärmedämmstandard

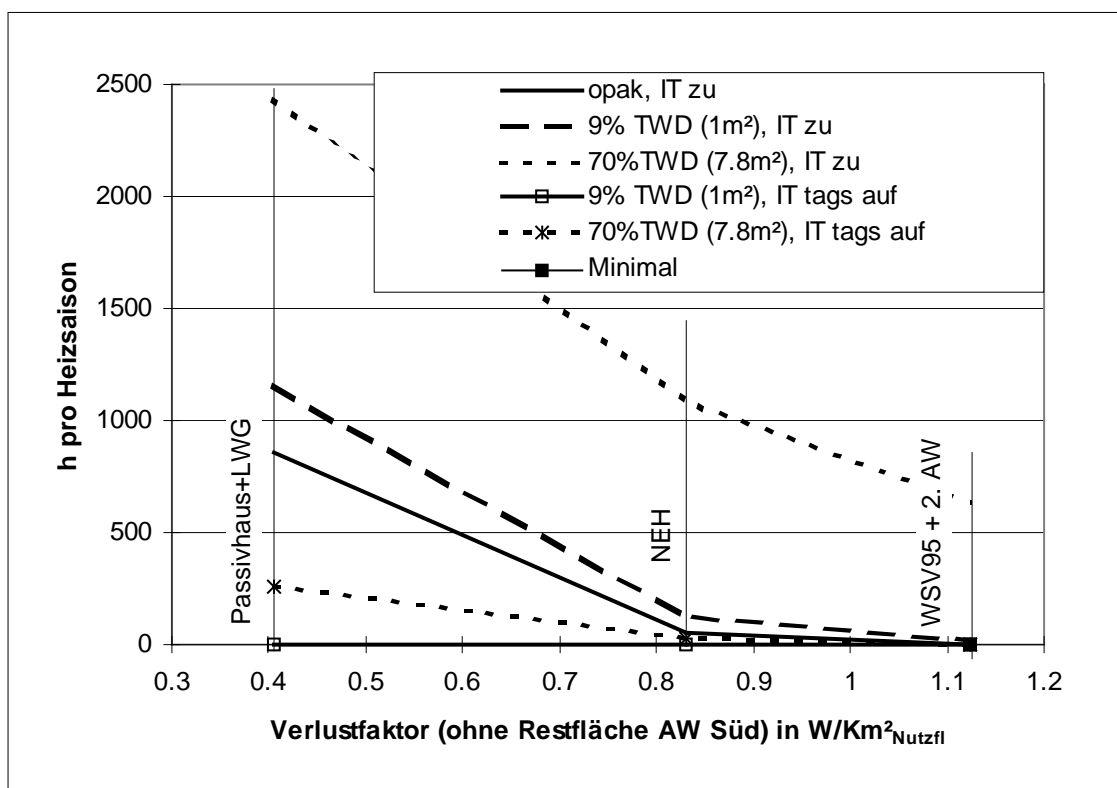


Bild 26: Überhitzungsstunden bei TWD-Anwendung (Randbedingungen s. Text)

Zwar beträgt in der NEH-Version der relative Anteil der TWD-Wärme an der Heizenergie bis zu 55%, wichtig für die Kostenrechnungen sind aber die eher niedrigen flächenspezifischen Absolutwerte, d.h. die Kosteneffektivität wird sehr niedrig (s. Kap.I.9).

Theoretisch können maximal ca. 100 kWh/m<sup>2</sup>a eingespart werden, wenn die Nutzbarkeit der TWD-Gewinne in der Heizsaison von Oktober bis April 100% beträgt. Dabei wurde von einer Innenlufttemperatur von mindestens 20°C ausgegangen, außerdem von einer durch den Horizont unverschatteten und durchschnittlich verschmutzten TWD-Fassade nach Süden.

Der Überhitzungsgefahr kann durch geöffnete Innentüren wirksam begegnet werden, so daß die Zeiten mit zu hohen Temperaturen deutlich unter 500 h / Heizsaison gesenkt werden können. Der extreme Fall mit 70% TWD und geschlossener Innentür ist wohl eher hypothetisch (s. Bild 26).

Der Grund für diese niedrigen Einsparwerte im Heizenergiebedarf liegen zum einen im deutschen Wetter mit seinen milden strahlungsreichen Übergangszeiten und kalten strahlungsarmen Wintern. Damit sind die Gewinne aus der Übergangszeit nur teilweise nutzbar, je besser das Gebäude wärmegeklämt ist, desto weniger. Nach einer Rechnung mit dem strahlungsreichen und kalten Testreferenzjahr 9 (südliches Voralpenland 600-1000m) sind ca. 16 kWh/m<sup>2</sup><sub>TWD</sub> höhere Heizenergieeinsparwerte zu erwarten. In alpinen Lagen sind sicher noch höhere Einsparwerte möglich, wenn auch im Sommer oft geheizt werden muß. Damit wird die TWD für strahlungsreichere und kältere Orte (z.B. in der Schweiz, in Norditalien) interessant.

An den häufigen strahlungsreichen Übergangszeittagen muß in einem NEH auf Grund der direkten Gewinne und der geringen Wärmeverluste nur morgens und selten abends geheizt werden. Das Wärmebewahrungsvermögen des Gebäudes ist sehr groß (Zeitkonstanten von ca. 4 bis 28 Tagen im ES). In den meist trüben Winterkernmonaten November bis Februar sind die Nettogewinne gering. Der effektive k-Wert für eine trübe Winterperiode kann als Maß für die Eignung eines TWD-Systems herangezogen werden, da vor allem in dieser Zeit die großen Wärmeverluste auftreten. Er kann mit dem k-Wert einer opaken Dämmung eines NEH verglichen werden. Je besser der Wärmedämmstandard eines Hauses ist, desto wichtiger ist obiger effektiver k-Wert einer trüben Periode, da dann in der Übergangszeit kaum noch Wärmebedarf herrscht.



Im Vergleich passivsolarer Systeme wird das Maximum der Wärme bei direkter Einstrahlung durch die Fenster wie bei Wintergärten im Moment der Einstrahlung eingebracht, bei TWD-Systemen nach 6 bis 9 Stunden und bei Luftkollektoren mit Geröllspeicher oder Bauteilspeicher nach 3 bis 4 Tagen. Aktive wasserführende Solarsysteme mit Wasserspeicher können die Wärme bis zu Monaten speichern und dann kontrolliert abgeben. Zu den großen Zeitkonstanten von NEH (4 Tage) und Passivhäusern (bis 28 Tage) passen also eigentlich nur die beiden letztgenannten Systeme, um trübe Wetterperioden zu überbrücken, wobei deren Kosten und Platzbedarf berücksichtigt werden müssen.

Das energetisch optimierte Energieautarke Solarhaus erreicht einen minimalen Heizwärmebedarf von 2,6 bis 5,1 kWh/m<sup>2</sup><sub>WFA</sub> [VOSS]. Dies liegt zum einen an der Halblinsenform des Gebäudes mit großen TWD-Flächen nach Süden wie auch an seiner sehr großen Trägheit, die sich aus der guten Wärmedämmung und Lüftungswärmerückgewinnung sowie der großen Speicherkapazität ergibt: Es ist keine Trittschalldämmung vorhanden, die Decken bestehen aus 25cm Beton. Den großen TWD-Flächen stehen also auch große Raummassen gegenüber, so daß hohe Wärmegewinne pro m<sup>2</sup> TWD erzielt wurden. Außerdem wurde erst ab einer Lufttemperatur unter 18°C bei Anwesenheit und nur die mit Zuluft versorgten Räume geheizt. Diese Heizgrenztemperatur hat einen großen Einfluß auf den Heizwärmebedarf. Bei einer solchen von 20°C und Beheizung aller Räume wären schon ca. 10 kWh/m<sup>2</sup><sub>WFA</sub> [VOSS] zuzuheizen, dies liegt im Bereich der Passivhäuser. Verglichen mit anderen Gebäuden ist dies natürlich immer noch ein sehr kleiner Wert.

Zwar entspricht die Außenwandkonstruktion der opaken Bauteile dem Passivhausstandard, jedoch liegt nach Simulationsrechnungen [VOSS] der Wärmebedarf bei einer rechteckigen Form mit der Hauptfassade nach Süden um 45% höher. Andere rechteckige Formen/Ausrichtungen führen zu noch höheren Bedarfswerten, lediglich die Dreieck- und Halbrundformen kommen auf ähnliche Werte. Die sehr massiven Betondecken sind ebenfalls kaum üblich und die Investitionskosten insgesamt sehr hoch. Daher werden sich auch solche niedrigen Heizwärmebedarf nicht so ohne weiteres reproduzieren lassen.

Geeigneter da preisgünstiger bei ebenso niedrigem Wärmebedarf erscheinen kompaktere Formen z.B. als Reihenhäuser mit tiefen Räumen und kleinflächigen südorientierten TWD-Wänden.

## 1.7 Zum Einfluß der Luft- und Strahlungstemperatur auf den Komfort

Mit einem Programm zur Berechnung der Strahlungstemperatur [RAYTEMP] wurde der Einfluß von Luft- und Strahlungstemperatur in einem NEH-Raum und einem TWD-Raum untersucht. Der Raum ist 4m x 5m x 2,5m groß und besitzt eine 4m x 2,5m große Südwand mit 60% opaker Dämmung bzw. TWD und 40% Fensterfläche sowie eine 5m x 2,5m große opak gedämmte Westwand (k-Wert 0,3 W/m<sup>2</sup>K). Es wird mit einer reinen Luftheizung, d.h. ohne Strahlungskompensation durch einen Heizkörper gerechnet. Außen ist es 0°C kalt und dunkel. Es wurde die Lufttemperatur so variiert, daß sich in den beiden untersuchten Fällen opake Dämmung und TWD dieselbe operative Temperatur einstellt, d.h. bei geringen Luftgeschwindigkeiten <0,2m/s auch der selbe thermische Komfort vorliegt.

Raum	Lufttemperatur [°C]	Strahlungstemperatur [°C]	operative Temperatur [°C]
NEH-Raum	20,2	19,74	19,97
TWD-Raum	19,9	20,04	19,97

Tabelle 11 Luft-,Strahlungs- und operative Temperaturen in der Mitte eines NEH- und eines TWD-Raums in der Nacht nach einem strahlungsreichen Tag.

Nach Tabelle 11 muß, um in Raummitte eine operative Temperatur von knapp 20,0°C zu erreichen, im NEH-Raum die Raumlufttemperatur um 0,2°C höher als die Strahlungstemperatur liegen. Im TWD-Raum genügt eine Lufttemperatur von 19,9°C, wenn der Tag strahlungsreich war (TWD-Wandtemperatur 29°C). Die Unterschiede sind also relativ gering und auch nur an Abenden strahlungsreicher Tage zu verzeichnen. In mehrtägigen trüben Perioden haben gute TWD-Wände Innenoberflächentemperaturen wie opak gedämmte Wände, die Unterschiede sind dann - je nach vergleichende opake Dämmung - minimal.

Während in Fensternähe die operativen Temperaturen beider Räume gleich sind, ist es vor der TWD-Wand in 25cm Entfernung (Diskretisierungsmaß) 1 K wärmer als vor der opak gedämmten Außenwand.

Man kann also im TWD-Raum an strahlungsreichen Tagen die Lufttemperatur um 0,3 K absenken, so daß die selbe operative Temperatur und damit die selbe Behaglichkeit nach Fanger (s. Kap. I.1.2) vorliegt wie im NEH-Raum. Über die Heizperiode gemittelt liegt der

Wert eher bei 0,2 K, wenn auch die trüben Tage berücksichtigt werden (s. Kap. I.6.2). Somit kann Heizwärme eingespart werden, wenn das Heizsystem eine Einzelraumregelung besitzt und die Raumtemperatur so genau eingestellt werden kann. Dies ist m.E. nur mit elektronischen Thermostatventilen mit integrierendem Anteil möglich.

## 1.8 Energetischer Vergleich zwischen opaker Wand, Fenster und TWD

Für einen energetischen Vergleich zwischen opaker Wand, Fenster und TWD an einer Südfassade wurden für ausgewählte Konstruktionen die Energiebilanzen erstellt und die Wärmegewinne mit einem Nutzungsgrad bewertet. Dies wurde für 3 verschiedene Nutzungsgrade durchgeführt, welche die Nutzbarkeit der Gewinne bei idealer Nutzung ( $N=1$ ), in NEH ( $N=0,89$ ) und in Passivhäusern ( $N=0,72$ ) näherungsweise wiedergeben. Diese Nutzungsgrade basieren auf Simulationsrechnungen. Bei allen Bauteilen ergibt sich der (Nutzungsgrad-unabhängige) flächenspezifische Wärmeverlust zu

$$q_{\text{verl}} = k \text{ HGT} \quad [\text{kWh/m}^2\text{a}] \quad /5/$$

Hgh sind die Heizgradstunden in kKh, für die verkürzte Heizperiode des TRY05 (Okt.-April) sind das 80,9 kKh.  $k$  ist der Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils.

Bei den Fenstern wurde nach folgender Beziehung, aber ohne Berücksichtigung der Einbauverluste der Gesamt- $k$ -Wert berechnet :

$$k_{\text{Fe}} = (k_v A_v + k_{\text{Ra}} A_{\text{Ra}} + \Psi_{\text{Glas}} l_{\text{Glas}} + \Psi_{\text{Glas}} l_{\text{Glas}}) / A_{\text{Fe}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad \text{mit } A_{\text{Fe}} = A_v + A_{\text{Ra}} \quad /6/$$

mit	$A_{\text{Fe}}$	Rohmaß des Fensters (Maueröffnungsmaß)
	$A_{\text{Ra}}$	Fläche des Fensterrahmens
	$k_{\text{Fe}}$	$k$ -Werte des gesamten Fensters
	$k_{\text{Ra}}$	$k$ -Wert des Fensterrahmens
	$k_v$	$k$ -Wert der Verglasung im ungestörten Bereich
	$l_{\text{Ein}}$	Einbauumfang
	$l_{\text{Glas}}$	Glasumfang
	$\Psi_{\text{Ein}}$	linearer Verlustkoeffizient durch die Einbausituation in der Laibung
	$\Psi_{\text{Fe}}$	linearer Verlustkoeffizient der zusätzlichen Fensterverluste (gegenüber reiner Verglasung)
	$\Psi_{\text{Glas}}$	linearer Verlustkoeffizient durch die Verluste am Glasrand

Die Maße des Fensters waren 1,25mx1,25m mit einer 1mx1m großen Verglasung.

Die Nettowärmebilanz des Fensters läßt sich wie folgt berechnen [FEIST3]:

$$q_{\text{Fe,netto}} = k_{\text{Fe}} \cdot \text{Hgh} - g_0 \cdot f_{\varphi} \cdot f_{\text{verschm}} \cdot f_{\text{verscha}} \cdot f_{\text{V}} \cdot I \quad [\text{kWh/m}^2\text{a}] \quad /7/$$

daraus errechnet sich die Heizenergiebedarf des Fensters zu

$$q_{\text{HEB,F}} = k_{\text{F}} \cdot \text{Hgh} - g_0 \cdot f_{\varphi} \cdot f_{\text{verschm}} \cdot f_{\text{verscha}} \cdot f_{\text{V}} \cdot I \cdot N \quad [\text{kWh/m}^2\text{a}] \quad /8/$$

$g_0$	g-Wert bei 0° Einfallswinkel
$f_{\varphi}$	Winkelabhängigkeitskorrektur 85%
$f_{\text{verschm}}$	Verschmutzungsfaktor (hier 95%)
$f_{\text{verscha}}$	Verschattungsfaktor (hier 89%)
$f_{\text{V}}$	Verglasungsanteil = $A_{\text{V}}/A_{\text{Fe}}=64\%$
$\text{Hgh}$	Heizgradstunden (hier 80,9 kWh für verkürzte Heizperiode Okt.-April)
$I$	solare Einstrahlung auf Fensterebene im Betrachtungszeitraum (360 kWh/m <sup>2</sup> a)
$N$	Nutzungsgrad der Wärmegewinne

Für die TWD gilt für der Netto-Wärmegeinn der TWD-Wand (negativ =Gewinn):

$$q_{\text{TWD,netto}} = k_{\text{TWD,ges}} \cdot \text{Hgh} - g_{\text{diff}} \cdot f_{\text{Verschm}} \cdot f_{\text{Verscha}} \cdot f_{\text{Ra-Verl}} \cdot f_{\text{Apert}} \cdot \frac{k_{\text{TWD,ges}}}{k_0} \cdot I \quad [\text{kWh/m}^2] \quad /9/$$

und der Heizenergiebedarf der TWD

$$q_{\text{HEB,TWD}} = k_{\text{TWD,ges}} \cdot \text{Hgh} - g_{\text{diff}} \cdot f_{\text{Verschm}} \cdot f_{\text{Verscha}} \cdot f_{\text{Ra-Verl}} \cdot f_{\text{Apert}} \cdot \frac{k_{\text{TWD,ges}}}{k_0} \cdot I \cdot N \quad [\text{kWh/m}^2] \quad /10/$$

$$q_{\text{HEB,TWD}} = k_{\text{TWD,ges}} \cdot \text{Hgh} - \eta \cdot I \cdot N \quad [\text{kWh/m}^2] \quad /11/$$

$$\text{mit dem Systemwirkungsgrad } \eta = g_{\text{diff}} \cdot f_{\text{Verschm}} \cdot f_{\text{Verschatt}} \cdot f_{\text{Ra-Verl}} \cdot f_{\text{Apert}} \cdot \frac{k_{\text{TWD,ges}}}{k_0} \quad [-] \quad /12/$$

und dem maximalen effektiven k-Wert für N=1:

$$k_{\text{eff,max}} = \frac{q_{\text{TWD,netto}}}{\text{Hgh}} = k_{\text{TWD,ges}} - \eta \cdot \frac{I}{\text{Hgh}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad /13/$$

mit

$f_{\text{Apert}}$	= 0,9
$f_{\text{Ra-Verl}}$	= 0,79
$g_{\text{diff}}$	= 0,63
$k_{\text{TWD,ges}}$	= 0,57 W/m <sup>2</sup> K
$k_0$	= 0,72 W/m <sup>2</sup> K

Nach den mit den Meßergebnissen am Haus Abrecht validierten Simulationsmodell beträgt der Faktor für Verschmutzung und Rahmenverluste zusammen  $f_{\text{Verschm}} \times f_{\text{Ra-Verl}}=0,75$ . Bei einem angenommenen Verschmutzungsfaktor von 0,95 errechnet sich dann derjenige für die Rahmenverluste zu 0,79. Der Verschattungsfaktor von 0,89 entspricht einer leichten Verbauung des Horizonts und ist eher niedrig angesetzt.

### Vergleich: Energiebedarf verschiedener Außenbauteile an einer Südfassade

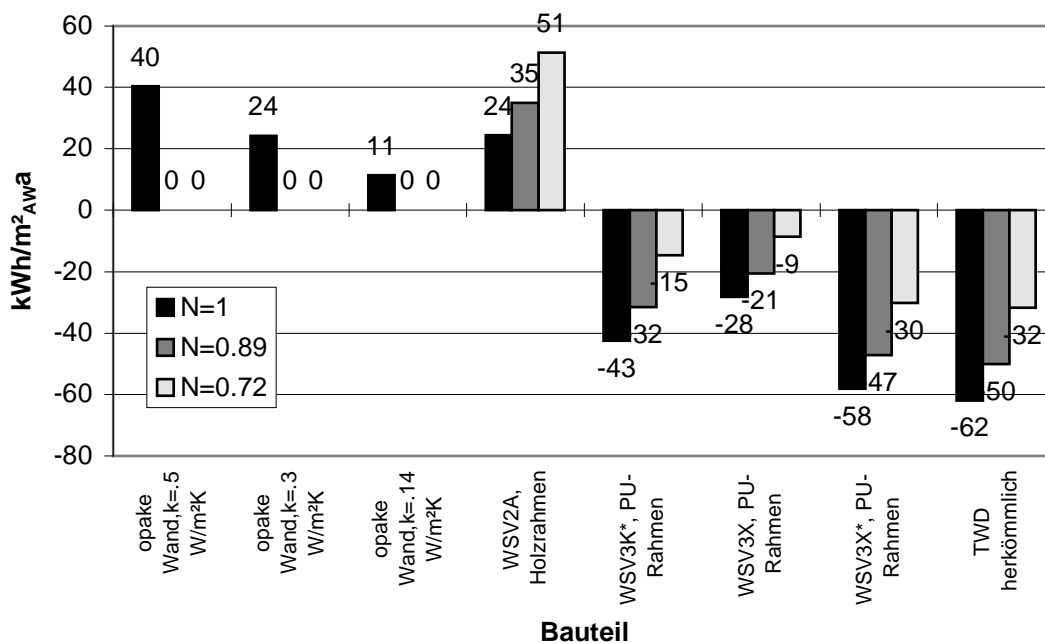


Bild 27: Energetischer Vergleich zwischen verschiedenen Außenbauteilen (Südfassade)

Die Bezeichnungen sind:

- WSV2A, Holzrahmen: Zweifachwärmeschutzverglasung mit Argon und Holzrahmen ( $k_V=1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $k_R=1,58 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g_0=0,58$ ,  $\psi_{\text{Glas}}=0,06 \text{ W/mK}$ )
- WSV3K\*-PU-Rahmen: Dreifachwärmeschutzverglasung mit Krypton und PU-Rahmen ( $k_V=0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $k_R=0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g_0=0,60$ ,  $\psi_{\text{Glas}}=0,03 \text{ W/mK}$ )
- WSV3X- PU-Rahmen: Dreifachwärmeschutzverglasung mit Xenon und PU-Rahmen ( $k_V=0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $k_R=0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g_0=0,42$ ,  $\psi_{\text{Glas}}=0,03 \text{ W/mK}$ )
- WSV3X\* PU-Rahmen: Dreifachwärmeschutzverglasung mit Xenon und PU-Rahmen ( $k_V=0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $k_R=0,50 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g_0=0,60$ ,  $\psi_{\text{Glas}}=0,03 \text{ W/mK}$ )

\* mit spezieller Beschichtung

Es ergibt sich für die TWD ein Systemwirkungsgrad  $\eta$  von 0,30 und bei  $N=1$  ein effektiver  $k$ -Wert für die verkürzte Heizperiode von  $k_{\text{eff}}=-0,76 \text{ W/m}^2\text{K}$  entsprechend einem Wärmegewinn von  $62 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Zusammen mit den vermiedenen Verlusten einer opaken Wand mit  $k_{\text{AW}}=0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$  sind dies  $86 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  an maximaler Heizenergieeinsparung.

Ohne die äußere Verschattung betragen der Systemwirkungsgrad 0,34, der effektive maximale ( $N=1$ )  $k$ -Wert  $-0,93 \text{ W/m}^2\text{K}$ , der Wärmegewinn  $75 \text{ kWh/m}^2$ , die Energieeinsparung  $99 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ .

Mit dem Monat Mai ergäbe sich eine maximale Einsparung von  $113 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  ( $N=1$ ). Bei den Fenstern mit PU-Rahmen ist die Verglasung  $3\text{cm}$  von der Dämmung überdeckt, so daß der  $\psi_{\text{Glas}}$ -Wert reduziert ist.

