



DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR
HOLZFORSCHUNG e.V.

Bayerstrasse 57-59 · D-80335 München
Telefon 089 / 51 61 70-0 · Fax 53 16 57



Hochschule Rosenheim
University of Applied Sciences



HOLZBAU DER ZUKUNFT

TP 05

Leichte Vorhangfassaden aus Holz
Konstruktionsgrundlagen für
eine definierte Feuchteabfuhr

Hochschule Rosenheim
University of Applied Sciences



Prof. Dr. F. Feldmeier
Bauphysik
Hochschule Rosenheim



HOLZBAU DER ZUKUNFT

TP 05

Leichte Vorhangfassaden aus Holz Konstruktionsgrundlagen für eine definierte Feuchteabfuhr

Projektleitung:

Prof. Dr. rer. nat Franz Feldmeier

Projektbearbeitung

Dipl.-Ing. Timo Skora

Mitarbeiter

Dipl.-Ing. Florian Nöske

Dipl.-Ing. Ludger Wallersheim

Fachliche Beratung:

Dr.-Ing. Winfried Heusler, Schüco International

Dipl.-Ing. Gerd Hönicke, Gebr. Schneider

Dr.-Ing. Harald Schulz, Ingenieurbüro

Zusammenfassung

Leichte Vorhangfassaden mit tragender Holzstruktur erfüllen hohe Anforderungen an Gestaltung und Ausführung. Statische und bauphysikalische Anforderungen sind auf nur wenigen cm Bautiefe zu erfüllen. Wirtschaftlichkeit und Energieeinsparung erfordern ständige Weiterentwicklung ohne dabei Funktion und Lebensdauer der Produkte zu gefährden. Fragen hinsichtlich des Verhaltens bei Feuchtebeanspruchung sind insbesondere bei Fassaden mit tragender Holzgrundkonstruktion berechtigt

Der vorliegende Bericht untersucht das Feuchteverhalten von Pfosten-Riegel-Konstruktionen, insbesondere das Austrocknen des Glasfalzraumes und das Diffusionsverhalten von diffusionsdichten Konstruktionen. Hierzu wurden Versuche an Testelementen an der Hochschule Rosenheim und an Testfassaden am ift Rosenheim durchgeführt.

Es wurde festgestellt, dass thermisch optimierte Rahmenkonstruktionen die Austrocknung von eingedrungenem Schlagregen verzögern und kurzzeitig zu einem deutlich höheren Dampfdruck in den Riegeln führen. Die Gesamtfeuchtebelastung ist im Vergleich zu einfachen Systemen um ca. 15% größer. Eine mögliche Gegenmaßnahme sind zusätzliche Öffnungen zum Druckausgleich in den Riegeln.

Die an der Testfassade ermittelte Holzfeuchte der Tragkonstruktion ist durchweg unkritisch. Das teilweise aufgrund theoretischer Überlegungen abgeleitete Risiko der Durchfeuchtung bei diffusionsdichten Systemen konnte nicht bestätigt werden.

Summary

Curtain walls with timber structure are on a high level regarding design and construction. Requirements like structural behaviour and building physics should be achieved in an area of just a few centimetres. Economic and energy efficiency demand constant development without compromising functionality and durability. The behaviour of curtain walls with timber structure exposed to humidity has a special focus in this project.

The report shows the investigation of the performance of curtain walls exposed to humidity, especially the drying up of the glazing rebate and the diffusion of water in diffusion resistant constructions. Tests were carried out on test elements at University of Applied Science of Rosenheim and on test facades at the ift Rosenheim.

It was observed that thermally improved frame sections delay the drying up of infiltrated driving rain and cause a temporary increase of vapour pressure in the transom. Compared to simple curtain wall systems they have a 15% higher total load of humidity. Additional holes in the transom for pressure equalization could be a possible solution.

The observed humidity of the timber construction was consistently below the critical value. The risk of humidity penetration in diffusion resistant constructions could not be confirmed by the tests.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	11
2	Grundlagen.....	13
2.1	Bauteile einer leichten Vorhangsfassade aus Holz.....	13
2.2	Auswertung vorhandener Literatur.....	14
2.2.1	Forschungsarbeiten.....	14
2.2.2	Diplomarbeiten.....	17
2.2.3	Technische Firmenunterlagen.....	18
2.2.4	Normen.....	19
2.3	Erkenntnisse aus Gutachten.....	20
2.4	Stand der Technik.....	25
2.4.1	Dichtigkeit bei Schlagregen.....	25
2.4.2	Öffnungen des Glasfalzraumes.....	25
2.5	Vorgehen und Auswahl der Fassadenysteme.....	28
3	Bauphysikalische Größen und Begriffe.....	30
3.1	Solarstrahlung.....	30
3.2	Schlagregen.....	31
3.3	Wind.....	33
3.4	Luftfeuchte.....	34
3.4.1	Dampfdruck und Sättigungsdruck.....	34
3.4.2	Taupunkttemperatur.....	36
3.5	Wasserdampftransport.....	36
3.5.1	Diffusion.....	36
3.5.2	Konvektion.....	38
3.6	Wärmetransport.....	39
4	Voruntersuchungen.....	42
4.1	Aufbau und Lage der Testelemente.....	42
4.2	Messtechnik.....	45
4.2.1	Falzraumklima.....	45
4.2.2	Außen- und Innenklima.....	46
4.2.3	Wind.....	47
4.2.4	Regen.....	47
4.2.5	Druckdifferenz.....	48
4.2.6	Solarstrahlung.....	48
4.2.7	Oberflächentemperaturen.....	49
4.2.8	Datenerfassung.....	49

4.3	Orientierende Versuche	50
4.3.1	Künstliche Feuchtebelastung	50
4.3.2	Darstellung der Messdaten	51
4.3.3	Austrocknung	53
4.3.4	Abgleich mit Wetterstationen	56
4.3.5	Überprüfung der Messtechnik	57
4.3.6	Auswertung	58
4.4	Überprüfung des experimentellen Aufbaus	59
4.4.1	Vergleich System A	59
4.4.2	Vergleich System B	61
4.4.3	Vergleich System C	63
5	Versuche an Testelementen	65
5.1	Einfluss der Solarstrahlung	65
5.1.1	Abschätzung zum thermisch induzierten Wassertransport	65
5.1.2	Vergleich der Fassadensysteme	65
5.2	Einfluss von Schlagregen	68
5.3	Einfluss der Deckprofile auf die Schlagregendichtheit	69
5.4	Variation der Falzraumgeometrie	71
5.4.1	System A Einfluss Falzraumdämmung	71
5.4.2	System B Einfluss Falzraumdämmung	73
5.4.3	System B Einfluss Riegeldichtungsfahne	75
5.4.4	System C Einfluss Falzraumdämmung	77
5.4.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	79
5.5	Variation der Druckausgleichsöffnungen	80
5.5.1	System A Druckausgleich in Riegelmitte	81
5.5.2	System B Druckausgleich in Riegelmitte	83
5.5.3	System B Einfluss Riegelmitte/Riegelseite	85
5.5.4	System C Einfluss Riegelmitte/Riegelseite	87
5.5.5	System A mit mehreren Öffnungen	88
5.5.6	System B geschlossene Pfosten	90
5.5.7	Einfluss von Wind	92
5.5.8	Zusammenfassung der Ergebnisse	93
6	Wasserbrückenbildung im Falzraum	96
7	Versuche an Testfassaden	99
7.1	Vergleich Testelemente – Testfassade	99
7.2	Aufbau der Testfassade	99
7.3	Messtechnik	100

7.3.1	Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit im Falzraum	100
7.3.2	Außenklima, Solarstrahlung, Regensensor.....	101
7.3.3	Raumseitige Klimatisierung	101
7.3.4	Holzfeuchte	102
7.3.5	Datenerfassung.....	103
7.4	Messergebnisse.....	104
7.4.1	Falzraumklima.....	104
7.4.2	Holzfeuchtigkeit	110
7.4.3	Ergebnisse der Holzfeuchtemessung	110
8	Diffusionsversuche	113
8.1	Aufbau und Durchführung der Diffusionsversuche	113
8.2	Ergebnisse der Diffusionsversuche.....	114
9	Zusammenfassung.....	117

Anhang

1 Einführung

Das Verhalten von Pfosten-Riegel-Fassaden mit tragender Holzgrundkonstruktion bei Feuchtebeanspruchung wird in der Literatur unterschiedlich dargestellt. Häufig werden Bauschäden auf unzureichende konstruktive Ausbildung oder mangelhafte Ausführung zurückgeführt [Arn1996, Zim2000]. Ziel des Projektes ist es, durch Labor- und Felduntersuchungen an realen Fassadenelementen Empfehlungen für ein einfaches und sicheres Belüftungs- und Entwässerungssystem zu erarbeiten. Hierzu wird der Feuchtezustand im Glasfalz in Abhängigkeit von der Glasfalzausbildung, Wasserführung, Wasserübergabe, Abmessung sowie Abstand und Zahl der Druckausgleichs- und Entwässerungsöffnungen untersucht. Außerdem sollen der Einfluss der Feuchtediffusion auf die Materialfeuchte des Grundprofils näher untersucht und bewertet werden.

In Verbindung mit Erkenntnissen aus Vorprojekten, Erkenntnissen aus der Praxis und aus Feldversuchen sollen fundierte Empfehlungen erarbeitet werden, welche die Konzeption der Fassadenkonstruktionen erleichtern und auf diesem Feld sicherer machen. Für die Verarbeiter von Pfosten-Riegel-Fassaden aus Holz stehen dann gesicherte Vorgaben zur Verfügung.

Verbunden damit ist eine erhebliche Verbesserung der Planungssicherheit bei den häufig mit hohen Ansprüchen in Bezug auf den Geltungswert ausgeführten leichten Vorhangfassaden aus Holz. Schäden durch undefinierte Durchfeuchtungen der Hölzer mit der Folge von visuellen Mängeln bis hin zum Befall durch holzerstörende Pilze können damit deutlich reduziert werden.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Konstruktionen auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu optimieren, da die Fassadenkonstruktion besser an die tatsächlichen Anforderungen angepasst und gegebenenfalls überflüssige Maßnahmen vermieden werden können.

2 Grundlagen

2.1 Bauteile einer leichten Vorhangfassade aus Holz

Pfosten-Riegel-Fassaden bestehen aus einer gitterförmigen tragenden Struktur aus vertikalen (Pfosten) und horizontalen Profilen (Riegel) welche mit transparenten (Glas) oder opaken Elementen (Paneel) ausgefacht werden. Konstruktive Materialien der Tragstruktur sind vorwiegend Aluminium, Stahl und Holz. Dabei erfordert jedes Material spezifische Detaillösung zur Integration der Ausfachungselemente.

Zunächst sollen die wichtigsten Bauteile einer leichten Vorhangfassade aus Holz und deren Bezeichnung an Hand von Abb. 1 vorgestellt werden. In der Baupraxis und in den Systemunterlagen der Hersteller sind für die einzelnen Bauteile teilweise unterschiedliche Bezeichnungen zu finden. Im vorliegenden Bericht werden die folgenden Bezeichnungen verwendet, siehe Abb. 1 und Legende im Text. Zusätzlich werden in der Branche teilweise übliche synonyme Bezeichnungen angegeben.

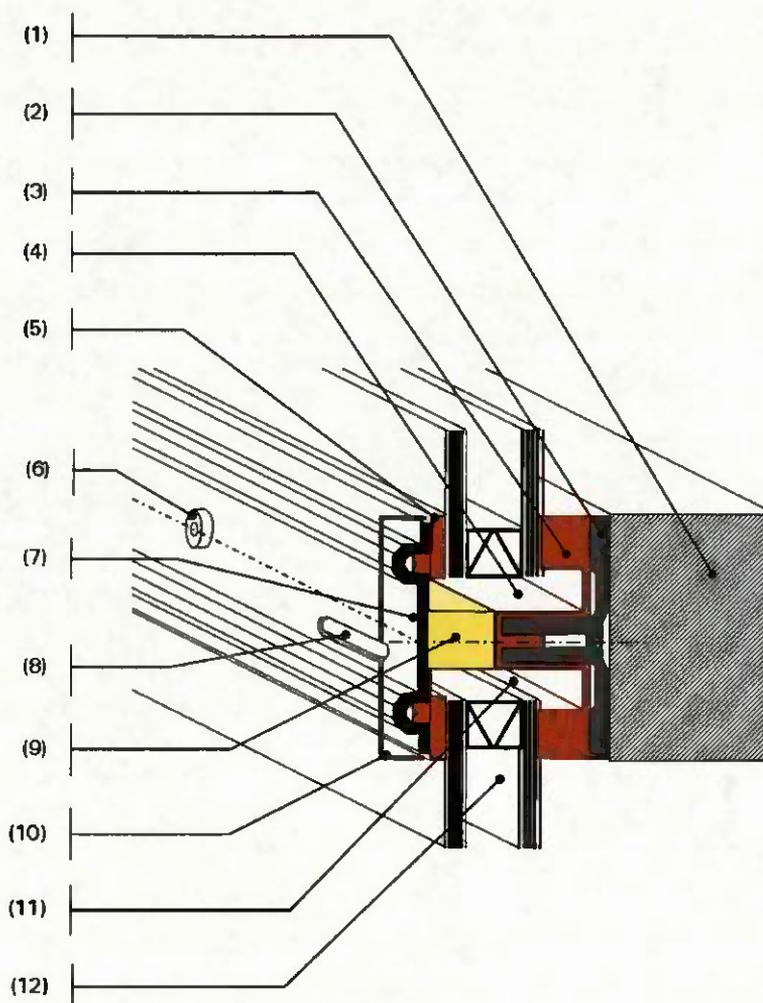


Abb. 1 Schematische Darstellung einer Pfosten-Riegel-Fassade und Bezeichnung der wichtigsten Bauteile, Legende siehe Text

- (1) Riegel- bzw. Pfostenprofil aus Holz oder Holzwerkstoff
- (2) Grundprofil mit Schraubkanal
auch: Aufschraubprofil; Basisprofil
- (3) Raumseitige Verglasungsdichtung
auch: Innendichtung, Glasdichtung innen, Primärdichtung
- (4) Glasfalzraum oberhalb der Falzraumdämmung
auch: Pfosten- bzw. Riegelfalz
- (5) Außenseitige Verglasungsdichtung
auch: Außendichtung, Glasdichtung außen
- (6) Druckleistenschraube, siehe (7)
- (7) Druckleiste
auch: Druckprofil, Andruckleiste (-Profil), Pressleiste (-Profil),
Klemmprofil, Grundprofil für Deckprofil, siehe (10)
- (8) Druckausgleichsöffnung
auch: Dampfdruckausgleichsöffnung, Entwässerungsöffnung,
Entspannungsöffnung
- (9) Falzraumdämmung
auch: Dämmkeder, Isoblock, Isolator
- (10) Deckprofil
auch: Deckleiste, Klipsdeckel, Deckschale
- (11) Glasfalzraum unterhalb der Falzraumdämmung
auch Entwässerungskanal, Drainagenut
- (12) Füllung, in der Regel Mehrscheiben-Isolierglas oder Paneel

Je nach System und Hersteller können einzelne Bauteile fehlen z.B. Grundprofil und Falzraumdämmung bzw. zusätzlich vorhanden sein, z.B. Riegelfahne. Besondere Abweichungen werden bei Bedarf im Bericht einzeln beschrieben.

2.2 Auswertung vorhandener Literatur

2.2.1 Forschungsarbeiten

Dampfdruckausgleich von Verglasungen, Institut für Fenstertechnik, 1985

An zwei Aluminium-Fenstern wurde der Dampfdruck im Glasfalz bei verschiedenen Varianten von Dampfdruckausgleichsöffnungen untersucht. Es wurden immer Vergleiche zwischen Probekörper 1 ohne Druckausgleichsöffnungen und Probekörper 2 mit drei verschiedenen Anordnungen von Druckausgleichsöffnungen angestellt. Die Fenstermaßen betragen 2,2 m x 1,7 m.

Folgende Anordnungen der Druckausgleichsöffnungen wurden untersucht:

- Variante 1: Unten rechts und links nahe den Ecken je eine Bohrung mit 6 mm
- Variante 2: Unten rechts, mittig und links je eine Bohrung mit 8 mm und oben rechts und links nahe den Ecken eine Bohrung mit 8 mm
- Variante 3: Unten rechts, mittig und links je eine Bohrung mit 8 mm

Über einen Zeitraum von je 14 Tagen im Frühjahr, Sommer, Herbst und Winter wurde der Dampfdruckverlauf jeder Variante 7 Tage lang aufgezeichnet. Je Fenster waren im Glasfalz 6 Messstellen untergebracht. Zwei Messstellen im unteren horizontalen Profil, 3 Messstellen in einem seitlichen Profil und eine Messstelle im oberen horizontalen Profil seitlich.

Ergebnisse:

Die jeweiligen Extremwerte wurden an den horizontalen Messstellen ermittelt. Die Messstellen in den vertikalen Profilen wurden nicht weiter ausgewertet.

Die höchsten Dampfdrücke bis 8000 Pa wurden im Sommer bei hohen Außentemperaturen ermittelt. Im Winter wurden Dampfdrücke bis max. ca. 800 Pa gemessen.

Bei geringer solarer Einstrahlung im Winter zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten mit Druckausgleichsöffnungen.

Bei den sonstigen Messungen ergeben sich bei den Varianten 3 und 4 immer geringere Dampfdrücke als bei Variante 2.

Weitere Vergleiche zwischen den Varianten 3 und 4 konnten nicht angestellt werden, da der Messzeitraum zu kurz und nicht identisch war.

Verwertbare Aussagen

Der Schwerpunkt der Untersuchungen sollte auf die Riegelprofile und auf die Sommermonate gelegt werden. Umso größer und umso häufiger Dampfdruckausgleichsöffnungen vorhanden sind, umso niedriger ist die Dampfdruckbelastung im Glasfalz.

Es muss überprüft werden ob die Ergebnisse auch auf Pfosten-Riegel-Systeme übertragbar sind.

Untersuchung zur Ausbildung der Entwässerungsöffnungen in Wetterschutzschiene für Holzfenster, Institut für Fenstertechnik, 1975

Untersucht wurde der Ausfluss von Wasser an verschiedenen Öffnungsquerschnitten, wie Bohrungen und Schlitzfen, und deren Anordnung innerhalb der Wetterschutzschiene, z.B. mittig, seitlich, nach unten und nach vorne.

Ergebnisse:

Die Ausflussmengen hängen von den Öffnungsquerschnitten und von der Druckhöhe ab. Die Druckhöhe ist beim Fenster unter anderem abhängig von den Windverhältnissen und dem Staudruck an der Fassade. Weiterhin beeinflusst die Druckdifferenz zwischen Falzraum und Außenseite die Ausflussmengen. Zu entwässernde Falzräume sollten daher einen Druckausgleich zur Außenseite besitzen.

Verwertbare Aussagen:

Beim (Holz-)Fenster kann Schlagregen in erheblichen Mengen in den äußeren Falzraum zwischen Flügel- und Blendrahmen eindringen. Die Wetterschutzschiene muss diese Mengen Wasser vom Falzraum nach draußen ableiten. Für den Glasfalz wird davon ausgegangen, dass kein direkter Wassereintritt stattfindet. Somit sind an die Dampfdruckausgleichsöffnungen im Glasfalz geringeren Anforderungen gestellt. Festzuhalten ist, dass Bohrungen mindestens einen Durchmesser von 8 mm und Schlitzlöcher eine Abmessung von 5 mm x 20 mm haben sollten, damit sie nicht von Wassertropfen verschlossen werden können.

Glasabdichtung am Holzfenster, Institut für Fenstertechnik, 1981

Im Kapitel 5 wurden folgende Fragen behandelt:

Wie ist trotz Verklotzung ein umlaufend offener Falzraum möglich?
Hierzu wurden keine Versuche durchgeführt. Es wurden lediglich Hinweise für die Durchbrüche bei Klotzbrücken von mindestens 3 mm x 10 mm und für die Nutgröße im Falzgrund von mindestens 4 mm x 8 mm angegeben.

Wie groß muss der Abstand zwischen Glaskante und Holzfalzgrund sein, damit sich keine Tropfenbrücke bildet?

Aufgrund von durchgeführten aber nicht beschriebenen Versuchen wurde ein Mindestabstand von 5 mm gefordert.

Welche Öffnungen des Glasfalzes sind notwendig, um eine anhaltende Feuchtigkeitsansammlung zu vermeiden?

Unter Veränderung der Anzahl, der Lage und der Querschnitte der Öffnungen wurde der Dampfdruckausgleich mit dem Außenklima untersucht. Hierzu wurden Versuche mit Trägergas (Methan) im Falzraum durchgeführt. Die Übertragbarkeit von Versuchen mit Indikatorgas auf das Verhalten der Luftfeuchtigkeit wurde geprüft und bestätigt. Zur Vorbereitung wurde das Trägergas in den Glasfalzraum eingefüllt und bei geschlossenen Druckausgleichsöffnungen eine bestimmte Zeit lang als Ausgleichsphase unverändert belassen. Danach wurden die Druckausgleichsöffnungen geöffnet und die Abnahme der Gaskonzentration an verschiedenen Stellen gemessen.

Ergebnisse

Bei Druckausgleichsöffnungen unten rechts und links wurde nur ein Luftwechsel im Bereich der Druckausgleichsöffnung von ca. 2,5 1/h gemessen. Bei Druckausgleichsöffnungen an allen Ecken oben und unten wurde ein Luftwechsel in den vertikalen Profilen von bis zu ca. 12,5 1/h gemessen. In den horizontalen Profilen wurde nur ein Luftwechsel im Bereich der Druckausgleichsöffnung von ca. 5 1/h gemessen.

Vergleiche zwischen Holz- und Kunststoffrahmen ergaben, dass die maximalen rel. Luftfeuchten bei Holz geringer sind als bei Kunststoff, dafür aber die Luftfeuchte länger anhält. Das hygroskopische Holz wirkt als Puffer.

Als Mindestabmessungen der Druckausgleichsöffnung wurden angegeben:

- Schlitz mit 5 mm x 20 mm
- Quadratische Querschnitte mit 8 mm x 8 mm
- Bohrungen mit 8 mm Durchmesser.

Empfohlen werden im Wohnbereich 4 Druckausgleichsöffnung jeweils an den Ecken der Falzräume. Ab einer Flügelbreite von 130 cm wird eine zusätzliche Druckausgleichsöffnung unten in der Mitte des horizontalen Rahmenprofils empfohlen.

Verwertbare Aussagen

Die Dampfdruckausgleichsöffnungen an den Ecken wirken sich hauptsächlich auf die vertikalen Profile aus.

Die damals angegebenen Mindestabmessungen der Druckausgleichsöffnung haben sich in der Praxis durchgesetzt, in fast allen Systembeschreibungen sind diese Angaben zu finden. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit auf weitere Untersuchungen diesbezüglich verzichtet.

Weitere gesichtete Forschungsberichte:

Verhalten der raumseitigen Holzprofile und Tauwasserbildung bei Differenzklima an einem Aluminium-Holz-Fensterelement, Institut für Fenstertechnik, 1997

Vergleich unterschiedlicher Möglichkeiten von Dampfdruckausgleichsöffnungen an Holzfenstertüren, Institut für Fenstertechnik, 2001

2.2.2 Diplomarbeiten

Schillinger, W.; Experimentelle Untersuchungen an Wintergartenverglasungssystemen, DA, FHR, 1999

Zieglmayer, J.; Erarbeitung eines Konzeptes für ein wärme- und feuchtetechnisch optimiertes Verglasungssystem von Holz-Aluminium Fassaden, DA, FHR, 2002

Kehrer, C.; Untersuchung zur Feuchtebelastung an Holzfenstern, DA, FHR, 1998

2.2.3 Technische Firmenunterlagen

Die technischen Unterlagen der Systemhersteller enthalten im Allgemeinen Angaben zur Ausbildung des (Dampf-)Druckausgleichsystems bzw. der Entwässerungsöffnungen. Im Folgenden werden die Vorgaben typischer Systembeschreibungen zusammengefasst.

Systembeschreibung, Schüco International KG

Bis zu einer Fassadenhöhe von 8 m oder 8 Feldern erfolgt der Dampfdruckausgleich über die Pfostenenden. Bei Fassadenhöhe von über 8 m müssen abschnittsweise Riegeldichtstücke eingebaut werden und die untere Riegeldichtung stückweise ausgenommen werden. Ab einer Riegellänge von 1,5 m werden zusätzliche Ausklinkungen der Dichtungsfahnen und Verglasungsdichtungen empfohlen.

Systembeschreibung, Hermann Gutmann Werke AG

Der Standard Dampfdruckausgleich erfolgt über die Pfostenenden. Kann der Pfosten unten nicht geöffnet werden, ist eine Ausnehmung der Riegeldichtung mit ca. 5-8 cm in einem Abstand von ca. 80 cm vorzusehen. Bei Riegellängen über 2,5 m werden zusätzliche Bohrungen von 6 mm Durchmesser beidseitig ca. 100 mm vom Riegelende empfohlen. Alternativ zur Bohrung kann auch hier die Riegeldichtung ausgenommen werden.