Die gesamten Ergebnisse sind in Bild 27 dargestellt. Wie man sieht, stellen die opaken Bauteile je nach  $k$ -Wert Verlustflächen mit Jahresverlusten von  $40$ ,  $24$  und  $11 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  dar. Während die Zweifachwärmeschutzverglasungen noch Verlustflächen sind, können Dreifachwärmeschutzverglasungen Energiegewinne einbringen, je nach Nutzungsgrad bis zu  $32 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  im NEH (WSV3K\*+PU-Rahmen). Dabei kann durch Einsatz eines solchen dreifachwärmeschutzverglasten anstatt eines zweifachwärmeschutzverglasten Fensters (WSV2A+ Holzrahmen) etwa genausoviel Heizenergie eingespart werden wie durch die Verwendung einer TWD anstatt einer opaken Wärmedämmung ( $32 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  Gewinn gegen  $35 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  Verlust =  $67 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  Energieeinsparung).

Die Einsparung durch die besseren Fenster sind hierbei an allen Hausseiten möglich, da der g-Wert der neuen spezialbeschichteten Dreifachwärmeschutzverglasung etwa genauso hoch ist wie der der Zweifachwärmeschutzverglasung. Dagegen sind die TWD-Einsparungen nur an einer weitgehend unverschatteten Südfassade möglich.

Das beste Fenster mit einer Dreifachwärmeschutzverglasung und besonderer Beschichtung sowie Xenon im Scheibenzwischenraum ist bereits technisch herstellbar. Es hat ein sehr gutes  $g_{\text{diff}}/k_{\text{F}}$ -Verhältnis von 1,0 (incl. Rahmenverluste). Mit diesen Werten ist der energetische Unterschied zwischen TWD und einer Dreifachwärmeschutzverglasung im NEH nicht mehr groß. Er ist bei etwa gleichem Verhältnis  $g_{\text{diff}}/k$  bei einem Fenster mit Dreifachwärmeschutzverglasung und Kryptonfüllung sowie PU-Rahmen fast nur noch auf den (zusätzlichen) Wärmewiderstand der Wand zurückzuführen.

## 1.9 Kosteneffektivität der TWD im Vergleich zu anderen Maßnahmen

Die Kosteneffektivität verschiedener energiesparender Baumaßnahmen (Neubau) wurden hier untersucht und einander gegenübergestellt. Es wird von einem NEH-Standard ohne Lüftungswärmerückgewinnung (LWRG) ausgegangen, der bei guter Planung mit geringen Mehrkosten kleiner 5 % gegenüber dem Wärmedämmstandard nach der jetzigen [WSVO95] erreicht werden kann.

Der betrachtete Raum ist 4m·5m·2,5m groß, hat eine Südaußenwand mit Fenster und eine Westaußenwand. Sonstige Flächen werden adiabatisch gerechnet. Der Luftwechsel beträgt ohne LWRG 0,7/h, mit LWRG 0,2/h, die Fensterverglasung ist eine Zweifachwärmeschutzverglasung mit Holzrahmen ( $k_{\text{V}}=1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $g_0=0,58$ ,  $k_{\text{R}}=1,58 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Opake Wände haben einen k-Wert von 0,3 (Neubau in NEH-Standard) bzw.  $0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$  (Altbau mit Thermohaut saniert). Die internen Wärmegewinne betragen  $3,5 \text{ W/m}^2$ . Es wurde die Nutzbarkeit der Wärmegewinne mit **einem** Jahres-Nutzungsfaktor nach der SIA 180 [SIA180] berücksichtigt. Die Mehrkosten beziehen sich auf den obigen NEH-Standard im Neubau bzw. den nach NEH-Standard sanierten Altbau mit opaker Wärmedämmung. Die Wärmegestehungskosten sind wie folgt definiert:

$$\text{WGK} = \frac{\text{Investitionsmehrkosten} - \text{Minderkosten Heizung} - \text{Energiekosteneinsparung}}{\text{in der Lebensdauer eingesparte Energie}} \quad [\text{DM/kWh}] \quad /14/$$

mit

Energiekosteneinsparung=jährliche Energieeinsparung x Annuitätsfaktor x Nutzenergiepreis  
und dem Annuitätsfaktor A:

$$A = \frac{(1+q)^n - 1}{q \cdot (1+q)^n} \quad [-] \quad /15/$$

mit  $q=0,04$  (Realzins) und der Lebensdauer  $n$  nach Tabelle 12. Der Nutzenergiepreis wurde mit 6 Pf/kWh angesetzt. Die Minderkosten für die Heizung ergeben sich aus der niedrigeren maximalen Heizleistung und werden nur im Neubau mit 50 Pf/W für kleinere Heizkörper berücksichtigt. Bei negativen Wärmegestehungskosten ist eine Investition wirtschaftlich. Bei den TWD-Versionen wurden keine Wartungskosten berücksichtigt.

Bei den TWD-Anwendungen kann der Fall eintreten, daß nach einer längeren trüben Periode eine klare Nacht mit sehr niedrigen Temperaturen folgt. In diesem Fall muß bei den TWD-Versionen etwa die selbe Heizleistung wie mit opaker Dämmung aufgebracht werden, so daß dort kein Kostenabschlag angesetzt werden kann (s. Kap. I.6.2.).

Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse (im Neubau/bei der Altbausanierung). Die Berechnung der Wärmebilanzen erfolgte wie in Kap. I.8. Die Annahmen zu den Investitionskosten sind im Anhang A2 aufgeführt.

Wie man sieht, verursachen die Maßnahmen mit der konventionellen TWD (mit Rahmen, Verschattung) die höchsten Wärmegestehungskosten. Diese TWD ist zwar leistungsfähiger, aber auch teurer und insgesamt weniger kosteneffektiv als das transparente Wärmedämmverbundsystem (TWDVS). Bei größerer Belegung wird die Energieeinsparung auf Grund der geringeren Nutzbarkeit der TWD-Gewinne geringer, die Kosteneffektivität sinkt.

Im Neubau sollte als kosteneffektivste Maßnahmen die Wärmedämmung von 12 auf 20cm erhöht und die besseren Fenster eingesetzt werden, beides kann mit geringen Mehrkosten geschehen. Die Minderung der Nutzfläche wurde hier nicht berücksichtigt.

Deutlich höher sind die Wärmegestehungskosten der Lüftungswärmerückgewinnung und der TWD-Systeme.



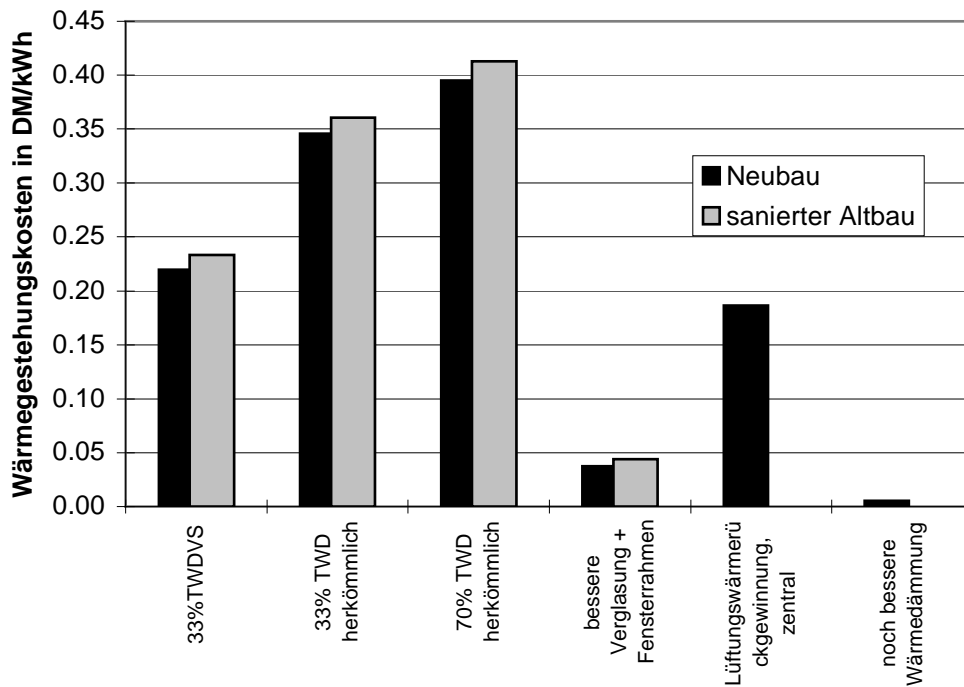


Bild 28: Wärmegestehungskosten verschiedener Energiesparmaßnahmen am Bau  
(ausgehend von einem NEH-Neubau bzw. nach NEH-Standard saniertem Altbau)

Bei der Altbausanierung wird die TWD nur in Verbindung mit einem opaken Wärmedämmverbundsystem eingesetzt werden, da nur die Südwände für die TWD in Frage kommen. Dann jedoch entspricht der Wärmedämmstandard wieder dem eines NEH. Der Wirkungsgrad der TWD und damit dessen Kosteneffektivität wird oft sogar ungünstiger als im Neubau, da das Mauerwerk der meisten monolithischen Gebäude von 1945 bis heute eine geringere Wärmeleitfähigkeit und -speicherfähigkeit als Kalksandstein oder Beton besitzt, den idealen Wandbaustoffen für die TWD im Neubau. Andererseits scheidet die Lüftungswärmerückgewinnung im Altbau aus, da der Platz für die notwendigen Rohre und Aggregate fehlt. Die bessere und dickere Wärmedämmung läßt sich im Regelfall auch nicht realisieren, da die Wände meist schon ohne jegliche Wärmedämmung relativ dick sind.

Maßnahme	Energie- einsparung [kWh/m <sup>2</sup> a]	Lebensdauer in [a]	Mehrkosten in [DM/m <sup>2</sup> ] bzw. [DM]	Minderkosten Heizungsinstall. [DM/m <sup>2</sup> ] bzw. [DM]	Wärmegeste- hungskosten [DM/kWh]
33% TWDVS an der Südwand	46/44	30	350	0	0,22/0,23
33% konventio- nelle TWD an der Südwand (12cm TWD-Material)	70/60	30	800	0	0,35/0,36
70% konventio- nelle TWD an der Südwand	62/53	30	800	0	0,40/0,41
Lüftungswärme- rückgewinnung, zentral	646*/ -	15	2321*	75*	0,19/ -
WSV3K+PU- Rahmen anstatt WSV2A+Holz- rahmen	64/63	30	150**	6	0,04/0,04 (0,01)
noch bessere Wärmedämmung (20 anstatt 12cm)	9/ -	50	15	1	0,01/ -

\*für LWRG: Angaben ohne m<sup>2</sup>-Bezug, bezogen auf den 20m<sup>2</sup>-Raum.

\*\*[FEIST1]

Tabelle 12: Vergleich der Wärmegestehungskosten verschiedener Energiesparmaßnahmen (TWDVS=transparentes Wärmedämmverbundsystem mit 12cm TWD-Material)

Der Wert in Klammern bei der Maßnahme 'bessere Fenster' berücksichtigt die Innenwandinstallation der Heizkörper (50 DM/m<sup>2</sup> Fensterfläche).

Nach Tabelle 12 ist z.Z. keine der Maßnahmen wirtschaftlich, der Einsatz besserer Fenster mit Innenwandinstallation der Heizkörper und die bessere Dämmung im Neubau liegen aber an der Wirtschaftlichkeitsgrenze.

## 1.10 Zusammenfassung der Planungshinweise für TWD-Wände

TWD-Wände sollten sorgfältig auf den Wärmebedarf eines Raumes abgestimmt werden. Bei den üblichen Raumtiefen und Baumassen ist eine kleinflächige Anwendung (im Beispiel 9% der Südfassade, s. Kap. I. 6.6) unkritisch bzgl. Überhitzung und liefert die höchsten Nutzen pro m<sup>2</sup> TWD oder pro DM. Die Vorteile einer kleinflächigen Dimensionierung sind:

- Geringe Überhitzungsgefahr auch in den Übergangszeiten und damit keine so große Notwendigkeit zur Regelung mittels Verschattung (eine saisonale auch manuelle Verschattung reicht dann i.d.R. aus). Damit kann die Verschattungseinrichtung einfacher ausgeführt werden und deren Kosten sowie der damit verbundene Bedienung- und Wartungsaufwand sinken.
- Die Ausnutzung der solaren Gewinne wird größer, da die großen Solargewinne der Übergangszeiten stärker genutzt werden können. Damit steigt auch das Kosten-Nutzen-Verhältnis der TWD.
- Die absoluten Kosten der TWD sinken. Bei den noch unwirtschaftlichen Systemen ist dies ein Argument.

Der Nachteil:

- Durch den kleineren Raumwinkel, den die TWD bestreicht, wird deren Einfluß auf die räumliche Strahlungstemperaturverteilung und die Empfindungstemperatur geringer.

Die **Planungshinweise** lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

Die folgenden drei Punkte, die auch den Berechnungen zugrundegelegt sind und aus anderen Quellen entnommen, sollten erfüllt sein, um die in Kap. I.6.6 ermittelten Energieeinsparwerte auch zu erreichen.

- Die TWD-Wand sollte nach Süden orientiert und nicht durch den Horizont verschattet sein
- Die Hauptnutzungszeit sollte am späten Nachmittag und Abend liegt, wenn die TWD-Wand ihre Wärme abgibt.
- Aufgrund des Zeitpunktes der Wärmeabgabe und der herrschenden hohen internen Lasten bzw. der damit verbundenen geringen Nutzbarkeit der Solarwärme ist die TWD kaum für Bürogebäude geeignet, auch nicht für Schlafzimmer, in denen hohe nächtliche

Temperaturen i.d.R. nicht gewünscht oder benötigt werden. Am besten ist die TWD für Wohnzimmer geeignet.

Aus den Parameterstudien ergab sich:

- Die TWD-Fläche sollte richtig dimensioniert sein, d.h. die Wärmebilanz für sehr kalte strahlungsreiche Tage stimmen, so daß zumindest im Winter keine Überhitzung auftritt. I.d.R. kann 2/3 der Südaußenwand mit TWD, 1/3 mit Fenstern belegt werden, günstiger ist aber eine kleinflächige Belegung (s.o.). Für Spezialfälle mit großflächiger TWD und weiteren Fremdwärmequellen sollten Simulationsrechnungen durchgeführt werden.
- Es sollte eine grobe Regelung oder auch manuelle Steuerung des TWD-Wärmeeintrags über eine mobile Verschattung möglich sein. (Der Algorithmus einer automatischer Regelung sollte die Raumtemperatur berücksichtigen)
- Die Speichermasse des Raums sollte möglichst groß sein, damit Solargewinne bei nur kleinen Raumtemperaturschwankungen eingespeichert werden können
- Die Anlagentechnik muß auf die TWD angepaßt sein (Einzelraumheizungsregelung, am besten mit elektronischem Thermostatventil mit I-Anteil)
- Die Heizung muß auch für trübe Tage genügend Leistung liefern und dann auch den Einfluß schlechter Fenster kompensieren können. Die TWD-Wände können in längeren trüben Perioden zu Verlustflächen werden. Bei den heute üblichen Wärmeschutzverglasungen ( $k_v \leq 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) besteht nur bei raumhohen Fenstern mit  $k_v \geq 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$  die Notwendigkeit den Kaltluftabfall abzuschirmen [NEFF].

### **Ausblick**

Neue Entwicklungen sollten in Richtung preisgünstiger Systeme gehen, wobei dem Rahmen und der Verschattungseinrichtung besondere Bedeutung zukommen. Dabei sollte beachtet werden, daß gerade die im Winter dominierende diffuse Einstrahlung die Wärmeverluste stark reduziert, so daß Verschattungseinrichtungen keine großen Reduktionen des diffusen g-Wertes bringen sollten. Andernfalls müßten die TWD-Strukturen sehr dick sein, so daß der k-Wert schon ohne Einstrahlung klein ist. Da die bisherigen TWD-Systeme doch relativ aufwendig und daher teuer sind, wurde mit dem nun folgenden zweiten Teil der Arbeit versucht, ein vereinfachtes System zu konzipieren, welches dennoch die Vorteile der TWD bei einem besseren Preis-Leistungsverhältnis bieten soll.

## **2 Untersuchungen zu einer neuen transparenten Wärmedämmung aus einer Verglasung**

### **2.1 Beschreibung**

Die Berechnungen zur Kosteneffektivität der TWD haben zu den Überlegungen geführt, ob die TWD nicht preisgünstiger herzustellen ist. Angelehnt an die Neuerungen in der Verglasungsindustrie wurde eine sog. Verglasungs-TWD entwickelt, die im wesentlichen aus einer hochwärmedämmenden Verglasung besteht.

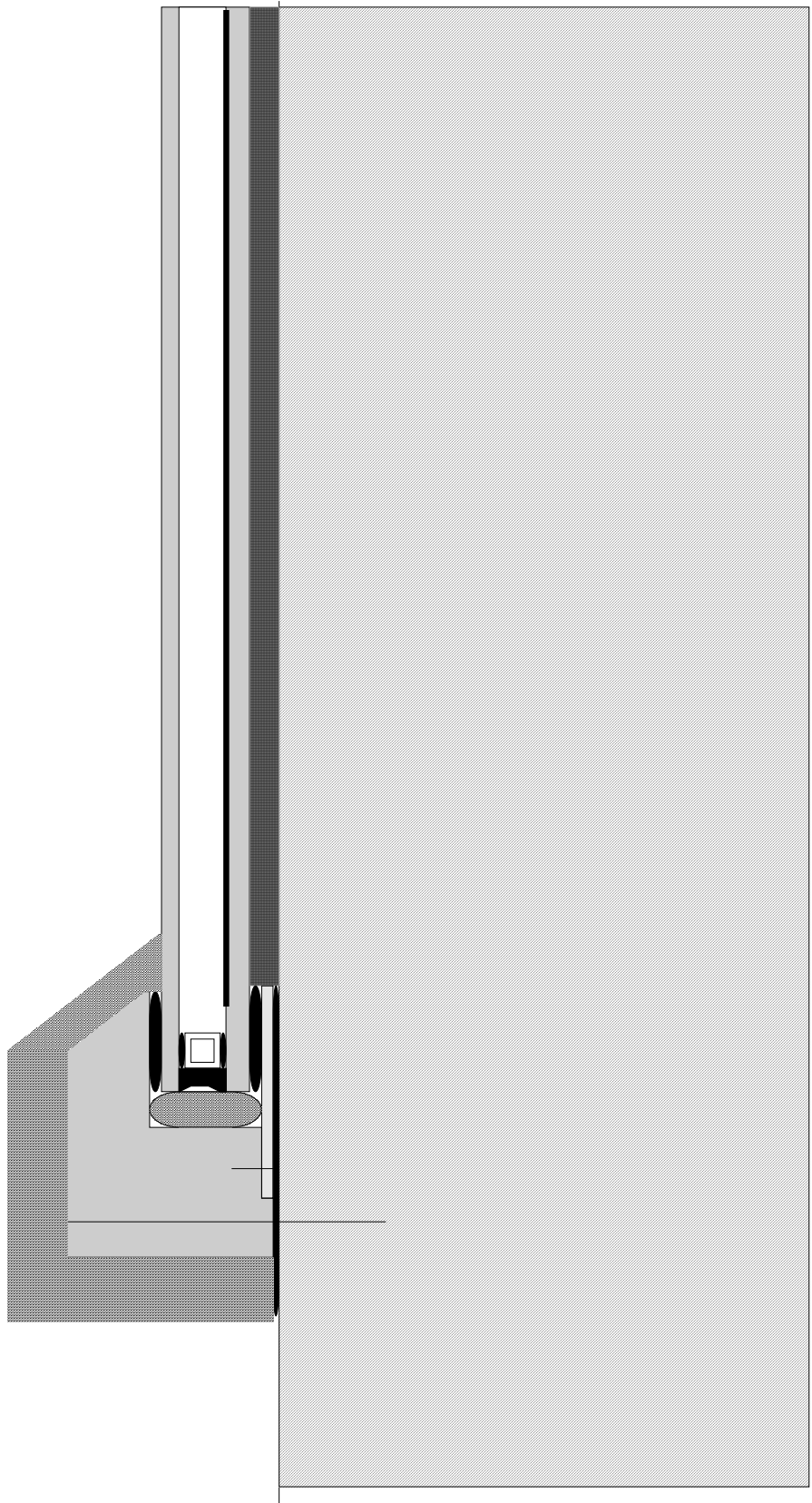
Anhand des Bildes 30 soll eine Ausführungsform der neuen transparenten Wärmedämmung erläutert werden: Die Sonnenstrahlung gelangt durch die erste Glasscheibe und den Xenon-Spalt auf den Solarabsorber, eine niedrig-emissive schwarze Folie auf der zweiten Glasscheibe zum Spalt hin bzw. einer entsprechenden Beschichtung auf dieser Glasscheibe. Dadurch wird die Solarstrahlung auf den Absorber gelassen, die langwellige Wärmestrahlung kann aber wie bei einer Wärmeschutzverglasung für Fenster nur zu einem geringen Teil wieder nach außen gelangen. Somit ist der Strahlungsaustausch minimiert. Durch die Wahl einer Xenon-Edelgasfüllung im Spalt sowie der gewählten Spaltweite (8mm) wird der Wärmetransport durch Konvektion im Idealfall ganz unterdrückt und die Wärmeleitung gegenüber Luft um ca. 50% verringert.

Durch eine gut wärmeleitende Schicht ist ein guter Kontakt zur Außenwand zu gewährleisten. Hohe Temperaturspitzen auf dem Absorber werden vermieden, wenn zusätzlich ein schweres Mauerwerk oder Beton verwendet wird. Der Rahmen besteht aus gedämmten Holz- oder Aluminiumprofilen.

Die Verschattung soll mittels einer äußeren mobilen Verschattungseinrichtung erreicht werden.

Die voraussichtlichen Vorteile der Verglasungs-TWD sind:

- dünner Aufbau (15mm für Verglasung plus Kontaktschicht von einigen Millimetern)
- flacher Rahmen, damit nur geringe Verschattung durch diesen
- hoher thermischer Komfort durch zeitverzögerte gedämpfte Wärmeabgabe an den Raum
- Wärmegewinn wie bei herkömmlichen TWD-Systemen (nach ersten Berechnungen)
- niedrige Herstellungskosten denkbar, da Massenproduktion in Verglasungsindustrie möglich



- Neuentwicklungen aus der Verglasungs- und Fenstertechnik direkt einsetzbar (thermisch bessere Abstandhalter, hochwärmedämmende Rahmensysteme)
- keine Kondensation, die optisch stört und den Eintrag mindert
- hoher Vorfertigungsgrad möglich, dadurch schnelle Anbringungsmöglichkeit und kurze Montagezeit
- höhere Kosteneffektivität als bei herkömmlichen TWD-Systemen (vgl. Kap. I.9).