Systembeschreibung, Hydro Building Systems GmbH (Wicona)

Bis zu einer Fassadenhöhe von 20 m erfolgt der Dampfdruckausgleich über die Pfostenenden. Bei Fassadenhöhen über 20 m sind zusätzliche Entwässerungsteile im Pfosten einzubauen. Bei Riegellängen von 2 m bis 4 m werden zusätzliche Druckausgleichsöffnungen in der Mitte des Riegels vorgeschlagen und sollen mit dem Isolierglashersteller abgeklärt werden. Vorgeschlagen werden Schlitzlöcher von 5 mm x 20 mm durch das Druckprofil in den oberen Falzraum und mit mind. 50 mm Versatz nach unten durch das Deckprofil

Systembeschreibung, esco Metallbausysteme GmbH

Bis zu einer Fassadenhöhe von 20 m erfolgt der Dampfdruckausgleich über die Pfostenenden. Bei Fassadenhöhen über 20 m sind zusätzliche Entwässerungsteile im Pfosten einzubauen. Bei Riegellängen von 2 m bis 4 m werden zusätzliche Druckausgleichsöffnungen in der Mitte des Riegels vorgeschlagen und sollen mit dem Isolierglashersteller abgeklärt werden. Vorgeschlagen werden Schlitzlöcher von 5 mm x 20 mm durch das Druckprofil in den oberen Falzraum und mit mind. 50 mm Versatz nach unten durch das Deckprofil.

Systembeschreibung, Wuppermann Staba GmbH

Der Dampfdruckausgleich erfolgt im Regelfall über die Pfostenenden. Weitere Öffnungen sind in den Riegelprofilen möglich.

Systembeschreibung, RAICO Bautechnik GmbH

Der Dampfdruckausgleich erfolgt über den Entwässerungskanal der Pfosten-dichtung. Ab einer Fassadenhöhe von 8 m sind zusätzliche Dampfdruckausgleichsöffnungen im Pfosten herzustellen. Der zusätzliche Dampfdruckausgleich des Glasfalzes bei überlangen Riegeln erfolgt durch Ausnehmungen in den Druck- und Deckprofilen. Die Anzahl der Ausnehmungen ist abhängig von der Riegellänge, den individuellen Anforderungen und den entsprechenden Verglasungsrichtlinien und müssen mit dem Glaslieferanten abgestimmt werden.

Systemunterlagen, Gebrüder Schneider GmbH

Beschrieben wird hier ein Dampfdruckausgleich in den Riegelprofilen. Im Abstand von 68 mm zum Riegelende ist eine Dampfdruckausgleichsöffnung im Druckprofil von 5 mm x 18 mm im oberen Falzraum und dazu in einem Abstand von 70 mm eine zweite Dampfdruckausgleichsöffnung von 5 mm x 18 mm im unteren Falzraum vorzusehen. Die obere Dampfdruckausgleichsöffnung im Druckprofil ist in einem maximalen Abstand von 600 mm einzubauen. In einem Abstand von 87,5 mm vom Riegelende ist ein Langloch durch das Deckprofil nach unten vorgesehen.

2.2.4 Normen

DIN EN 13830 Vorhangfassaden - Produktnorm

DIN EN 12152 Vorhangfassaden - Luftdurchlässigkeit - Klassifizierung

DIN EN 12153 Vorhangfassaden - Luftdurchlässigkeit - Prüfverfahren

DIN EN 12154 Vorhangfassaden - Schlagregendichtheit - Klassifizierung

DIN EN 12155 Vorhangfassaden - Schlagregendichtheit - Laborprüfung

DIN 68800 Holzschutz, Teil 1 und 2

DIN 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung im Hochbau
Teile 1 bis 7, Beiblatt 1 und 2;

2.3 Erkenntnisse aus Gutachten

Die Erkenntnisse beruhen auf der Auswertung von Gutachten des ift Rosenheim und den Erfahrungen Sachverständiger für Fassadentechnik. Dabei wurden überwiegend Schäden an Glasfassaden und Wintergärten mit einer Tragkonstruktion aus Holz analysiert. Eine statistische Auswertung der Schadensursachen war im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht vorgesehen. Ziel war vielmehr, einen Überblick über die in der Praxis auftretenden Schadensbilder und deren (nach Auffassung der Gutachter) Ursachen zu erhalten.

Pfosten-Riegel-Konstruktion aus Holz entsprechen fast ausschließlich dem in Abschnitt 1.2 dargestellten Konstruktionsprinzip mit äußerer Druck- und Abdeckprofilen aus Metall. Die Holzprofile bilden die tragende Struktur und liegen ausschließlich auf der Raumseite. Überwiegend wurden Mängel bzw. Schäden an den Holzbauteilen festgestellt, in geringerem Umfang waren Verglasungen und angrenzende Bauteile betroffen. Die Schwere reicht von optischen Mängeln durch Holzverfärbung und Oberflächenschäden bis zur Gefährdung der Standsicherheit durch Zerstörung der Holzsubstanz.

Als Schadensursache wurde fast ausnahmslos lang andauernde Feuchtebelastung an der Holzoberfläche oder in den Glas-Falz-Räumen der Konstruktion festgestellt. Dabei ist zu bemerken, dass nahezu baugleiche Fassaden andernorts über viele Jahre schadensfrei bleiben. Dies deutet auf einen erheblichen Einfluss von Einbauort, Nutzung und/oder Ausführung hin.

Als Ursache der Feuchtebelastung werden folgenden Faktoren angegeben:

- Tauwasser an der Raumseite der Verglasung bei kaltem Außenklima
- Wassereintritt von außen durch Schlagregen
- Sonstige Feuchtebelastung z.B. durch schadhafte angrenzende Bauteile und Baukörperanschlüsse.
- Keine ausreichende Öffnung des Falzraumes zum Außenklima
- Diffusion von Raumluftfeuchte

Tauwasserbildung am Glasrandbereich bei kaltem Außenklima.

Die Problematik ist grundsätzlich bei Mehrscheiben-Isolierglas vorhanden, da der Glasrandbereich immer eine konstruktive Wärmebrücke mit entsprechend niedrigen Oberflächentemperaturen darstellt. Tragkonstruktionen aus Holz zeigen wegen der geringeren Wärmeleitfähigkeit von Holz tendenziell niedrigere Glasrandtemperaturen als Konstruktionen aus Metall. Die Tauwassergefahr am Glasrandbereich kann mit einem thermisch optimierten Randverbund verringert aber nicht gänzlich vermieden werden.

Tauwasser im Falzraum durch Undichtigkeiten der raumseitigen Dichtungsebene bei kaltem Außenklima.

Sehr häufig wurden als Schadensursache undichte, raumseitige Verglasungsdichtungen und undichte Pfosten-Riegelverbindungen festgestellt. In den meisten Fällen war die Verarbeitung der Verbindungen und der Dichtprofile nicht fachgerecht. Darunter zählen offene Dichtungsecken und zu geringer Anpressdruck der Pressleistenverschraubung, siehe Abb. 3 und Abb. 4.

Raumluft gelangt durch die Undichtigkeiten in den Falzraum und kondensiert dort an den kalten Bauteilen.



Abb. 2 Beispiel von Holzschäden durch Tauwasser am Scheibenrand.



Abb. 3 Beispiel einer offenen raumseitigen Dichtungsecke



Abb. 4 Beispiel einer offenen raumseitigen Dichtung

Feuchtigkeit im Falzraum durch Wassereintritt durch die äußere Dichtebene.

Die Bauteile einer Pfosten-Riegelfassade sind thermischen und mechanischen Belastungen vor allem durch das Außenklima ausgesetzt. Die aus diesen Belastungen resultierenden Bewegungen der Fassadenbauteile und des Dichtungssystems können im Zusammenhang mit einer Wind- und Schlagregenbelastung zu einem Wassereintritt in den Glasfalz führen. Dies konnte auch an handwerklich sauber verarbeiteten Testfassaden am ift Rosenheim festgestellt werden und entspricht dem derzeitigen Stand der Technik. Ziel muss daher sein die eindringende Wassermenge zu begrenzen und die verbleibende Menge schadensfrei flüssig abzuleiten bzw. Verdunstung und Abtransport des Wasserdampfes zu begünstigen.

Die häufigsten Fehlerquellen bei aufgetretenen Schäden sind ein zu geringer Anpressdruck der Pressleistenverschraubung und fehlende Kreuzungspunktabdichtungen, siehe Abb. 5 und Abb. 6. Bei einer Schlagregenbelastung gelangt somit verhältnismäßig viel Regenwasser in den Falzraum.



Abb. 5 Beispiel einer nicht ausreichenden Druckprofilverschraubung



Abb. 6 Beispiel eines Holzschadens durch Wassereintritt

Öffnungen zum Dampfdruckausgleich

In der Praxis sind häufig keine ausreichenden Druckausgleichsöffnungen vorhanden. Die sich je nach System ergebenden Öffnungen an den unteren und oberen Enden der Pfosten sind häufig z.B. durch Verblechungen, Abdeckkappen und durch durchgehende Riegelfahnen stark verengt oder ganz verschlossen. Zusätzliche Druckausgleichsöffnungen an den Riegeln werden in der Praxis selten eingebaut. Teilweise werden die vorgesehenen Druckausgleichsöffnungen auch mit Dichtbändern überklebt, so dass kein planmäßiger Dampfdruckausgleich möglich ist, siehe Abb. 7.



Abb. 7 Beispiel eines Holzschadens durch fehlender Dampfdruckausgleichsöffnung.

Dampfdiffusion innerhalb der Holzbauteile

Holzschäden aufgrund von Feuchtediffusion von der Raumseite zu kälteren Teilen des Holzquerschnitts sind nicht nachweislich bekannt.

Falzraumdämmung

Gestiegene Anforderungen an den Wärmeschutz erfordern eine thermische Optimierung des Falzraumes. Hierzu wird der Falzraum durch Dämmprofile verengt und der Wärmeverlust verringert. Andererseits wird auch der Wasserdampftransport beeinflusst. Von sachverständiger Seite wird daher vermutet, dass sich dies ungünstig auf die Schadensanfälligkeit auswirkt. Da Falzraumdämmungen erst seit wenigen Jahren eingebaut werden, fehlen jedoch noch die praktischen Erfahrungen bezüglich der langfristigen Auswirkungen.

Baukörperanschlüsse

Auffällig ist in der Praxis die mangelnde Planung und Ausführung der Baukörperanschlüsse, vor allem an kritischen Bereichen wie z.B. Ecken, Bauteilübergängen, Brüstungsanschlüssen und Bodenanschlüssen. Luftundichtigkeiten und Wassereintritt können die Folge sein. Viele Monteure auf der Baustelle verstehen aufgrund mangelnder Ausbildung den technischen Zusammenhang der notwendigen Abdichtungsmaßnahmen nicht ausreichend. Bauteilanschlüsse sind eine Planungsaufgabe und werden im vorliegenden Bericht nicht weiter behandelt.

Materialalterung

Moderne Verglasungsdichtungen aus EPDM sind ausreichend alterungsresistent und formstabil, so dass kaum Probleme in der Praxis auftreten. Dichtungen an Pressleistenschrauben neigen zur Verformung und zum Kriechen, der Anpressdruck kann dadurch nachlassen.

Falzraumdämmungen aus geschlossenzelligem Polyethylen schwinden bis zu 3%. Teilweise werden aus Kostengründen keine Edelstahlschrauben eingesetzt. Verklebungen von Dichtteilen sind teilweise nicht dauerhaft.

Verarbeitungsfehler

Moderne Fassadensysteme mit guter Wärmedämmung erfordern eine sorgfältige Montage. Dies gilt vor allem für die Ausbildung der Kreuzungspunkte und den Einbau von Dämmprofilen.

Aus der Gutachterpraxis wird deutlich, dass häufig unzureichende Planung, insbesondere der Anschlüsse, und mangelhafte Montage schadensursächlich sind.

Eine ausreichende, fachspezifische Ausbildung der Monteure, Qualitätskontrolle eventuell mit Fremdüberwachung und Rücksicht auf das Wetter bei Außenmontage könnte helfen Verarbeitungsfehler zu vermeiden. Ebenso sind montagefreundliche Systeme vorteilhaft.

Für die zu erarbeitenden Konstruktionsempfehlungen kann aus den Praxiserkenntnissen folgendes abgeleitet werden:

(Dampf-)Druckausgleichsöffnungen sind erforderlich und sollten aus der Konstruktion folgen. Ist eine gesonderte Planung und Bearbeitung erforderlich, sollte diese werkseits geschehen.

Die Montageabläufe der Konstruktion müssen einfach und leicht verständlich sein, um die Fehleranfälligkeit zu senken.

Die Materialien und Bauteile sollten auch unter ungünstigen Praxisbedingungen problemlos eingebaut werden können.

Die Anzahl der Bauteile sollte auf ein notwendiges Minimum beschränkt werden.

2.4 Stand der Technik

2.4.1 Dichtigkeit bei Schlagregen

Die Bauteile einer Pfosten-Riegelfassade sind thermischer und mechanischer Belastungen durch das Außenklima ausgesetzt. Die Druckprofile aus Aluminium bewegen sich aufgrund von Temperatureinflüssen bis zu 2,0 mm/m Profillänge. Bei Windbelastung verformen sich die ausfachenden Bauteile „Verglasungen“ und „Paneel“ anders (abhebende Ecken!) als die den Rand der Ausfachungen stützenden Tragprofile. Bei hoher Belastung werden diese Verformungsdifferenzen nicht mehr vollständig durch die elastische Verformung der äußeren Dichtprofile aufgenommen.

Die insbesondere bei dynamischer Windlast (Windböen) resultierenden Bewegungen der Fassadenbauteile und des Dichtungssystems führen im Zusammenhang mit einer Schlagregenbelastung in der Regel zu einem Wassereintritt in den Glasfalz. Eine dauerhafte, absolute Schlagregendichtheit der **äußeren** Dichtebene ist in der Praxis somit nicht erreichbar. Das bei hoher Wind- und Regenbelastung in den Glasfalzraum eindringende Wasser muss über ein „Drainage-System“ schadfrei nach außen abgeführt werden, um ein weiteres Vordringen in die Konstruktion und letztlich ein Eindringen in den Innenraum zu verhindern.

Die raumseitige Dichtungsebene (auch „Primärdichtung“) hat die Aufgabe, die erforderliche Luftdichtheit sicherzustellen. Eine absolute Luftdichtheit ist mit vertretbarem Aufwand nicht erreichbar und auch nicht notwendig. Um die Schlagregendichtheit sicher zu stellen, darf aber kein flüssiges Wasser zur raumseitigen Dichtebene gelangen. Dies ist die Aufgabe der äußeren Dichtung in Zusammenwirken mit der Glasfalzgestaltung.

2.4.2 Öffnungen des Glasfalzraumes

Um in den Glasfalzraum eingedrungenes Wasser möglichst rasch abzuleiten, wird der Glasfalzraum gezielt nach Außen geöffnet. In der Fachliteratur werden diese Öffnungen dann in Anlehnung an Drainagesysteme als „Entwässerungsöffnungen“ und „Druckausgleichsöffnungen“ bezeichnet. Oft wird in diesem Zusammenhang vom Glasfalzraum als zweite „wasserführende“ Ebene gesprochen.

Aufgrund der Bezeichnung „Entwässerungsöffnungen“ könnte missverständlich vermutet werden, dass an die äußere Glasdichtung keine Anforderung bezüglich Dichtheit zu stellen ist, da eindringendes Wasser abgeführt wird. Dies ist falsch! Die eindringende Wassermenge ist so gering wie möglich zu halten.

Geringe Wassermengen in den horizontalen Falzräumen der Riegel fließen mangels Gefälle nicht ab und müssen durch Verdunstung abtrocknen. Der entstehende Wasserdampf wird dann konvektiv oder wesentlich langsamer durch Diffusion nach Außen abgeführt. Auf dieser Funktionalität beruhen die Bezeichnungen „Belüftungsöffnung“ und „Dampfdruckausgleichsöffnung“.

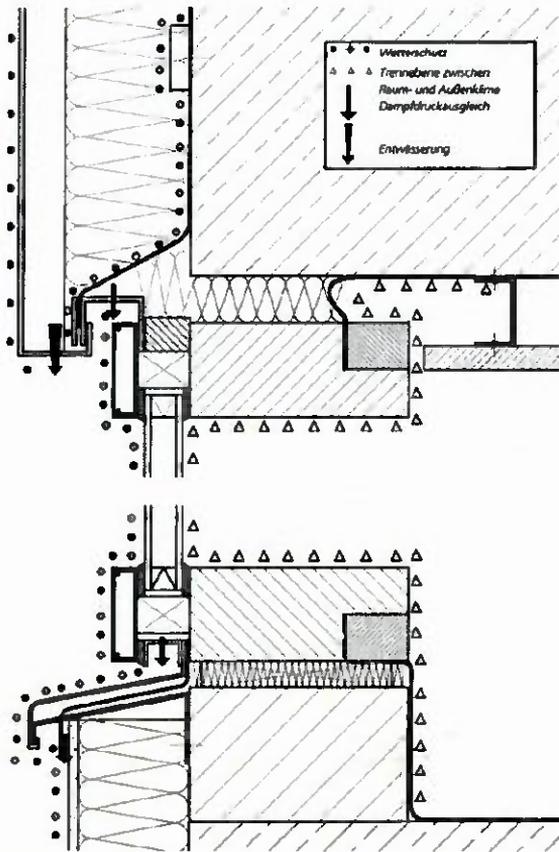


Abb. 8 Funktionsebenen bei Fassaden [Hol1999]

Anmerkung:

Bei den üblichen Öffnungsquerschnitten von unter 500 mm^2 pro Meter Riegelänge ist der Einfluss auf die Wärmedämmung vernachlässigbar. Es erfolgt also keine „Belüftung“ des Falzraumes im Sinne von DIN EN 6946.

In der Praxis lassen sich die unterschiedlichen Funktionen der Falzraumöffnungen nicht trennen und dementsprechend werden die oben aufgeführten Bezeichnungen nebeneinander und synonym verwendet. Im vorliegend Bericht wird überwiegend die Bezeichnung „Druckausgleich“ verwendet.

Die Systemanbieter beschreiben in ihren Verarbeitungsrichtlinien Möglichkeiten wie eine Falzraumbelüftung hergestellt werden kann. Genaue Anweisungen ab welchen Bedingungen z.B. zusätzliche Dampfdruckausgleichsöffnungen an den Riegeln einzubauen sind, sucht man allerdings meist vergeblich. Häufig wird in diesem Punkt auf den Glaslieferanten verwiesen.

Durch den üblichen Aufbau der durchgehenden Pfostenprofile und der dazwischen liegenden Riegelprofile bieten sich die offenen Pfostenenden als Druckausgleichsöffnungen an. Auch bei Falzraum-trennenden Konstruktionen ergibt sich in der Regel eine Verbindung zwischen dem oberen und unteren Verglasungsfeld. Über diese Verbindung kann eingedrungene Feuchtigkeit vom Riegel in den Pfosten geführt werden und über den nach außen geöffneten Pfostenfalzraum abtrocknen. Die Glasfälze im Riegel werden somit indirekt über die Pfostenfalzräume belüftet, siehe Abb. 9 links. Je nach Hersteller und Systemvorgaben werden so bis zu 8 Meter hohe Fassaden oder Fassadenabschnitte gebaut.

Bei feldweiser Entwässerung und Belüftung wird der Falzraum direkt durch Druckausgleichsöffnungen belüftet, vergleichbar mit einem Fensterflügel, siehe Abb. 9, rechts. Üblicherweise befinden sich die Druckausgleichsöffnungen dann an den Riegelprofilen. Die feldweise Entwässerung und Belüftung wird hauptsächlich als zusätzlicher Druckausgleich bei Riegelprofilen eingesetzt, welche eine bestimmte Länge überschreiten,

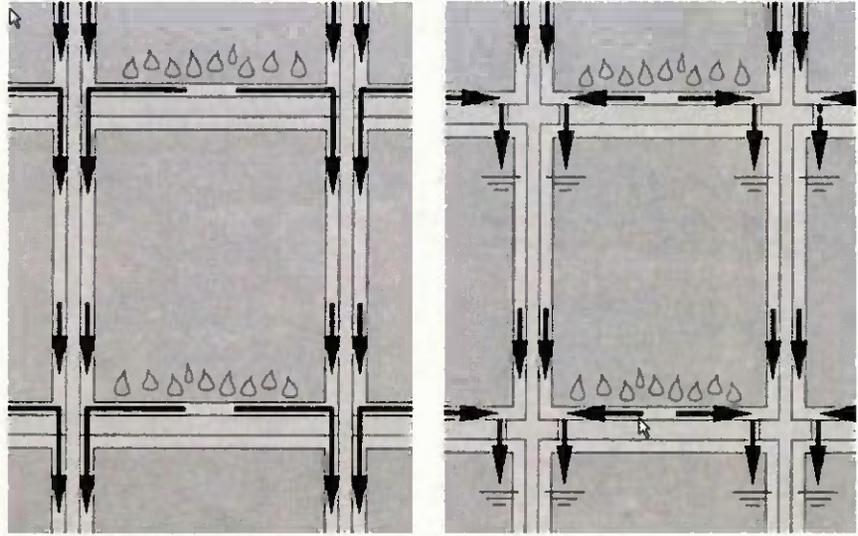


Abb. 9 Dampfdruckausgleich über Pfosten (links) und über Riegel (rechts) [Hol1999]

2.5 Vorgehen und Auswahl der Fassadenysteme

Im Rahmen des Forschungsprojektes soll untersucht werden, wie sich die im Falzraum eingedrungene Feuchtigkeit bei unterschiedlichen Fassadenkonstruktionen und Anordnung der Druckausgleichsöffnungen verhält. Dabei sollen einfache handwerkliche Fassadenkonzepte ebenso wie hochwärmedämmende Konstruktionen einbezogen werden.

Weiterhin soll der Einfluss der Feuchtbelastung auf das Holztragwerk durch

- Raumlufte bei diffusionsdichtem Aufbau
- durch Feuchte im Glasfalz bei diffusionsoffenem Aufbau

untersucht werden.

Der Einfluss von Ausführungsfehlern oder Planungsschwächen, wie undichte Eckverbindungen, undichte innere oder äußere Glasabdichtung, Vergrößerung des inneren Wärmeübergangswiderstands bei ungünstiger Einbausituation und anders mehr ist nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts.

Für die Untersuchung musste es einerseits möglich sein, eine größere Anzahl von Systemvariation in kurzer Zeit zu testen und zu bewerten, andererseits aber den Bezug zum tatsächlichen Verhalten in der Realität zu sichern. Es wurde daher zwei parallel laufende Versuchsanordnungen gewählt:

- Zur Untersuchung von Varianten wurden vier „Testelemente“ labornahe in die Fassade der Hochschule eingebaut
- Zur Untersuchung des realitätsnahen Verhaltens wurden eine Testfassade am ift Rosenheim aufgebaut.

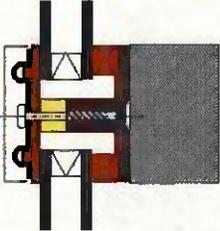
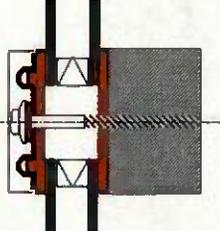
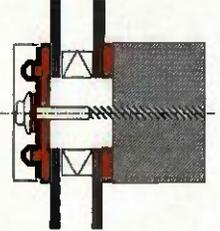
Hinsichtlich dieser Aufgabenstellung wurden marktübliche Holz-Glas-Fassaden-Systeme auf ihre Eignung im Forschungsvorhaben untersucht. Dabei wurden folgende Kriterien zu Grunde gelegt:

- Zur Untersuchung der Diffusionseinflüsse zwischen Holzkonstruktion und Falzraum sollen diffusionsoffene und diffusionsdichte Systeme ausgewählt werden.
- Zur Untersuchung wie sich eine Falzraumdämmung auf die Austrocknung auswirkt, sollen Systeme mit und ohne Falzraumdämmung ausgewählt werden.
- Zur Untersuchung der Wasserführung sollen Systeme mit Falzraumdämmung, mit Riegelbahn und ohne spezielle Wasserführung ausgewählt werden.
- Es soll ein hoch wärmedämmendes System und ein möglichst einfach konstruiertes System ausgewählt werden.

Nach einer Analyse von marktüblichen Verglasungssystemen verschiedener Hersteller lassen sich die meisten Systeme in drei typische Konstruktionsgruppen einteilen, siehe Tab. 1. Hieraus wurde ein typischer Vertreter jeder Konstruktionsgruppen für die Testfassaden ausgewählt.

Die Ansichtsbreiten der Systeme ist einheitlich 50 mm. Diese entspricht den Wünschen der Bauwirtschaft, so schlanke Konstruktionen wie möglich auszuführen. Sämtliche Fassadenhersteller haben sich darauf eingestellt und bieten entsprechende Konstruktionen an. Der Querschnitt der Tragkonstruktion wurde mit 50 x 75 mm² festgelegt.

Tab. 1 Ausgewählte Grundsysteme Holz-Glas-Fassaden

Schnittdarstellung	System	Beschreibung
	A	<p>Auf die Holz-Tragkonstruktion ist ein Grund- oder Basisprofil aus Aluminium geschraubt. Die raumseitige Dichtung bedeckt das Grundprofil vollständig. Durch eine optionale Falzraumdämmung kann der U-Wert verbessert und der Falzraum getrennt werden. Das Holz ist zum Falzraum diffusionsdicht abgedeckt. Die Holztragkonstruktion ist vor Feuchtigkeit im Falzraum geschützt. Die Montage des Druckprofils erfolgt mit Schrauben im Grundprofil.</p>
	B	<p>Auf der Holz-Tragkonstruktion ist eine vollflächige raumseitige Dichtung aufgebracht. Das Holz ist damit zum Falzraum diffusionsdicht abgedeckt. Die Holztragkonstruktion ist vor Feuchtigkeit im Falzraum geschützt. Der Falzraum ist nicht gedämmt und großräumig. Optional kann in den Riegeln eine Dichtungsfahne eingesetzt werden. Die Dichtungsfahne trennt die Falzräume und soll eingedrungenes Wasser von der unteren Verglasung abhalten. Die Montage des Druckprofils erfolgt mit Holzschrauben durch die innere Dichtung in das Holzprofil, dabei durchdringt die Schraube das inner Dichtprofil.</p>
	C	<p>Auf der Holz-Tragkonstruktion sind zwei schmale raumseitige Dichtungen eingebaut. Das Holz ist damit zum Falzraum diffusionsoffen. Die Holztragkonstruktion kommt mit eingedrungener Feuchtigkeit im Falzraum in Kontakt. Der Falzraum ist nicht gedämmt und dadurch großräumig. Die Montage des Druckprofils erfolgt mit Holzschrauben und Dichtung im Holzprofil.</p>

3 Bauphysikalische Größen und Begriffe

3.1 Solarstrahlung

Die solare Einstrahlung spielt für das Temperatur- und Feuchteverhalten in Fassadenkonstruktionen eine große Rolle. Bei der Sonnenstrahlung handelt es sich allerdings um eine stark gerichtete und extrem variable Größe. Abb. 10 zeigt die Globalstrahlung und die Außenlufttemperatur an der FH Wetterstation über das Kalenderjahr 2006. Maximalwerte werden in den Sommermonaten erzielt, allerdings erreicht die Einstrahlung auch in den anderen Jahreszeiten immer wieder beachtliche Spitzenwerte, die zwar kürzer auftreten, aber aufgrund der vergleichsweise hohen Intensität von bis zu 700 W/m^2 immer direkte Auswirkung auf die Temperatur und den Dampfdruck haben.