Die Nachteile sind voraussichtlich:

- hohe thermische Beanspruchung des TWD-Moduls wie des Glasrandverbundes und der Außenwand
- es ist noch eine Verschattungseinrichtung notwendig
- das Problem des guten Wärmekontaktes zwischen TWD und Wand
- das Problem der Dichtheit des Randverbundes

## **2.2 Messungen an einer Testzelle**

Um die Leistungsfähigkeit der Verglasungs-TWD zu ermitteln, wurde diese an einer kleinen unbeheizten Testzelle mit den Außenmaßen 1,86m · 1,86m · 1,84m angebracht. Die Testzelle besteht aus einem Stahlgestell, das bis auf die Südseite rundum mit Spanplatten und 16 cm Styrodur gedämmt wurde (s. Bild 30). Als TWD-Speicherwand dient eine 24cm dicke KS-Wand, an der ein Rand aus 5cm Porenbeton befestigt wurde, um die seitlichen Wärmeabflüsse zu minimieren. Im Inneren der Testzelle stehen 130 Kunststoffflaschen mit 169 l Wasser als interne Speichermasse, die die Raumumschließungsflächen eines schweren Raums ersetzen soll. Die Testzelle wurde mit PE-Folie bzw. einer Tür mit Gummidichtung, welche durch eine Verschraubung an die Stahlkonstruktion gepreßt wurde, gut luftdicht abgedichtet. Ein Luftdichtigkeitstest wurde nicht vorgenommen, beim Schließen der Tür konnte jedoch ein hoher Widerstand festgestellt werden.

Die Verglasungs-TWD mit den Scheiben-Maßen 1,4m·1,4m besaß einen 35mm dicken Holzrahmen, welcher mit 20mm Styrodur gedämmt wurde. Der Glaseinstand in der Dämmung war ebensogroß.

Alle relevanten Größen wurden gemessen.

## Testzelle mit Sensoren

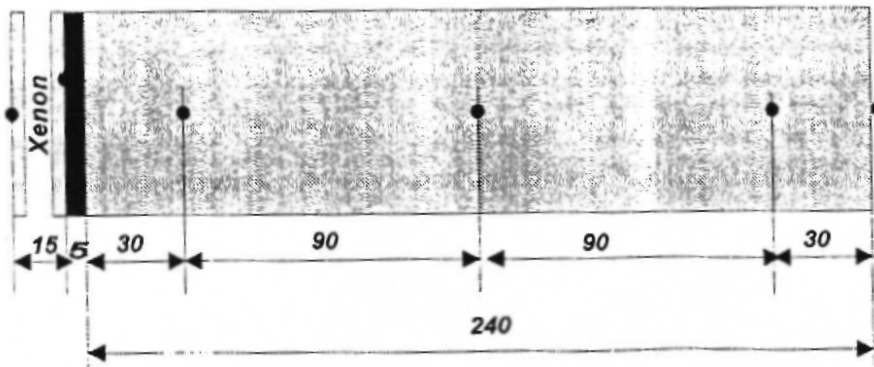
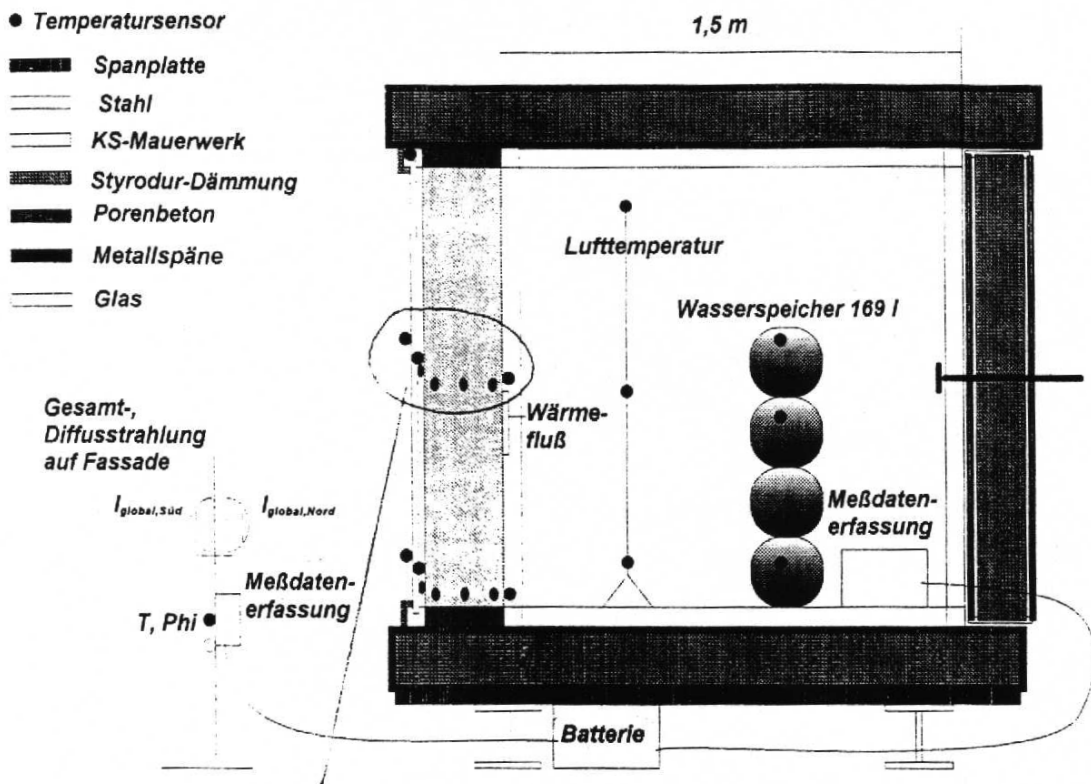


Bild 30: Testzelle mit den Meßeinrichtungen (Prinzipiskizze)





Bild 31: Testzelle mit Wetterstation (Foto)

Bild 30 zeigt eine Skizze der Testzelle mit der Verglasungs-TWD und der Meßeinrichtung, Bild 31 ein Foto. Die Meßkampagne lief ab dem Januar bis zum Juni 1998, als die Verglasungs-TWD mit einer Spanplatte verschattet wurde. Die kleine Wetterstation maß die Außenlufttemperatur und die Einstrahlung auf die Nord- und die Südfassade. Unter Annahme einer isotropen Diffusstrahlungsverteilung entspricht das Minimum dieser Werte der Diffusstrahlung auf senkrechte Flächen am Meßort und wird als Näherung für die Diffusstrahlung verwendet.

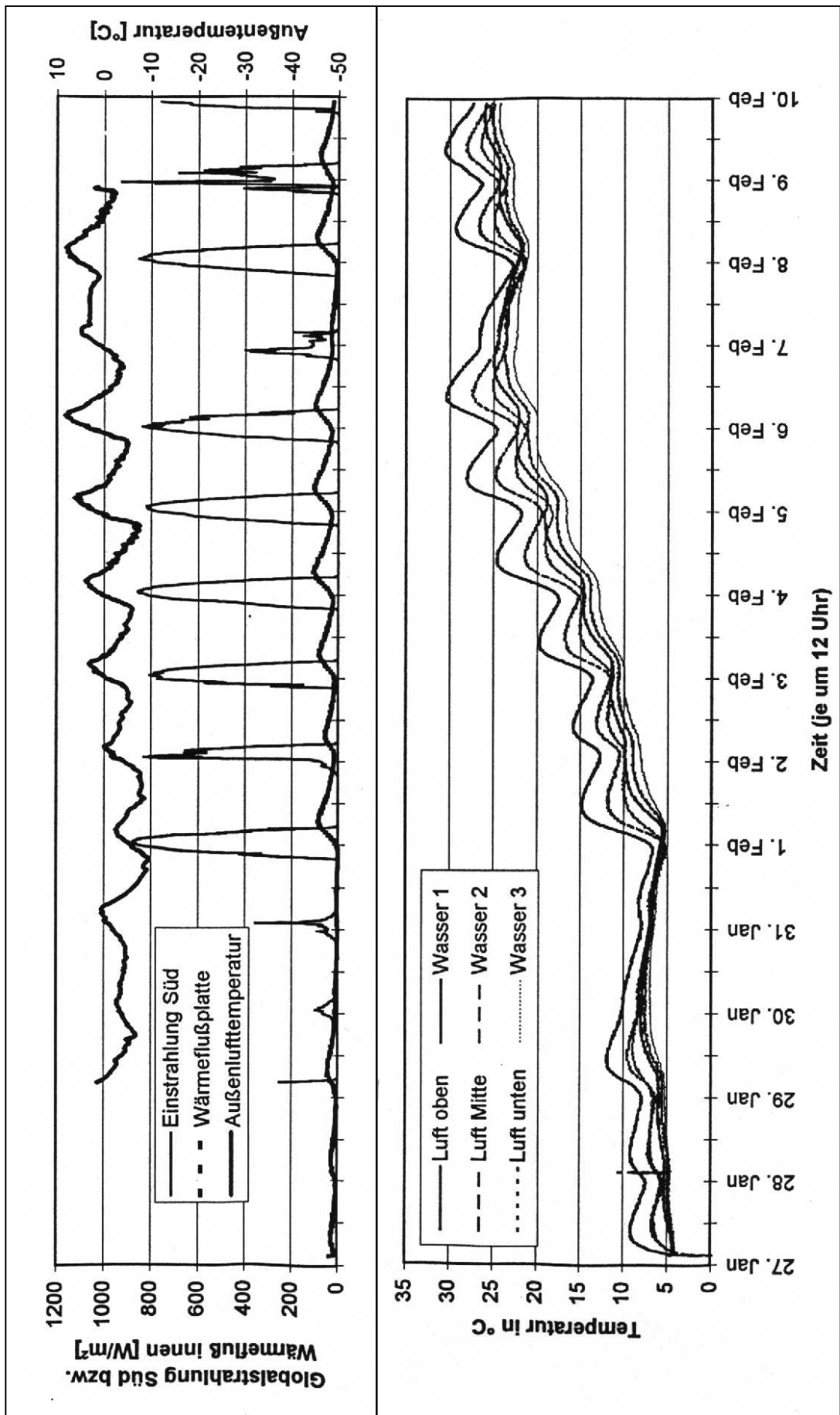
Die Differenz zwischen der gemessenen Süd-Gesamtstrahlung und der Diffusstrahlung ist dann die Direktstrahlung auf die Südfassade.

## 2.3 Ergebnisse der Messungen an der Testzelle

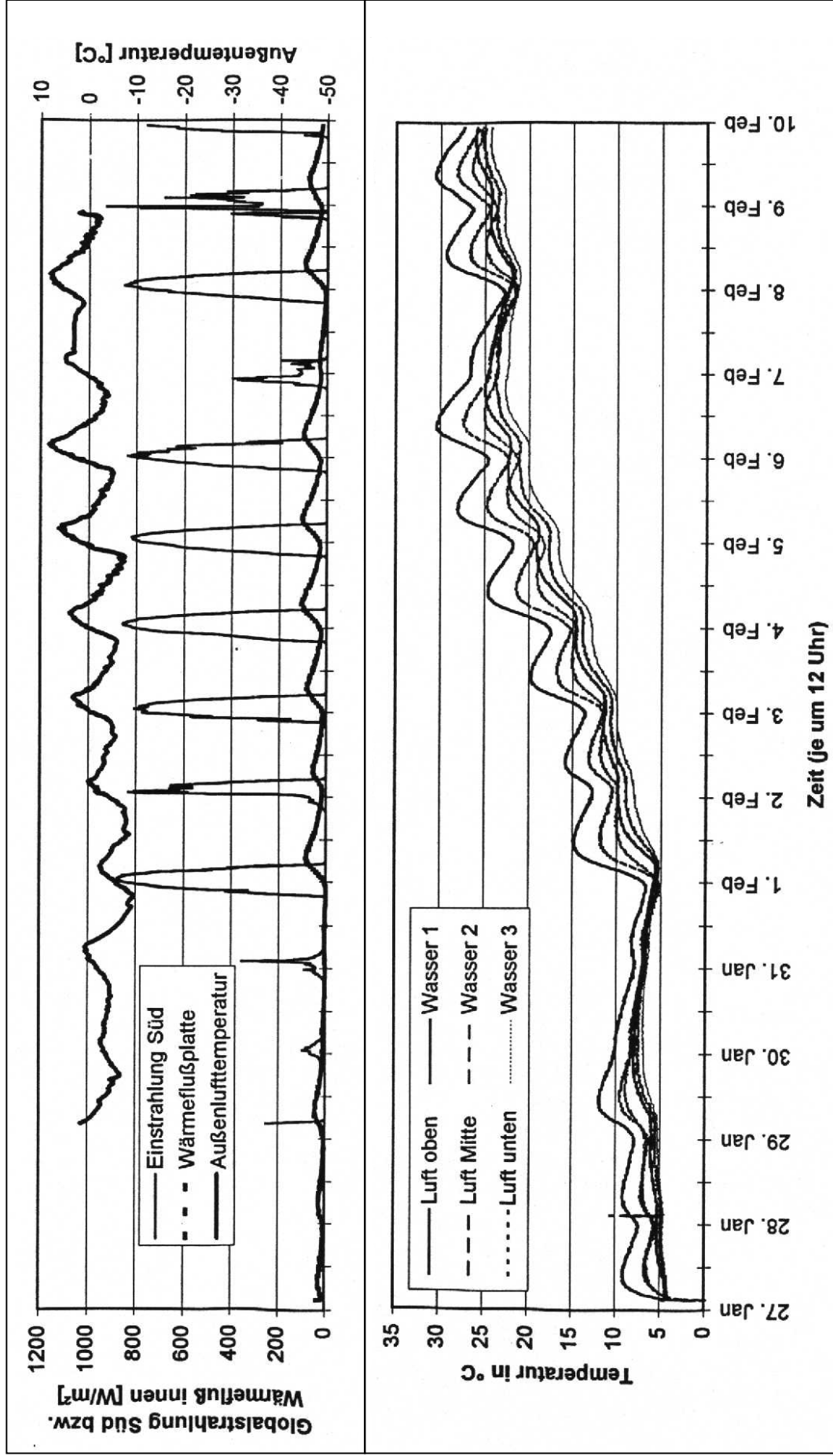
Die Meßdaten wurden ausgewertet. Die Meßwerte von zwei repräsentativen Wochen zeigen die Bilder 32a÷d. In einer klaren kalten Winterperiode wird sehr viel Wärme in das KS-Mauerwerk eingespeichert, die Raumlufthtemperatur steigt (ohne sonstige Heizung) auf 27°C. Bedingt durch die sehr schwere KS-Wand (Rohdichte 2053 kg/m<sup>3</sup>) und die Wasserbehälter, die etwa genauso viel Wärmespeicherkapazität haben, sowie die sehr gute Wärmedämmung der Zelle und die Dämmwirkung der Verglasungs-TWD sinken die Temperaturen in trüben Perioden wenig ab. Der Wärmestrom von der KS-Wand-Oberfläche in den Raum betrug bis knapp über 100 W/m<sup>2</sup>, ein außerordentlich hoher Wert für TWD-Systeme. Die Zeitverzögerung zwischen Einstrahlungsmaximum und Maximum der Innenoberflächen-temperatur beträgt 6,7 bis 8,5 h.

Die hohen Absorberrtemperaturen von bis zu 112°C deuten darauf hin, daß der Wärmekontakt zwischen Verglasungs-TWD und Mauerwerk in Form der Metallspäne noch nicht optimiert war. Es könnte sich aber auch um eine kleine Stelle ohne Späne handeln, bei der die Sensor-zuleitung die Füllung mit den Spänen behindert hat, denn am Rand ist die Absorberr-temperatur deutlich geringer. Auch ist die Temperatur im Mauerwerk in 3cm Tiefe von außen sowohl in Wandmitte wie am Rand weit geringer.

Daß die Temperaturen in der Wand am Rand geringer als in der Mitte sind, läßt sich durch seitliche Wärmeflüsse erklären, die noch trotz starker Dämmung auftraten. Diese 3-dimen-sionalen Wärmeleitprobleme wurden mit Hilfe eines FE-Programms stationär und 2-dimen-sional angenähert (Bilder 33, 34). Die Einstrahlung in Absorberebene betrug dabei 200 W/m<sup>2</sup>. Während die Wärmeströme in Wandmitte noch in Normalenrichtung verlaufen, treten am Rand dazu senkrechte Komponenten auf. Nach dieser Berechnung kann ca. 40% der Wandfläche 1-dimensional mit den Wand-Mittenwerten berechnet werden, der Rest ist Rand-bereich. Neben den seitlichen Wärmeverlusten an der Wand treten auch solche am Rahmen auf (s. Bild 34). Die Konstruktion mit styrodurgedämmtem Holzrahmen und Aluminium-Abstandhalter in der Verglasung hat natürlich auch Verluste, die bei der dünnen Verglasungs-TWD ins Gewicht fallen und noch optimiert werden können (s. Kap.II.9).



Bilder 32a,b: Testzelle 27.1.-10.2.1998: Wetterdaten und Wärmefluß an der TWD-Wand innen (a) sowie Luft- und Wassertemperaturen in der Zelle (b)



Bilder 32c,d: Testzelle 27.1.-10.2.1998: Temperaturen an der Verglasungs-TWD und in der KS-Wand in Wandmitte (a) und am Rand (b)

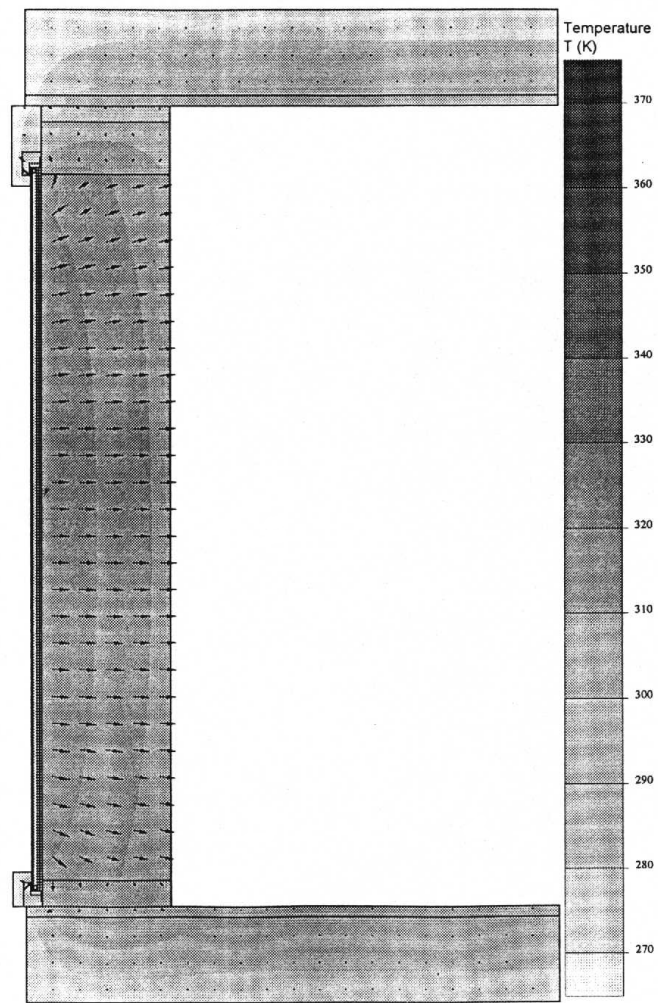


Bild 33: FE-Ergebnisse: Temperaturen der Testzelle bei einer Einstrahlung am Absorber von  $200\text{W/m}^2$

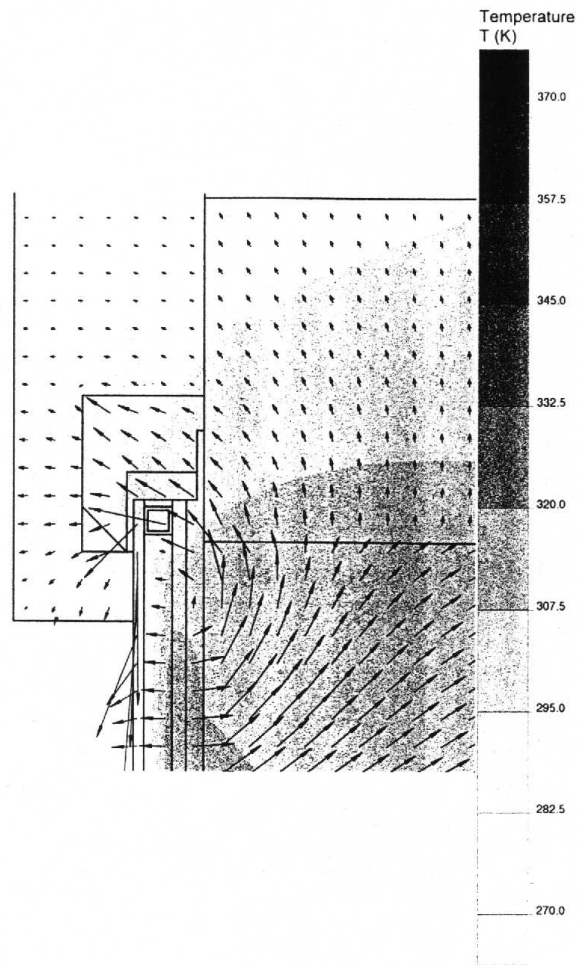


Bild 34: FE-Ergebnisse: Temperaturen der Testzelle bei einer Einstrahlung am Absorber von  $200\text{W/m}^2$ , Ausschnitt am TWD-Rahmen

## 2.4 Ausführung der Verglasungs-TWD

Zur Berechnung des k-Wertes der Verglasungs-TWD kann Glg /6/ für Fenster verwendet werden:

$$k_{Fe} = \frac{k_V \cdot A_V + k_{Ra} \cdot A_{Ra} + \Psi_{Glas} \cdot l_{Glas} + \Psi_{Ein} \cdot l_{Ein}}{A_{Fe}} \quad \text{mit } A_{Fe} = A_V + A_{Ra} \quad /6/$$

mit	$A_{Fe}$	Rohmaß des Fensters (Maueröffnungsmaß)
	$A_{Ra}$	Fläche des Fensterrahmens
	$k_{Fe}$	k-Werte des gesamten Fensters
	$k_{Ra}$	k-Wert des Fensterrahmens
	$k_V$	k-Wert der Verglasung im ungestörten Bereich
	$l_{Ein}$	Einbauumfang
	$l_{Glas}$	Glasumfang
	$\Psi_{Ein}$	linearer Verlustkoeffizient durch die Einbausituation in der Laibung
	$\Psi_{Glas}$	linearer Verlustkoeffizient durch die Verluste am Glasrand

Die Terme auf der rechten Seite bedeuten von links nach rechts:

- Verluste durch die Verglasung im ungestörten Bereich
- Verluste durch den Fensterrahmen
- Verluste durch den Glasrand (Abstandhalter, Rahmenverluste am Glasrand)
- Verluste durch die Einbausituation des Fensters in der Laibung

Der  $\Psi_{Glas}$  setzt sich zusammen aus dem Verlustkoeffizient durch den Glasrandverbund und denjenigen durch den Rahmenverlust am Glasrand.