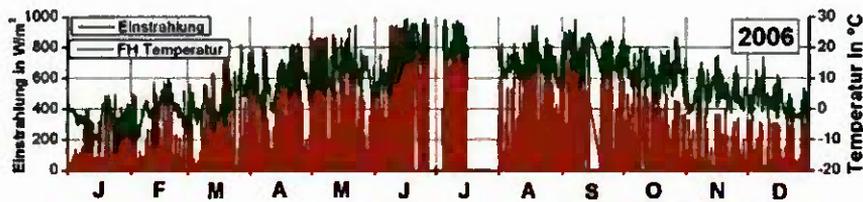


Abb. 10 Solare Einstrahlung und Außenlufttemperaturen an der FH Wetterstation im Kalenderjahr 2006.

Die Globalstrahlung bezeichnet die auf eine horizontale Fläche fallende gesamte Solarstrahlung und besteht aus der direkten Sonnenstrahlung und der durch die Atmosphäre gestreuten diffusen Strahlung. Je nach Zustand der Atmosphäre (Sonnenhöhe, Wassergehalt, Staub, Wolken) ergeben sich unterschiedliche Werte der direkten und diffusen Strahlung, siehe Tab. 2.

Tab. 2 Solare Einstrahlung abhängig von der Himmelsbedeckung

Wetter	Gesamtstrahlung in W/m^2	davon Diffusstrahlung in %
klarer Himmel	1000	10
Dunstig	500 – 700	30
Trüb	100 - 300	70 - 100

Bei Einstrahlung auf geneigte Flächen ist neben der direkten und diffusen Einstrahlung auch die Reflexion am Boden zu beachten. Insbesondere Reflexionen von Wasser oder Schneeflächen können die Einstrahlung wesentlich verstärken. Allgemein gültige Aussagen können daher nur Anhaltswerte sein. Abb. 11 zeigt die Einstrahlung im Sommer und Winter auf Flächen unterschiedlicher Orientierung. Während die Direktstrahlung auf eine Südwand im Winter am größten ist, liegt das Maximum im Sommer bei Ost oder Westorientierung [Kün2006]. Der schraffierte Bereich kennzeichnet die von der Himmelsrichtung unabhängige diffuse Strahlung.

In jedem Fall beeinflussen neben den himmelsmechanischen Parametern wie Jahreszeit, Tageszeit, Himmelsrichtung bzw. Orientierung auch lokale Bege-

benheiten wie Wetter sowie Randbebauung und Oberflächenbeschaffenheit die Einstrahlung in großem Maße.

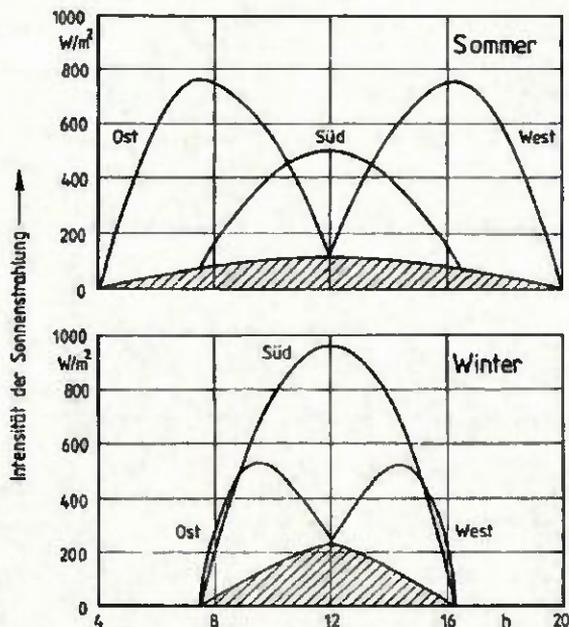


Abb. 11 Intensität der Sonneneinstrahlung auf senkrechte Flächen mit Ost-, Süd und Westorientierung über einen Tagesverlauf im Sommer und Winter. Der schraffierte Bereich kennzeichnet die diffuse Strahlung.

3.2 Schlagregen

Bei Kontinentalklimaverhältnissen fallen die größten Niederschlagsmengen in den Sommermonaten, siehe Abb. 12. Dabei ist auffällig, dass es zu dieser Jahreszeit am Nachmittag deutlich mehr regnet als am Vormittag. Im Winter kann eine tageszeitliche Schwankung nicht beobachtet werden. Daher hängt nach [Kün2006] der stärkere Sommerregen mit einer höheren Gewittertätigkeit zusammen. Entscheidend für Fassaden ist jedoch nicht die Menge des absoluten Niederschlages, sondern allein der Teil, der direkt die Fassade belastet, der Schlagregen.

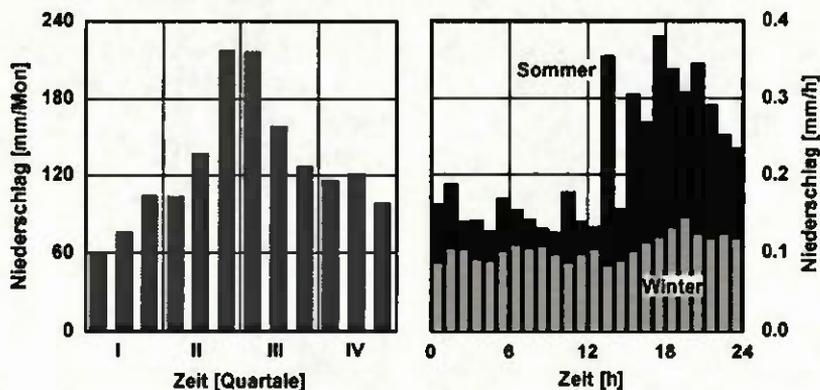


Abb. 12 Niederschlagsmengen in Holzkirchen über ein Jahr (links) und an einem Tag (rechts) [Kün2006]

Die DIN 4108-3 klassifiziert Kriterien der Einstufung für Schlagregenbeanspruchungen drei Gruppen (I-III) unter Berücksichtigung der örtlichen Windgeschwindigkeiten sowie den durchschnittlichen jährlichen Regenmengen. In Abb. 13 (oben) wird ein Ergebnis des Fraunhofer Institutes für Bauphysik dargelegt: als Verhältnis von Schlagregen zu Normalregen in der Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit. Dies zeigt, wie der Wind den Niederschlag stark beeinflusst. Dabei hat [Kün1994] dargelegt, dass die mittlere Schlagregendauer bei 4h liegt, wohingegen Regen im Mittel etwa 6h fällt (Standort Holzkirchen).

Auftreffende Regenmengen hängen zum einen stark von der Neigung und der Orientierung der Fassaden und zum anderen von umliegenden Bauteilen ab.

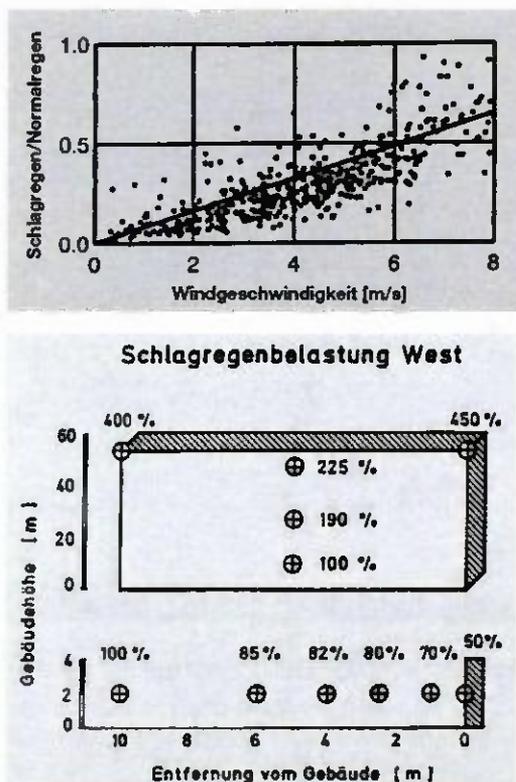


Abb. 13 Schlagregen in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeiten (oben) Schlagregenbelastung auf eine westorientierte Fassade und im Abstand der Fassadenfläche (unten) [Kün1994]

Die Schlagregenbelastung ist meist auf der Hauptwetterseite am größten, da hier die Hauptwindrichtung angreift. Besonders betroffen sind hoch gelegene Fassadenflächen und Gebäudeecken und -kanten, wie dies aus Abb. 13 (unten) und Abb. 14 ersichtlich wird. Im Falle der Hochhausfassaden können Unterschiede in der Schlagregenbelastung auftreten, die den Faktor 4 bis 10 überschreiten [Kün1994].

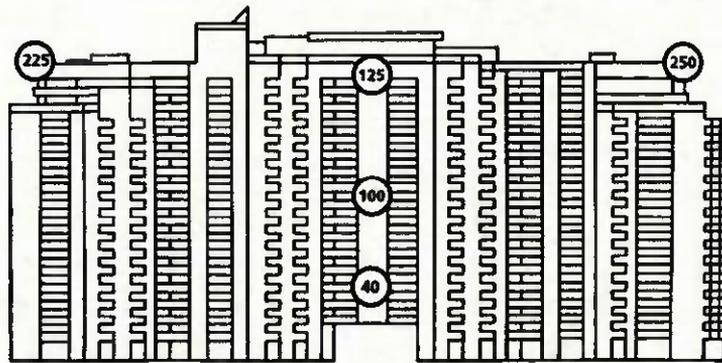


Abb. 14 Schlagregennmengen, gemessen an verschiedenen Positionen eines 50m hohen Gebäudes, bezogen auf die Belastung in Fassadenmitte (= 100%) [Sch1973]

Verbessert wird die Situation durch große Dachüberstände. Nach [Kün2006] gilt dies allerdings nur für Schrägdachüberstände. Horizontale Überstände können demnach durch Zirkulationsströmungen einen Anstieg der Schlagregennmenge zur Folge haben. Eine Schiefstellung oder Ausbauchung kann zu einer Vervielfachung der Niederschlagsmenge führen, da hier auch gerade fallender Regen (bei Windstille) direkt auf die Fassadenflächen trifft. Abb. 15 zeigt dies anhand von Ergebnissen des Fraunhofer Institutes sehr deutlich:

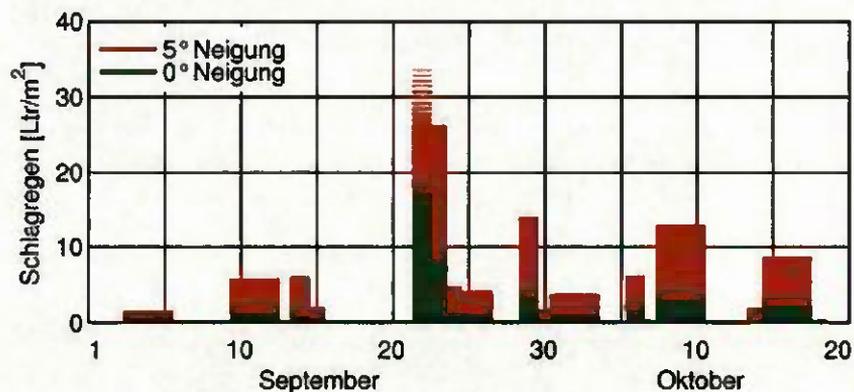


Abb. 15 Schlagregennmengen gemessen als Tagessummen an einer westorientierten 4 m hohen Fassade [Kün1006]

3.3 Wind

Der Wind ist für die feuchtetechnischen Prozesse dann von Belang, wenn er zum einen in Verbindung mit Niederschlag eine Schlagregenbelastung hervorruft oder zum anderen, in dem er die Feuchteschwankungen im Glasfalz beeinflusst, wie z.B. bei einer Austrocknung. In beiden Fällen ist das eine regionale Einflussgröße und ist vom Standort der Fassade abhängig. Ähnlich wie bei der solaren Einstrahlung können daher nur bedingt pauschale Aussagen getätigt werden.

Abb. 16 zeigt repräsentativ für den Raum Rosenheim die Windgeschwindigkeiten für den Monat März 2006. Üblicherweise schwanken die Werte im Jahresmittel um ca. 2m/s. [Sch1973] machte Messungen an einer Hochhausfassade (50m Höhe) in München, aus denen hervorging, dass die häufigsten

Windgeschwindigkeiten bei Westwinden im Bereich von 5 bis 6m/s und bei Ostwinden im Bereich von 3 bis 4m/s lagen.

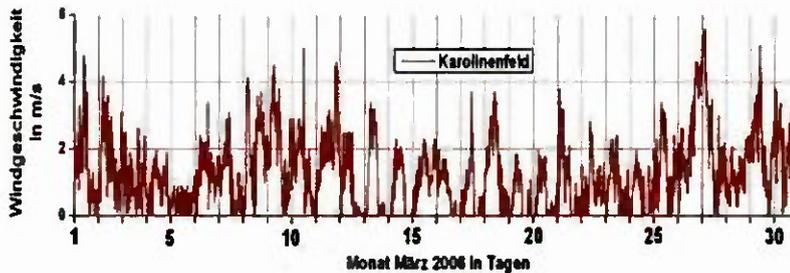


Abb. 16 Windgeschwindigkeiten im März 2006 – (Messstation Karolinenfeld)

3.4 Luftfeuchte

3.4.1 Dampfdruck und Sättigungsdruck

Luft ist ein Gasgemisch und besteht hauptsächlich aus den Gasen Stickstoff und Sauerstoff sowie Edelgasen, Wasserdampf, Kohlendioxid und verschiedenen Luftschadstoffen in Spuren. Die trockene Luft kann unter Normalbedingungen als ideales Gas angesehen werden. Der Anteil des Wasserdampfes am Gemisch Luft wird durch den Wasserdampfpartialdruck (Wasserdampfteildruck) angegeben.

Der Luftdruck (Gesamtdruck) entspricht der Summe des Drucks der trockenen Luft und des Wasserdampfpartialdrucks (Druckeinheit Pa), da sich alle Komponenten der Luft so verhalten, als ob die anderen Gase nicht vorhanden wären (Dalton'sches Gesetz).

$$p = p_{TL} + p_D$$

Der Anteil des Wasserdampfs am Luftdruck ist variabel und kann mit der Temperatur ansteigen. Der Gesamtdruck der Luft (äußere Luftdruck) hängt aber von der Ortshöhe und den Wetterbedingungen ab und beträgt ca. 1 bar.

Der Wasserdampfpartialdruck wird durch den Wasserdampfsättigungsdruck begrenzt. Dieser hängt nur von der Temperatur ab und ist tabelliert, siehe z.B. DIN4108-3.

$$p_D \leq p_S(T)$$

Der Wasserdampfpartialdruck wird als absolute Luftfeuchte bezeichnet und in Pa angegeben. Alternativ ist eine Angabe der Wasserdampfdichte, z.B. in g/m^3 oder der Konzentration in mol/m^3 möglich.

Die relative Luftfeuchte wird als Verhältnis von Wasserdampfpartialdruck zu Wasserdampfsättigungsdruck definiert und meist in % angegeben.

$$\varphi = \frac{p_D}{p_S(T)} \cdot 100\%$$

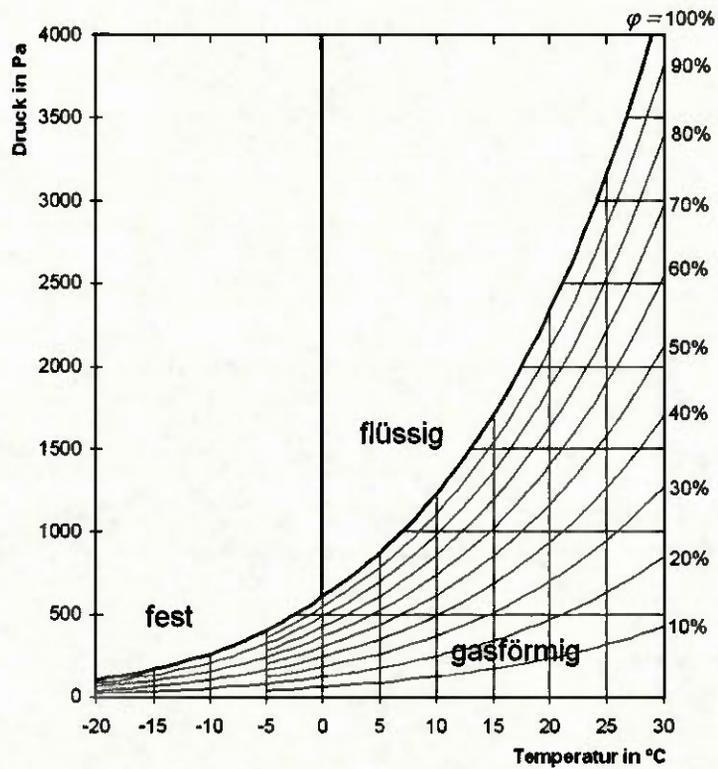


Abb. 17 Wasserdampfdruck als Funktion der Temperatur

Für Berechnungen ist es vorteilhaft, den Wasserdampfsättigungsdruck durch einen geeigneten mathematischen Ausdruck zu beschreiben. Abhängig vom Fachgebiet werden unterschiedliche Näherungsfunktionen verwendet. In der Bauphysik ist folgende in DIN 4108-3 angegebene Parametrisierung der Dampfdruckkurve üblich und wird im Weiteren verwendet:

$$p_s = a \cdot \left(b + \frac{g}{100^\circ\text{C}} \right)^n$$

Dabei ist

g die Lufttemperatur in $^\circ\text{C}$

a, b, n Parameter nach Tab. 3

Tab. 3 Werte der Parameter a, b, n nach DIN 4108-3

Konstante	Temperaturbereich für	
	$0^\circ\text{C} < T < 30^\circ\text{C}$	$-20^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C}$
a	288,68 Pa	4,689 Pa
b	1,098	1,486
n	8,02	12,30

Für den bauphysikalisch relevanten Bereich ($T < 50^\circ\text{C}$) kann Wasserdampf als ideales Gas behandelt werden, so dass zwischen Wasserdampfdruck und Wasserdampfdichte gilt:

$$p_D = \rho_D \cdot R_D \cdot T$$

Dabei ist

ρ_D die Wasserdampfdichte,

T die Kelvin-Temperatur und

$R_D = 462 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ die Gaskonstante von Wasserdampf.

3.4.2 Taupunkttemperatur

Bei Abkühlung sinkt der Wasserdampf-sättigungsdruck und erreicht bei der Taupunkttemperatur den vorhandenen Wasserdampf-sättigungsdruck, es ist:

$$p_S(T_S) = p_D \quad \text{oder} \quad T_S = p_S^{-1}(p_D)$$

Meist wird der Zustand der Luft durch die Temperatur und die relative Luftfeuchte angegeben. Aus der Definition der relativen Luftfeuchte folgt dann:

$$p_D = \varphi \cdot p_S(T)$$

Für die Taupunkttemperatur gilt daher bei bekannter Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte:

$$T_S = p_S^{-1}\{\varphi \cdot p_S(T)\}$$

Mit der Parametrisierung nach DIN 4108 (Lufttemperaturen $> 0^\circ\text{C}$) berechnet sich die Taupunkttemperatur:

$$t_S = \varphi^{0,125} \cdot (109,8^\circ\text{C} + t) - 109,8^\circ\text{C}$$

dabei ist

t_S Taupunkttemperatur in $^\circ\text{C}$

φ relative Luftfeuchte in %

t Lufttemperatur in $^\circ\text{C}$

3.5 Wasserdampftransport

3.5.1 Diffusion

Aufgrund unterschiedlicher Konzentration der Wassermoleküle (Wasserdampfpartialdruck) kommt es zu einer Ausgleichsbewegung der Dampfmoleküle vom höheren in Richtung des niedrigeren Partialdruckes, siehe Abb. 18.

Grundlage zur Beschreibung ist das Fick'sche Gesetz:

$$\dot{m} = -D \frac{dc}{dx}$$

\dot{m} Teilchenstromdichte in $\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$

D Diffusionskoeffizient in m^2/s

$\frac{dc}{dx}$ Konzentrationsgefälle in $\text{mol}/\text{m}^3/\text{m}$

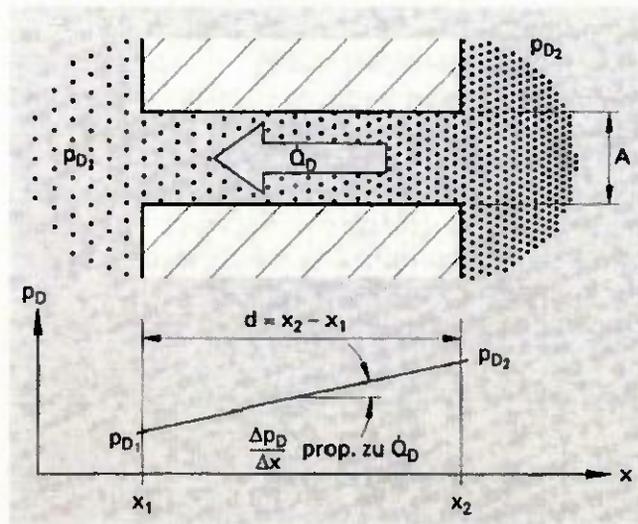


Abb. 18 Wasserdampfdiffusion infolge unterschiedlicher Partialdampfdrücke [Zür2004]

Der Diffusionskoeffizient kennzeichnet die Durchlässigkeit des Baustoffes und beschreibt die Beweglichkeit der Moleküle. Wird dieses Gesetz auf die Wasserdampfdiffusion in ruhender Luft angewendet, so kann der Diffusionskoeffizienten für Wasserdampf in Luft aus folgender Zahlenwertgleichung ermittelt werden [Hoh1997].

$$D = 0,083 \frac{\text{m}^2}{\text{h}} \cdot \frac{p_0}{p} \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,81}$$

Dabei ist

$p_0 = 1013 \text{ hPa}$ atmosphärischer Normaldruck

$T_0 = 273 \text{ K}$ Normaltemperatur 0°C

$p; T$ Luftdruck und Lufttemperatur

Da der Wasserdampf den Gesetzen des idealen Gases folgt, kann man anstelle der Konzentration den Partialdruck setzen. Damit kann analog zur Wärmeleitfähigkeit für den Wasserdampftransport geschrieben werden [Zür2004]:

$$q_D = -\delta_D \cdot \frac{dp_D}{dx}$$

Dabei ist

\dot{Q}_D Dampfstromdichte in $\text{g}/\text{m}^2\text{h}$

δ_D Dampfleitfähigkeit in $\text{g}/(\text{m h Pa})$

$\frac{dp_D}{dx}$ Dampfdruckgefälle in Pa/m

Für die Dampfleitfähigkeit der Luft gilt dann bei 10°C :

$$\delta_D = \frac{D}{R_D T} = \frac{1}{462 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 283 \text{ K}} \cdot 0,083 \frac{\text{m}^2}{\text{h}} \cdot 1 \cdot \left(\frac{283}{273} \right)^{1,81} = 0,68 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{h}}$$

Besser bekannt ist der Wasserdampf-Diffusionswiderstand bei ruhenden Luft

$$\text{nach DIN 4108-3: } Z = \frac{1}{\delta_D} = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{h}}{\text{kg}}$$

3.5.2 Konvektion

Wasserdampfkonvektion ist der Transport von Wasserdampf durch Luftströmungen. Hierdurch können im Vergleich zur Wasserdampfdiffusion erheblich höhere Mengen an Wasserdampf transportiert werden.

In [Lut2002] wird der Transport von feuchter Luft in vertikal vor Fassaden montierten Rohren behandelt. Dies wäre vergleichbar mit Prozessen im Falzraum der Pfosten. Bei Messungen wurde festgestellt, dass mit dem Durchmesser der Rohre auch die Strömungsgeschwindigkeiten im Rohr ansteigen, siehe Abb. 19.

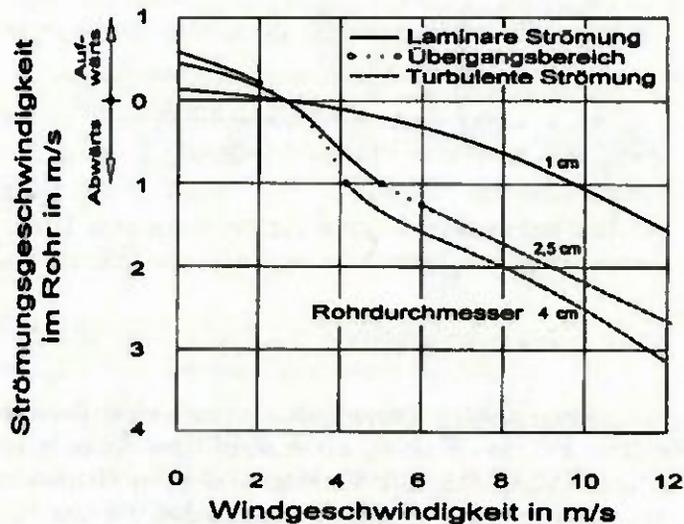


Abb. 19 Strömungsgeschwindigkeiten in vertikal angeordneten Rohren vor einer Fassade [Lut2002] bei Wind.