Außer den Einbauverlusten treten diese Verlustterme auch bei der Verglasungs-TWD auf und machen sich auf Grund des hohen Wärmedämmwertes der Verglasungs-TWD sowie des dünnen Aufbaus stark bemerkbar. Sie können durch folgende Maßnahmen reduziert werden:

- besserer Absorber mit niedrigeren Emissivitätswerten und höheren Absorptionsgraden
- das Material im Glasspalt sollte möglichst schlecht Wärme leitend sein. Besser als die gewählte Xenon-Verglasung ist nur eine Vakuumverglasung.
- wärmegeämmter Rahmen, u.U. mit Glaseinstand in Dämmung
- thermisch besserer Abstandhalter im Glasrandverbund
- Des weiteren muß ein guter Kontakt vom Absorber zur Außenwand gewährleistet sein

Zur Vermeidung der Überhitzung wird eine entsprechende Einrichtung benötigt.

Die einzelnen Punkte werden im folgenden näher erläutert:

#### 2.4.1 Absorber

Der Absorber der Verglasungs-TWD an der Testzelle ist eine mit Schwarznickel beschichtete Aluminiumfolie mit mikrorauher perforierter Oberfläche und besitzt einen Absorptionsgrad von 97 +/- 1,5 % und eine Emissivität von 10,5 +/- 1,3% [REMMERS]. Nach Herstellerangaben [INCO] beträgt die Absorptionsgrad 95÷99% und die Emissivität 8 bis 11% bei 100°C. Weitere Beschichtungen, wie sie für Absorber von Solarkollektoren verwendet werden, haben meist deutlich höhere Emissivitäten und niedrigere Absorptionsgrade [REMMERS]. Lediglich die gesputterten Absorberschichten aus Titanoxinitrid, Metall-Keramik-Verbindungen (CERMET) [SUNSELECT] und Black-Cristal (Multiphasen-Nano-Kristallationsmatrix-Beschichtung (MPNC) [SIT]) weisen bessere Werte auf (um 95% Absorption, 5% Emissivität bzw. 8% bei MPNC), sind aber nur auf Metallblechen zu erhalten. Der Vorteil der verwendeten Absorberfolie besteht auch im niedrigen Preis.



## 2.4.2 Material im Glasspalt

Der Glasspalt ist mit dem Edelgas Xenon gefüllt, welches das niedrigste Wärmeleitvermögen besitzt, da es ein sehr schweres Gas ist. Die Wärmeleitfähigkeiten von Luft, Argon, Krypton und Xenon bei 0°C sind:

	Luft	Argon	Krypton	Xenon
Wärmeleitfähigkeit bei 0°C in W/mK	0,0242	0,0164	0,0094	0,0051

Tabelle 13: Wärmeleitfähigkeit von Luft, Argon, Krypton und Xenon bei 0°C

Eine Verbesserung wäre nur durch eine Vakuumverglasung denkbar. Auf Grund der hohen Absorbertemperaturen und der damit verbundenen Scherspannungen würde aber der verschweißte Glasrand brechen und die notwendigen Abstandhalter umknicken.

Das Vakuumtechnik ist bei den Verglasungsherstellern bisher noch nicht ausgereift und etabliert.

## 2.4.3 Rahmen

Der Rahmen für die Verglasungs-TWD sollte nach den Ausführungen in Kapitel II.9 gedämmt sein, um die doch erheblichen Randverluste zu minimieren. Das Material am Glasrand muß bis ca. 90°C thermisch belastbar sein. Am besten eignen sich Rahmen mit PU-Kern und Aluminium-Außenschale. PU ist bis mindestens 90°C temperaturbeständig.

Für die Testzelle wurde ein außen mit Styrodur gedämmter Holzrahmen verwendet. Neue Rahmenentwicklungen [FEIST1],[PAZEN] bestehen aus PU mit eingeschäumten Stahlprofilen oder aus einem PU-Kern und Holz bzw. Aluminiumaußenschalen und erreichen k-Werte von 0,5 W/m<sup>2</sup>K [Pazen].

#### 2.4.4 Randverbund

Der Randverbund der Verglasungs-TWD besteht z.Z. aus einem herkömmlichen Aluminiumabstandhalter mit Butyldichtung und Polysulfiddichtung/-klebung. Da der Aluminiumabstandhalter eine große Wärmebrücke darstellt, werden in letzter Zeit neue Randverbünde untersucht. Tabelle 14 zeigt die charakteristischen linearen  $\Psi_{\text{Glas}}$ -Werte verschiedener neuer Randverbünde in der Kombination mit einem Holzrahmen und einer Wärmeschutzverglasung ( $k_v=1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) für öffnenbare Fenster.

Abstandhalter	$\Psi_{\text{Glas}}$ [W/mK]
Aluminiumprofil (heutiger Standard)	0,057
Silicon-Schaum mit Alufolie	0,023
Mastic mit integrierten Blechstreifen	0,035
Thermisch getrenntes Aluprofil	0,047
Silicon-Schaum mit Stahlprofil	0,028
Dünnwandiges Edelstahlprofil	0,033
Glasfaserprofil	0,039

Tabelle 14: lineare Verlustkoeffizienten  $\Psi_{\text{Glas}}$  für den Glasrand [FRANK]

Mit Hilfe eines gut wärmedämmenden Abstandhalters wie Silicon-Schaum kann dieser Verlustanteil in einem herkömmlichen Holzfenster also etwa halbiert werden, der k-Wert des gesamten Fensters reduziert sich bei üblichen Fenstermaßen von  $1,51 \text{ W/m}^2\text{K}$  auf  $1,42 \text{ W/m}^2\text{K}$ , d.h. um etwa  $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Nicht untersucht wurde hier die mechanische Belastung des Randverbundes durch die thermischen Spannungen.

#### 2.4.5 Kontakt zur Speicherwand

Die am Absorber entstehende Wärme sollte gut in die Wand dahinter und in den Raum abfließen können.

Daher sollte der thermische Widerstand dieser Kontaktschicht gering sein. Außerdem sollte sie bis zu 150°C thermisch und mechanisch stabil sein und in gewissem Maß elastisch sein, um eine Längenänderung der angrenzenden Scheibe zuzulassen.

Für die Messungen an der Testzelle wurden Metallspäne verwendet. Die Dicke der Schicht betrug ca. 6mm.

Die bereits geprüfte Verwendung gut rieselfähigen Materials wie Sand ist ungünstig, da sich dieser setzen kann, wenn die Scheibe sich auf Grund der hohen Abrobertemperatur ausdehnt und nach außen beult. Somit wird die Verglasung nie wieder in die planparallele Form zurückkommen. Bei den Metallspänen ist die Reibung der Späne gegeneinander so groß, daß das nicht passieren kann. Denkbare andere Lösungen sind:

Ein sehr glatter Putz wird auf die Wand, eine dünne Silikonschicht auf die Scheibe aufgebracht. Diese gleicht die Längenänderungen der Scheibe bei hohen Temperaturen aus. Nun wird die Scheibe mit dem Rahmen auf den trockenen Putz gepreßt und mit dem Rahmen verschraubt.

Alternativ kann die Scheibe auch als Schalung verwendet und der Putz in den Zwischenraum eingefüllt werden. Dabei müßte die Scheibe von außen durch ein (provisorisches) Gestell am Ausbeulen gehindert werden. Es kann dabei allerdings nicht verhindert werden, daß es durch das Ausdiffundieren des Wassergehaltes des nassen Putzes zu Lufteinschlüssen kommt.

Eine Ölschicht in einer dichten Folien-Tasche würde den Wärmeübergang ebenfalls verbessern, dabei ist allerdings die große Volumenänderung des Öls bei Temperaturerhöhung zu beachten (10% bei Mineralöl bei  $\Delta T=100$  K).

## 2.4.6 Verschattungseinrichtung

Da die Verglasungs-TWD noch sensibler gegenüber der Sonnenstrahlung ist als die herkömmliche TWD, sollte der g-Wert einer Verschattungseinrichtung im Heizbedarfsfall nicht weniger als 90%, im Sommerfall nicht mehr als 10% betragen. Die Verschattungseinrichtung sollte wetterbeständig sein. Die Testzelle wurde im Sommer fest durch eine Holzspanplatte verschattet. Praktisch geeignete Systeme sind:

- Außenlamellenjalousien
- wetterfeste Rollos
- Rolladen
- Falt- und Schiebeläden

mit g-Werten von nahe 0 bzw. 100%. Neuere Entwicklungen sind

	$g_{\text{geschl}}$	$g_{\text{offen}}$ in %
• Thermotrope Schichten (Polymerblends)	20	90
• elektrochrome Schichten	(10) 40	65
• Prismengläser	7	94
• Bead Wall	5	90
• Fluidfüllung	?	90

Thermotrope Beschichtungen mit Polymerblends ([KERSCHBERGER]) weisen noch Probleme mit der thermischen Langzeitstabilität und der Feuchteempfindlichkeit auf. Sie erlauben auch keine genaue Regelung nach dem Heizwärmebedarf, da die Schaltung nach ihrer Temperatur und nicht nach dem zukünftigen Wärmebedarf erfolgt. Der Schaltheb elektrochromer Schichten ist (noch) zu klein ( s.[KERSCHBERGER]), so daß der sommerliche Überhitzungsschutz bei diesem System nicht gewährleistet ist und im Winter zu wenig Strahlung hindurch gelangt. Daneben kommen Prismengläser in Frage, die ab einem bestimmten konstruktiv einzustellenden Winkel total reflektieren ([ISFH]). Diese wurden prototypisch auch als Mikrostruktur hergestellt [ZAE2]. Es konnten bisher jedoch noch keine größeren Scheiben produziert werden. Die Prismenverglasungen erscheinen für die TWD- und Tageslichtanwendungen vielversprechend, wenn in längeren warmen Übergangszeitperioden Komforteinschränkungen wegen Überhitzung hingenommen werden.

Des Weiteren ist eine Anwendung der Bead-Wall mit einer weiteren Glasscheibe denkbar. Hierbei wird der Glaszwischenraum zur Verschattung mit Polystyrolkugeln gefüllt. Dieses System ist einerseits sehr aufwendig, stellt aber auch einen guten temporären Wärmeschutz dar.

Denkbar ist auch eine Fluidfüllung [LUDWIG], die jedoch eine zweite Glasscheibe benötigt, deren sekundäre Wärmeabgabe im Verschattungszustand sehr hoch sein dürfte, da alle Sonnenstrahlung absorbiert wird. Die Fluidfüllung erwärmt sich nach [LUDWIG] bis auf 49°C.

## 2.5 Tauwasserfreiheit

Die Gesamtkonstruktion wurde mit Hilfe des Verfahrens in der DIN4108, Teil5 [DIN4108T5] auf Tauwasserfreiheit überprüft. Dabei wurden die  $\Lambda$ -Werte ohne Einstrahlung bei 0/20°C verwendet.

Es entstehen im Winter minimale Mengen von unter 1 g/m<sup>2</sup> an Tauwasser, die jedoch im Sommer wieder verdunsten.

## 2.6 Kosten der Verglasung-TWD

Die Verglasungs-TWD kann zu folgenden Kosten hergestellt werden:

• Verglasungs-TWD (Verglasung selbst mit Absorberfolie)	150 DM/m <sup>2</sup>
• Xenonfüllung 6 l/m <sup>2</sup> [LINDE] bei 6mm-Spalt	120 DM/m <sup>2</sup>
• gedämmter Alu-Rahmen	80 DM/m <sup>2</sup>
• Außenliegende Lamellenjalousie	250 DM/m <sup>2</sup>
• Kontaktschicht zur Wand (Silikon/Fließmörtel)	50 DM/m <sup>2</sup>
• <u>Montage</u>	<u>50 DM/m<sup>2</sup></u>
	<u>700 DM/m<sup>2</sup></u>

Alternativ wird angedacht, die Verschattung durch eine Prismenscheibe zu realisieren, die in die Verglasung eingebaut wird. Wenn diese nach eigener Schätzung zu einem Preis von 150 DM zu haben wäre, ergeben sich die Kosten zu

- Verglasungs-TWD (Verglasung selbst mit Absorberfolie 150 DM/m<sup>2</sup>, 460 DM/m<sup>2</sup>  
Xenon 120 DM/m<sup>2</sup>, Prismenscheibe 150 DM/m<sup>2</sup>)
  - gedämmter Alu-Rahmen 80 DM/m<sup>2</sup>
  - Kontaktschicht zur Wand (Silikon/Fließmörtel) 50 DM/m<sup>2</sup>
  - Montage 50 DM/m<sup>2</sup>
- 600 DM/m<sup>2</sup>

Mit diesem Preis und einer Energieeinsparung von 62 kWh/m<sup>2</sup>a ergeben sich Wärmege-  
stehungskosten von 18 Pf/kWh.

Dabei ist zu bemerken, daß der Preis für Xenon ist in der letzten Zeit rapide angestiegen ist,  
im Moment liegt er bei 15÷20 DM/l [LINDE].

## 2.7 Bestimmung des Wärmeleitwertes der Verglasungs-TWD

An einer 1,2m·0,81m großen Verglasungs-TWD mit einem Scheibenabstand von 10mm wurden Wärmeleitwert  $-(\Lambda_{ges})$ -Wert-Messungen durchgeführt, um die Werte der Rechnung verifizieren zu können. Die Messungen fanden in den Institutsräumen statt, so daß eine Glasfläche der Raumluft ausgesetzt war. Die in der Praxis zum Mauerwerk gerichtete Glasoberfläche wurde mit einem Heizdraht versehen und mit Mineralwolle wärme gedämmt, so daß bei Anlegen einer Spannung von 220 V eine elektrische Heizleistung von 300 W übertragen werden konnte. Schon bei einer geringeren Spannung wurde dort die anvisierte Maximaltemperatur von 120°C erreicht. Auf der beheizten Seite wurden 5, auf der unbeheizten Seite 2 Oberflächenthermoelemente (Meßgenauigkeit +/-0,2 K) angebracht, eine Wärmestrommeßplatte befand sich in der Mitte auf der unbeheizten Scheibe (Meßgenauigkeit +/-5%).

Die Ergebnisse hierzu finden sich in der Gegenüberstellung der Meß- und Rechenergebnisse im nächsten Kapitel.

## 2.8 Physikalisch-mathematisches Modell der Verglasungs-TWD

Das physikalisch-mathematische Modell der Verglasungs-TWD geht von den drei Wärmetransportmechanismen Strahlung, Konvektion und Leitung im Gas-Spalt aus, die über ihre Wärmeleitwerte zum Gesamtwärmestrom addiert werden:

$$q_{\text{ges}} = (\Lambda_{\text{str}} + \Lambda_{\text{konv/Lei}}) \Delta T = \Lambda_{\text{ges}} \Delta T \quad \text{mit} \quad /16/$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad \text{Temperaturdifferenz der Berandungsflächen in K} \quad /17/$$

Der Strahlungsaustausch zwischen den zwei im Spalt befindlichen Glasoberflächen erfolgt mit dem linearisierten Ansatz für planparallele Flächen zu

$$\Psi_{\text{str}} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot T_m^3}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad \text{mit} \quad /18/$$

$$T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad [\text{K}], \quad t_m = T_m - 273 \quad [^\circ\text{C}] \quad /19/$$

( $T_1$  und  $T_2$  sind die Temperaturen der Berandungsflächen in K,  $\sigma$  Stephan-Boltzmann-Konstante)

Die Wärmeleitung und Konvektion wird über die dimensionslose Nusseltzahl bestimmt:

$$\text{Nu} = \frac{\Lambda_{\text{konv/Lei}} \cdot D}{\lambda} \quad \text{mit} \quad [-] \quad /20/$$

$D$  Spaltdicke in m

$\lambda$  Wärmeleitfähigkeit in W/mK

Diese ist abhängig von der Rayleigh-Zahl (beinhaltet Einflüsse von Auftriebskraft, Reibungskraft sowie Wärmetransport durch Leitung und Konvektion):

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot D^3}{\nu \cdot a} \quad \text{mit} \quad [-] \quad /21/$$

$g$ = Erdbeschleunigung =9,81 m/s<sup>2</sup>

$\beta$ = volumetrischer Ausdehnungskoeffizient =  $\frac{1}{T_m}$  bei idealem Gas

$\nu$ =kinematische Viskosität [m<sup>2</sup>/s]

$$a = \text{Wärmeleitzahl} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad [m^2/s] \quad /22/$$

Eine Näherung für die Nusseltzahl nach Hollands [VDI-WA] lautet:

$$Nu = 1 + 1,44 \cdot \left[ 1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos \varphi} \right]^+ \cdot \left( 1 - \frac{(\sin(1,8 \cdot \varphi))^{1,6} \cdot 1708}{Ra \cdot \cos \varphi} \right) + \left[ \left( \frac{Ra \cdot \cos \varphi}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad /23/$$

mit

$\varphi$ =Neigungswinkel (für  $\varphi > 75^\circ$  gilt  $\varphi = 75^\circ$ )

+ nur die positiven Werte in den eckigen Klammern dürfen benutzt werden,  
bei negativen Werten ist die eckige Klammer gleich Null zu setzen

Für diesen Ansatz wurden die Wärmeleitwerte für Konvektion und Wärmeleitung ( $\Lambda_{\text{konv/Lei}}$ ) für Luft, Argon und Xenon bei senkrechten Flächen und den Berandungstemperaturen  $T_1=0^\circ\text{C}$ ,  $T_2=20^\circ\text{C}$  in Abhängigkeit des Flächenabstandes berechnet, s. Bild 35. Am günstigsten schneidet wie erwartet das schwere Edelgas Xenon ab. Die Minima liegen bei Scheibenabständen von 14 bzw. 13 bzw. 6mm mit  $\Lambda_{\text{konv/Lei}}$ -Werten von 1,78 bzw. 1,30 bzw. 0,90 W/m<sup>2</sup>K.



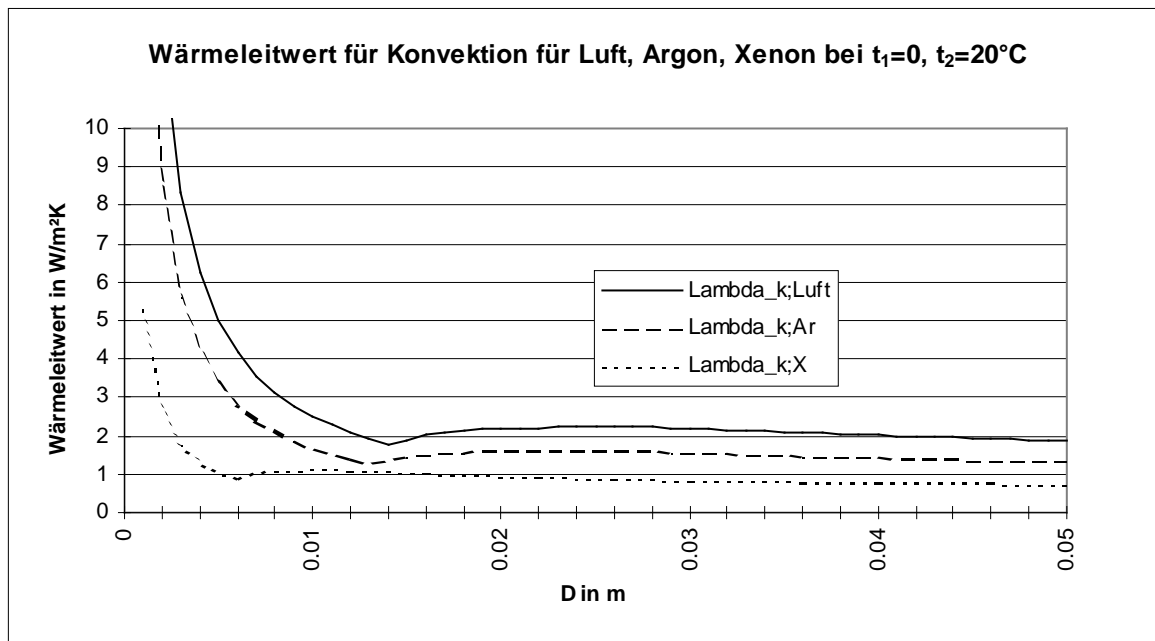


Bild 35: Konvektiver Wärmeleitwert ( $\Lambda_{kon/Lei}$ ) für Luft, Argon, Xenon in Abhängigkeit von der Spaltdicke bei  $t_1=0^\circ\text{C}$ ,  $t_2=20^\circ\text{C}$  nach Berechnungen mit [VDI-WA]

Bild 36 zeigt in den dünneren Kurven die Wärmeleitwerte für Konvektion, Strahlung und deren Summe nach dem Ansatz von Hollands mit  $\epsilon_2=10\%$  für Xenon bei 8mm Abstand in Abhängigkeit einer Berandungstemperatur, die andere beträgt  $0^\circ\text{C}$ . Der Abstand 8mm rührt von der gegebenen Dicke des Abstandhalters der Verglasungs-TWD an der Testzelle. Die Emissivitäten betragen 84 bzw. 10%. Bei niedrigen Temperaturen ist die Konvektion unterbunden ( $Nu=1$ ), der  $\Lambda_{ges}$ -Wert beträgt ca.  $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Ab ca.  $8^\circ\text{C}$  steigt dieser Wert rasch an bis zu  $2,6 \text{ W/m}^2\text{K}$  bei einer Temperaturdifferenz von 100 K. In einer Gegenüberstellung von Meß- und den Rechenergebnissen für den Versuchsaufbau nach Kap. II.7 mit  $D=10\text{mm}$  in Bild 37 ist zu erkennen, daß der Ansatz nach Hollands zu zu hohen  $\Lambda_{ges}$ -Werten führt.

Dies könnte zwei Gründe haben: Entweder gibt der Hersteller der Absorberfolie zu hohe Werte für deren Emissivität bei kleinen Temperaturen an oder der Ansatz für die konvektiven Verluste ist nicht korrekt. Es wäre denkbar und m.E. wahrscheinlich, daß die Konvektion im Spalt auf Grund der größeren Reibung des Xenons an der mikrorauen und perforierten Absorberfolie gegenüber dem Fall mit zwei Glasoberflächen reduziert ist. Es können auch beide Effekte auftreten.