Entscheidend für die Konvektion ist die Luftgeschwindigkeit. Antrieb für Luftströmungen sind Wind und thermischer Auftrieb, wobei sich beide in der Realität überlagern. Bei Windstille erfolgt die Strömung wegen des thermischen Auftriebes von unten nach oben und dreht die Richtung bei der Zunahme des Windes.

Wind induzierte Strömung

Die von einer Windströmung verursachten Druckdifferenzen zwischen Ein- und Austrittsöffnungen am Rohr können durch Einsetzen in die Formeln des Windprofils gewonnen werden:

$$\Delta p_W = c \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{10}^2 \left[\left(\frac{h_o}{10m} \right)^{2n} - \left(\frac{h_u}{10m} \right)^{2n} \right]$$

- c: Druckbeiwert
- v: Windgeschwindigkeit in 10m in m/s
- ρ : Dichte der Luft, meist 1,25 kg/m³
- h_o : Höhe oben in m
- h_u : Höhe unten in m
- n: Rauigkeitsfaktor der Erdoberfläche

Thermisch induzierte Strömung

Druckdifferenzen können auch durch Temperaturdifferenzen und somit durch Dichteunterschiede der Luftschichten zu Stande kommen. Die Luftdichte hängt umgekehrt proportional von der absoluten Temperatur ab, daher ergibt sich ein thermischer Auftrieb. Erwärmte und somit leichter gewordene Luft steigt nach oben.

$$\Delta p = \Delta \rho \cdot g \cdot H = \rho \cdot g \cdot H \cdot \frac{\Delta T}{T}$$

Werden die Druckdifferenzen infolge Wind und Temperatur zusammengefasst, so gilt, da der Wind stets eine Strömung nach unten bewirkt und die temperaturinduzierte Druckdifferenz nach oben gerichtet ist:

$$\Delta p = |\Delta p_T - \Delta p_W|$$

Nach Bernoulli folgt die Strömungsgeschwindigkeit aus:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot (1 + \sum \lambda)}}$$

ρ : Dichte der Luft im Belüftungsraum

v : mittlere Strömungsgeschwindigkeit im Belüftungsraum

$\sum \lambda$: Summe der Reibungsbeiwerte

Mit dem Strömungsquerschnitt erhält man für den Volumenstrom:

$$\dot{V} = A \cdot v$$

A : Strömungsquerschnitt.

3.6 Wärmetransport

Der Wärmetransport findet auf verschiedene Arten statt. Abb. 20 zeigt die Einflüsse schematisch, die an einem Außenbauteil eines Gebäudes ablaufen. Der Transport durch feste Materialien wird als Wärmeleitung bezeichnet. Ein Maß für die Stärke der Wärmeleitung eines Stoffes ist dessen Wärmeleitfähigkeit. Wird Wärmeenergie durch ein strömendes Medium, wie beispielsweise Luft, transportiert, spricht man von Konvektion. Hier soll vor allem die Wärmestrahlung näher betrachtet werden, da sie von besonderer Bedeutung ist.

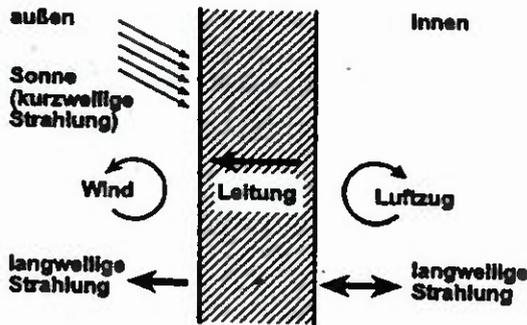


Abb. 20 Darstellung der Einflüsse auf den Wärmetransport [Sed2004]

Wärmestrahlung

Jeder Körper strahlt in Abhängigkeit von seiner Temperatur und Oberfläche eine elektromagnetische Strahlung aus. Die Wellenlänge dieser Emission liegt bei bauphysikalisch üblicher Temperatur von -20°C bis ca. 80°C im mittleren Infrarot (MIR) von 2 bis $50\ \mu\text{m}$. Die Sonne mit einer Oberflächentemperatur von 6000K strahlt mit Wellenlängen zwischen $0,2 - 2\ \mu\text{m}$ und damit vom nicht sichtbaren kurzwelligem Ultraviolett (UV) über sichtbare Strahlung (Licht: $0,38$ bis $0,78\ \mu\text{m}$) bis zum nahen Infrarot (NIR).

Die auf einen Körper auftreffende Strahlung kann reflektiert, absorbiert oder durchgelassen (transmittiert) werden, siehe Abb. 21. Aus dem Energieerhaltungssatz folgt sofort,

$$\rho(\lambda) + \alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$$

- $\rho(\lambda)$ Reflexionsgrad bei Wellenlänge λ
- $\alpha(\lambda)$ Absorptionsgrad bei Wellenlänge λ
- $\tau(\lambda)$ Transmissionsgrad bei Wellenlänge λ

Der Anteil der absorbierten Strahlung wird dem Körper als Energie zugeführt. Wie gut ein Körper Strahlung aufnehmen kann, wird durch seine Fähigkeit zur Absorption bestimmt. Während eine spiegelnde metallische Oberfläche den größten Teil der Strahlung reflektiert und z.B. Glas den größten Teil der Sonnenstrahlung hindurch lässt (Transmission), wird eine stumpfe schwarze Oberfläche eine große Strahlungsmenge aufnehmen. Ein Körper, der die gesamte auftreffende Strahlung absorbiert, wird „schwarzer Körper“ genannt.

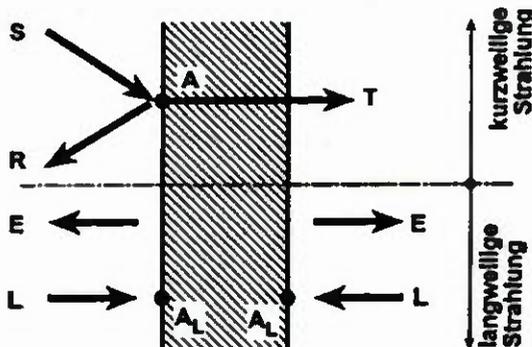


Abb. 21 Strahlungseinflüsse auf ein Außenbauteil [Sed2004]

S: Solare Einstrahlung; R Reflexion; A Absorption; T Transmission

E: langwellige Emission; L: Langwellige Einstrahlung; A_L: langwellige Absorption

Strahlungsemission

Die spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers wird durch das Stefan-Boltzmannsche Gesetz beschrieben:

$$M_S = \sigma \cdot T^4$$

Dabei ist

M_S spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers in W/m^2

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ Stefan-Boltzmann-Konstante

T Kelvin-Temperatur

Für einen „grauen“ Körper ergibt sich die spezifische Ausstrahlung nach:

$$M_S = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

Dabei ist ε der Emissionsgrad (auch Emissionsvermögen [DIN EN 673])

Tab. 4 Emissionsgrad einiger Oberflächen im mittleren Infrarot (2,5 μm bis 50 μm)

Aluminium, pressblank	ca. 0,05
Eisen verzinkt	ca. 0,25
Glas (Kalk-Natron-Glas)	0,84
Aluminium anodisch oxidiert, Schichtdicke > 20 μm	ca. 0,90
Holz, Kunststoffe, Beton, Pulverlack	ca. 0,90

Als Konsequenz des 2. Hauptsatzes der Wärmelehre ergibt sich ein einfacher Zusammenhang zwischen Absorptionsgrad und Emissionsgrad:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \quad (\text{Kirchhoffschen Gesetz})$$

Da im mittleren Infrarot alle relevanten Materialien nichttransparent sind, gilt für diese $\alpha_{MIR} = 1 - \rho_{MIR} = \varepsilon_{MIR}$ so dass zur Charakterisierung einer Oberfläche im mittleren IR die Angabe des Emissionsgrades genügt.

4 Voruntersuchungen

4.1 Aufbau und Lage der Testelemente

An der Fassade der FH Rosenheim wurden vier Fensterelemente im Fensterband des Erdgeschosses (Labor für Wärmetechnik) durch so genannte Fassaden-„Testelemente“ ersetzt. Das Labor für Wärmetechnik befindet sich im Erdgeschoss an der Ecke eines sechsstöckigen Gebäudes. Die Testelemente liegen nach Westen hin orientiert und somit in der Hauptwindrichtung im Raum Rosenheim. Dies ist die Lage mit der höchsten Wetterbelastung. In dieser Orientierung kommt es am ehesten zu einer Schlagregenbelastung. Die nächste Bebauung liegt über 20 m weiter entfernt und ist nur ein einstöckiger Industriebau. Dies schränkt die Strahlungseinflüsse nicht ein. Somit sind extreme klimatische Witterungsbedingungen gewährleistet.

Ein Testelement ersetzt dabei jeweils einen Fensterflügel. Die Testelemente wurden aus jeweils drei Riegeln und zwei Pfosten aufgebaut. Die Außenmaße betragen 127 cm x 127 cm. Abb. 22 zeigt schematisch ein Testelement. Schnitt A-A legt dar, wie das Testelement am vorhandenen Blendrahmen befestigt wird. Die Testelemente werden durch die Druckprofile am vorhandenen Blendrahmen gehalten, so dass keine Veränderungen an den vorhandenen Blendrahmen nötig waren. Als Holz wurde Fichte massiv gewählt. Es erfüllt die Anforderungen für Konstruktionsvollholz. Die Oberfläche wurde mit dem Holzschutzmittel „Aidol Holzschutzlasur – Eiche hell“ behandelt. Dadurch wird ein üblicher UV-Schutz und Wetterschutz erreicht.

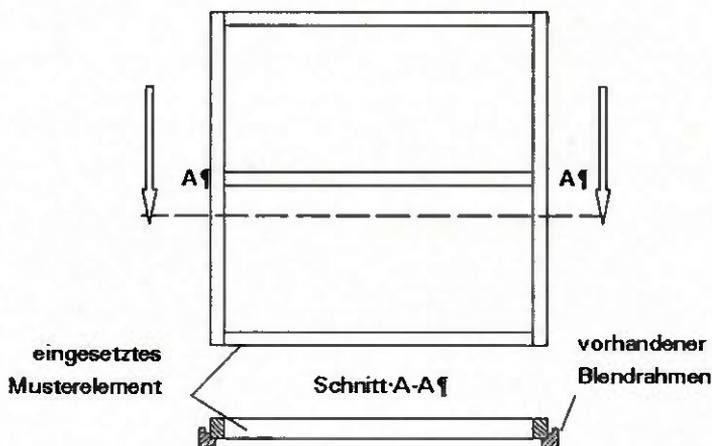


Abb. 22 Skizze der Ansicht und horizontaler Schnitt eines Testelementes

Die Pfostenprofile aller Testrahmen sind oben und unten geöffnet, so dass ein Dampfdruckausgleich der Falzräume mit dem Außenklima möglich ist. Unten sind die Pfosten-Pressleisten 10 mm kürzer als die Blendrahmenöffnung, so dass sich hier eine Öffnung von 3 cm² ergibt. Um bei den unterschiedlichen Pressleistenprofilen und den dazugehörigen Dichtungen einen definierten oberen Dampfdruckausgleich zu schaffen, wurde am oberen Ende der Pfostenpressleiste ein Loch mit 12 mm Durchmesser gebohrt.

Abb. 23 und Abb. 24 zeigen die eingebauten Testelemente. Alle vier Testelemente befinden sich unmittelbar nebeneinander. Somit sind die Messungen durch identische Randbedingungen direkt vergleichbar.



Abb. 23 Innenansicht in der Testelemente in der FH-Fassade



Abb. 24 Außenansicht der Testelemente in der FH-Fassade

Um die Vorgänge im Falzbereich ohne eine Öffnung des Systems visuell zu beobachten, wurde zwischen den Verglasungsdichtungen eine transparente Leiste aus Acrylglas (PMMA) eingesetzt. Als Füllung wurde eine PMMA-Steckplatte so nach außen versetzt eingebaut, so dass der Falzraum vollständig von der Raumseite aus eingesehen werden kann, siehe Abb. 25 links.

Durch diese Konstruktion ergibt sich im Bereich der Verglasung bei niederen Außentemperaturen ein ungünstiger und wirklichkeitsfremder Isothermenverlauf. Daher wird in der kalten Jahreszeit auf die transparente PMMA-Leiste noch ein Dämmstreifen gesetzt, siehe Abb. 25 rechts.

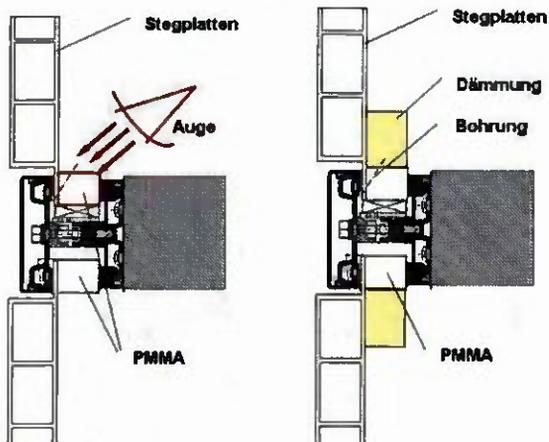


Abb. 25 Schnittskizze durch ein Testelement (links) und eines Testelementes mit aufgebraachten Dämmstreifen (rechts) auf der Innenseite.

Abb. 26 zeigt den Isothermenverlauf ohne und mit Dämmstreifen im Vergleich zum Isothermenverlauf bei Zweischeiben-Isolierglas mit thermisch verbessertem Randverbund. Mit Dämmung zeigt der Falzraum ein ähnliches Verhalten wie beim Einsatz von Zweischeibenisolierglas. Der Prüfaufbau kann daher das ansonsten eingesetzte Isolierglas in den hygrothermischen Eigenschaften ausreichend simulieren.

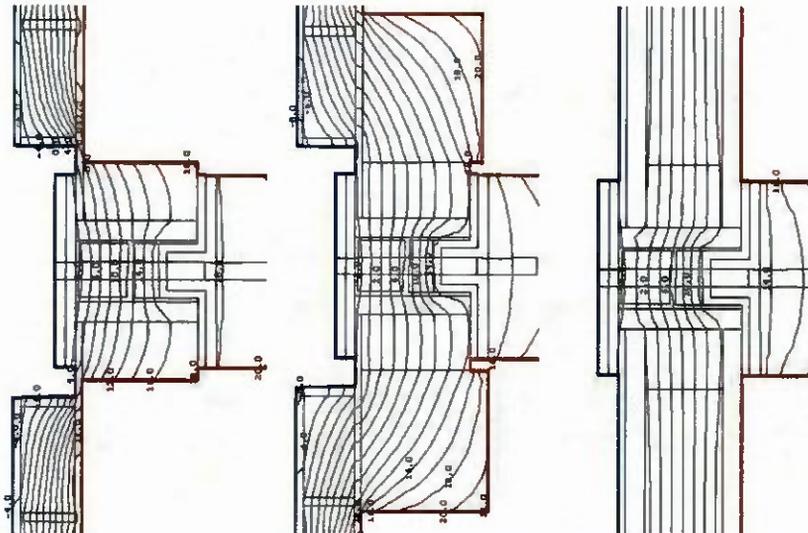


Abb. 26 Isothermenrechnungen am mittleren Riegel der Testelemente ohne Dämmstreifen (links), mit Dämmstreifen (Mitte) und mit Verglasung (rechts)

4.2 Messtechnik

4.2.1 Falzraumklima

Der Falzraum wird durch die Pressleiste, den Isolierglasrandverbund und den tragenden Holzquerschnitt bestimmt. Temperatur und relative Luftfeuchte im Falzraum werden durch Kombinationsfühler SHT75 (Hersteller Sensirion) erfasst. Dieser Fühler verfügt über einen digitalen Zweikanalausgang, der für die Bereiche von -40 bis 120°C und 0 bis 100% r.F. kalibriert ist und eine sehr gute Genauigkeiten von $\pm 1,8\%$ r.F. und $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ erreicht. Der Sensor hat sehr kleine Abmessungen ($1,5\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 10\text{ mm}$) und beeinflusst die Verhältnisse im Falzraum nur wenig, siehe Abb. 27. Seine Ausführung als Steckkopf über vier vergoldete und korrosionsbeständige Pins macht eine Auswechslung einfach. Zum besseren Schutz vor Korrosion wurden die Kontakte zusätzlich mit einem Klarlack überzogen. Ein weiterer Vorteil liegt in seiner kurzen Ansprechzeit, wodurch geringe Messintervalle gewählt werden können. Der Sensorkopf wurde in der Mitte des Falzraumes durch eine 8 mm Bohrung im PMMA-Streifen in den Falzraum eingebracht und dampfdicht mit dauerplastischem Terostat-Dichtstoff abgedichtet.



Abb. 27 Positionierung der Sensoren im Falzraum (links) und Foto des Kombinationsensors (rechts)

Jedes Testelement wurde mit mindestens 5 Sensoren versehen. Ihre Verteilung und die eindeutige Bezeichnung gehen aus der folgenden Abb. 28 hervor. Der Pfosten wurde mit einem Sensor ausreichend bestückt. Untersuchungen an einem Prototyp ergaben, dass im Pfosten kaum höhere Dampfdrücke als beim Außenklima auftreten. Die vorgesehenen Dampfdruckausgleichsöffnungen an den Pfostenenden führen zu einem raschen Luftaustausch mit dem Außenklima. Die Messungen konzentrieren sich primär auf den Falzraum im mittleren Riegel. Um die Dampfdrücke hier ausreichend zu erfassen, wurden je nach Aufgabenstellung zwischen 4 und 6 Sensoren eingebaut. Die Standardfühlerbelegung ist auf Abb. 28 zu sehen. Abweichende Fühlerbelegungen sind jeweils bei der Probekörperbeschreibung aufgeführt.

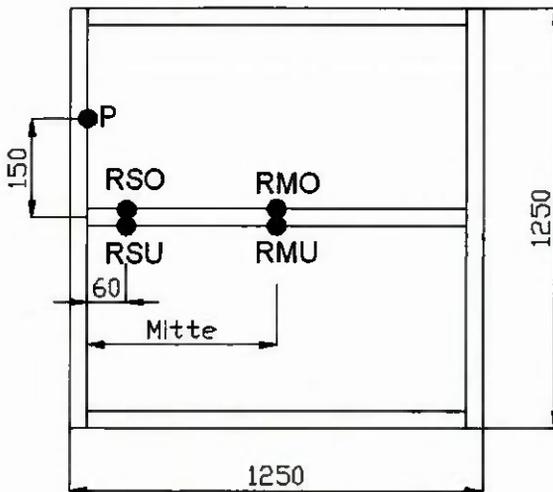


Abb. 28 Lage der Sensoren am Testelement

Tab. 5 Bezeichnung der Sensoren in einem Testelement

Abkürzung	Bezeichnung
P	Pfosten
RSO	Riegel Seite oben
RSU	Riegel Seite unten
RMO	Riegel Mitte oben
RMU	Riegel Mitte unten

4.2.2 Außen- und Innenklima

Außen- und Innentemperaturen wie Luftfeuchten werden jeweils durch einen Kombinationssensor der Firma Vaisala erfasst. Es wird der Typ HMP 133Y eingesetzt. Die Temperatur kann in einem Bereich von -20 bis $+80^{\circ}\text{C}$ und die Luftfeuchte zwischen 0 und 100% gemessen werden.

Das Innenklima wird direkt auf der Innenseite der Holzkonstruktion der Testelemente aufgenommen. Somit wird das Klima unmittelbar vor den Testrahmen ermittelt.

Die Außentemperatur und relative Luftfeuchte werden ebenfalls ortsnahe zu den Testelementen gemessen, siehe Abb. 31. Um direkte Strahlungseinflüsse zu vermeiden wurde der Sensor in einem kurzen Rohr aus Edelstahl untergebracht. Das Edelstahlrohr ist oben und unten geöffnet und vor Regenwasser durch einen Deckel geschützt. Durch die Positionierung der Sensoren werden die Verhältnisse des Außenklimas nahe den Testelementen erfasst.

Die Positionierung und Art der hier aufgeführten Messtechniken zur Erfassung der Wetterdaten weichen von denen allgemein ausgeführter Wetterstationen ab.

4.2.3 Wind

Im Abstand von 2m vor den Testelementen werden die Winddaten erfasst. Ein Schalenkreuz-Anemometer erfasst die Windgeschwindigkeit. Die drei halbkugelartigen Schalen werden mechanisch vom Wind angetrieben und erzeugen so ein Signal. Nachteil hierbei ist, dass nur horizontale Böen erfasst werden können. Eine Windfahne zeichnet die Windrichtung auf, siehe Abb. 29. Aufgrund der speziellen Bedingungen, der Lage des Labors an der Gebäudeecke und weiterer Bebauung, ist dies eine sinnvolle Ergänzung zu der weiter oben auf dem Dach montierten FH Wetterstation. Entstehende regionale Windphänomene wie Luftverwirbelungen lassen sich so erkennen.



Abb. 29 Schalenkreuz-Anemometer und Windfahne vor den Testelementen

4.2.4 Regen

Zur Messung der Niederschlagsintensität und -menge wird ein optischer Sensor eingesetzt, siehe Abb. 30. Es ist ein „Niederschlagssensor mit analogem Intensitätsausgang“ der Firma „Thies“ und zeichnet Niederschläge von 0,001 mm/min bis 10 mm/min auf. Der Niederschlag fällt durch das „U“ hindurch und unterbricht somit ein Lichtband, das durch Leuchtdioden erzeugt wird. Durch diese Unterbrechung der Lichtschranke wird der Fühler aktiviert. Das Maß der Abschattung in Verbindung mit der Durchtrittszeit wird als Größe zur Bestimmung des Niederschlagsteilhens benutzt. Für kalte Witterungsbedingungen besitzt der Niederschlagssensor eine Heizung, die einen Schnee- und Eisansatz an der Gehäuseoberfläche verhindert.



Abb. 30 Niederschlagssensor

4.2.5 Druckdifferenz

Ab Februar 2007 wurde auch die Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außen auf gleicher Höhe der Fassade direkt bestimmt. Somit kann ermittelt werden, ob Unter-/ Überdruck an den Testelementen herrscht. Diese Druckdifferenz ist die treibende Kraft für Luftströmungen durch eventuelle Undichtigkeiten der Fassade. Verwendet wurde der Druckaufnehmer DKP1010 der Firma „Driesen & Kern“. Zur Bestimmung des Außendruckes wurde die Schlauchleitung durch die Stegplatte eines mittleren Testelementes geführt.

Das Messprinzip des Druckaufnehmers beruht darauf, dass die Druckdifferenz zu einem kleiner Luftstrom durch die Kapillare des Sensors führt. Die Strömungsgeschwindigkeit wird ähnlich einem Hitzedraht-Anemometer bestimmt. Der Sensor misst in einem Bereich von +/- 500 Pa in einer Genauigkeit von 0,2%.

4.2.6 Solarstrahlung

Zur Messung der solaren Einstrahlung wird ein Pyranometer (Solarimeter) Typ CM11 der Firma „Kipp & Zonen“ eingesetzt. Es besteht aus einer doppelten Glaskuppel, rotationssymmetrischem Aluminiumkörper mit einer eingebauten geschwärzten Thermosäule und einem weißem Strahlungsschutzschirm. Die schwarze Beschichtung der Thermosäule absorbiert die Solarstrahlung und setzt diese um in Wärme. Das Pyranometer misst sowohl die direkte Sonneneinstrahlung (Direktstrahlung) als auch die diffuse Himmelsstrahlung (Diffusstrahlung) und gibt die Daten in W/m^2 aus. Um die Einstrahlung aufzunehmen, die auf die Testelemente einwirkt wird das Pyranometer zwischen den Testelementen parallel zur Fassadefläche befestigt. Die Lage in der Fassade zeigt Abb. 31.



Abb. 31 Wetterdatenerfassung an den Testelementen mit Globalstrahlung (I) und Niederschlagssensor (II)

4.2.7 Oberflächentemperaturen

An allen Testelementen wurden eine Pressleiste und eine Deckleiste mit einem Thermoelement zur Aufzeichnung der Temperatur versehen. Wie aus Abb. 32 ersichtlich liegt das Thermoelement jeweils in Mitte der Aluminiumleiste des Pfostens. Befestigt wurden die Thermoelemente mit einem Aluminiumklebeband, um die Oberflächenstruktur so wenig wie möglich zu beeinflussen. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit des Aluminiums herrschen an allen Punkten der Press- wie Deckleiste vergleichbare Verhältnisse. Daher ist es ausreichend, eine Messstelle je Testelement und Leiste vorzusehen.



Abb. 32 Thermoelement an der Druckleiste befestigt, abgedeckt mit Aluminiumfolie

4.2.8 Datenerfassung

Bezeichnung der Messstellen

Die Vielzahl der Messstellen erfordert eine sorgfältige und eindeutige Zuweisung der einzelnen Sensoren an den Testelementen. Somit gehört zu jeder Positionsbezeichnung eine Anschlussstelle in der der Messbox. Tab. 6 zeigt einen Ausschnitt der Liste.

Tab. 6 Ausschnitt der Sensorkennzeichnung

Sensornummer	Position	Steckplatz
01	1 RMU	101/102
02	1 RSU	103/104
03	1 RSO	105/106
04	1 RMO	107/108
05	1 P	109/110
06	2 RSU	111/112
07	2 RMU	113/114
08	2 RMO	115/116
09	2 RSO	117/118
10	2 P	119/120
11	3 RSU	201/202
12	3 RMU	203/204
13	3 RMO	205/206

Blockschaltbild der Sensorik

Wie aus Abb. 33 hervorgeht, laufen die gemessenen Parameter in Datenerfassungseinheiten (Datenlogger) zusammen, welche zur Datenspeicherung und graphischen Darstellung der laufenden Messergebnisse üblichen Personalcomputern ansteuern. Dabei werden alle Sensoren bis auf die Differenzdruckmessung zusammengefasst und in einem Messintervall von 4 Minuten abgefragt. Um kurze Windböen zu erfassen, musste der Differenzdruck in kürzeren Intervallen abgefragt und abgespeichert werden. Die Datenlogger nehmen in einem frei wählbaren Taktintervall die Daten von den Messstellen auf und geben diese an eine Rechneinheit zur Abspeicherung weiter. Für die Messung des Differenzdruckes liegt das Messintervall bei 3s, bei allen anderen hat sich ein Intervall von 4 Minuten als ausreichend gezeigt.

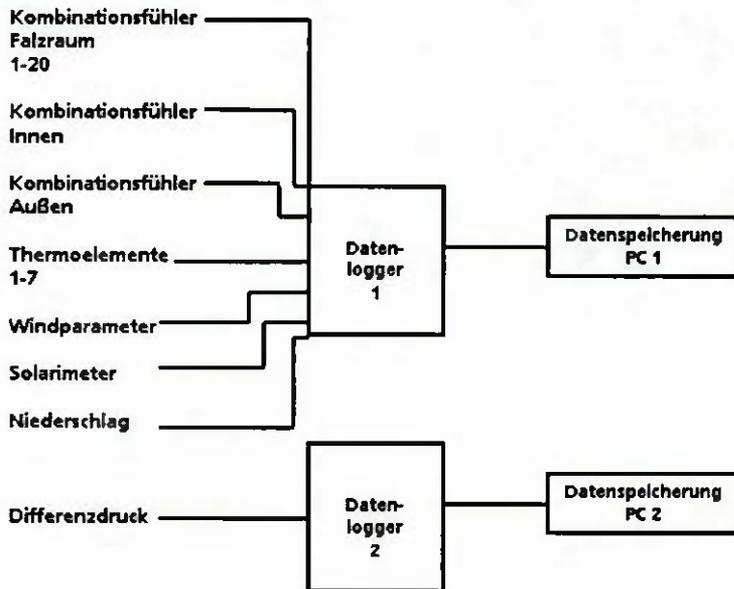


Abb. 33 Blockschaltbild des Messstellen

4.3 Orientierende Versuche

4.3.1 Künstliche Feuchtebelastung

Die Testelemente wurden so verarbeitet, dass sie gegenüber äußerem natürlichem Niederschlag als weitgehend dicht angesehen werden können. Die natürliche Belastung durch Wind und Schlagregen würde daher nur selten zu einer Feuchtebelastung im Glasfalz führen und wäre vor allem nicht reproduzierbar. Um in der verfügbaren Zeit möglichst viele unterschiedliche Varianten testen zu können, war es daher erforderlich, Wasser „künstlich“ in den Glasfalz einzubringen und so das Eindringen von Regenwasser in die Konstruktion zu simulieren. Gleichzeitig sind durch die gut definierte Wassermenge für alle Versuche vergleichbare Grundbedingungen gegeben.

Durch Vorversuche wurde das Einbringverfahren mittels Spritze direkt durch den Acrylglastreifen in den oberen Bereich des Glasfalzraumes des Riegels

entwickelt, siehe Abb. 34. Auf der Länge des Riegels wurden insgesamt zwölf Befüllöffnungen mit 2,0 mm Durchmesser und 80 mm Abstand gebohrt. Die Löcher sind nach außen zur Pressleiste angesetzt, dies soll einem Wassereintritt von der Außenseite entsprechen. Auch die Verteilung des eingebrachten Wassers auf der gesamten Riegellänge soll das unter realen Bedingungen eintretende Wasser nachbilden. Nach der Befüllung werden die Bohrungen mit einem dampfdichten Klebeband verschlossen. Die Einbringmenge betrug je Bohrung 1 ml Wasser. Diese Menge hat sich in Vorversuchen bewährt, da hierdurch die Systeme nicht länger als 7 Tage benötigen um auszutrocknen, andererseits aber klare Differenzierungen möglich sind.

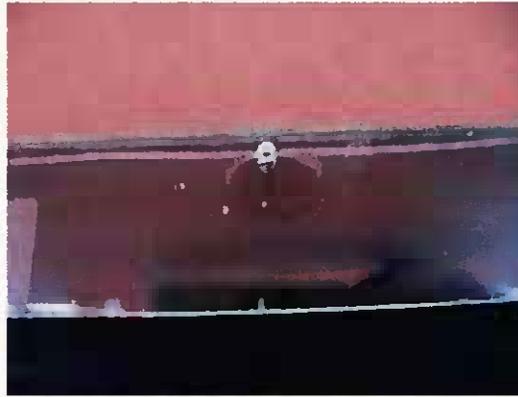


Abb. 34 Bohrung im Plexiglas mit Wassertropfen. Das Wasser wurde mittels Spritze durch die Bohrung in den Riegelfalz eingebracht.

4.3.2 Darstellung der Messdaten

Die Kombinationssensoren liefern Temperatur und relative Feuchte. Zur Beurteilung des Wassergehaltes der Luft wurde, wie in der Bauphysik auch sonst üblich, der Wasserdampfteildruck als kennzeichnende Größe verwendet. Dieser wurde mit Hilfe der in DIN 4108-3 angegebenen Parametrisierung der Dampfdruckkurve aus den gemessenen Größen Temperatur und relative Luftfeuchte berechnet.

In Abb. 35 sind die unterschiedlichen Messgrößen im Zusammenhang dargestellt. Gezeigt wird je ein Tag mit einem noch „nassen“ System 24 h nach Befüllung (Abb. 35 links) und einem trockenen System (Abb. 35 rechts). Als Beispiel wurde hier die Messstelle „Riegel Mitte“ bei System A gewählt.

Aufgrund der Westorientierung der Testelemente steigt die solare Einstrahlung erst ab 14:00 an und erreicht gegen 18:00 ihr Maximum. Die Temperatur im Glasfalz folgt der Einstrahlung und erreicht bis zu 44°C bei ca. 30°C Außentemperatur. Mit dem Anstieg der Temperatur fällt die relative Luftfeuchte des Außenklimas an beiden Tagen. Ebenso kann ein Sinken der relativen Luftfeuchte tagsüber beim trockenen System beobachtet werden.

Anders verhält sich das „nasse“ System. Solange noch flüssiges Wasser im Glasfalz des Systems vorhanden ist, bleibt die relative Luftfeuchte konstant hoch. Das vorhandene flüssig eingebrachte Wasser verdunstet und kann konvektiv abgeführt werden. Der Dampfdruck und damit der absolute Wassergehalt der Luft steigen mit steigender Temperatur und erreichen bei Sonneneinstrahlung über 8 kPa.

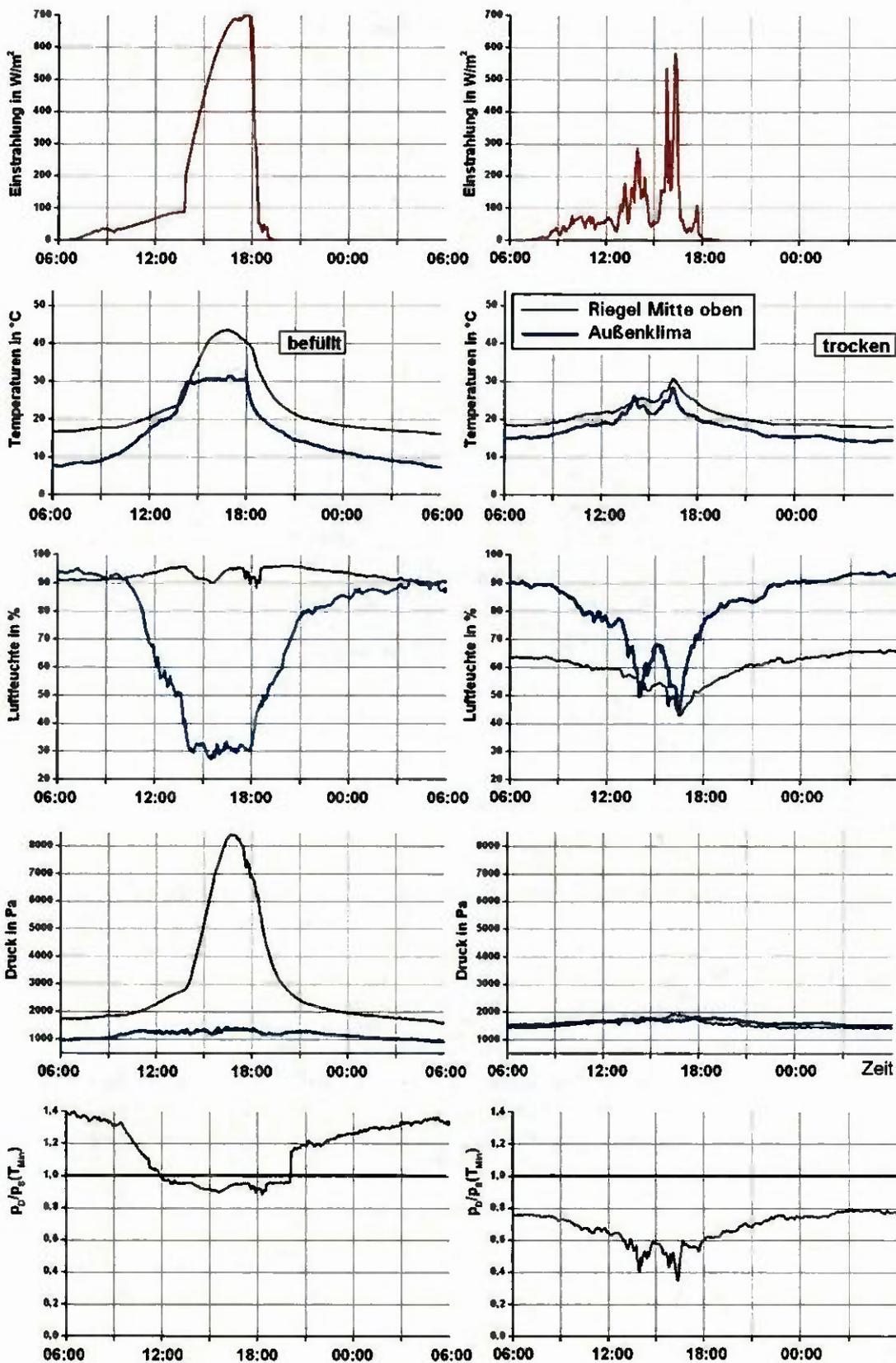


Abb. 35 Typischer Verlauf von Sonneneinstrahlung, Temperatur, relativer Luftfeuchte, Wasserdampfpartialdruck und dem Verhältnis von Wasserdampfdruck und Wasserdampf-sättigungsdruck an der kältesten Stelle im Glasfalz für einen Tag nach der Befüllung (09.09.2006) und einem Tag nach vollständiger Austrocknung (18.09.2006).

Betrachtet man das abgetrocknete System, in dem kein flüssiges Wasser mehr vorhanden ist, so entspricht der Dampfdruck dem Niveau des Außenklimas. Es ist jedoch aus dem Dampfdruck alleine nicht ersichtlich, ob Tauwasser im Glasfalz anfällt. Auch die relative Luftfeuchte am Kombinationsfühler gibt nur einen Anhaltspunkt, da die Stelle mit der geringsten Temperatur erfasst werden muss.

Es ist anzunehmen, dass der Wasserdampfdruck im gesamten Falzbereich annähernd gleich ist. Treten im Falzraum noch kältere Stellen als am Kombinationsfühler auf, so kann die Taupunkttemperatur dort unterschritten werden und es kommt an diesen Stellen zu Tauwasser. Daher macht es Sinn, den vorhandenen Wasserdampfdruck mit dem Sättigungsdruck an der (voraussichtlich) kältesten Stelle im Falzbereich zu vergleichen. Dies gibt die in Abb. 35 unten dargestellte Verhältnisgröße wieder.

Im Gleichgewicht kann der Dampfdruck den Sättigungsdruck nicht überschreiten und das in Abb. 35 unten dargestellt Verhältnis sollte kleiner eins sein. Im nassen System steigt dieser Wert aber nach Sonnenuntergang bis zum nachfolgenden Mittag weit über 1 hinaus an. Dies bedeutet, dass ein intensiver Feuchtetransport aus der Dampfphase hin zu den kältesten Stellen des Falzraumes erfolgt und dort zu Tauwasser führt.

Anmerkung:

Das bei der Demontage von Pressleisten häufig im Bereich der äußeren Dichtungen bzw. Dichtungslamellen anzutreffende flüssige Wasser dürfte in den meisten Fällen auf diese Weise entstanden sein und nicht durch eindringenden Schlagregen.

4.3.3 Austrocknung

Die folgende Abb. 36 verdeutlicht das Austrocknungsverhalten der Testelemente. Betrachtet werden vier sonnenreiche Tage nach einer Befüllung. Diese zeigt sich sowohl in der relativen Feuchte als auch in der abgeleitete Größe des Wasserdampfdruckes durch einen deutlichen Anstieg.

Der Dampfdruck im Falzraum liegt in den ersten 1,5 Tagen über dem des Außenklimas. In diesem Zeitraum ist die absolute Luftfeuchte im Falzraum jederzeit höher als die der Außenluft und der Falzraum trocknet konvektiv.

Zu dem Zeitpunkt, an dem die Dampfdruckkurve des Falzraumes auf die des Außenklimas sinkt, ist kein direkt verfügbares flüssiges Wasser mehr im Falzraum vorhanden. Jedoch zeigt der Anstieg an den Folgetagen unter solarer Einstrahlung, dass noch Feuchtequellen vorhanden sein müssen, da der Dampfdruck im Falzraum teilweise wieder oberhalb des Außenklimas liegt. Physikalisch liegt folgende Erklärung nahe:

Das frei vorliegende flüssige Wasser ist aus dem System abgetrocknet, nicht aber das an Oberflächen adsorbierte, bzw. in Kapillarfugen schwer zugängliche Wasser. Dieses kann erst bei erneuter Erwärmung in die Gasphase übergehen und so den Falzraum verlassen.

Es gibt somit zwei Möglichkeiten, den Falzraum als trocken zu bezeichnen:

Trockenzustand 1:

Nach Befuchtung entspricht der Dampfdruck im Glasfalz erstmals dem des Außenklimas.

Im Falzraum ist kein sichtbares Wasser mehr vorhanden. Hygroskopischen Oberflächen und Kapillarfugen binden aber noch eine Restfeuchtigkeit. Bei erneuter Solarstrahlung steigt der Dampfdruck im Falzraum wieder deutlich über den Dampfdruck des Außenklimas.

Trockenzustand 2:

Der Dampfdruck im Glasfalz entspricht auch bei Sonneneinstrahlung dem des Außenklimas.

Auch die Restfeuchtigkeit in hygroskopischen Werkstoffen und in Kapillarfugen ist abgetrocknet.

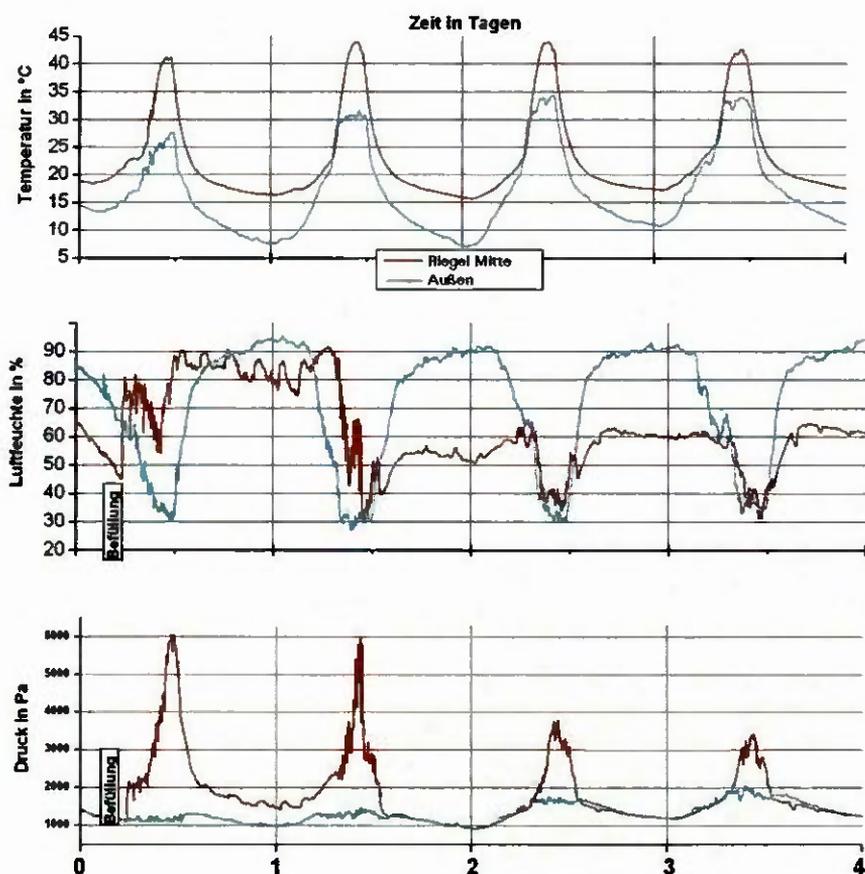


Abb. 36 Temperatur, relative Luftfeuchte und Dampfdruck des Außenklimas und in Riegel Mitte von System B nach Befüllung mit 12 ml Wasser; September 2006

Um diese Vorstellung zu überprüfen, zeigt Abb. 37 exemplarisch einen weiteren Trocknungsverlauf (System B) an bedecktem, einstrahlungsarmen Tagen. Deutlich erkennbar ist der hohe Verlauf der Luftfeuchte im Falzraum über alle vier Tage. Während die Außenluftfeuchte bei höheren Temperaturen sinkt, bleibt die Luftfeuchte im Falz konstant hoch und der Dampfdruck steigt. Der Dampfdruck im Riegelfalz sinkt zu keinem Zeitpunkt auf das Niveau des Außenklimas. Das bedeutet, dass das flüssige Wasser nach 4 Tagen noch nicht verdunstet ist, der Glasfalz ist noch nicht abgetrocknet.

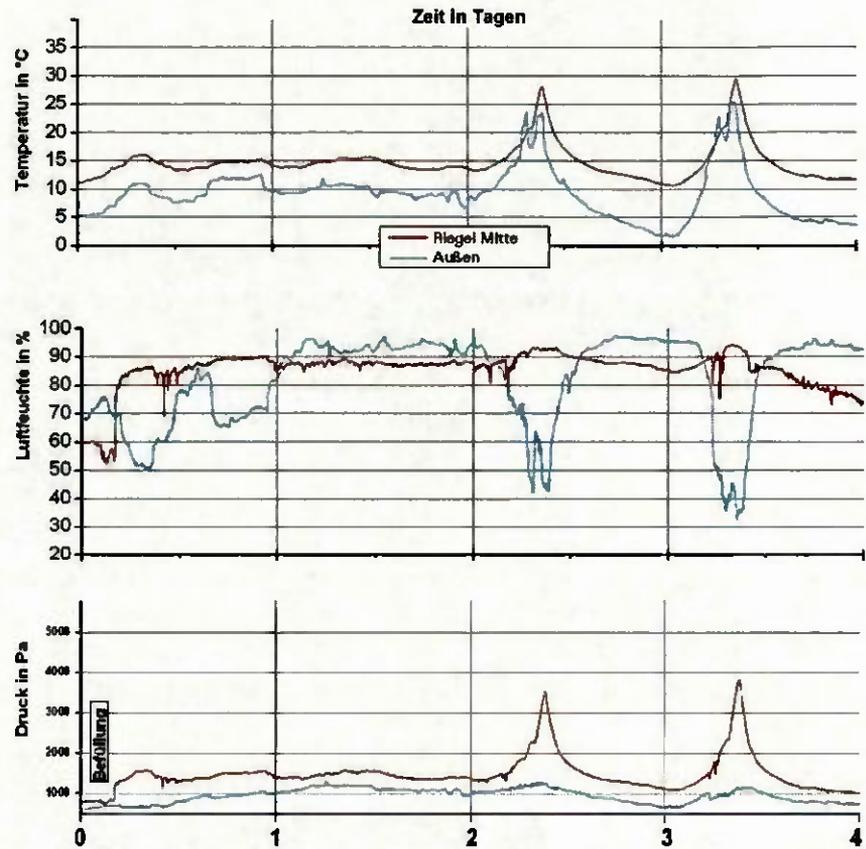


Abb. 37 Temperatur, relative Luftfeuchte und Dampfdruck am Beispiel System B (November 2006)

Zur Beurteilung der Austrocknung des Glasfalzraumes nach „Befüllung“, d.h. nachdem 12 ml Wasser in den oberen Bereich des Riegels eingebracht wurden, genügt daher ein Vergleich des Wasserdampfdruckes in den Falzräumen mit dem Wasserdampfdruck des Außenklimas. Im folgenden wird daher nur noch der Verlauf des Wasserdampfdruckes (in den Diagrammen kurz „Druck“) dargestellt. Bei speziellen Fragestellungen können noch weitere Messgrößen, z.B. solare Einstrahlung, Wind, etc hinzugezogen werden.

4.3.4 Abgleich mit Wetterstationen

Die vor den Testelementen aufgenommenen Klimadaten werden mit zwei nahe gelegenen Wetterstationen abgeglichen.

Die FH Rosenheim verfügt über eine eigene Wetterstation (451 mNN, 47°52'03"N, 12°06'34"E) auf dem Dach der Hochschule in unmittelbarer Nähe zu den Testelementen. Ermittelt werden Minutenwerte für Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Windrichtung, sowie die Daten für die Globalstrahlung. Nicht erfasst wird die Niederschlagsmenge. Aufgrund des Standortes auf dem Dach entspricht die Station nicht in allen Einzelheiten den Vorgaben des DWD.

Zum anderen stehen die Daten einer ca. 3,5 km entfernten Wetterstation (Versuchstation Karolinenfeld der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, 468 mNN, 47°51'55"N, 12°04'41"E) zur Verfügung. Die Daten können im Internet abgefragt werden.

Abb. 38 stellt Lufttemperatur, Luftfeuchte und Einstrahlung zusammen. Allerdings darf die Einstrahlung auf die Westfassade nicht mit der Globalstrahlung der Wetterstationen verglichen werden. Die Lufttemperaturen zeigen mit Ausnahme der Nachmittagsstunden nur geringe Abweichungen. Die solare Einstrahlung auf die Fassade erreicht nachmittags die größte Intensität und die Lufttemperatur vor der Fassade deutlich höhere Werte.

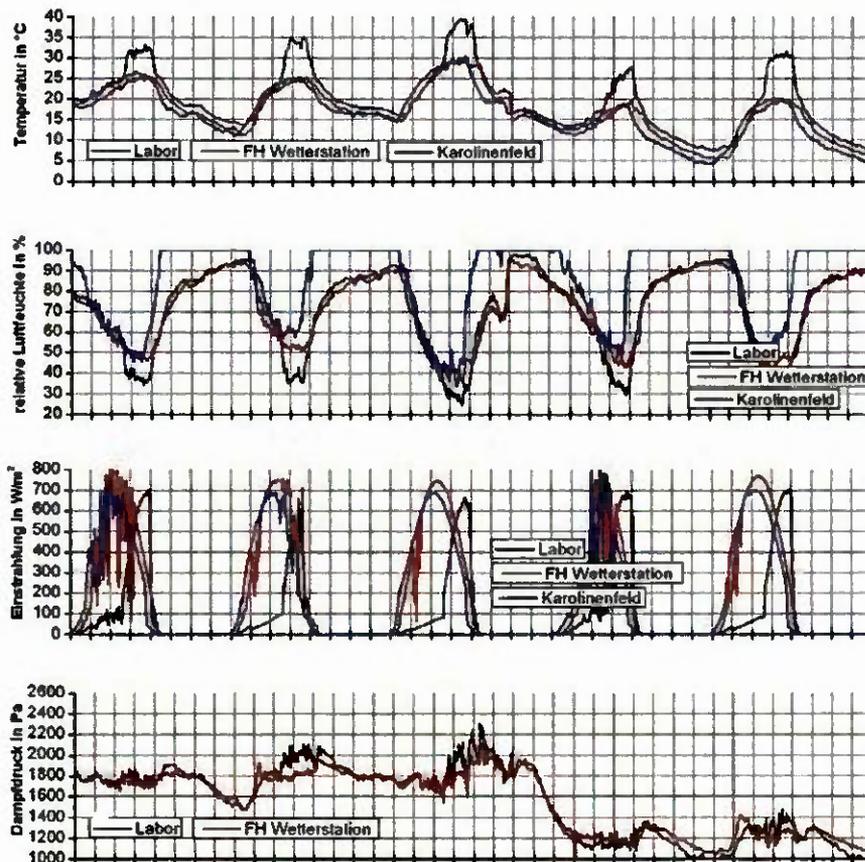


Abb. 38 Vergleich der Außenlufttemperatur, relativer Luftfeuchte und solarer Einstrahlung von drei unabhängigen Wetteraufzeichnungen

Die relative Luftfeuchte der FH Station stimmen gut mit den Daten vor der Fassade überein. Nur am Nachmittag sinkt die relative Luftfeuchte aufgrund der höheren Temperatur vor der Fassade ab, die absolute Feuchte (siehe Dampfdruck) stimmt aber auch zu diesen Zeiten überein. Die hohe Feuchte bzw. Taubildung an der LfL-Station ist durch deren freie Lage erklärbar, siehe Abb. 39.