Wärmeleitwert für Xenon,  $D=8\text{mm}$ ,  $T_1=0^\circ\text{C}$ ; nach Hollands mit  $\text{eps}_2=10\%$  bzw.  $7\%$  und nach dem opt. Ansatz

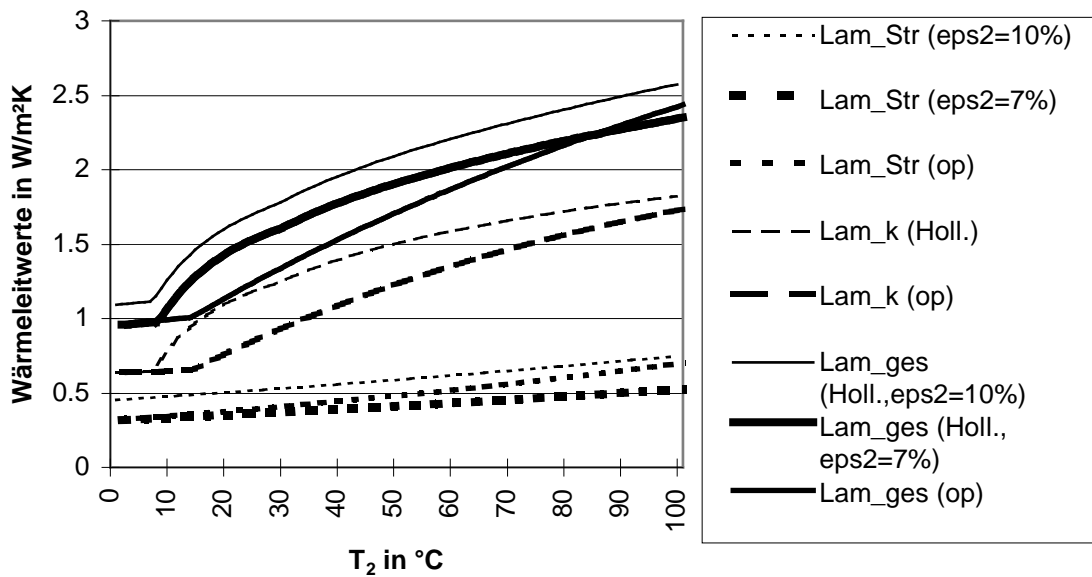


Bild 36: Wärmeleitwerte für Strahlung, Konvektion und gesamten Wärmetransport für eine Verglasungs-TWD mit Xenon-Füllung,  $D=8\text{mm}$

Wärmeleitwert-Wert-Messungen Verglasungs-TWD  $D=10\text{mm}$

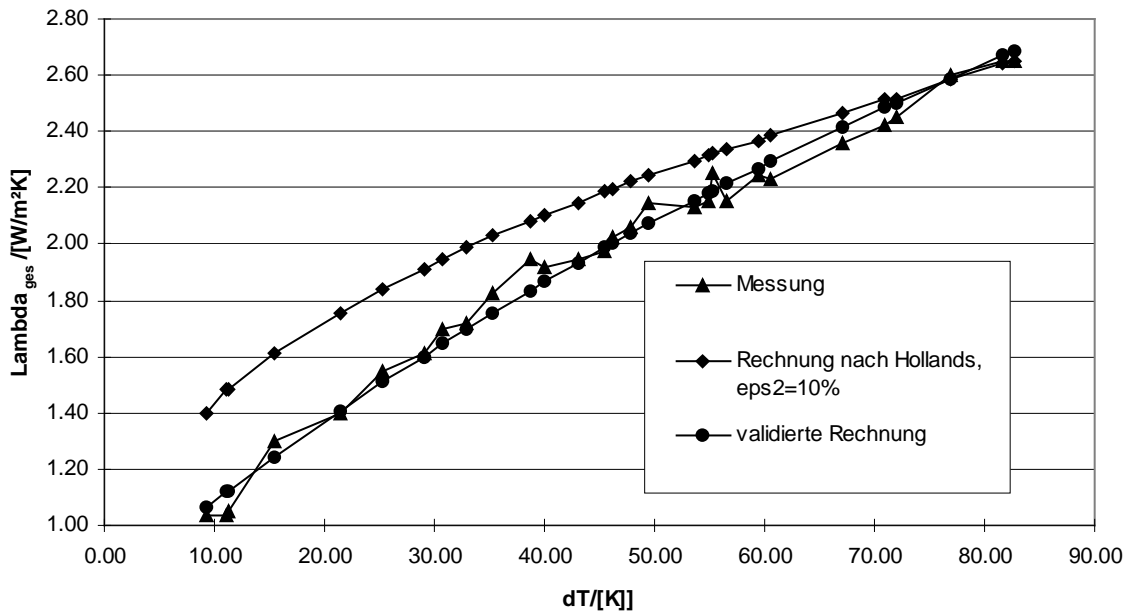


Bild 37: Vergleich Meßwerte -Rechenergebnisse für die Wärmeleitwert -Messungen an einer Verglasungs-TWD mit  $D=10\text{mm}$

Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß die Nusseltzahl mindestens gleich 1 sein muß (reine Wärmeleitung), ergibt sich bei der kleinsten Mitteltemperatur in der Meßreihe eine Emissivität der Folie von 8%, die Emissivität bei der höchsten mittleren Temperatur von 85,6°C wurde zu 11% angenommen und dazwischen linear interpoliert:

$$\varepsilon_2 = 7 + 0,047 t_m \quad \text{in [\%]} \quad /24/$$

Für die Nusseltzahl wird ein linearer Ansatz in Abhängigkeit von der Rayleigh-Zahl in Rechnung gestellt:

$$Nu = \text{MAX}(1 ; 0,59176 + 3,5742 \cdot 10^{-5} Ra) \quad /25/$$

In den Bildern 36 und 37 sind auch die Ergebnisse der optimierten Rechnung mit dem linearen Ansatz für die Nusselt-Zahl dargestellt.

Man sieht, daß die Gesamt-Wärmeleitwerte insgesamt geringer sind, auch beginnt die Konvektion bei etwas höheren Temperaturen, so daß die Annahme einer größeren Haftreibung plausibel erscheint.

In Bild 36 ist auch der Ansatz nach Hollands mit  $\varepsilon_2=7\%$  eingetragen, wie er nach der Parameteridentifikation an der Testzelle für die Simulationsrechnungen verwendet wurde.

Die Abhängigkeit aller Stoffgrößen von der Mitteltemperatur wurde in einem linearen Ansatz berücksichtigt. Im Anhang in den Tabellen A5 und A6 befinden sich die relevanten Stoffgrößen.

## 2.9 FE-Berechnungen zum k-Wert der Verglasungs-TWD

Mit Hilfe von FE-Berechnungen wurde der k-Wert der gesamten Verglasungs-TWD (ohne Einbauverlust) mit Rahmen ermittelt. Der Verlustbeiwert in W/K für Verglasung und Rahmen wurde zunächst statisch berechnet und addiert und davon die Differenz zur FE-Berechnung (Innenflächenintegral) mit Randverbundverlusten gebildet. Die Randbedingungen waren: keine Einstrahlung bei einer Außentemperatur von 0°C und einer Wandtemperatur von 20°C. Tabelle 15 zeigt die Verlustwerte nach Glg. /6/:

	Einheit	ohne Rahmendämmung und ohne Einstand	mit Rahmendämmung und mit Einstand
$k_V$	W/m <sup>2</sup> K	1,09	1,09
$k_R$	W/m <sup>2</sup> K	3,23	1,14
$\Psi_{\text{Glas}}$	W/m K	0,19	0,07
$k_0$	W/m <sup>2</sup> K	1,86	1,27
$k_{\text{ges}}$	W/m <sup>2</sup> K	1,13	0,88

Tabelle 15: Wärmedurchgangswerte der Verglasungs-TWD ohne und mit Rahmendämmung und Glaseinstand

$k_0$  ist der k-Wert der gesamten Verglasungs-TWD mit Rahmen aber ohne Außenwand nach Glg. /6/,  $k_{\text{ges}}$  beinhaltet den Wärmewiderstand der TWD und der Außenwand.

Gegenüber dem k-Wert der ungestörten Verglasung von 1,09 W/m<sup>2</sup>K (bei  $T_1=0^\circ\text{C}$ ,  $T_2=20^\circ\text{C}$ , ohne Einstrahlung, mit äußerem Wärmeübergangskoeffizient von 25 W/m<sup>2</sup>K und beiden Glasscheiben) liegt der erhöhte Verlust der Verglasungs-TWD mit Rahmen und Randverbund bei +71% bzw. +17%. Daraus ist der große Einfluß des Randbereichs ersichtlich, insbesondere ohne Rahmendämmung und Glaseinstand in der Dämmung sind die Verluste sehr groß. Im zweiten Fall wird allerdings auch die Solarapertur geringer (-6%). Ob sich die Dämmung in der Gesamtbilanz positiv darstellt, soll anhand von Gleichung /10/ untersucht werden. Sie stellt ein Näherungsverfahren dar. Nicht berücksichtigt wird insbes. die Temperaturabhängigkeit des  $k_V$ -Wertes (im  $k_0$ -Wert). Für diese Abschätzung soll der Ansatz genügen:

$$q_{\text{HEB,TWD}} = k_{\text{TWD,ges}} \cdot Hgh - g_{\text{diff}} \cdot f_{\text{Verschm}} \cdot f_{\text{Verscha}} \cdot f_{\text{Ra-Verl}} \cdot f_{\text{Apert}} \cdot \frac{k_{\text{ges}}}{k_0} \cdot I \cdot N \quad [\text{kWh/m}^2\text{a}] \quad /10/$$

Der  $k_{\text{TWD,ges}}$ -Wert mit Mauerwerk (24cm KS,  $\lambda=1,1$  W/m<sup>2</sup>K) errechnet sich nach

$$k_{\text{ges}} = \frac{k_w \cdot k_0}{k_w + k_0} \quad \text{mit} \quad /26/$$

$$k_w = \frac{1}{\frac{0,24}{1,1} + 0,13} \text{ W/m}^2\text{K} = 2,87 \text{ W/m}^2\text{K}$$

zu den in Tabelle 15 aufgeführten Werten. Die Aperturfläche beträgt ohne Dämmung 1,77m<sup>2</sup>, mit Dämmung 1,88m<sup>2</sup>, die Gesamtfläche ist 2,13m<sup>2</sup>.

Die mittlere Raumtemperatur wird zu 20°C angesetzt, die mittlere Außentemperatur des TRY05 beträgt in der Heizperiode (Okt.-April, 5088 h) 4,1°C, die mittlere Sonneneinstrahlung auf eine Südfassade 70,8 W/m<sup>2</sup>. Der g<sub>diff</sub>-Wert liegt bei 84%, f<sub>verscha</sub> x f<sub>verschm</sub> bei 0,85.

Der Rahmenverlust wird im k<sub>TWD,ges</sub>-Wert berücksichtigt.

Im Fall **ohne** Dämmung ergibt sich für die Heizperiode (Okt.-April) ein mittlerer Wärmestrom von:

q = -9,1 W/m<sup>2</sup>, über die Heizperiode summiert sind das 46,5 kWh/m<sup>2</sup> an Wärmegewinnen.

Im Fall **mit** Dämmung ergibt sich für die Heizperiode:

q = -15,1 W/m<sup>2</sup>, über die Heizperiode summiert sind das 76,9 kWh/m<sup>2</sup> an Wärmegewinnen.

Der große Unterschied im Wärmegewinn deutet auf das große Verbesserungspotential durch den wärmedämmten Rahmen mit Glaseinstand in der Dämmung hin.

## **2.10 Valuierung eines FORTRAN-Programms zur Simulation der Testzelle mit Verglasungs-TWD anhand der Meßdaten**

Es wurde ein FORTRAN-Programm-Modul zur Beschreibung der Testzelle und der Verglasungs-TWD entwickelt und in das Programmpaket TRNSYS [TRNSYS14.2] eingebunden. So konnten vorhandene Module wie Wetterdatenleser und Ausgabe-Drucker genutzt werden.

Das TRNSYS-Modul (TYPE70) wurde nach einem 2-Knotenmodell von Feist [FEIST2] mit einem Luft- und einem Strahlungsknoten modelliert. Dabei gibt es zwei massebehaftete Wandstücke (TWD-Wand aus KS, Mitte und Randbereich) und 4 masselose Wände. Der Luftknoten selbst wie auch die Wasserbehälter im Inneren des Raums besitzen auch eine Masse.

Eine Modellbeschreibung findet sich in Anhang in Tabelle A7, eine Modellskizze in Bild A12.

Der Wärmedurchgang durch die Wand wird mit finiten Vorwärtsdifferenzen berechnet. Nach der Parameteridentifikation mit den Meßwerten der Testzelle wurde für die Verglasungs-TWD nach Kap. II.8 die beste Übereinstimmung mit dem Ansatz nach Hollands und einer Emissivität von 7% ermittelt, die Werte liegen weitgehend zwischen dem Ansatz nach Hollands mit  $\epsilon_2=10\%$  und dem obigen optimierten Ansatz, bei höheren Temperaturen ergeben sich noch niedrigere Werte für  $\Lambda_{\text{ges}}$  unter dem optimierten Ansatz.

Eingabegrößen sind die diffuse und die gesamte Strahlung auf die Südfassade sowie der Einfallswinkel und die Außenlufttemperatur. Der äußere Wärmeübergangskoeffizient wird nach [DIN4108T4] mit konstant 25 W/m<sup>2</sup>K angenommen, da keine Windmessungen möglich waren.

Durch die Parameteridentifikation wurde der  $\Lambda$ -Wert der Kontaktschicht in TWD-Mitte zu 12 W/m<sup>2</sup>K ermittelt. Dieser Wert ist nicht besonders hoch und deutet auf einen ungenügenden Kontakt des Absorbers zur Außenwand hin. Mit diesem Wert wurde auch weitergerechnet.

## 2.11 Ergebnisse der Testzellensimulation

Das obige Simulationsprogramm wurde mit Hilfe der Meßergebnisse der Testzelle validiert und eine Parameteridentifikation durchgeführt. Das Validierungskriterium hierbei waren die Übereinstimmung der Temperaturen in der TWD-Wand-Mitte (vom Raum aus gesehen) in verschiedenen Tiefen, der Wärmestrom in den Raum sowie die Raumluft- und Wassertemperaturen.

Zunächst wurde eine Periode im Februar gewählt und die Parameteridentifikation durchgeführt. Es zeigte sich für die Kriterien eine gute Übereinstimmung in TWD-Mitte, während die Temperaturen am Rand der TWD weniger gut übereinstimmten (s. Bilder 38a,b). Dies ist auf die 3-dimensionalen Wärmeleitvorgänge dort zurückzuführen (s. Kap. II.9). Es besteht also eine gewisse Unsicherheit darüber, wieviele Wärmegewinne dieser Randbereich einbrachte und wieviele Wärmeverluste die Testzelle über die opaken Außenbauteile hatte. Da die Raumluft- und Wassertemperaturen übereinstimmten, war die Wärmebilanz insgesamt gleich. Somit ist eine Aussage über das thermische Verhalten im ungestörten Bereich der TWD-Mitte möglich, nicht jedoch für den Randbereich, der auch je nach Einbausituation und je nach Ausführung des Rahmens und Randverbundes unterschiedlich sein kann.

In das validierte Modell wurden nun die gemessenen Wetterdaten von Anfang Mai eingegeben. Unter Annahme gleichbleibender thermischer Parameter müßte das Modell auch Simulationsergebnisse gleich den Meßwerten liefern. Dies war nicht der Fall (s. Bilder 39a,b). Insbesondere der Wärmeeintrag durch die TWD-Wand ist höher als in den Meßergebnissen, auch die Raum- und Wassertemperaturen sind am Ende der Periode zu hoch. Da die k-Werte der übrigen Bauteile i.d.R. eine minimale Temperaturabhängigkeit besitzen, kann dies nur erhöhten Wärmeverlust bzw. geringere Wärmegewinne durch die Verglasungs-TWD bedeuten. Meines Erachtens hat hier die Randverbunddichtung versagt und Xenon ist ausgeströmt, so daß der konvektive Wärmeübergang im Gasspalt deutlich erhöht ist.

Dies wird einsichtig unter Berücksichtigung der Temperaturen am Absorber von bis zu 120°C, am Rand waren es noch 65°C (Maximalwerte der gesamten Meßzeit). Der Randverbund ist nicht für so hohe Temperaturen ausgelegt.

Es stellt sich die Frage, ob der Randverbund auch dann versagt hätte, wenn die Temperaturen am Absorber im Falle eines besseren Wärmekontakts zur Wand weit niedriger gewesen wären. Untersuchungen hierzu konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden.

Weitere Berechnungen gehen von einem dichten Randverbund aus und betreffen die Heizenergieeinsparung der Verglasungs-TWD. Es wurde wie bei der herkömmlichen TWD mit Verschmutzung (5%), aber ohne Verschattung des Horizonts gerechnet. In der kürzeren Heizzeit Oktober bis April wird im ungestörten TWD-Bereich ca. 88 kWh/m<sup>2</sup> in den Raum eingetragen, mit den vermiedenen Verlusten einer NEH-Wand beträgt die Heizenergieeinsparung maximal 112 kWh/m<sup>2</sup>a. In der längeren Heizperiode bis Mai könnten bis zu 139 kWh/m<sup>2</sup>a eingespart werden (N=1), allerdings wird der Nutzungsgrad der TWD-Gewinne im Mai in einem NEH gering sein (N<<1).

Damit läge die Energieeinsparung im Bereich der herkömmlichen TWD.



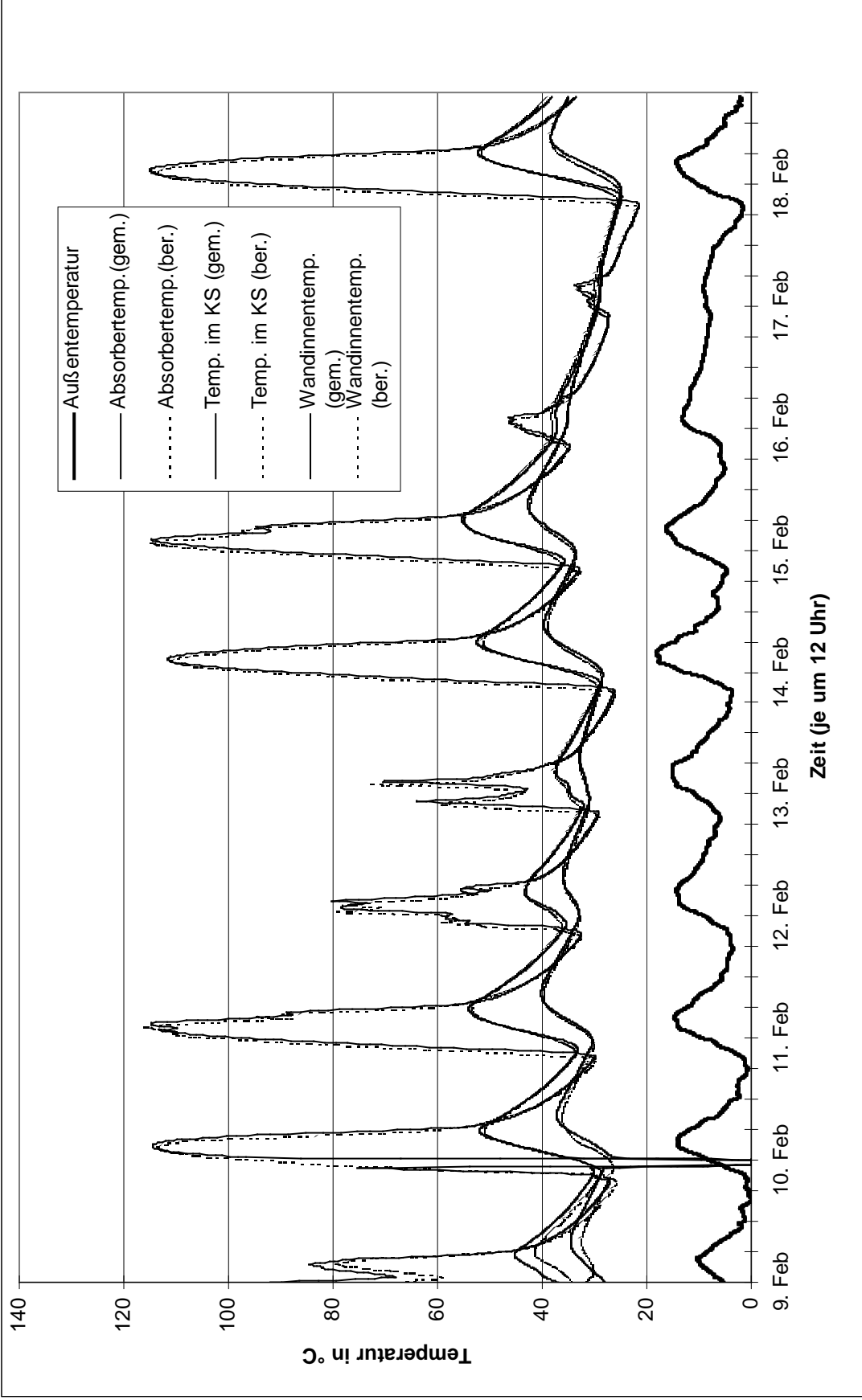


Bild 38a: Testzelle 9.2.-19.2.1998: Temperaturen an der Vergleichs-TWD und in der KS-Wand (Mitte) (Messungen und Simulationsrechnungen)