Abb. 39 Standort der LfL-Wetterstation Karolinenfeld

4.3.5 Überprüfung der Messtechnik

Zur Überprüfung der eingesetzten Messtechnik wurden jeweils zwei Kombinationsfühler unmittelbar übereinander in den Falzraum der Testelemente eingebaut. Wie Abb. 40 zeigt, liegen die Messwerte Temperatur und relative Luftfeuchte dieser Sensoren im Diagramm nahezu identische übereinander. Die Kombinationssensoren liefern daher zuverlässige Messwerte und sind geeignet, Unterschiede in den Systemen nachzuweisen.

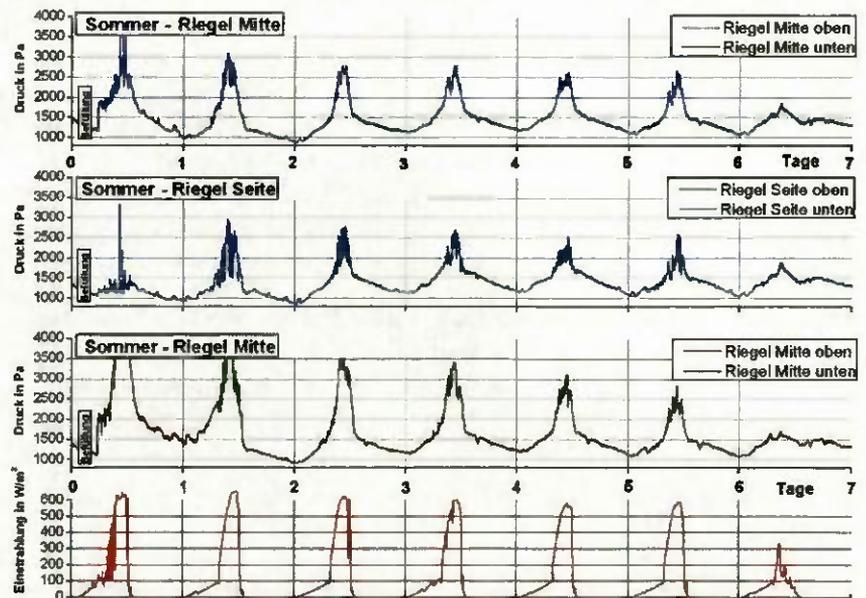


Abb. 40 Beispiele für den Vergleich verschiedener Sensoren.

4.3.6 Auswertung

Maßgeblich für die Auswertung der Versuchsreihen sind der maximal gemessene Dampfdruckanstieg und die Dauer der Austrocknung des Falzraumes. Diese Daten werden bei jeder Versuchsreihe in einer Tabelle festgehalten. Sie dienen anschließend als Grundlage für die zusammenfassende Auswertung.

Maximal gemessener Dampfdruckanstieg

Bei jeder Versuchsreihe werden die Dampfdrücke im Falzraum sowie die Dampfdrücke des Raum- und Außenklimas in einem Diagramm aufgezeichnet. Eine Versuchsreihe beginnt mit der künstlichen Feuchtebelastung der vorbereiteten Testrahmen und endet, wenn in den Falzräumen derselbe Dampfdruck wie beim Außenklima herrscht. Der maximal gemessene Druckanstieg während einer Versuchsreihe ist die Differenz zwischen dem maximalen Dampfdruck im Falzraum und dem Dampfdruck des Außenklimas. Diese Betrachtung ist notwendig, da der Dampfdruck des Außenklimas je nach Jahreszeit zwischen 500 Pa im Winter und 2000 Pa im Sommer schwankt. Zur Auswertung soll aber nur der durch die künstliche Befeuchtung erzeugte zusätzliche Dampfdruckanstieg herangezogen werden. Wie beschrieben ist der maximal Dampfdruck im Falzraum in erster Linie abhängig von der Erwärmung durch solare Einstrahlung. Bei gleichmäßiger solarer Einstrahlung während des Zeitraumes einer Versuchsreihe wird der maximale Dampfdruck am ersten Tag erreicht. An den darauf folgenden Tagen nimmt der Dampfdruck immer weiter bis zur völligen Austrocknung ab. Bei unterschiedlicher solarer Einstrahlung während einer Versuchsreihe kann es vorkommen, dass z. B. erst am 2. oder am 3. Tag nach der künstlichen Feuchtebelastung der maximale Dampfdruckanstieg erreicht wird. In diesem Fall kommen auch diese Werte in die statistische Auswertung.

Austrocknungsdauer

Als trocken werden die Falzräume der Testrahmen dann definiert, wenn der Dampfdruck im Falzraum identisch mit dem Dampfdruck des Außenklimas ist. Die Austrocknungsdauer beschreibt den Zeitraum ab der künstlichen Befüllung der Testelemente bis zu dem Zeitpunkt, bei dem die Falzräume als trocken definiert werden. Da die Austrocknung im Wesentlichen tagsüber bei solarer Erwärmung stattfindet, ist eine Angabe der Austrocknungszeit in Stunden wenig sinnvoll. Aus diesem Grund wird die Austrocknungszeit in Tagen angegeben. Zur genaueren Auswertung der Austrocknungsdauer wird in Trockenzustand 1 und Trockenzustand 2 unterschieden:

Trockenzustand 1: Im Falzraum ist nach der künstlichen Befeuchtung zum ersten Mal kein sichtbares Wasser mehr vorhanden. In hygroskopischen Werkstoffen oder in Kapillarfugen ist aber noch eine Restfeuchtigkeit vorhanden. Messtechnisch ist das nachvollziehbar sobald der Dampfdruck zum ersten Mal unter den Wert des Außenklimas sinkt, bei erneuter Einstrahlung der Dampfdruck im Falzraum aber wieder deutlich über den Dampfdruck des Außenklimas steigt.

Trockenzustand 2: Die Restfeuchten in hygroskopischen Werkstoffen und in Kapillarfugen sind abgetrocknet. Messtechnisch ist das nachvollziehbar, sobald der Dampfdruck im Falzraum auch bei solarer Bestrahlung, immer auf oder unter dem Wert des Außenklimas bleibt.

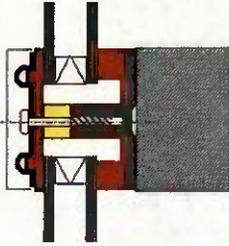
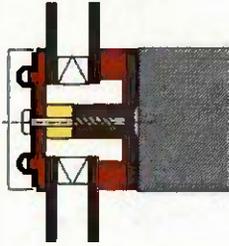
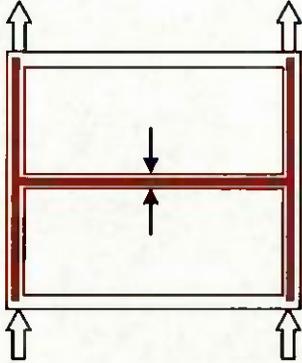
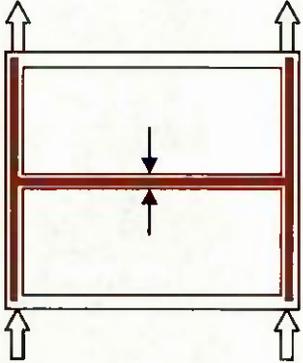
4.4 Überprüfung des experimentellen Aufbaus

Zur Untersuchung verschiedener Varianten der Falzraumdämmung und Dampfdruckausgleichsöffnungen werden je System zwei identische Testrahmen nach Herstellervorgaben gebaut. Um systematische Fehler des Messaufbaus zu erkennen bzw. auszuschließen, wurden zunächst Vergleichsmessungen mit jeweils zwei identischen Testrahmen für durchgeführt.

4.4.1 Vergleich System A

Die folgende Tabelle zeigt schematisch die in Testrahmen 1 und 2 eingebauten Fassadensysteme und die jeweiligen Variationen bezüglich Druckausgleichsöffnungen, Lage der Temperatur/Luftfeuchte-Fühler und Falzraumdämmung.

Tab. 7 Probekörperaufbau

Testrahmen 1	System A	Testrahmen 2	System A
			
			
			
<p>Beobachtungszeitraum: 27. Sep 2006 bis 30. Sep 2006</p>			

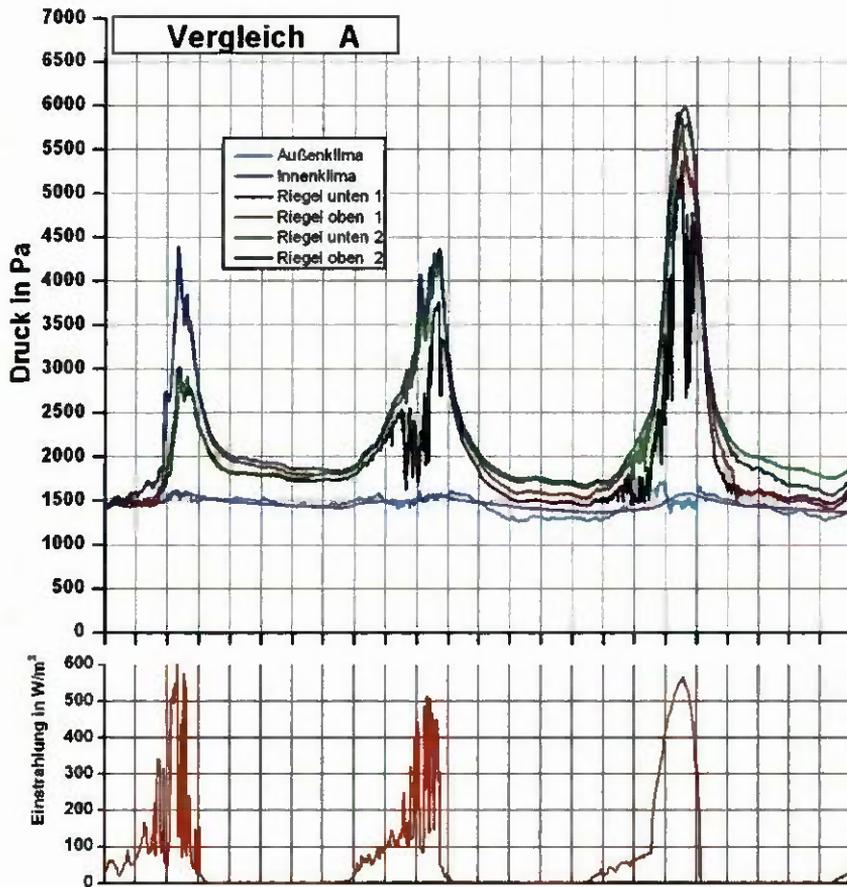


Abb. 41 Dampfdruckverlauf bei identischen Testrahmen System A

Tab. 8 Feststellungen

	Testrahmen 1	Testrahmen 2
max. Dampfdruck	5,5 kPa bis 6,0 kPa	5,5 kPa bis 6,0 kPa
Trocken 1	ca. 4 Tage	ca. 4 Tage
Trocken 2	ca. 7 Tage	ca. 7 Tage

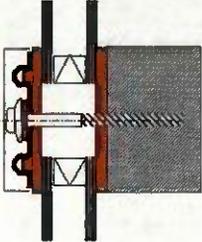
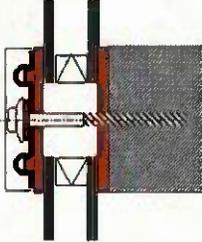
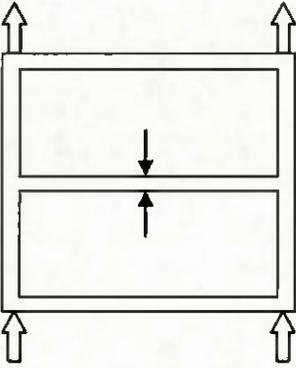
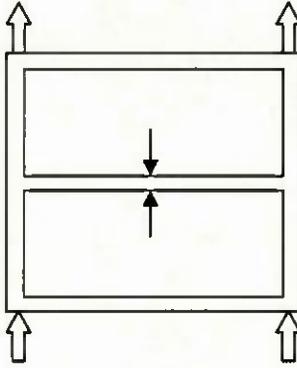
Erkenntnisse

Die Messkurven der entsprechenden Temperatur/Luftfeuchte-Fühler zeigen keine signifikanten Unterschiede. Die Verarbeitungsqualität der Prüfkörper und die Messtechnik sind korrekt.

4.4.2 Vergleich System B

Die folgende Tabelle zeigt schematisch die in Test 1 und 2 eingebauten Fasadensysteme und die jeweiligen Variationen bezüglich Druckausgleichsöffnungen, Lage der Temperatur/Luftfeuchte-Fühler und Falzraumdämmung.

Tab. 9 Probekörperaufbau

Testrahmen 1	System B	Testrahmen 2	System B
			
			
<p>  Druckausgleichsöffnung  Temperatur/Feuchtefühler  Falzraumdämmung </p>			
<p>Beobachtungszeitraum: 20. Sep 2006 bis 23. Sep 2006</p>			

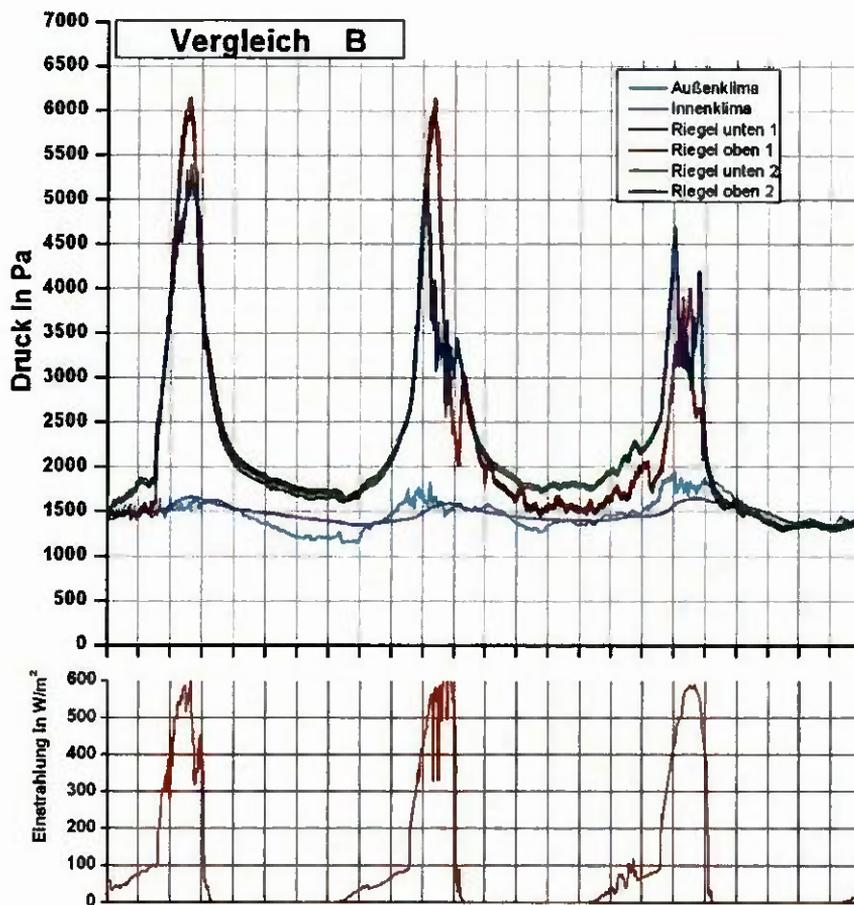


Abb. 42 Dampfdruckverlauf bei zwei identischen Testrahmen System B

Tab. 10 Feststellungen

	Testrahmen 1	Testrahmen 2
max. Dampfdruck	5,5 kPa bis 6,0 kPa	5,5 kPa bis 6,0 kPa
Trocken 1	ca. 3 Tage	ca. 3 Tage
Trocken 2	ca. 3 Tage	ca. 3 Tage

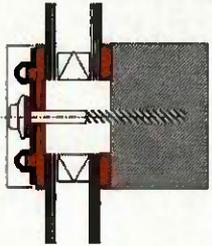
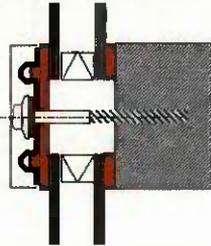
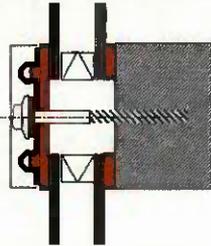
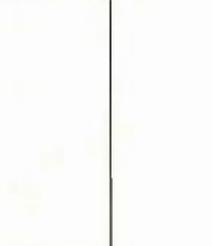
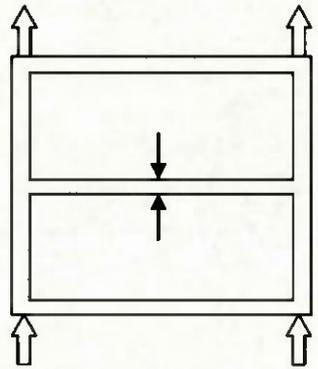
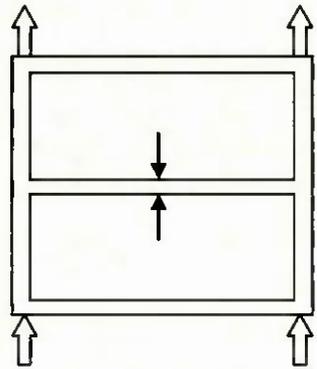
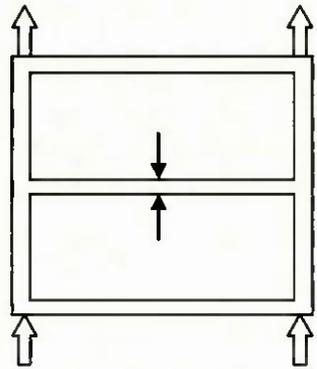
Erkenntnisse

Die Messkurven der entsprechenden Temperatur/Luftfeuchte-Fühler zeigen keine signifikanten Unterschiede. Die Verarbeitungsqualität der Prüfkörper und die Messtechnik sind korrekt.

4.4.3 Vergleich System C

Die folgende Tabelle zeigt schematisch die in Test 1 und 2 eingebauten Fasadensysteme und die jeweiligen Variationen bezüglich Druckausgleichsöffnungen, Lage der Temperatur/Luftfeuchte-Fühler und Falzraumdämmung.

Tab. 11 Probekörperaufbau

Testrahmen1	System C	Testrahmen 2	System C
			
			
<p>  Druckausgleichsöffnung  Temperatur/Feuchtefühler  Falzraumdämmung </p>			
<p>Zeitraum: 12. Dez 2006 bis 18. Dez 2006, überwiegend sonnig</p>			

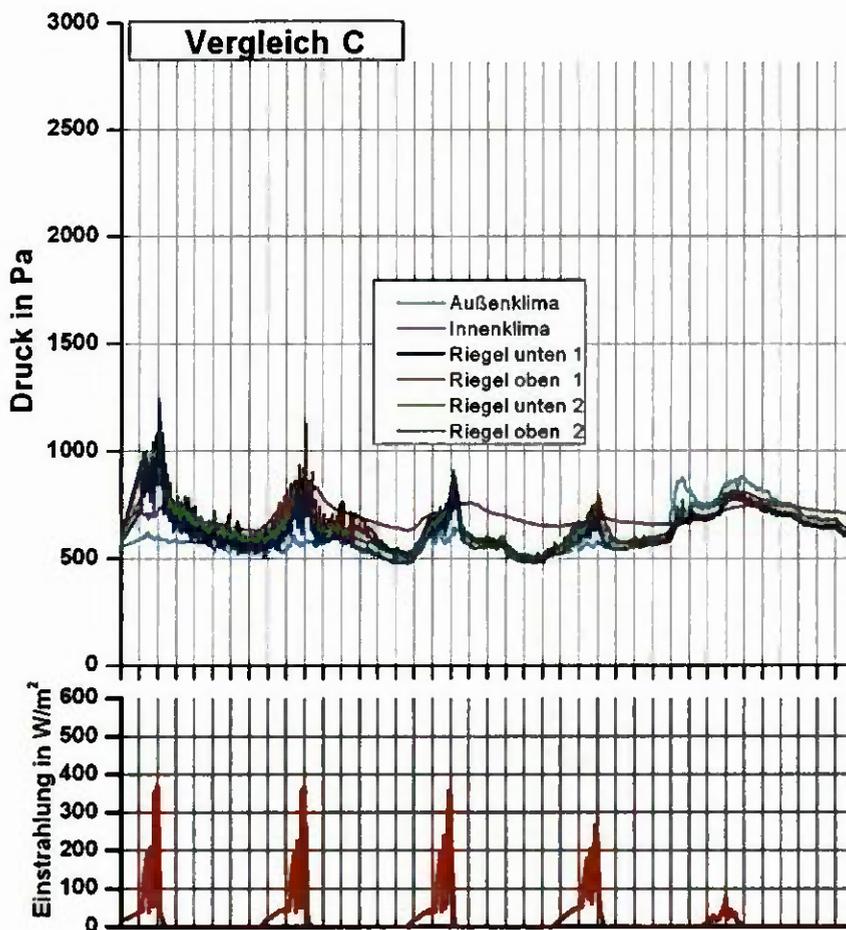


Abb. 43 Dampfdruckverlauf bei identischen Testrahmen des Systems C

Tab. 12 Feststellungen

	Testrahmen 1	Testrahmen 2
max. Dampfdruck	ca. 1,0 kPa	ca. 1,0 kPa
Trocken 1	ca. 3 Tage	ca. 3 Tage
Trocken 2	ca. 3 Tage	ca. 3 Tage

Erkenntnisse

Die Messkurven der entsprechenden Temperatur/Luftfeuchte-Fühler zeigen keine signifikanten Unterschiede. Die Verarbeitungsqualität der Prüfkörper und die Messtechnik sind korrekt.

5 Versuche an Testelementen

5.1 Einfluss der Solarstrahlung

5.1.1 Abschätzung zum thermisch induzierten Wassertransport

Die Oberflächentemperatur der Fassade und die Lufttemperatur im Glasfalzraum hängen stark von der solaren Einstrahlung ab und erreichen bis zu 50°C. Mit der Temperatur steigt der Wasserdampf-sättigungsdruck und im „nassen“ Glasfalz auch der Wassergehalt der Luft (Messgröße Dampfdruck). In einem abgeschlossenen Raum sollte der Wasserdampfdruck im Gleichgewicht den Wasserdampf-sättigungsdruck erreichen. Durch die Öffnung des Glasfalzraumes nach außen ergibt sich ein Austausch mit der Außenluft. Die höhere Temperatur im Falzraum führt zu einem thermischen Auftrieb und damit zu einer Durchströmung. Wasserdampf wird abgeführt und der Dampfdruck bleibt unterhalb der Sättigung.

Liegt die Temperatur der senkrechten Profilen 10 K über der Außenlufttemperatur ergibt sich bei der vorliegenden Pfostenhöhe eine treibende Druckdifferenz von etwa:

Fehler! Es ist nicht möglich, durch die Bearbeitung von Feldfunktionen Objekte zu erstellen.

Hieraus ergibt sich eine Strömungsgeschwindigkeit von einigen cm/s bzw. einen Luftvolumenstrom je nach freier Querschnittsfläche von 0,01 m³/h bis 0,10 m³/h. Dies entspricht bei einer Wasserdampfdruckdifferenz zwischen zu- und abströmender Luft von 1000 bis 5000 Pa einem Wasserdampfstrom von 0,1 bis 5 g/h. Die eingebrachten 12 ml Wasser können also in einem Zeitraum von einigen Stunden bis Tagen durch thermisch induzierte Konvektion abgeführt werden.

5.1.2 Vergleich der Fassadensysteme

Abhängig von den untersuchten Systemen steigt der Dampfdruck nach der künstlichen Befüllung in Verbindung mit der Erwärmung durch Einstrahlung unterschiedlich stark an. Dabei zeigt der Dampfdruck nahezu denselben Kurvenverlauf wie die Einstrahlung bzw. die Temperatur im Glasfalz. Auch die diffuse Strahlung mit einer Intensität um 100 W/m² bewirkt noch eine Temperaturerhöhung um einige °C. Volle Sonne auf die Westfassade erreicht eine Intensität von ca. 700 W/m² und eine Temperaturerhöhung von 15°C über Lufttemperatur.

Anmerkung:

Die Messungen wurden mit pressblanken Deckprofilen in Westorientierung durchgeführt. Durch eine dunkle Farbgebung der Deckprofile sind eine höhere Temperatur und entsprechend höhere Dampfdrücke aber kürzere Austrocknungszeiten zu erwarten.

Den Zusammenhang von Einstrahlung und Dampfdruck nach Befüllung zeigen die Diagramme in Abb. 44 bis Abb. 46. Hierzu wurden die Messdaten über den Zeitraum von einem Jahr ausgewertet. Zur Auswertung wurden die Systeme A, B und C jeweils im Originalzustand herangezogen. Der maximale Dampfdruck im Falzraum wird in der Regel am ersten oder zweiten Tag nach

der künstlichen Feuchtebelastung erreicht. Der Dampfdruck des Außenklimas wurde vom Dampfdruck des Falzraumes abgezogen, so dass nur die Erhöhung des Dampfdruckes durch die Befüllung zur Auswertung kommt.

Es zeigt sich ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen der Intensität der Einstrahlung und der Wasserdampfdruckdifferenz zwischen Glasfalzraum und Außen.