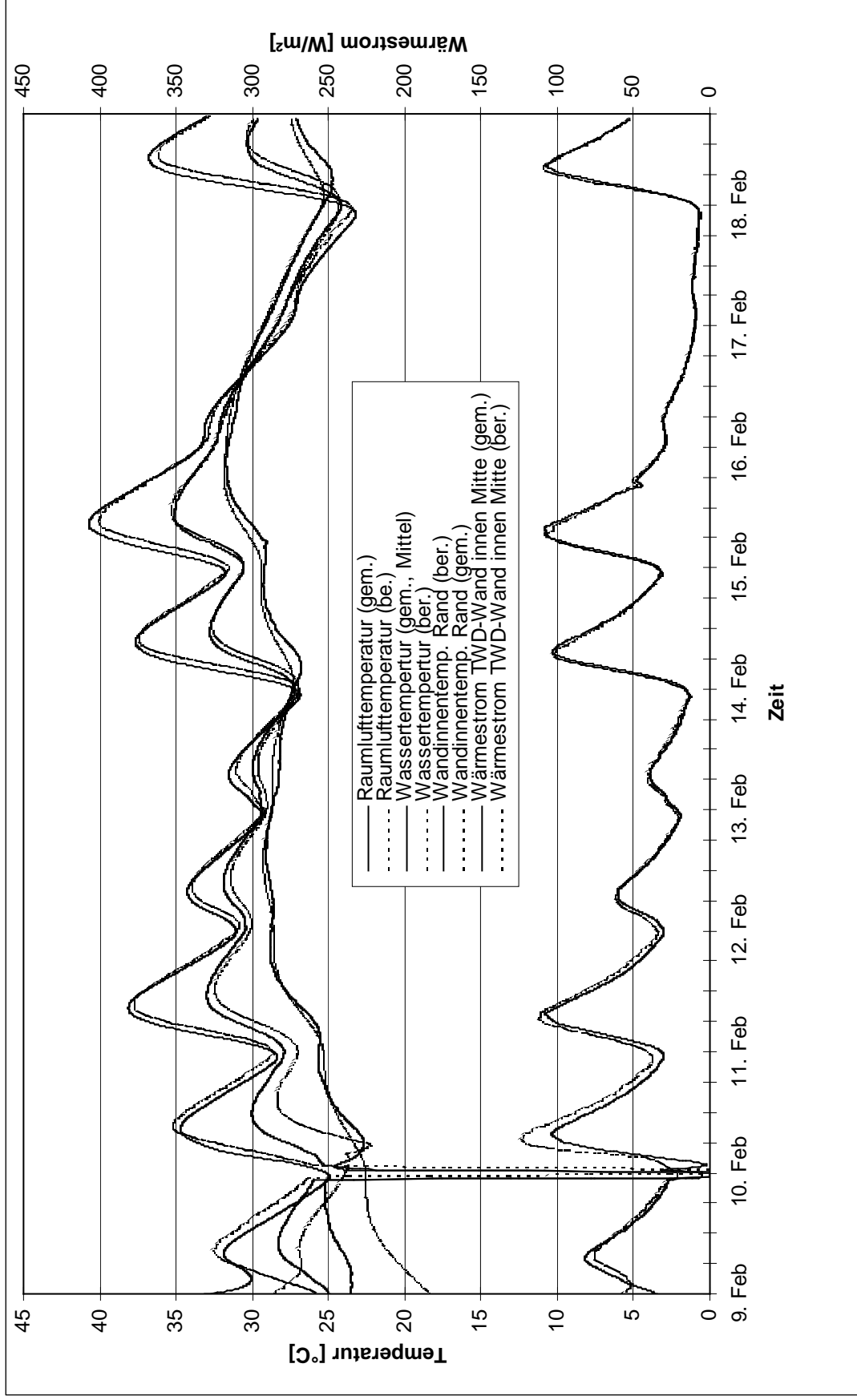
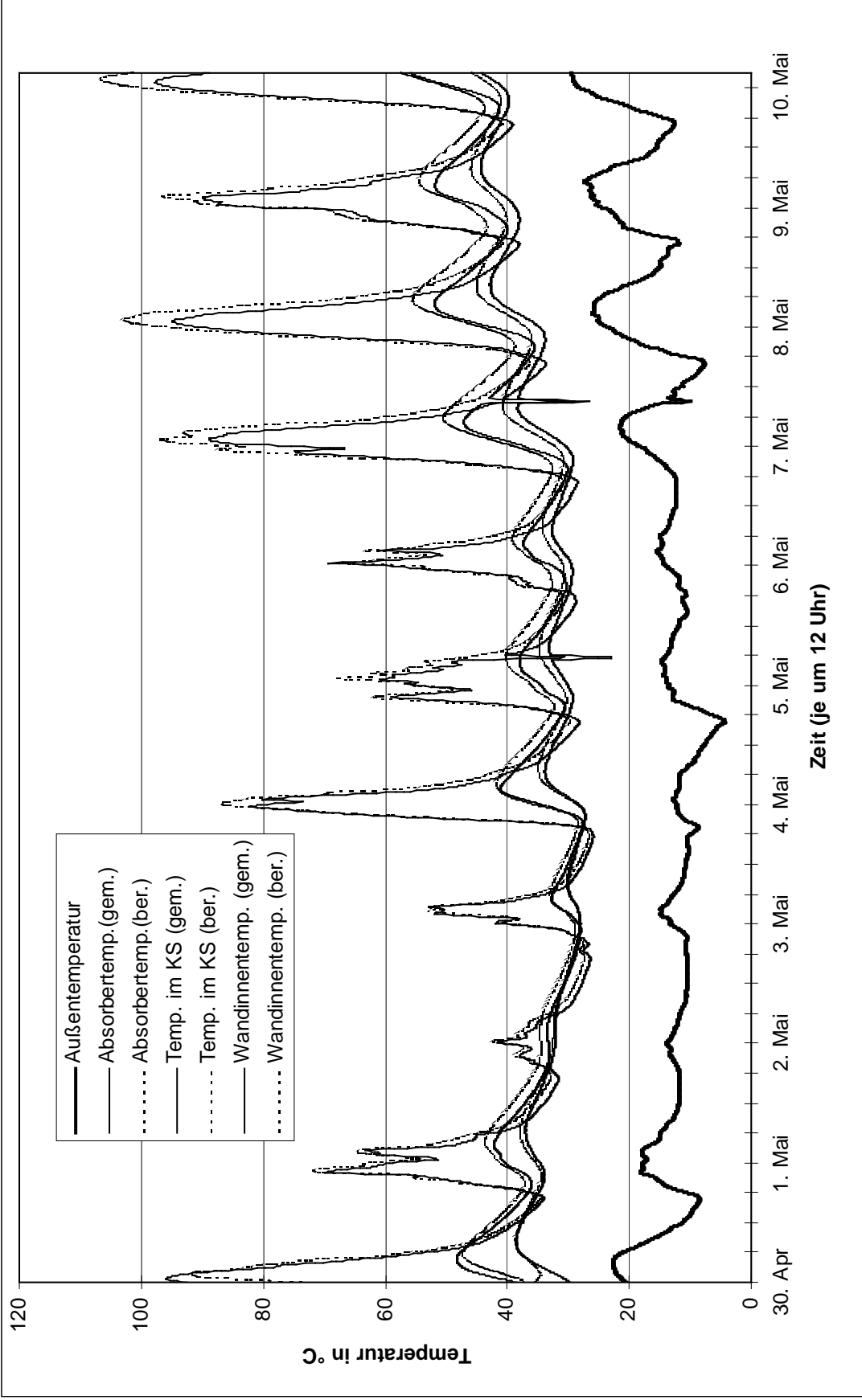
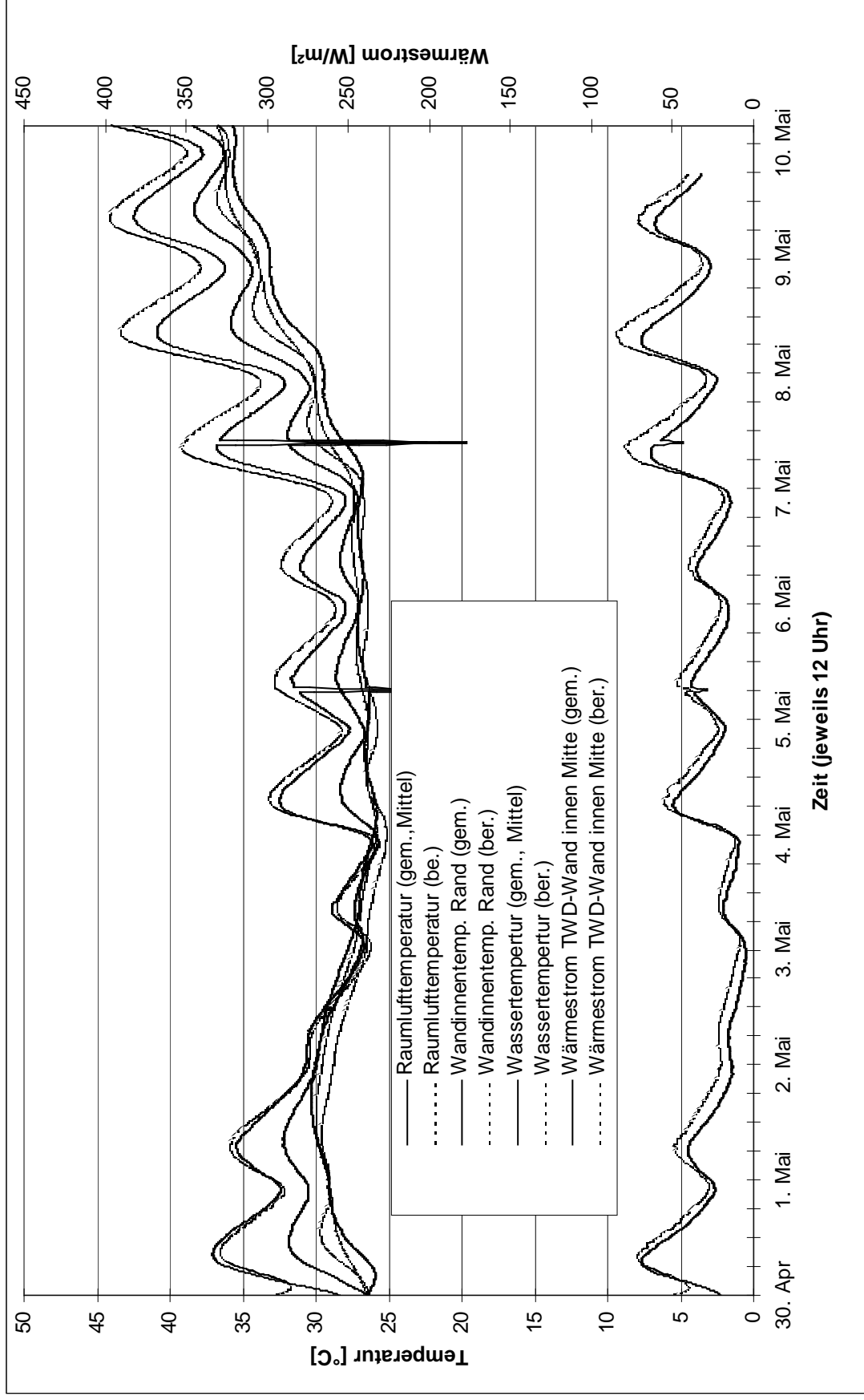


Bild 38b: Testzelle 9.2.-19.2.1998: Raumtemperaturen, Temperatur an der KS-Wand (Rand) und Wärmestrom an der VTWD-Wand (Mitte)



Bilder 39a: Testzelle 30.4.-10.5.1998: Temperaturen an der Verglasungs-TWD und in der KS-Wand (Mitte)  
(Messungen und Simulationsrechnungen)



Bilder 39b: Testzelle 30.4.-10.5.1998: Raumtemperaturen, Temperatur an der KS-Wand (Rand) und Wärmestrom an der VTWD-Wand (Mitte)

### 3 Zusammenfassung

Mit Hilfe von Messungen an 5 TWD-Gebäuden wurde der thermische Komfort in TWD-Räumen untersucht und mittels begleitender Simulationsrechnungen ein Vergleich mit dem Niedrigenergiestandard aufgestellt. Parameterstudien zur optimalen TWD-Dimensionierung, zur Regelung der TWD-Verschattungseinrichtung, zur Regelung und Dimensionierung der Zusatzheizung und zur erwartbaren Heizenergieeinsparung und Kosteneffektivität schließen sich an.

Es wird deutlich, daß die Wirkung der TWD sehr komfortabel sein kann: der großflächige und verzögerte Wärmeeintrag stellt eine angenehme Grund-Strahlungsheizung dar. Die Strahlungstemperaturen sind insbes. vor der TWD-Wand, aber auch in Raummitte i.d.R. höher als die Lufttemperatur. Wie lange der Komfort durch die TWD verbessert wird, hängt neben der Witterung vor allem von der Trägheit des Raums ab. Die TWD-Wandinnentemperatur ist je nach Außentemperatur bis maximal ca. 2 Tage nach einer strahlungsreichen Periode über 20°C warm, eine normale Beheizung vorausgesetzt.

Während die Strahlungstemperaturen in Raummitte im NEH geringfügig unter der Lufttemperatur liegen, liegen sie im TWD-Raum im Jahresmittel um ca. 0,2 K über der Lufttemperatur.

Der TWD-Wärmeeintrag kann in Verbindung mit den direkten Wärmegewinnen durch die Fenster kritisch sein: es kann insbes. in der Übergangszeit Überhitzung mit großen Temperaturschwankungen auftreten. Gerade dann sind die hohen Wärmegewinne z.T. nicht nutzbar, so daß die Heizenergieeinsparungen im NEH mit 35 bis 80 kWh/m<sup>2</sup><sub>TWDa</sub> gegenüber der opaken Dämmung wesentlich geringer ausfallen als zunächst erwartet. Im Passivhaus sind nur noch 2 bis 70 kWh/m<sup>2</sup><sub>TWDa</sub> einzusparen. Diese Werte beziehen sich auf eine durch den Horizont unverschattete Südfassade und beinhalten die Verluste durch Verschmutzung und den Rahmen.

In längeren strahlungsarmen Perioden kann die TWD-Wand mit 120mm TWD-Material eine Verlustfläche mit effektiven k-Werten entsprechend einer opak gedämmten Wand in NEH-Standard werden ( $k_{\text{eff}} \leq 0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

In den Winterkernmonaten besteht i.d.R. keine Überhitzungsgefahr. Nur in Extremfällen mit sehr gutem Wärmedämmstandard und geringer Raumtiefe kleiner 4m oder wenn neben den Fensterwärmegewinnen zusätzliche Fremdwärme in den Raum gelangt, können Komfortprobleme auftreten. Die Heizung sollte eine Einzelraumheizungsregelung besitzen.

Zwar kann der thermische Komfort in der Übergangszeit durch Nutzereingriff voraussichtlich noch erhalten werden, zur Minderung der Überhitzungsneigung und zur Steigerung der Kosteneffektivität sollte die TWD jedoch nur kleinflächig angewandt werden. Einen Komfortvorteil bringt die Möglichkeit, in der Übergangszeit ohne Temperaturabfall mehr lüften zu können und damit die Luftqualität zu verbessern.

Die wichtigsten Rahmenbedingungen zur Entfaltung der TWD-Vorteile sind eine durch den Horizont unverschattete Südfassade sowie eine Nutzung des dahinterliegenden Raums am Abend, wenn die TWD ihre Wärme abgibt. Andernfalls sind die Heizenergieeinsparungen noch geringer, der Komfortgewinn reduziert.

Sollte eine großflächige Anwendung gewünscht werden, so müßten auch sehr große raumseitige Speichermassen wie im ES vorgesehen werden, wie sie z.Z. nicht üblich sind. Andernfalls wäre die Überhitzungsgefahr wie die Raumtemperaturschwankungen groß, die spezifischen Energieeinsparungen und die Kosteneffektivität gering.

Aus Sicht der Kosteneffektivität sollten andere verlustmindernde Maßnahmen vor der TWD angestrebt werden. Ausgehend von einem NEH-Neubau sind die noch bessere Wärmedämmung, bessere Fenster sowie die Lüftungswärmerückgewinnung wirtschaftlicher als die TWD. Außerdem kann ein kompakter Bau sowohl Energie wie auch Kosten einsparen. Nach Anwendung dieser Maßnahmen wird der Energiegewinn der TWD allerdings sehr gering sein. Bei der Altbausanierung in NEH-Standard sind gute Fenster mit Dreifach-Wärmeschutzverglasung und PU-Rahmen anstatt Zweifach-Wärmeschutzverglasung mit Holzrahmen wirtschaftlicher als die Verwendung der TWD anstatt einer opaken Dämmung.

Die Situation hat sich in der letzten Zeit auf Grund der deutlichen Verbesserungen moderner Fenster bei der Verglasung und bei den Rahmensystemen geändert:

Durch Einsatz einer guten Dreifachwärmeschutzverglasung mit hochwärmedämmendem Rahmen anstatt einer Zweifachwärmeschutzverglasung mit Holzrahmen kann etwa genauso viel Energie eingespart werden wie durch die Verwendung der TWD anstelle einer opaken Dämmung (NEH-Standard), ersteres zu weit niedrigeren Kosten..

Es bleibt für die TWD bei guter Planung der Komfortvorteil, auf der anderen Seite steht aber eine gewisse Überhitzungsgefahr. Natürlich sollte auch eine Dreifachwärmeschutzverglasung

nur kleinflächig angewandt werden, da der Passivhausstandard noch stärker zur Überhitzung neigt.

Andererseits ist es verständlich, die Solarenergie in einer angenehmen Form als großflächige Strahlungsheizung im Raum erspüren zu wollen.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde ein neues kostengünstiges TWD-System auf der Basis einer Zweifach-Wärmeschutzverglasung auf deren Leistungsfähigkeit hin untersucht. Nach den Berechnungen kann diese TWD im Prinzip ähnliche Energieeinsparungen wie die herkömmliche TWD bringen. Es stellte sich allerdings heraus, daß der Randverbund des Prototyps der Verglasung-TWD, welcher an der Testzelle verwendet wurde, im Laufe der Messungen undicht wurde. Dessen thermische Belastung war zeitweise sehr hoch, die Absorbertemperaturen stiegen z.T. bis auf 120°C. Es ist noch zu untersuchen, ob der Randverbund bei einem besseren Wärmekontakt zur Wand und damit niedrigeren Temperaturen auf Dauer dicht bleibt. Außerdem müßte eine praxisnähere Lösung zur Füllung des Spaltes zwischen Verglasung und Wand gefunden werden als die Füllung mit Metallspänen. Sollte die Prismenverglasung in üblichen Scheibengrößen herstellbar sein, so könnten die voraussichtlichen Kosten der Verglasungs-TWD mit einer Prismenaußenscheibe als Verschattung bei 600 DM/m<sup>2</sup> liegen, d.h. im Bereich des transparenten Wärmedämmverbundsystems. Die Wärmegestehungskosten liegen mit 18 Pf/kWh im Bereich derer des transparenten Wärmedämmverbundsystems (auch auf Grund des z.Z. hohen Xenonpreises).

Insgesamt würde der Autor jedoch auf Grund des eingeschränkten Komfortvorteils mit Überhitzungsgefahr sowie deren geringen Energieeinsparung auf eine TWD verzichten und die oben genannten weiteren Maßnahmen in der Reihenfolge ihrer Kosteneffektivität anwenden.

Es ist insbes. energetisch und ökonomisch sinnvoller, die thermischen Schwachstellen Fenster und die Lüftung durch Einsatz der Lüftungswärmerückgewinnung, wenn möglich und akzeptiert, zu verbessern, als eine relativ gut wärmedämmende Außenwand durch eine TWD-Wand zu ersetzen.

## 4 Literaturverzeichnis

- [BBB] Wagner, A.: Transparente Wärmedämmung zur passiven Solarenergienutzung an Gebäuden. Bundesbaublatt 1/98, S. 40-45
- [BINE] Fachinformationszentrum Karlsruhe (Hrsg.): BINE-Informationdienst, profiinfo 1/96: Transparente Wärmedämmung.
- [BUCK1] comfort-xyz: Programm zur Berechnung der räumlichen Verteilung der Strahlungstemperatur sowie der operativen Temperatur und des PMV-Wertes im Raum. Karlsruhe, 1995
- [BUCK2] comfort-time : Programm zur Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Strahlungstemperatur sowie der operativen Temperatur und des PMV-Wertes an einem Punkt im Raum. Karlsruhe, 1995
- [CAPATECT] Firmenprospekt der Fa. Capatect, 1996
- [DIN 1946T2] DIN 1946, Teil 2: Raumluftechnik - Gesundheitliche Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln). Jan. 1994
- [DIN4108T4] DIN 4108, Teil 4: Wärmeschutz im Hochbau.. Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte. Dez. 1985
- [DIN4108T5] DIN 4108, Teil 5: Wärmeschutz im Hochbau. Berechnungsverfahren. Aug , 1981
- [DIN4701T1] DIN 4701, Teil 1: Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden.. Grundlagen der Berechnung. März,1993
- [EISENMANN] Eisenmann, G.: Ist das Heizsystem im künftigen Niedrigenergiehaus problematisch? Bauphysik 20(1998), H.4, S. 115-121
- [EMPA] Egolf, P.W., Manz, H.: Latentwärmespeicher für die Sonnenenergienutzung: Lade- und Entladevorgänge. Zwischenbericht des NEFF-Projektes Nr. 515, EMPA, Dübendorf, 1996
- [ERL] Dorer, A., Moser., V: Grundlagen der Raumluftströmung. Forschungsprogramm Energierrelevante Luftströmungen in Gebäuden. 1994
- [FRANK] Frank, T.: Thermische Verbesserung des Glasrandverbundes. 8. Statusseminar "Energieforschung im Hochbau", Dübendorf (CH), Sept. 1994
- [FESIT1] Feist, W.: Fensterrahmen und Randverbund - die bisher schwächsten Glieder. 2. Passivhaus-Tagung, Düsseldorf, Febr.1998



- [FESIT2] Feist, W.: Thermische Gebäudesimulation -kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze. 1.Aufl., Verlag C.F. Müller, Heidelberg, 1994
- [FESIT3] Feist, W.: Das Niedrigenergiehaus - Neuer Standard für energiebewußtes Bauen. 4.Aufl., C. F. Müller, Heidelberg, 1997
- [HEIDENHEIM] Reiß, J., Erhorn, H.: Niedrigenergiehäuser Heidenheim. Abschlußbericht. IBP-Bericht WB 75/1994
- [HEIZANLV94] Verordnung über energiesparende Anforderungen an heizungstechnische Anlagen und Brauchwasseranlagen. März 1994
- [INCO] Firmenangaben der Fa. INCO Alloys International Ltd.
- [ISE-TWD] Fraunhofer-Gesellschaft, Institut für Solare Energiesysteme: TRNSYS-Modul zur Berechnung der Transparenten Wärmedämmung., 1992
- [ISFH] Christophers, D.: Seasonal Shading of Vertical South-Facades with Prismatic Panes, Solar Energy, Vo. 57, No.5, 1996, S. 339-343
- [ISO 7730] Deutsches Institut für Normung: DIN ISO 7730. Ermittlung des PMV und des PPD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit. Sept. 1995
- [KERSCHBERGER] Kerschberger, A.: Wirtschaftlichkeit von transparenten Wärmedämmsystemen zur Gebäudeheizung. 1.Aufl., Institut für Bauökonomie der Univ. Stuttgart, 1994, Bauökon. Papiere 56
- [KUMMER] Kummer, J.P.: A simplified model for transparently insulated walls.
- [LINDE] mündliche Angaben der Fa. Linde AG
- [LUDWIG] Ludwig, D.: Neue Verschattungsmöglichkeiten im Geschoßwohnungsbau. Bauphysik 20 (1998), H.4, S. 110-114
- [NEFF] (Hrsg.:. EMPA. Abtlg. Bauphysik, Dübendorf und Institut Bau und Ökologie, Bern: NEFF Bericht Nr. 366: Oberflächentemperaturen von besonnten Fensterglasscheiben und ihre Auswirkungen auf Raumklima und Komfort.
- [NICOL] Nicol, F., Sykes, O.: Smart Controls for Thermal Comfort, the Scats Project. EPIC'98, Nov. 1998, Lyon, S.844
- [OKALUX] Firmenprospekt zu Kapilux H, 1995
- [PAPIERWABEN] Hingerl, K., Aschauer, H.: Transparente Wärmedämmung mit Papierwaben, Bauphysik 17 (1995), H.2, S. 44-47

- [PAZEN] Pazen, G.: Entwicklung und Demonstration eines Fenstersystems aus hochwärmedämmenden Rahmenwerkstoffen auf der Basis von Holzfensterrahmen. in [SOALROPT98]
- [PLATZER] Platzer, W.: Transparente Wärmedämmung - Materialaspekte und Systemvarianten. Tagung: TWD-Erfahrungsberichte aus der Praxis. Zürich, 1994
- [POSSBERG] Poßberg, N.: Energiesparendes Bauen und Modernisieren. Spektrum der Wissenschaft-Sonderheft Klima-und Energie. 1996
- [REMMERS] Remmers, K.-H.: Forum Solarpraxis: Selektive Schichten. Sonnenenergie und Wärmetechnik 4/98, S. 11-14
- [RUBNER] Frank, W.: Raumklima und thermische Behaglichkeit. Berichte aus der Bauforschung. Sonderdruck aus Heft 104, 1975
- [REGLÜ] Lehmann, J., Löffler, M.:Dezentrale bedarfsorientierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft mittels ortsfester Regeneratoren. Bauphysik-Berichte aus Forschung und Praxis. Hrsg. Hauser. Kassel, 1998, IRB-Verlag
- [STO] Firmenprospekt der Fa. STO AG zu STO Therm Solar, 1996
- [SOLAROPT94] Forschungszentrum Jülich/BEO: Solaroptimierte Gebäude mit minimalem Heizenergiebedarf, Statusbericht '94, Hannover, Sept.1994, S. 64-103
- [WSVO95] Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden. Aug. 1994
- [SOLAROPT98] Forschungszentrum Jülich/BEO: Solar optimiertes Bauen, Statusbericht '98, Freiburg, April 1998, S.109-133
- [SIT] SIT Solar Technologies: Flexible und robuste Absorberbeschichtung. Sonnenenergie und Wärmetechnik 5/97, S. 62
- [SUNSELECT] Firmenprospekt Fa. Interpane B&E GmbH, 1997
- [SIA180] Schweizerischer Ingenieur und Architekten-Verein: SIA 180 "Wärmeschutz im Hochbau", Zürich 1989
- [TRY05] Testreferenzjahr 05 (nördliches Baden-Württemberg und Bayern), Deutscher Wetterdienst
- [TRNSYS13] TRNSYS13: Transient System Simulation. Solar Energy Laboratory. University of Wisconsin-Madison. Version 13, 1992
- [TRNSYS14.2] TRNSYS14: Transient System Simulation. Solar Energy Laboratory. University of Wisconsin-Madison. Version 14.2, 1996

- [THERMARK] Lehmann, J., Maiwald, R.: Auswirkungen des thermischen Verhaltens der Außenwände auf das Raumklima. Abschlußbericht DFG-Projekt THERMARK, Karlsruhe, 1996
- [VDI-WA] VDI-Wärmeatlas, 6. Auflage, Düsseldorf 1991
- [VOSS] Voss, K.: Experimentelle und theoretische Analyse des thermischen Gebäudeverhaltens für das Energieautarke Solarhaus Freiburg. Dissertation, 1996
- [VEGLA] mündliche Angabe zu g- und k-Werten von Verglasungen (März 1999)
- [WSVO95] Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung) . Aug. 1994
- [WILKE] Wilke, W.-S.: Transparente Wärmedämmmaterialien in der Architektur - Anwendungen, thermisches Systemverhalten und optimale Raumklimakonditionierung. Dissertation. Karlsruhe, 1991
- [ZAE1] Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung (Hrsg.): Tätigkeitsbericht 1997
- [ZAE2] Geuder, N., Klett, U., Fricke, F.: Mikrostrukturierte Prismensysteme zur Solarenergienutzung. Int. Sonnenforum, Köln, Juli 1998

## 5 Anhang

### 5.1 Tabellen im Anhang

#### 1 Messungen

1994	Freiburg/Tiengen (22.2.-24.2.) 2 Tage gemischt bewölkt relativ warmC			
1995	Keltern (4.1.-7.1.) 3 Tage sonnig kalt bis sehr kalt	ES1 (1.2.-9.2.) ES4 (25.2.-28.2.)	ES2(9.2.-17.2.) ES5(7.3.-17.3.) in Freiburg 6 Wochen, gestückelt meist gemischt bewölkt, relativ warm	ES3 (17.2.-25.2.) ES6 (17.3.-23.3.)
1996	Donau- eschingen (1.2. bis 9.2.) 8 Tage gemischt/sonnig kalt bis sehr kalt	Windberg  (15.2. bis 20.2.) 5 Tage trüb kalt		

#### 2 Simulationsrechnungen KELTERN

zur thermischen Behaglichkeit:

Keltern TWD (4.1.-7.1.) reales Wetter reale Heizung	Keltern TWD (4.1.-7.1.) reales Wetter ideale Heizung	Keltern opak (NEH) (4.1.-7.1.) reales Wetter ideale Heizung
---	--	---

zum Jahresheizwärmebedarf:

Keltern TWD (1.10.-30.4.) TRY-Würzb. ideale Heizung	Keltern opak (NEH) (1.10.-30.4.) TRY-Würzb. ideale Heizung	Keltern opak (Passivh.) (1.10.-30.4.) TRY-Würzb. ideale Heizung
---	--	---

Tabelle A1: Übersicht über die Meßperioden und Simulationsrechnungen für Haus Abrecht

	Einheit	Freiburg/ Tiengen	Keltern	Freiburg	Donau- eschingen	Windberg
Nutzfläche ( $A_{Nutz}$ )	m <sup>2</sup>	11.43	18.54	33	12.22	23.81
Verluste ohne TWD bez. auf $A_{Nutz}$	W/m <sup>2</sup> K	1.03	0.63	0.4	1.03	0.76
sol. Gewinne durch Fenster $\Sigma g \cdot SF \cdot A_v / A_{Nutz}$		0.13	0.19	0.21	<=0.13*	0.17
interne Gewinne	W/m <sup>2</sup>	2.3	1.67	ca. 2	2.5/9.1 **	1.3
Speicherkapazität	kWh/m <sup>2</sup> K	0.28	0.11	0.41	0.2	0.19
Zeitkonstante	h	272	179	1024	151	244
Fensterart	-	2WSV	2WSV+1	2WSV+2WSV	2ISO zu Wiga	2WSV
Fenster $k_v$ -Wert	W/m <sup>2</sup> K	1.3	1.21	0.54	2.8	1.3
<b>TWD</b>						
Fläche der TWD: $A_{TWD}$ (brutto) am Meßraum	m <sup>2</sup>	6.1	8	15.77	5.02	5.45
$\Sigma A_{TWD} / A_{Nutz}$		0.53	0.43	0.48	0.41	0.23
TWD-Dicke	mm	100	120	120	80	48
TWD-Wand		24cm Ziegel	30cm KSV	30cm KSV	24cm KSV	30cmKSV
$g_{diff}$ der TWD		ca. 0.68	0.58	0.61	0.57	0.67
k-Wert der TWD	W/m <sup>2</sup> K	ca. 0.85	0.75	0.80	0.90	1.40
g/k-Verhältnis	m <sup>2</sup> K/W	ca. 0.8	0.77	0.76	0.63	0.48
$k_{ges}$ (Wand+TWD)	W/m <sup>2</sup> K	ca. 0.57	0.57	0.59	0.67	0.87
Verschattung	-	Rollo (innenliegend)	Plissee-Store (innenliegend)	Rollo (innenliegend)	Plissee-Store (innenliegend)	Außen- jalousie
Verschattungs-Regelung nach		(per Hand: saisonal)	Zeitsteuerung	Außenluft-T. Einstrahlung Absorber-T.	Außenluft-T. Einstrahlung Absorber-T.	(per Hand: saisonal)
in Meßzeit		offen	tags offen/ nachts zu	tags offen/ nachts zu (bis auf 1 mal)	tags offen/ nachts zu	offen

$A_{Nutz}$	Nutz-/Fußbodenfläche	* darin SF(Ost, verschattet) geschätzt
$A_v$	TWD_Fläche	** tags/nachts
$g_{diff}$	Fensterglasfläche	
SF	Gesamtenergiedurchlaßgrad für diffuse Einstrahlung	
2WSV	Solargewinnfaktor	
2ISO	Wärmeschutzverglasung (2 Scheiben)	
2WSV+1	Isolierverglasung (2 Scheiben)	
Wiga	=2WSV+ 3.Scheibe Schallschutzglas	
	Wintergarten	

Tabelle A2: Kenndaten der Meßräume und deren TWD

	Freiburg/ Tiengen	Keltern	Freiburg	Donaueschingen	Windberg
<b>Wetter</b>	gemischt bewölkt, wärmer	sonnig sehr kalt	gemischt bewölkt, wärmer	gemischt bewölkt/ sonnig kalt bis sehr kalt	trüb kalt
<b>interne Wärme- quellen</b>	Meßgeräte TA (25 W)	Meßgeräte TA (6 bzw. 31 W)	Meßgeräte TA u. vom FhG-ISE (ca. 60 W)	Meßgeräte TA, Nutzung vorwieg. nachts (1 Person)	Meßgeräte TA (31 W)
<b>Heizung</b>	(Heizkörper unter Fenster) in der Meßzeit keine	Zuluftheizung zentral	(Zuluftheizung zentral) in der Meßzeit: keine	(Fußbodenhgz.) in der Meßzeit: keine	Heizkörper an Raumteiler
<b>Lüftung</b>	Fensterlüftung: hier keine, nur Infiltration $n_{\text{inf}} < 0,1/\text{h}$	zentrale Lüftungs- anlage mit WRG (80% WRG) $V_{\text{mech}} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$ $n_{\text{inf}} \approx 0,06/\text{h}$	zentrale Lüftungs- anlage mit WRG (90% WRG) $V_{\text{mech}} = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ $n_{\text{inf}} \approx 0,03/\text{h}$	Fensterlüftung: Kipplüftung ( $n \approx 1,5/\text{h}$ ) und 3x Stoßlüftung ( $n = 5$ bis $10/\text{h}$ )	Fensterlüftung: hier keine, nur Infiltration $n_{\text{inf}} \approx 0,1/\text{h}$
<b>Kühlung</b>	keine	keine	keine	mit Lüftung	keine
Sonstiges	-	in den Nachbar- räumen Fenster- verschattung	-	benachbart zu Wintergarten, Abseite mit Hei- zungsrohren	Schnee auf dem Erdboden

Tabelle A3: Randbedingungen in den Meßsituationen

	PMV-Wert vor TWD/ in RM	Strahlungstemp- Asymmetrie vor TWD	Luftgeschwin- digkeit (vor TWD)	Luftfeuch- tigkeit (vor TWD)	Fußboden- Temperatur	Lufttemperatur- gradient *	Bemerkung
Freiburg/ Tiengen	- in RM: > 1,06	Maximal -0,9 OK	u<=0,12m/s OK	40 bis 54% n.b.	-	-	Heizung absichtlich abgeschaltet
Keltern	vor TWD: 0,26 bis 0,94 in RM: -0,06 bis 0,68	$\Delta T_{str}$ bis 2,5 K (OK) OK	u<=0,12 m/s OK	12 bis 16% n.b.	21.7<T <sub>Fb</sub> <28.2°C OK*	DT<=0,7K OK	insges. hohes Temp.-Niveau
Freiburg ES1	vor TWD: -0,50 bis 0,51 in RM: -0,55 bis 0,43	$\Delta T_{str}$ bis 4,5 K (OK) OK	u<=0,09 m/s OK	28 bis 43% n.b.	18.8<T <sub>Fb</sub> <23.4°C (OK)	DT<=1,2 / 1,1K* OK	
ES2	vor TWD: -0,38 bis 0,65 in RM: -0,39 bis 0,53	$\Delta T_{str}$ bis 4,3 K (OK) OK	u<=0,08 m/s OK	28 bis 42% n.b.	19.4<T <sub>Fb</sub> <23.9°C OK	DT<=0,9 / 1,0 K* OK	
ES3	vor TWD: ** in RM: -0,09 bis 1,05	** ⊗	**	**	20.7<T <sub>Fb</sub> <26.6°C OK	DT<=0,6 / 0,9 K* OK	insges. hohes Temp.-Niveau
ES4	vor TWD: ** in RM: -0,04 bis 0,34	** OK	**	**	20.9<T <sub>Fb</sub> <23.3°C OK	DT<=0,3/ 0,4 K* OK	
ES5	vor TWD: ** in RM: 0,21 bis 1,58	** ⊗	**	**	21.7<T <sub>Fb</sub> <26.7°C OK	DT<=2,0/ 1,4 K* OK	insges. sehr hohes Temp.-Niveau
ES6	vor TWD: ** in RM: 0,20 bis 1,05	** ⊗	**	**	22<T <sub>Fb</sub> <26.7°C OK	DT<=0,6/ 0,8 K* OK	insges. hohes Temp.-Niveau
Donau- eschingen	vor TWD: -0,67 bis 0,53 in RM: -0,68 bis 0,39	$\Delta T_{str}$ bis 2,5 K*** (OK) OK	u<=0,07 m/s OK	33 bis 56% OK	13.5<T <sub>Fb</sub> <21.9°C (OK)	DT<=2,5 K/ -*** (⊗)	NUTZUNG in Meßzeit wegen Fensterlüftung Kaltluftsee am Boden
Windberg	vor TWD: -0,71 bis -0,21 in RM: -0,71 bis -0,13	$\Delta T_{str}$ bis -1,8 K (⊗) OK	u=0,0 m/s OK	30 bis 33% n.b.	14.6<T <sub>Fb</sub> <22.5°C ⊗	DT<=2,1 / 2,0 K* (OK)	Kaltluftabfall am Fe., fehlende Strahlungs- kompensation

Tabelle A4:Ergebnisse der Komfortmessungen

#### Erklärungen zu Tabelle A4:

- OK Komfort in Ordnung
- (OK) Komfort meistens OK
- (⊗) Komfort oft nicht OK
- ⊗ Komfort nicht OK

- n.b. nicht bewertet (Luftfeuchtigkeit, da keine übliche Nutzung)
- \* vor TWD/in Raummitte
- \*\* keine Messung mit Raumklimaanalysator wegen Gerätedefekt
- \*\*\* nur Messung vor TWD möglich

Referenz: Wärmedämmverbundsystem 12cm Styropor :	200 DM/m <sup>2</sup>
TWDVS (transparentes Wärmedämmverbundsystem):	550 DM/m <sup>2</sup>
konventionelle TWD:	1000 DM/m <sup>2</sup>
Lüftungswärmerückgewinnung	2321 DM für 20m <sup>2</sup> -Raum
(davon 2000 für Investition, 321 DM für Wartung, Stromkosten in 15 a)	
WSV3K+PU-Rahmen anstatt WSV2A+Holzrahmen	150 DM Mehrkosten
nach [FEIST1]	
bessere Wärmedämmung (20 anstatt 12cm)	15 DM/m <sup>2</sup>
(Materialpreis für 8cm Styropor)	

#### Minderkosten Heizung:

TWD-Systeme: keine Minderkosten, da keine Minderdimensionierung der Heizkörper

Lüftungswärmerückgewinnung: Luftwechsel 0,15 anstatt 0,7/h ->

$0,55/h \times 50m^3 \times 0,34 Wh/m^3K \times 32 K = 299,2 W$  Minderleistung Heizkörper  
bei 0,25 DM/W : 75 DM für den 20m<sup>2</sup>-Raum

WSV3K+PU-Rahmen anstatt WSV2A+Holzrahmen: k-Wert 0,7 anstatt 1,51 W/m<sup>2</sup>K ->

$0,81W/m^2K \times 32 K \times 0,25 DM/W : 6,5 DM/m^2_{Fe}$

mit Innenwandinstallation:

$1200 DM/120m^2 \times 20m^2/3,36m^2 = 59,5 DM/m^2_{Fe}$

bessere Wärmedämmung: k-Wert 0,19 anstatt 0,3 W/m<sup>2</sup>K ->

$0,11 W/m^2K \times 32 K \times 0,25 DM/W = 0,88 DM/m^2$

Tabelle A2: Annahmen zu den Investitionskosten in Kap. I.9



Stoffgröße	Einheit	Luft	Argon	Krypton	Xenon
Dichte $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1,275	1,784	3,739	5,858
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	W/mK	24,18 $10^{-3}$	16,40 $10^{-3}$	9,36 $10^{-3}$	5,10 $10^{-3}$
Wärmekapazität $c_p$	kJ/kgK	1,006	0,5215	0,2502	0,1607
dynamische Viskosität $\nu$	m <sup>2</sup> /s	13,35 $10^{-6}$	11,78 $10^{-6}$	6,29 $10^{-6}$	3,63 $10^{-6}$

Tabelle A5: Stoffgrößen für Luft, Argon, Krypton und Xenon bei 0°C sowie 1 bar.

Stoffgröße	Einheit	Luft	Argon	Krypton	Xenon
Dichte $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1,188	1,664	3,454	5,458
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	W/mK	25,68 $10^{-3}$	17,44 $10^{-3}$	9,51 $10^{-3}$	5,15 $10^{-3}$
Wärmekapazität $c_p$	kJ/kgK	1,007	0,5215	0,2498	0,1603
dynamische Viskosität $\nu$	m <sup>2</sup> /s	15,40 $10^{-6}$	13,39 $10^{-6}$	6,67 $10^{-6}$	3,85 $10^{-6}$

Tabelle A6: Stoffgrößen für Luft, Argon, Krypton und Xenon bei 20°C sowie 1 bar.

1	Programm	TRNSYS-TYPE70	Verweise
2	Modelltyp	dynamisches Einzonen-Mehrnoten-Netzwerkmodell	
3	Raummodell	Mehrnotennetzwerkmodell: <ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 Raumlufknoten (mit Masse)</li> <li>• 1 Strahlungsknoten</li> <li>• 2 TWD-Wand-Innenoberflächenknoten mit Masse (Mitte und Randbereich)</li> <li>• 4 Wandinnenoberflächenknoten <math>T_i</math> (ohne Masse)</li> <li>• 1 Wassertemperaturknoten (mit Masse)</li> </ul>	Kap. II.10
4	langwelliger Strahlungsaustausch im Raum	$Q_{Str,i} = \sigma \epsilon_i A_i (T_i^4 - T_{Str}^4)$ Mischung aller Strahlung im (schwarzen) Strahlungsknoten	
5	konvektive Wärmeübergänge im Raum	Ansatz $\alpha_{k,i} = f_l (T_i - T_L)^{1/3}$ $Q_{k,i} = \alpha_{k,i} A_i (T_i - T_L)$	[FEIST2]
6	Fenstermodell	-	
7	Wandmodell (VTWD-Wand-Mitte und -Randbereich)	eindimensionale dynamische Wärmeleitung, Diskretisierung mit je 6 RC-Gliedern, Oberfläche mit Kapazität	[FEIST2]
8	Wandmodell (andere Wände)	Masselos als Wärmewiderstand	
9	Lüftungsmodell	$Q_{Lü} = n \rho c_p V_R (T_L - T_a)$ , Luftwechsel $n$ frei eingebbar (hier =0/h)	
10	Wandaußenoberflächen	konstant $\alpha_a = 25$ W/m <sup>2</sup> K für alle Außenoberflächen	
11	Klimadaten	diffuse Einstrahlung Süd (für alle Flächen) Gesamte Einstrahlung Süd (für TWD-Wand) Außenlufttemperatur	
12	interne Wärmequellen	konstant 1W konvektiv (Meßeinrichtung)	
13	Heizsystem	-	
14	mathematisches Lösungsverfahren - Wanddurchgang: - im Raum:	finites Vorwärtsdifferenzenverfahren (je Wand 6 Wandknoten incl. Ränder) Gleichungssystem für Knotennetzwerk mit Iteration von $T_{Str}$ ; massebehaftete Knoten: von altem Zeitschritt (Zeitschritt 0,1 h)	
15	VTWD	Massebehafteter Absorber. Berechnung der temperaturabhängigen Leitwerte, einfallswinkelabhängige Transmission, Konvektion im Spalt nach optimiertem Ansatz	Kap. II.8

Tabelle A7: Beschreibung des Simulationsmodell für die Testzelle und die VTWD

## 5.2 Bilder im Anhang

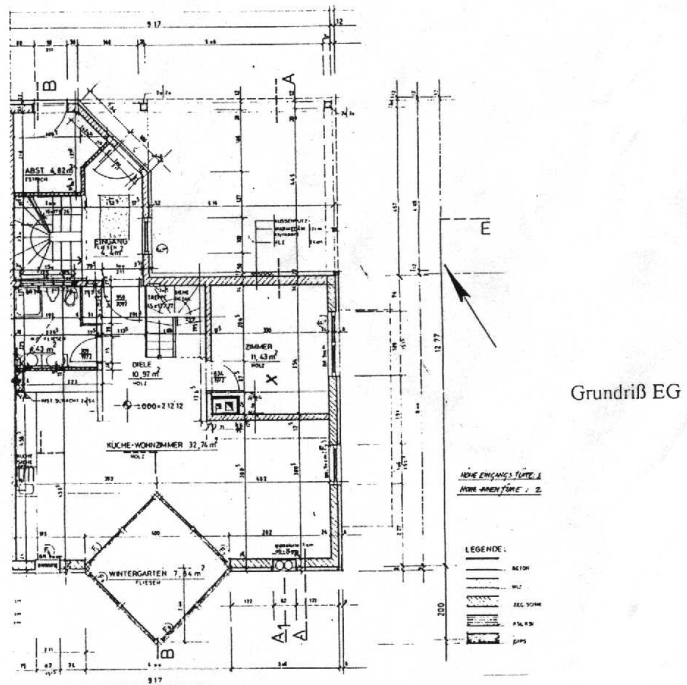
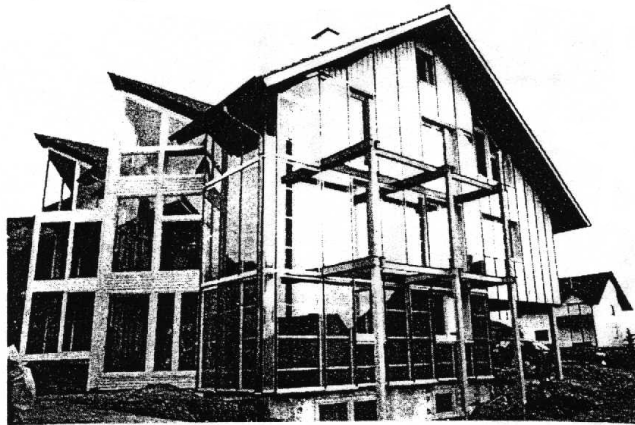
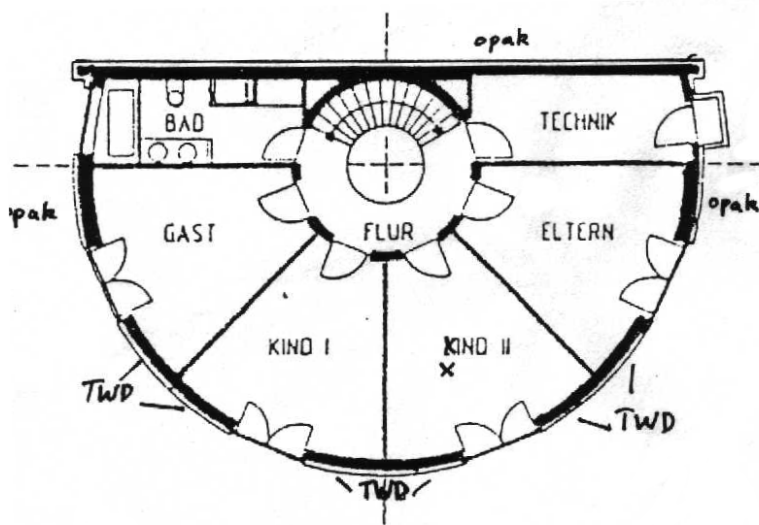


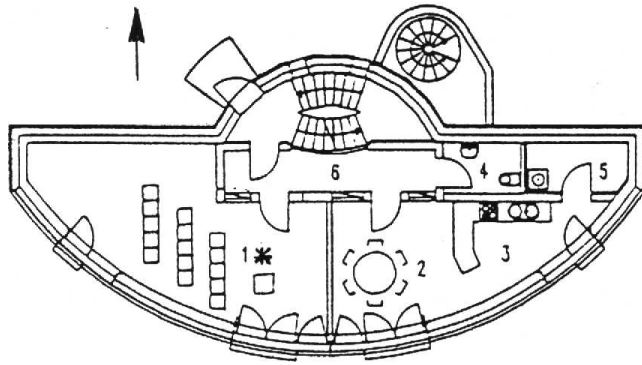
Bild A1: Wohnhaus Bollin in Freiburg-Tiengen