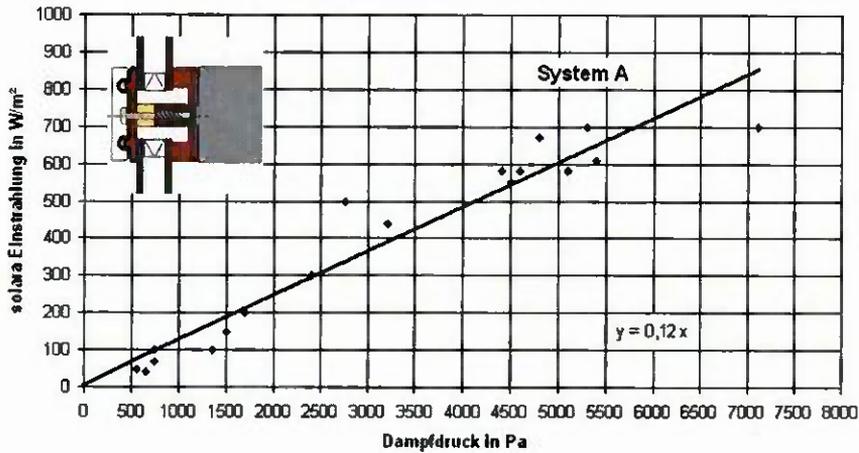


Abb. 44 Zusammenhang zwischen Einstrahlung und Dampfdruck am System A

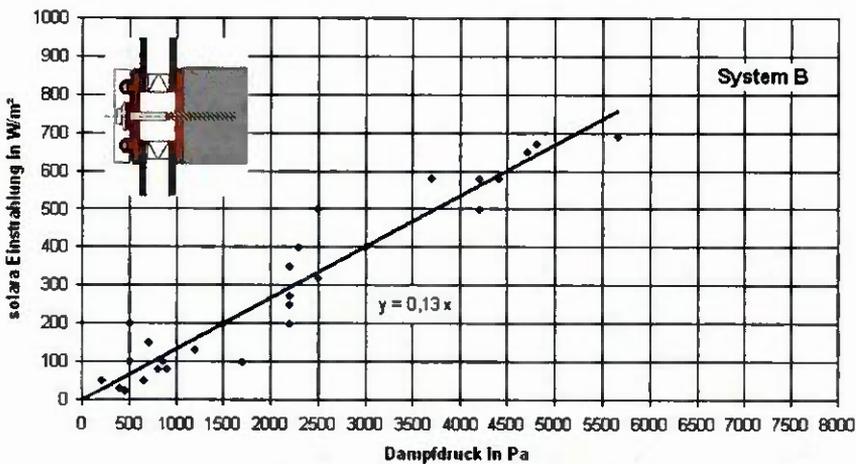


Abb. 45 Zusammenhang zwischen Einstrahlung und Dampfdruck am System B

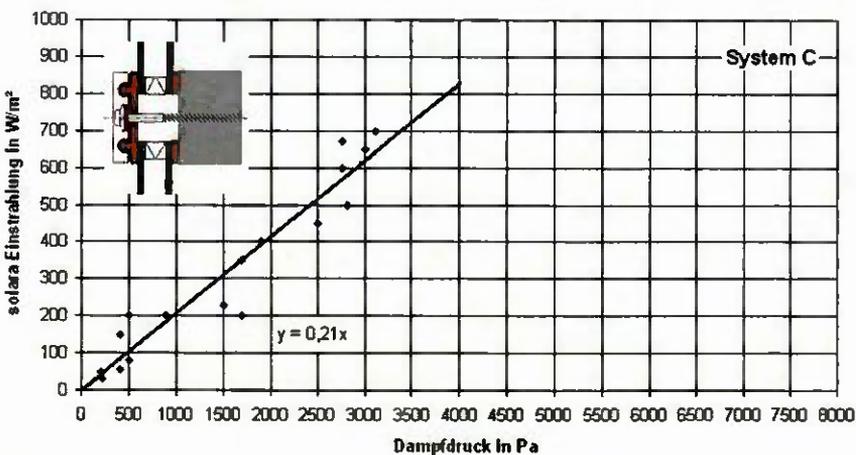


Abb. 46 Zusammenhang zwischen Einstrahlung und Dampfdruck am System C

Abb. 47 zeigt für die drei Systeme den aus den Regressionsgeraden bei einer Einstrahlung von 600 W/m^2 abgelesenen Dampfdruck sowie den maximal beobachteten Dampfdruck bei der maximalen Einstrahlung von 700 W/m^2 .

System A und B zeigen bei 600 W/m^2 Einstrahlung die höchsten Werte, wobei System A etwa 10% höher liegt. Wie erwartet treten die größten Werte des Dampfdrucks bei der maximal beobachteten Einstrahlung von ca. 700 W/m^2 auf. Hier streuen die Werte für System A bei vergleichbarer Einstrahlung zwischen ca. 5000 Pa und 7100 Pa Werte, während System B mit Werten zwischen 4700 Pa und 5700 Pa etwas geringeren Dampfdruck aufweist.

System C zeigt insgesamt die geringsten Werte des Dampfdrucks. Um die Ursachen dieser Unterschiede näher zu untersuchen, wurden weitere Messungen durchgeführt, siehe folgende Kapitel.

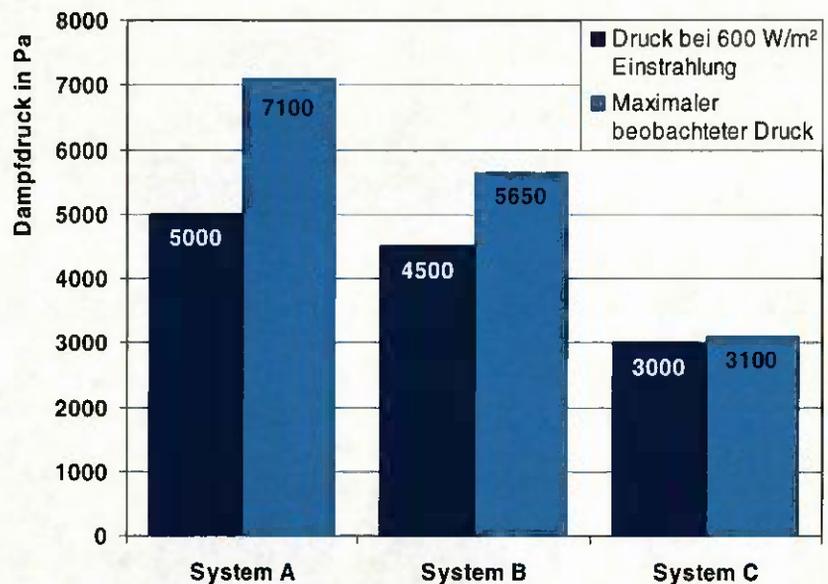


Abb. 47 Maximal gemessene Dampfdrücke der untersuchten Systeme

5.2 Einfluss von Schlagregen

Um vergleichbare Messdaten zu erhalten darf neben der definierten eingebrachten Wassermenge kein unplanmäßiger zusätzlicher Wassereintritt von außen aufgrund von Schlagregen in den Falzraum gelangen. Die Testrahmen wurden deshalb mit größter Sorgfalt gebaut um die Verfälschung der Messergebnisse durch unplanmäßigen Wassereintritt auszuschließen. Über den gesamten Prüfzeitraum wurde der Dampfdruckverlauf während und nach einer Schlagregenbelastung der Testelemente bezüglich Auffälligkeiten untersucht. In keinem Fall konnte der Eintritt von Regenwasser im Dampfdruckverlauf nachgewiesen werden, siehe Abb. 48.

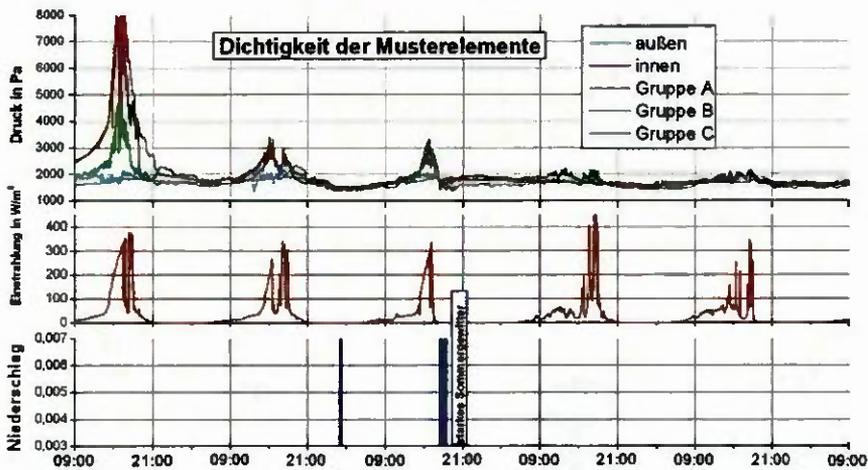


Abb. 48 Verlauf des Dampfdrucks in den Testelementen nach einem Sommergewitter

Abb. 48 zeigt am Abend des zweiten und dritten Tages ein starkes Sommergewitter mit Platzregen, das am dritten Tag über eine halbe Stunde anhält. Die Testrahmen waren zu dieser Zeit bereits weitgehend abgetrocknet. An allen betrachteten Tagen war die solare Einstrahlung nahezu vergleichbar. Dennoch wurde keine unregelmäßige Erhöhung der Dampfdruckwerte festgestellt. Während der zweiten Regenbelastung ist sogar ein leichter Rückgang der Dampfdrücke durch die Abkühlung der Außenluft erkennbar. Schlagregenbelastung führt somit zu keinem messbarer Wassereintritt in den Falzraum der Testrahmen.

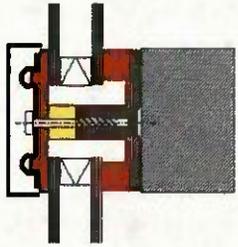
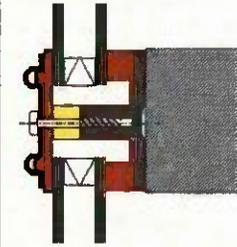
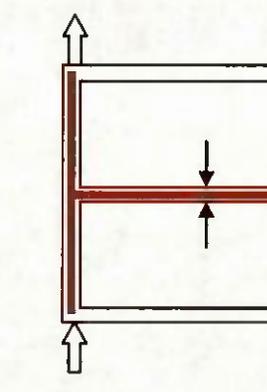
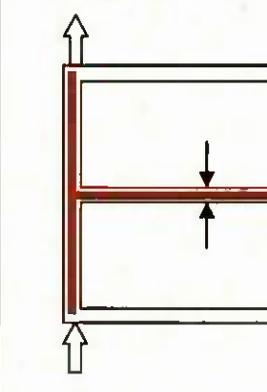
5.3 Einfluss der Deckprofile auf die Schlagregendichtheit

Die äußere Glaslagerung besteht in der Regel aus einem Druckprofil mit Dichtungen und einem Deckprofil zur optischen Gestaltung der Ansicht. Die Druckprofile sind mit dem tragenden Grundprofil verschraubt. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, dass Wasser durch die Verschraubungslöcher in den Falzraum gelangt. Aus diesem Grund soll untersucht werden, ob Regenwasser von außen durch die Verschraubung in den Falzraum gelangt und den Dampfdruck dort messbar erhöht.

Probekörperaufbau

Testrahmen 1 mit System A wurde mit Deckprofilen ausgestattet. Die Messwerte wurden mit Testrahmen 2 ohne Deckprofile verglichen.

Tab. 13 Probekörperaufbau

Testrahmen 1	System A	Testrahmen 2	System A
	<p>mit Deckprofil</p>		<p>ohne Deckprofil</p>
			
<p>  Druckausgleichsöffnung  Temperatur/Feuchtefühler  Falzraumdämmung </p>			
<p style="text-align: center;">Zeitraum 23. Aug 2006 bis 26. Aug 2006; Regenbelastung am 24.08.2006</p>			

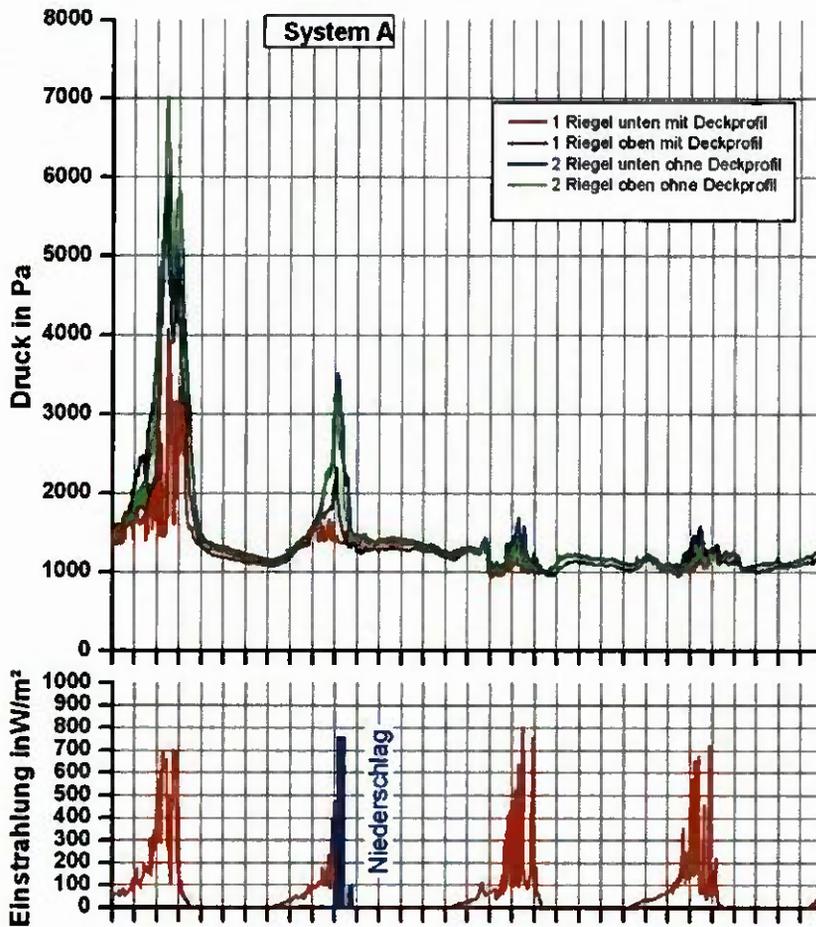


Abb. 49 Dampfdruck nach Schlagregenbelastung mit und ohne Abdeckprofil

Die Messkurven beider Systeme zeigen nach der Schlagregenbelastung keinen Unterschied. Beide Testrahmen trocknen trotz Schlagregenbelastung gleichmäßig schnell aus. Es konnte kein Wassereintritt durch die Druckleistenverschraubung nachgewiesen werden. Durch die dichtungsfreie Druckprofilverschraubung erfolgt bei Schlagregenbelastung kein messbarer Wassereintritt in den Falzraum.

Anmerkung:

Es wurde nochmals bestätigt, dass die Messungen an den Testrahmen nicht durch zusätzlichen Wassereintritt von außen beeinflusst werden.

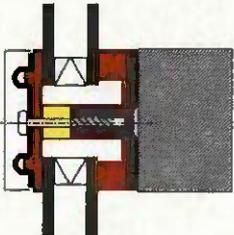
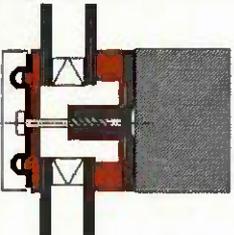
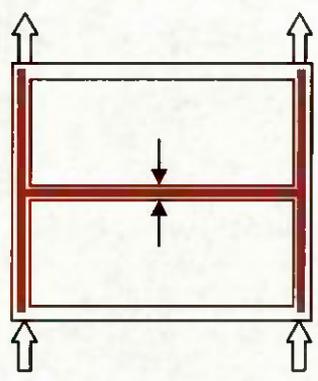
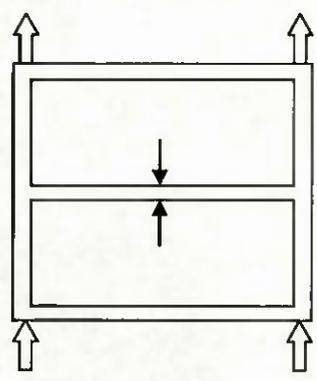
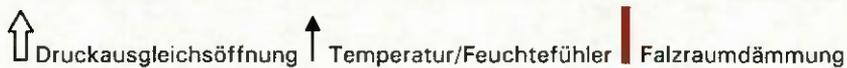
5.4 Variation der Falzraumgeometrie

Bei den Vorversuchen wurde festgestellt, dass das System A höhere Dampfdrücke als die Systeme B und C aufweist. Der wesentliche Unterschied besteht in der Geometrie des Falzraumes durch die vorhandene Falzraumdämmung. Die folgenden Messungen sollen klären, ob und wie die entstehenden Dampfdrücke durch eine Falzraumdämmung beeinflusst werden.

5.4.1 System A Einfluss Falzraumdämmung

System A ist gemäß Herstellerangaben mit einer Falzraumdämmung aus extrudiertem PE-Schaum auszustatten. Der Falzraum wird dadurch in zwei getrennte kleinere Falzräume geteilt. Um festzustellen, ob die Falzraumdämmung einen Einfluss auf den entstehenden Dampfdruck und die Austrocknungszeit hat, wurde der Testrahmen 1 mit einer systemüblichen Falzraumdämmung ausgestattet. Die Messwerte wurden mit den Testrahmen 2 ohne Falzraumdämmung verglichen.

Tab. 14 Probekörperaufbau

Testrahmen1	System A	Testrahmen 2	System A
	mit Falzraumdämmung		ohne Falzraumdämmung
			
			
Zeitraum: 24. Okt 2006 bis 30. Okt 2006, überwiegend sonnig 6. Nov 2006 bis 11. Nov 2006			

Allgemeine Beobachtung:
 Das bei Testelement 1 in den oberen Falzraum eingebrachte Wasser läuft zum Teil auch in den unteren Falzraum.

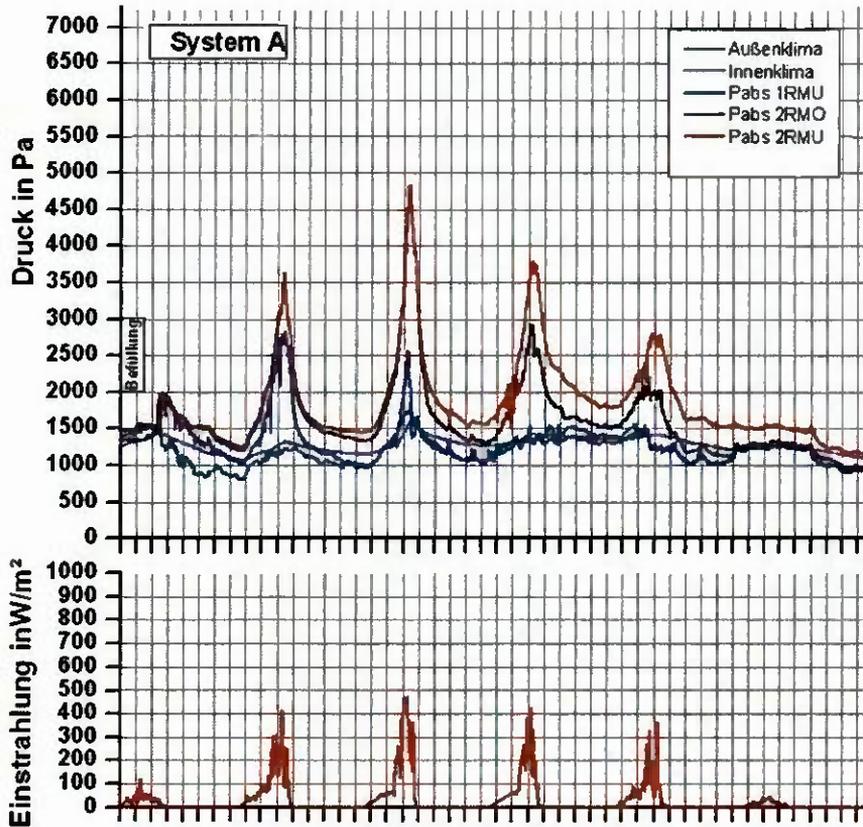


Abb. 50 Verlauf des Dampfdrucks Vergleich System A mit/ohne Falzraumdämmung

Tab. 15 Feststellungen

	Testrahmen 1	Testrahmen 2
max. Dampfdruck	ca. 4,5 kPa	ca. 2,5 kPa
Trocken 1	ca. 5 Tage	ca. 2 Tage
Trocken 2	ca. 6 Tage	ca. 3 Tage

Bei einer Unterteilung des Falzraumes durch die Falzraumdämmung in einen oberen und unteren Falzraum ergibt sich kein Unterschied im Dampfdruck. Der maximale Dampfdruck erreicht mit Falzraumdämmung etwa die doppelten Werte als ohne Falzraumdämmung. Die Austrocknungszeit beträgt bei geringer Einstrahlung ohne Falzraumdämmung zwei bis drei Tage, mit Falzraumdämmung verlängert sich mit Austrocknungszeit auf ca. sechs Tage.

Erkenntnisse:

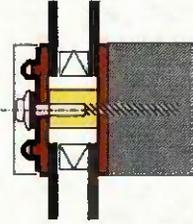
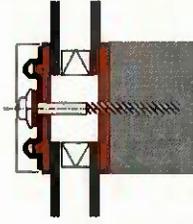
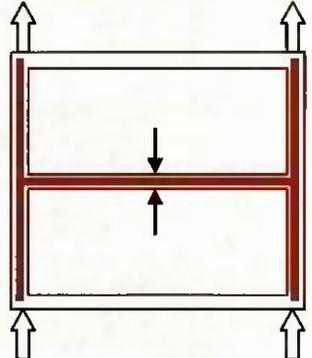
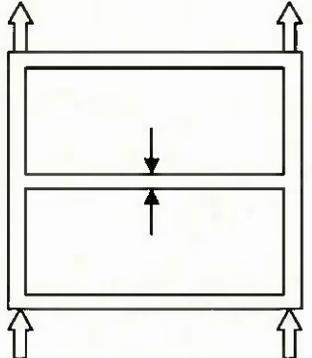
- im Vergleich zum System ohne Falzraumdämmung ergeben sich mit Falzraumdämmung deutlich höhere Dampfdrücke
- Die Austrocknung im gedämmten Falzraum dauert ca. doppelt so lange im Vergleich zum ungedämmten Falzraum.
- Die Falzraumdämmung bewirkt keine Falzraumtrennung.

5.4.2 System B Einfluss Falzraumdämmung

Nach den Erkenntnissen mit System A soll nun noch in einer weiteren Versuchsreihe mit System B untersucht werden, wie sich eine falzraum-trennende Dämmung auswirkt. Zu erwarten ist, dass der Dampfdruck mit Falzraumdämmung höher steigt als ohne Dämmung, da weniger Falzraumvolumen zur Verfügung steht.

Der Testrahmen 1 wurde an Pfosten und Riegel mit einer Falzraumdämmung aus extrudiertem PE-Schaum ausgestattet. Die Dämmung liegt an der raumseitigen Dichtung und an der Pressleise an. Der Falzraum ist damit in zwei Bereiche getrennt. Die Messwerte wurden mit einem Testrahmen 2 ohne Falzraumdämmung verglichen.

Tab. 16 Probekörperaufbau

Testrahmen1	System B	Testrahmen 2	System B
	<p>mit Falzraum-dämmung</p>		<p>ohne Falzraum-dämmung</p>
			
<p>↑ Druckausgleichsöffnung ↑ Temperatur/Feuchtefühler Falzraumdämmung</p>			
<p>Zeitraum: 30.Okt.2006 bis 6.Nov.2006 13.Nov 2006 bis 30.11.2006; 29. Dez 2006 bis 31.Dez 2006 18.01.2007 bis 23.01.07 Sturm; 03.Mai.2007 bis 09.Mai.2007</p>			

Sonstige Feststellungen

Stellenweise fließt das eingebrachte Wasser direkt in den unteren Falzraum. Eine Trennung der Falzräume ist mit der eingebauten PE-Falzraumdämmung nicht gegeben.

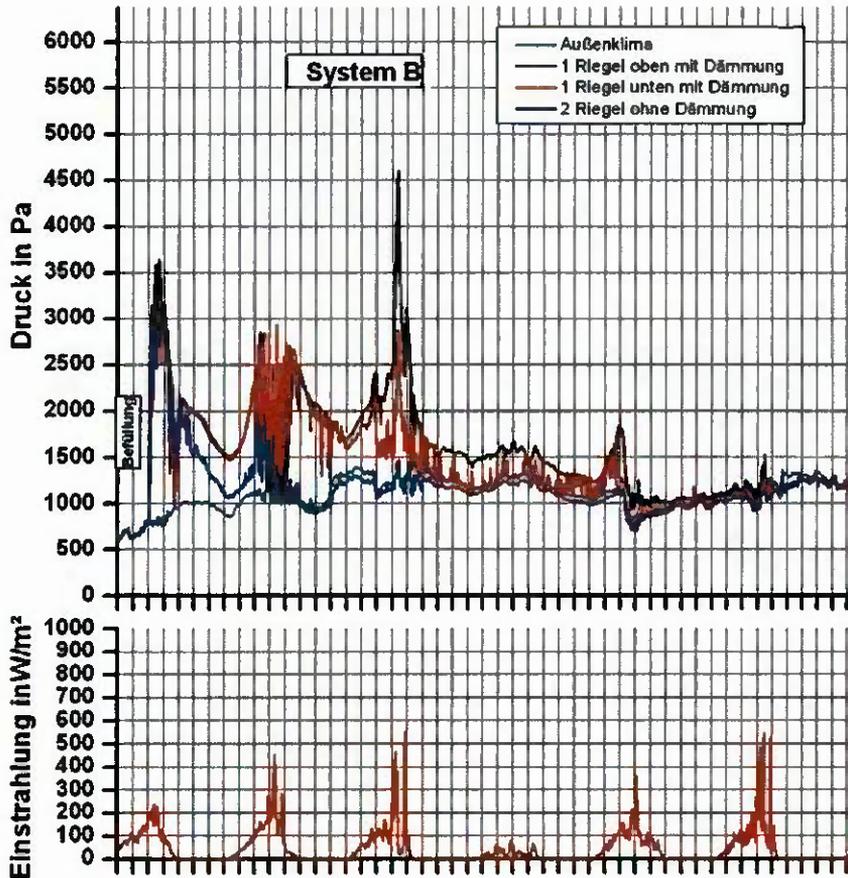


Abb. 51 Verlauf des Dampfdrucks Vergleich System B mit/ohne Falzraumdämmung

Tab. 17 Feststellungen

	Testrahmen 1	Testrahmen 2
max. Dampfdruck	ca. 4,5 kPa	ca. 3,0 kPa
Trocken 1	ca. 5 Tage	ca. 2 Tage
Trocken 2	ca. 5 Tage	ca. 2 Tage

Der maximale Dampfdruckanstieg während der Austrocknungszeit erreicht mit Falzraumdämmung etwa 1,5-fach höhere Werte als ohne Falzraumdämmung. Am dritten Tag steigt der Dampfdruck des Testrahmens 1 mit Dämmung kurzzeitig auf das 3-fache gegenüber dem Element ohne Dämmung. Die Austrocknungszeit beträgt ohne Falzraumdämmung ca. 2 Tage, mit Falzraumdämmung ca. 5 Tage.