Grundriß OG



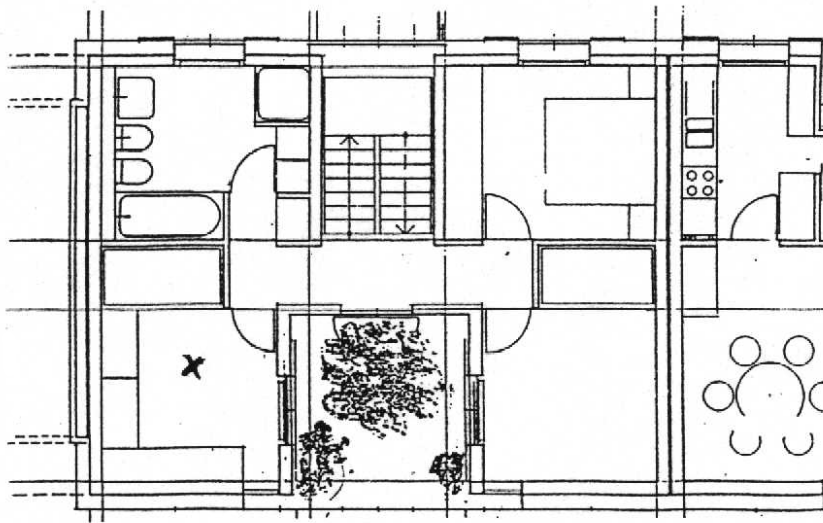
Bild A2: Wohn-/Bürohaus Abrecht in Keltern



Grundriß EG

- |                            |               |
|----------------------------|---------------|
| 1 Vortragsraum             | 4 WC          |
| 2 Wohnküche, Eßbereich     | 5 Vorratsraum |
| 3 Wohnküche, Küchenbereich | 6 Flur        |

Bild A3: Energieautarkes Solarhaus in Freiburg (Wohn-/Versuchshaus)



Grundriß OG

Bild A4: Reihenmittenhaus (Wohngebäude) in Donaueschingen

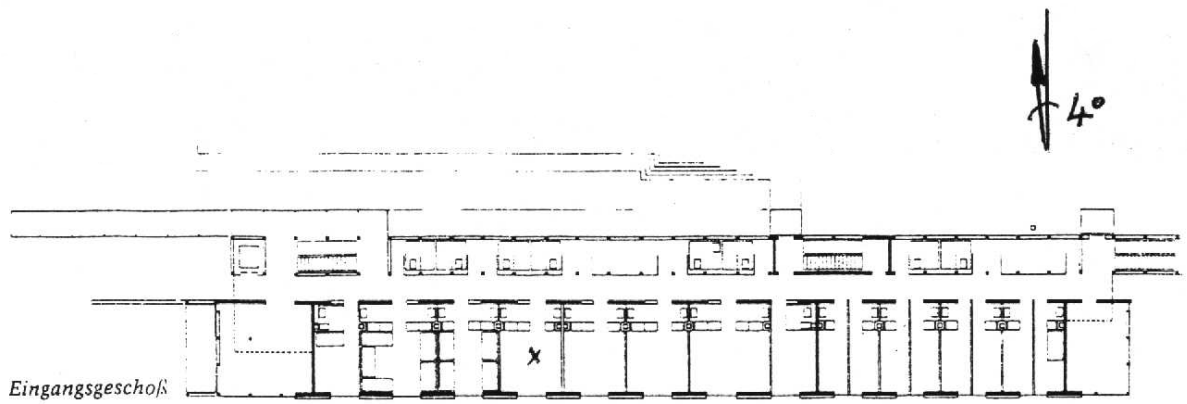


Bild A5: Gästehaus der Jugendbildungsstätte Kloster Windberg (Oberpfalz)

Bild A6: TWD-Konstruktion in  
Freiburg Tiengen

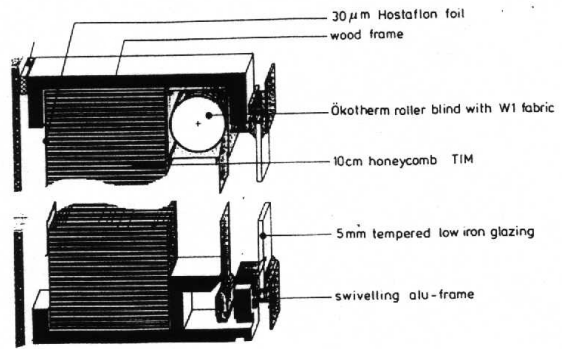


Bild A7: TWD-Konstruktion in Freiburg (ES)

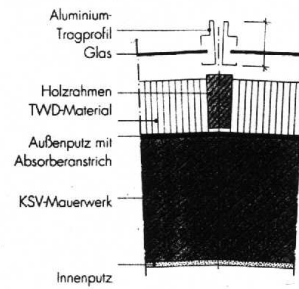
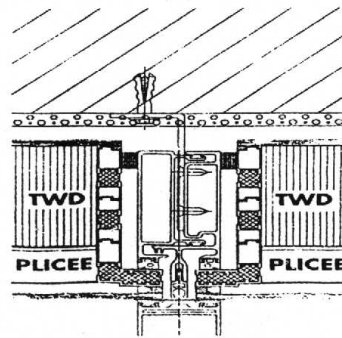


Bild A8: TWD-Konstruktion in Donaueschingen





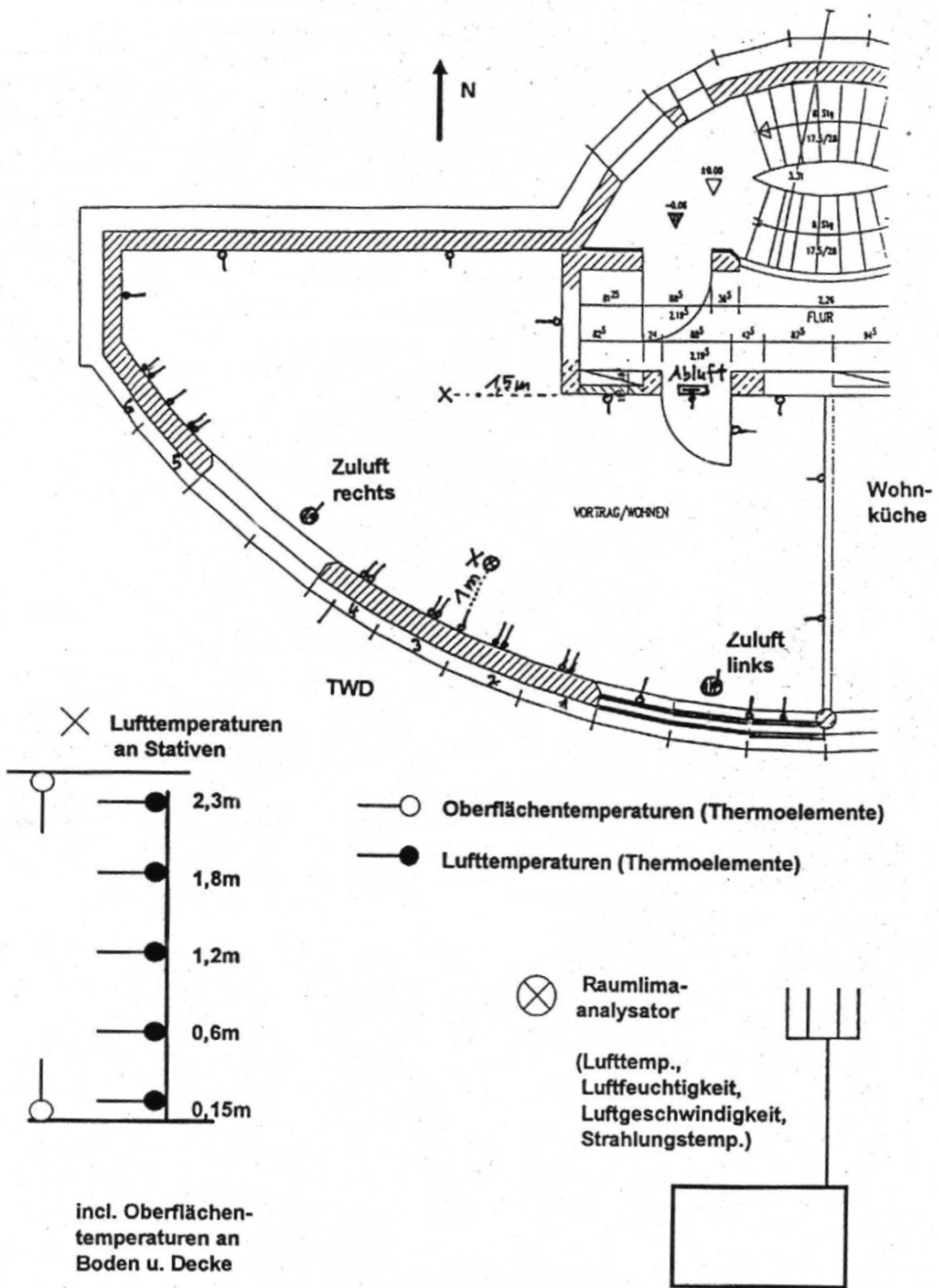


Bild A9: Aufbau der Meßeinrichtung im ES in Freiburg



**Bild A10:** Vortragsraum im ES (Foto):  
Sensoren an der TWD-Wand  
und Meßdatenerfassung



**Bild A11:** Wetterstation auf dem Dach des ES (Foto)

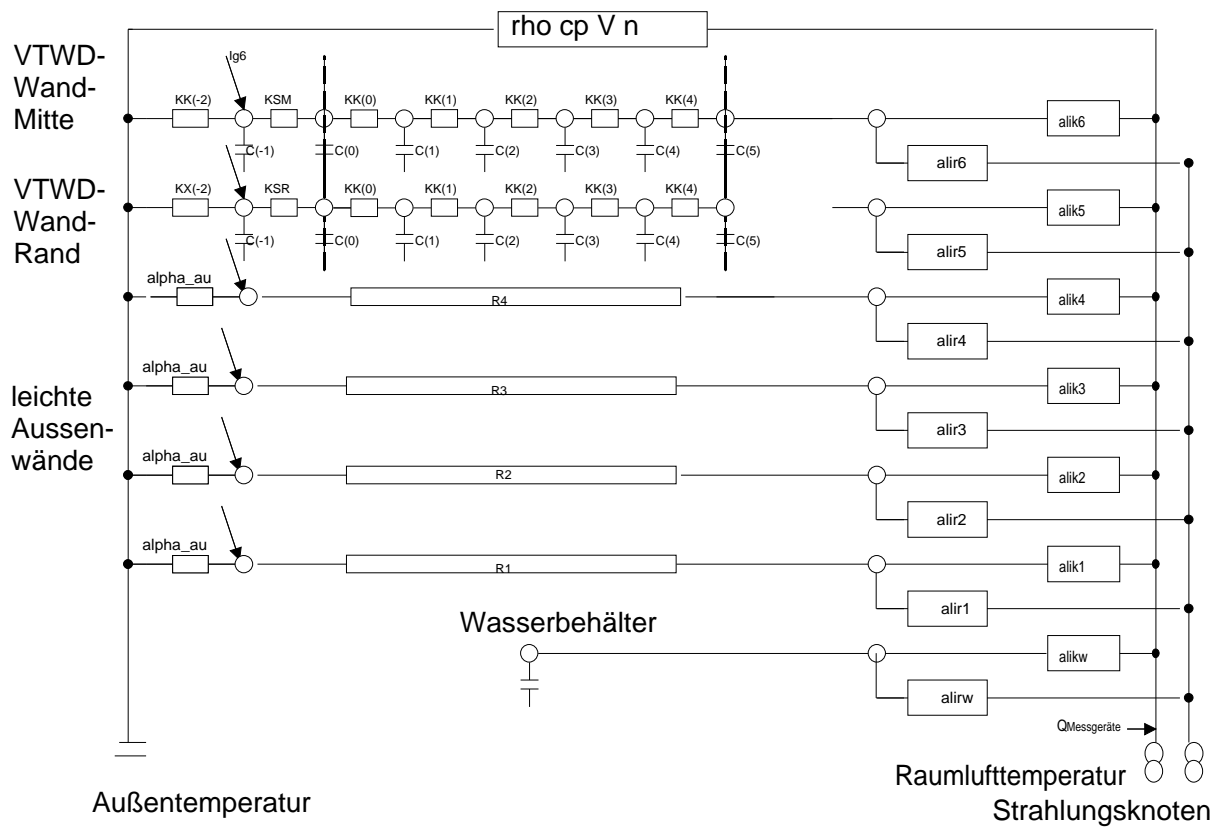


Bild A12: Simulationsmodell der Testzelle

### 5.3 Abkürzungen

DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
ES	Energieautarkes Solarhaus, Freiburg
KS	Kalksandstein
NEH	Niedrigenergiehaus (es gibt keine allgemeingültige Definition)
PMV	(engl. :) Predicted Mean Vote (vorausgesagtes mittleres Votum, s. Kap. I.2)
PPD	(engl. :) Predicted Percentage of Dissatisfied (vorausgesagter Prozentsatz Unzufriedener, s. Kap. I.2)
RKS	Raumklimaanalysator (s. Kap. I.3.1)
SZR	Scheibenzwischenraum
TRY	(engl. :) Test-Reference-Year
TWD	Transparente Wärmedämmung
TWDVS	transparentes Wärmedämmverbundsystem
VTWD	Verglasungs-TWD
WDVS	Wärmedämmverbundsystem

## 5.4 Formelgrößen

a	Temperaturleitwert	[m <sup>2</sup> /s]
A	Fläche	[m <sup>2</sup> ]
c <sub>p</sub>	massenspezifische Wärmekapazität	[kJ/kgK]
D	(Spalt-)dicke, TWD-Strukturdicke	[m]
f	(Minderungs-)faktor	[-]
g	Erdbeschleunigung (9,81m/s <sup>2</sup> ) bzw. Gesamtenergiedurchlaßgrad	[m/s <sup>2</sup> ] [-]
H <sub>gh</sub>	Heizgradstunden	[kKh]
I	Einstrahlung	[W/m <sup>2</sup> ]
k	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]
l	Randlänge	[m]
n	Luftwechsel	[1/h]
N	Nutzungsgrad	[-]
Nu	Nusselt-Zahl	[-]
q	flächenspezifische Wärmemenge	[kWh/m <sup>2</sup> ]
Q	Wärmemenge	[kWh]
Ra	Raleigh-Zahl	[-]
S	Solargewinnfaktor	[m <sup>2</sup> ]
SG	Solargewinnfaktor	[W]
Sp	Speichermasse eines Raumes	[Wh/K]
SV	Solarverlustfaktor	[W]
t	Temperatur in	[°C]
T	Temperatur in	[K]
v	flächenspezifischer Verlustwert eines Raums	[W/m <sup>2</sup> K]
V	Verlustwert eines Raums bzw. Volumen	[W/K] [m <sup>3</sup> ]
α	Absorptionsgrad bzw. Wärmeübergangskoeffizient	[-] [W/m <sup>2</sup> K]
β	volumetrische Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/K]
ε	Emissivität	[%]
η	Wirkungsgrad	[-]
φ	Einfallswinkel	[°]
κ	Absorptionskoeffizient	[1/m]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]
Λ	Wärmeleitwert	[W/m <sup>2</sup> K]
ν	kinematische Viskosität	[m <sup>2</sup> /s]
ρ	Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]
σ	Stephan-Boltzmann-Konstante (5,67 10 <sup>-8</sup> W/m <sup>2</sup> k <sup>4</sup> )	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
τ	Transmissionsgrad	[-]
ξ	IR-Eindringkoeffizient	[m]
ψ	linearer Wärmebrückenverlustbeiwert	[W/mK]

## 5.5 Indices

A	Absorber, Randfläche A
Apertur	der Apertur
äq	äquivalent (Luftwechsel)
au	außen
AW	Außenwand
B	äußere Randfläche einer TWD-Struktur
Dach	Dach-
diff	für diffuse Einstrahlung
dir	für direkte Einstrahlung
eff	effektiv (mit solarer Einstrahlung)
Ein	Einbau-
Fb	Fußboden
Fe	Fenster
Fe-Ra	Fensterrahmen
Glas	Glasrand-
HEE	Heizenergieeinsparung
i	innen
inf	durch Infiltration (Fugenlüftung)
intGewinterne	Gewinne
konv/Lei	durch Konvektion und Wärmeleitung
L	Luft-
Lei	(Wärme-)leitung
m	mittlere(r)
mech	durch Ventilatoren mechanisch gefördert
o	Oberfläche
op	operative
R	Raum
Ra	Rahmen
Ra-Verl	Randverluste
SP	Schwerpunkt der Absorption (in einer TWD-Struktur)
Str	Strahlung-
TWD	TWD
TWD,ges	mit TWD und TWD-Wand
TWD-Ra	TWD-Rahmen
V	Verglasung
Verscha	Verschattung
Verschm	Verschmutzung
w	(TWD-)wand-
WF	Wohnfläche
WRG	Wärmerückgewinnung
0	bei 0° Einfallswinkel ( $g_0$ ) bzw. ( $k_0$ ) k-Wert der TWD ohne Wand
$\varphi$	Einfallswinkelkorrektur
1,2	Berandungsindices
10	bei 10°C

## 5.6 Beschreibung des TWD-Modells nach Kummer

Dieses Modell nach [KUMMER] basiert auf den Annahmen, daß die optischen Schichten masselos sind und daß in der TWD-Struktur keine Konvektion auftritt. Die Absorption in den Schichten wird durch Superposition berechnet.

Die in eine TWD-Struktur einfallende Solarstrahlung wird dort zum einen durch Transmission oder als sekundärer Wärmegewinn ( $q_A$ ) auf den Absorber weitergeleitet. Andererseits verläßt ein Teil der Solarenergie die TWD-Struktur wieder nach außen - zum einen durch Reflexionen, zum anderen durch Wärmeverluste ( $q_B$ ).

Die Solarstrahlung, multipliziert mit dem sog. Solargewinnfaktor SG, erreicht den Absorber, derjenige mit dem Solarverlustfaktor SV gewichtete Anteil verläßt die TWD-Struktur nach außen. Diese Faktoren sind wie folgt definiert (A für Gewinne an den Absorber, B für Verluste an der Außenseite):

$$SG = A (g_{A,dir} I_{dir} + g_{A,diff} I_{diff})$$

$$SV = A (g_{B,dir} I_{dir} + g_{B,diff} I_{diff})$$

Der winkelabhängige Gesamtenergiedurchlaßgrad für die direkte Einstrahlung ist:

$$g_{A,dir}(\varphi) = \tau\alpha(\varphi) + q_A(\varphi)$$

Der sekundäre Wärmegewinn  $q_A(\varphi)$  wird definiert als die in den optischen Schichten absorbierte und zum Absorber geleitete Solarenergie bezogen auf die gesamte einfallende Solarenergie. Platzer [Platzer] gibt hierfür eine Methode an:

$$q_A(\varphi) = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{dir}(\varphi, i) + \Lambda_A(i)}{\Lambda_A(i) + \Lambda_B(i)}$$

entsprechend für der sekundären Wärmeverlust an der äußeren Oberfläche

$$q_B(\varphi) = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{dir}(\varphi, i) + \Lambda_B(i)}{\Lambda_A(i) + \Lambda_B(i)}$$

$\Lambda_A(i)$  bzw.  $\Lambda_B(i)$  sind die Wärmeleitwerte vom betreffenden Knoten  $i$  zum Absorber (A) bzw. nach außen (B). Für jede optische Schicht wie z.B. die TWD-Struktur werden 3 Knoten angesetzt: die Berandungsflächen A und B und ein Knoten in der Mitte bzw. im TWD-Material im Absorptionsschwerpunkt (s.u.).

Für die Absorption wird ein Exponentialansatz verwendet:

$$\alpha(\varphi, x) = \kappa(\varphi) \cdot e^{-\kappa(\varphi) \cdot (D-x)} \quad \text{mit}$$

$$\kappa(\varphi) = -\frac{1}{D} \ln(\tau(\varphi))$$

Mit diesem kann der Schwerpunkt der Absorption  $x_{SP}$  ermittelt und damit die Wärmeleitwerte  $\Lambda_A$  und  $\Lambda_B$ , von diesem Schwerpunkt zu den Randflächen A bzw. B differenziert nach Strahlungs- und Leitungsanteil, berechnet werden. Die Wärmeleitwerte für den Strahlungsaustausch werden folgendermaßen ermittelt:

$$\Lambda_{Str,A} = \frac{q_{A,B}}{T_A - T_{XSP}} = \frac{\sigma \cdot (T_A^4 - T_B^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 + \frac{D}{\xi}} \cdot \frac{1}{T_A - T_{XSP}},$$

entsprechend auch  $\Lambda_{Str,B}$ . Dabei ist die Temperatur des Absorptionsschwerpunktes  $X_{SP}$

$$T_{XSP}^4 \cdot \left( \frac{1}{\epsilon_A} + \frac{1}{\epsilon_B} - 1 + \frac{D}{\xi} \right) = T_A^4 \cdot \left( \frac{1}{\epsilon_B} - \frac{1}{2} + \frac{D - x_{SP}}{\xi} \right) + T_B^4 \cdot \left( \frac{1}{\epsilon_A} - \frac{1}{2} + \frac{x_{SP}}{\xi} \right)$$

Dabei beschreibt der Term  $D/\xi$  den Einfluß der eindringenden Solarstrahlung beim Strahlungstransport. Der Wärmeleitungsanteil

$$\Lambda_{Lei,A} = \frac{\lambda_{Luft}(T_{A,XSP})}{x_{SP}} \cdot C_{TWD} \quad \text{und}$$

$$\Lambda_{Lei,B} = \frac{\lambda_{Luft}(T_{XSP,B})}{D - x_{SP}} \cdot C_{TWD}$$

beschreibt den Einfluß der Wärmeleitung in Luft sowie in der TWD-Struktur (Faktor  $C_{TWD}$ ), welcher aus auch Laborversuchen bestimmt wird.  $D$  ist die Dicke der TWD-Struktur,



Die Anteile Strahlung und Wärmeleitung lassen sich bei nahezu schwarzen Randflächen ( $\epsilon_A, \epsilon_B > 0,6$ ) unabhängig voneinander bestimmen.

Sollte sich zwischen Absorber und TWD-Struktur noch eine Luftschicht befinden, so wird bei den Leitungswiderständen noch ein entsprechender Widerstand addiert, welcher auch die Konvektion berücksichtigen kann.

Für die winkelabhängigen Solargewinn- bzw. -verlustfaktoren werden Näherungen mit zwei Winkelbereichen gefunden, in denen die Werte linear verlaufen.

Der Gesamt-k-Wert wird nach folgender Gleichung gebildet:

$$k_0 = C_1 + C_2 \cdot T_A + C_3 \cdot T_B + C_4 \cdot SV + C_5 \cdot SG$$

mit den Koeffizienten  $C_1$  bis  $C_5$ , die aus den optischen Daten der Schichten gewonnen werden.