Erkenntnisse

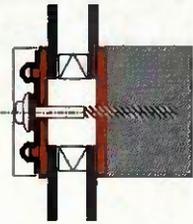
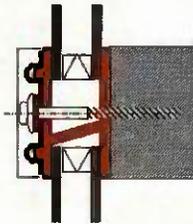
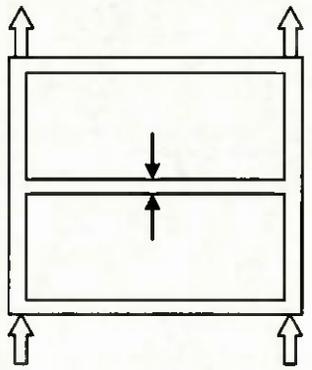
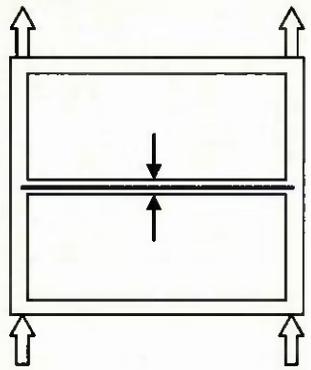
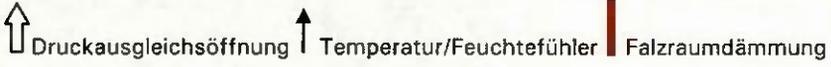
- im Vergleich zum System ohne Falzraumdämmung ergeben sich mit Falzraumdämmung deutlich höhere Dampfdrücke
- Die Austrocknung im gedämmten Falzraum dauert ca. doppelt so lange im Vergleich zum ungedämmten Falzraum.
- Die Falzraumdämmung bewirkt keine Falzraumtrennung.

Die Ergebnisse von System A und B stimmen bezüglich der Auswirkungen der Falzraumdämmung auf Dampfdruck und Austrockenzeit überein.

5.4.3 System B Einfluss Riegeldichtungsfahne

Bei System B ist vorgesehen, ein zusätzliches Gummiprofil (Dichtungsfahne) einzubauen. Dieses Profil soll Wasser, welches durch die obere Verglasungsdichtung eingedrungen ist, gezielt von der darunter liegenden Scheibenkante fernhalten. Zwischen Profil und Oberkante der unteren Isolierglasscheibe entsteht so ein stark verengter Falzraum. Die folgenden Untersuchungen sollen den Einfluss auf Dampfdruck und Austrocknung aufzeigen.

Tab. 18 Probekörperaufbau

Testrahmen 3	System B	Testrahmen 4	System B
			mit Zusatzprofil zur Wasser- Führung im Riegel (Riegelfahne)
			
			
Zeitraum: 27. Sep 2006 – 02. Okt 2006, überwiegend sonniges Wetter			

Den ermittelten Verlauf des Dampfdruckes zeigt Abb. 52. Nach der Befüllung steigt der Dampfdruck oberhalb (schwarze Kurve) und unterhalb der Riegelfahne (rote Kurve) sofort an. Der größte Wert mit 7000 Pa wird bei viel Sonne am dritten Tag erreicht. Der Dampfdruck unterhalb der Riegelfahne bleibt aber mit ca. 3500 Pa deutlich geringer als der Wert von fast 7000 Pa oberhalb der Abtrennung. Die Zeit bis zur völligen Trocknung (Trocken 2) dauert unter der Riegelfahne länger als oberhalb der Riegelfahne, obwohl unter der Riegelfahne trocken 1 bereits nach einem Tag erreicht ist.

Testrahmen 3 ohne Riegelfahne (blaue und grüne Kurve) zeigt insgesamt etwas geringere Dampfdruckanstiege und ist nach 3 bzw. 4 Tagen wieder trocken.

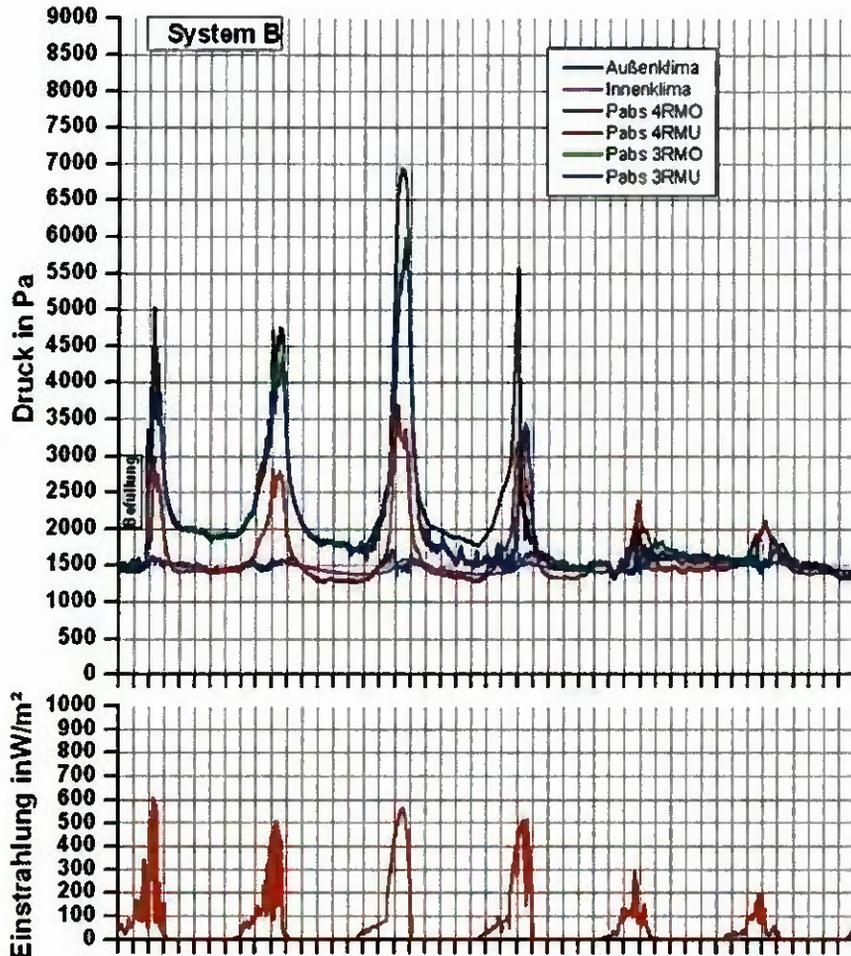


Abb. 52 Verlauf des Dampfdrucks Vergleich System B mit Falzraumtrennung (schwarz: oberhalb; rot: unterhalb) und ohne Falzraumtrennung (grün; blau)

Tab. 19 Feststellungen

	Testrahmen 4	Testrahmen 3
max. Dampfdruck	oben 5,5 kPa unten 2,2 kPa	4,5 kPa
Trocken 1	oben 4 Tage unten 1 Tage	3 Tage
Trocken 2	oben 5 Tage unten 6 Tage	4 Tage

Erkenntnisse

- Die Riegelfahne trennt das Falzraumklima, verhindert aber nicht, dass Feuchtigkeit in den unteren Bereich gelangt.
- Durch die Verengung des oberen Falzraumvolumens entsteht ein höherer Dampfdruck als im Vergleich zum Testrahmen 2 ohne Riegelfahne.
- Die Austrocknung dauert mit Riegelfahne ca. 2 Tage länger als ohne.

5.4.4 System C Einfluss Falzraumdämmung

Probekörperaufbau

Testrahmen 1 wurde mit einer Falzraumdämmung ausgestattet, die vom Holz bis zum Druckprofil reicht. Die Dämmung besteht aus einem extrudierten PE-Schaum. Der Falzraum ist somit getrennt mit Ausnahme der Glasaufleger, da hier die Falzraumdämmung ausgenommen werden musste. Zwischen Glasaufleger und Druckprofil wurde ebenfalls eine Dämmung eingebaut.

Tab. 20 Probekörperaufbau

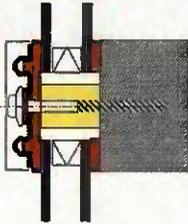
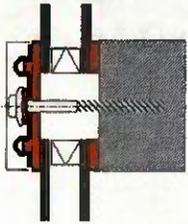
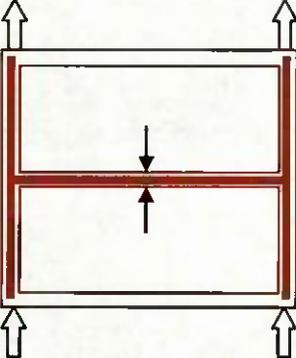
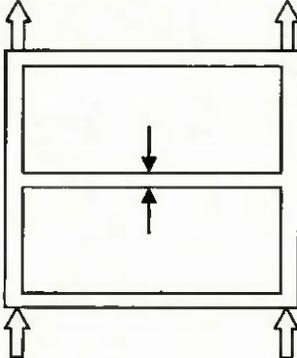
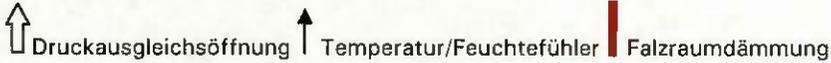
Testrahmen 1	System B	Testrahmen 2	System B
	mit Falzraum-Dämmung		
			
			
Zeitraum: 16. Mai 2007 bis 22. Mai 2007			

Abb. 53 zeigt den Verlauf des Dampfdrucks im Testrahmen 1 und 2. Mit Dämmung sind besonders am 3. und 4. Tag nach der künstlichen Befüllung die Werte erheblich höher als im Testrahmen 2 ohne Dämmung. Die Dampfdrücke oberhalb und unterhalb der Falzraumdämmung sind nahezu identisch. Das feuchte Außenklima führt in der Nacht zu einem trockeneren Falzrumklima gegenüber dem Außenklima. Der geringe Dampfdruckanstieg von etwa 1 kPa am fünften dargestellten Tag ist auch noch in den folgenden Tagen vorhanden. Der gleiche Verlauf ist aber auch beim System B in diesem Zeitraum zu beobachten. Ein Rückschluss auf evtl. Austrocknung von Holzfeuchtigkeit ist deshalb nicht möglich. Der Einfluss ist wetterbedingt.

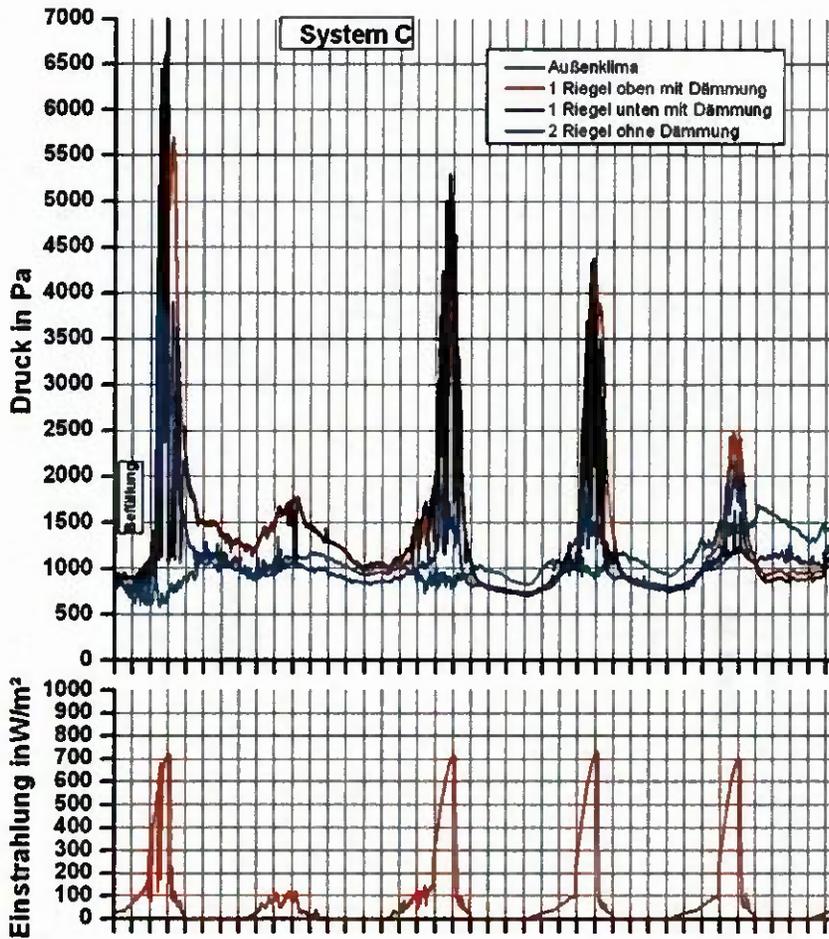


Abb. 53 Exemplarischer Dampfdruckverlauf

Tab. 21 Feststellungen

	Testrahmen 1	Testrahmen 2
max. Dampfdruck	ca. 6,5 kPa	ca. 3,5 kPa
Trocken 1	ca. 2 Tage	ca. 1Tag
Trocken 2	ca. 5 Tage	ca. 5 Tage

Erkenntnisse

- Die Falzraumdämmung führt auch im System C höheren Dampfdrücken.
- Die Austrocknungsdauer verlängert sich durch die Falzraumdämmung erheblich
- Die Falzraumdämmung bewirkt keine Falzraumtrennung.

5.4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Einbauten im Falzraum, gleich welcher Art, bedeuten immer eine Verengung des Falzraumquerschnittes und damit eine Behinderung der Belüftung. Die Belüftung des Falzraumes ist für ein möglichst schnelles Austrocknen des Falzraumes nach erfolgtem Wassereintritt aber notwendig. Gleichzeitig führt eine Behinderung der Belüftung zum Anstieg des Dampfdruckes im Falzraum.

Einfluss auf den Dampfdruckanstieg

Einbauten im Falzraum (Falzraumdämmung, Riegelfahne) führen unabhängig vom Fassadensystem immer zu höheren Dampfdrücken gegenüber einem Falzraum ohne Einbauten.

In Tab. 22 sind die Ergebnisse der Systemen A, B und C mit eingebauter PE-Schaumdämmung im Vergleich zu den Messungen ohne Dämmung dargestellt. Im Durchschnitt verdoppelt sich der Dampfdruck durch eine Falzraumdämmung. Ebenso erhöht sich der Dampfdruck beim Einbau eines Falzraumtrennenden Profils.

Tab. 22 Faktoren der Erhöhung des Dampfdruckes im Falzraum durch Einbauten

	System A	System B	System C
ohne Einbau	1	1	1
mit Falzraumdämmung	2,0	1,5	3,0
mit Trennprofil (Riegelfahne)	-	1,2	-

Einfluss auf die Austrocknungszeit

Je nach System und Ausführung der Falzraumdämmung erhöht sich die Zeit bis zum Abtrocknen des frei zugänglichen Wassers (trocken 1) um einen Faktor 2 bis 3, siehe Tab. 23. Mit Riegelfahne verändert sich diese Zeit nur wenig. Die Zeit bis zum völligen Austrocknen (trocken 2) hängt von der Bildung von Kapillarfugen und den hygroskopischen Eigenschaften der Oberflächen ab und ist stärker Systemabhängig.

Tab. 23 Faktoren der Austrocknungszeit im Falzraum durch Einbauten

	System A	System B	System C
ohne Einbau	1	1	1
mit Falzraumdämmung	2	2,5	3
mit Trennprofil (Riegelfahne)	-	1	-

Unabhängig vom Fassadensystem führt die Falzraumdämmung zu einer deutlich höheren Dampfdruckbelastung, sowohl in der Höhe des Dampfdruckes als auch in einer längeren Austrocknungszeit. Andererseits ist die Falzraumdämmung bei steigenden Anforderungen an den Wärmeschutz eine notwendige Maßnahme zur Verbesserung der Wärmedurchgangskoeffizienten der Rahmenprofile. Hier ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen Verbesserung der Wärmedämmung und Verringerung der Feuchtebelastung im Glasfalz.

5.5 Variation der Druckausgleichsöffnungen

Eine Möglichkeit zur Verringerung der Dampfdruckbelastung ist der Einbau von zusätzlichen Dampfdruckausgleichsöffnungen (Druckausgleichsöffnung) zum Riegelfalzraum. Einige Systemhersteller fordern diese Dampfdruckausgleichsöffnungen ab einer bestimmten Riegellänge von z.B. 2,0 m. Als Dampfdruckausgleichsöffnung werden meist Löcher oder Schlitzlöcher in das Druckprofil im Bereich des Falzraumes gebohrt oder gefräst. Diese Öffnungen werden dann meist mit einem Versatz von ca. 50 mm nach unten durch die Deckprofile fortgesetzt. Somit besteht eine Verbindung zwischen Falzraum und Außenklima. Teilweise werden auch die Dichtungsprofile auf der unteren Seite für wenige Zentimeter ausgeklinkt. In diesem Projekt wurde die erste Variante angewandt.

Darstellung der Messergebnisse

Die Ergebnisse werden in diesem Kapitel nicht wie im vorherigen Kapitel über den zeitlichen Dampfdruckverlauf dargestellt, sondern über den maximal ermittelten Dampfdruckanstieg im Riegelfalz (Dampfdruck im Falzraum minus Dampfdruck des Außenklimas). Damit ist es möglich die Information mehrerer Messstellen im Riegel übersichtlich darzustellen. Diese Darstellung ist notwendig, da der Dampfdruckverlauf im Riegelfalzraum durch die Dampfdruckausgleichsöffnungen beeinflusst wird. Bei einer Darstellung der Dampfdruckkurven müssen so alle Fühlerpositionen nebeneinander gezeigt werden, was keine Übersicht mehr ermöglicht.

Die nach der künstlichen Befüllung höchsten Messwerte wurden in ein gemeinsames Diagramm übertragen. Das Diagramm zeigt somit den maximal gemessenen Dampfdruck über die gesamte Riegellänge. An den Markierungen sind die übertragenen Messwerte zu erkennen. Der Dampfdruckverlauf über die gesamte Riegellänge ergibt sich durch Spiegeln der Messwerte. Die Positionen der einzelnen Messstellen sind auch in der Beschreibung der Testrahmen enthalten.

5.5.1 System A Druckausgleich in Riegelmitte

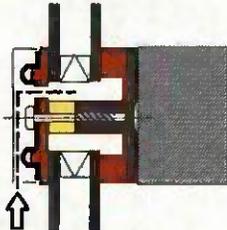
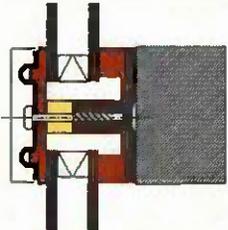
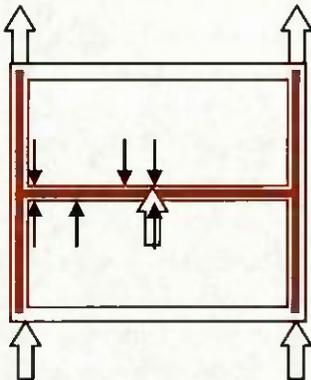
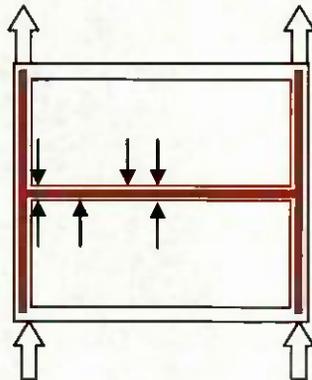
Nach den bisherigen Erkenntnissen stellt sich in der Mitte des Riegels der höchste Dampfdruck ein. Aus diesem Grund soll nun untersucht werden, wie sich eine zusätzliche Dampfdruckausgleichsöffnung in Riegelmitte auf den Dampfdruckverlauf des Riegels auswirkt.

Probekörperaufbau

Der Probekörper 1 wurde mit einer zusätzlichen Dampfdruckausgleichsöffnung in der Mitte des Riegels ausgestattet. Die Dampfdruckausgleichsöffnung wurde als Schlitz von 5 mm x 25 mm im Bereich des oberen Falzraumes eingefräst und nach unten über das Deckprofil mit einem 50 mm versetzt angeordneten Schlitz von ebenfalls 5 mm x 25 mm fortgesetzt, siehe gestrichelte Linie in der Skizze der Tab. 24. Der Probekörper 2 besitzt keine Dampfdruckausgleichsöffnung am Riegel.

Der auftretende Dampfdruck wurde an 4 unterschiedlichen Positionen am Riegel aufgezeichnet. Die Lage der Fühler 1 bis 4 ist aus den Skizzen der Tab. 24 zu entnehmen.

Tab. 24 Probekörperaufbau

Testrahmen1	System A	Testrahmen 2	System A
			
			
<p>  Druckausgleichsöffnung  Kombinationssensor  Falzraumdämmung </p>			
<p> Beobachtungszeitraum: 25. Feb 2008 bis 02. März 2008. Ausgewertet wurde der 26. Feb 2008, Einstrahlung 520 W </p>			

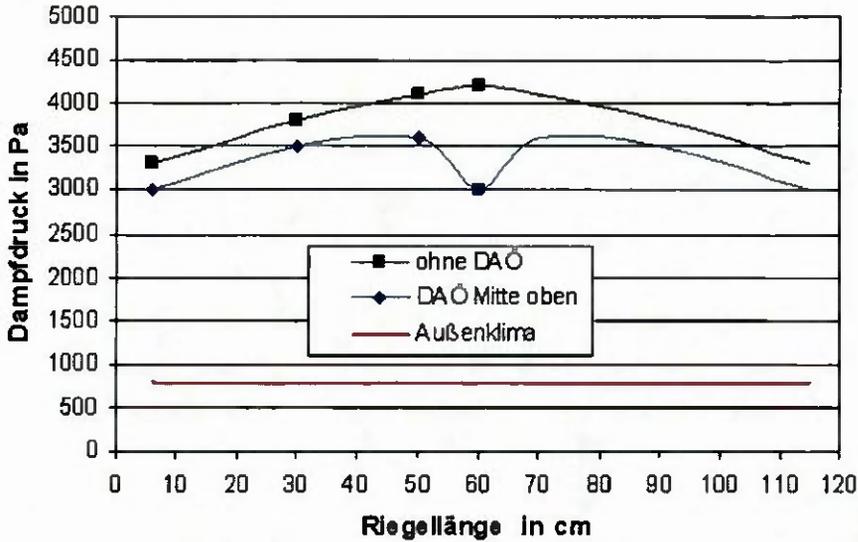


Abb. 54 maximaler Dampfdruck im Riegel System A; Vergleich ohne und mit einer zusätzlichen Öffnung in Riegelmitte

Tab. 25 Feststellungen

	Testrahmen 1	Testrahmen 2
max. Dampfdruck	ca. 3,6 kPa	ca. 4,2 kPa
Trocken 1	ca. 3 Tage	ca. 4 Tage
Trocken 2	ca. 4 Tage	ca. 6 Tage

Dampfdruckverlauf im Riegel

Die Werte über und unter der Falzraumdämmung sind nahezu identisch, aus diesem Grund sind in Abb. 54 nur die Verläufe oberhalb der Falzraumdämmung dargestellt. Testrahmen 2 ohne zusätzliche Druckausgleichsöffnung zeigt einen typischen parabelförmigen Dampfdruck innerhalb des Riegels. In Riegelmitte werden ca. 4200 Pa erreicht. Testrahmen 1 mit Druckausgleichsöffnung zeigt ebenfalls einen parabelförmigen Dampfdruck innerhalb des Riegels aber mit insgesamt ca. 30 Pa geringeren Dampfdruck. Im Bereich der Dampfdruckausgleichsöffnung ist auf einer Länge von ca. 20 cm der Dampfdruck nochmals um bis zu 900 Pa abgesenkt.

Austrocknung

Der obere Falzraum des Probekörpers 1, war im Bereich der zusätzlichen Dampfdruckausgleichsöffnung bereits nach ca. 2 Tage austrocknet. Der untere Falzraum des Probekörpers 1 war nach ca. 3 Tagen austrocknet. Der Falzraum des Probekörpers 2 war erst nach ca. 6 Tagen austrocknet.

Erkenntnisse

- Eine zusätzliche Dampfdruckausgleichsöffnung in der Riegelmitte führt zu geringeren Dampfdrücken besonders im Bereich bis ca. 10 cm rechts und links von der Dampfdruckausgleichsöffnung. Bei diesen Messungen verringerte sich der Dampfdruck in der Mitte um 30%, sonst um 10%.
- Eine zusätzliche Dampfdruckausgleichsöffnung im Riegel verkürzt die Austrocknungszeit des Falzraumes, bei diesen Messungen um einen Tag.

5.5.2 System B Druckausgleich in Riegelmitte

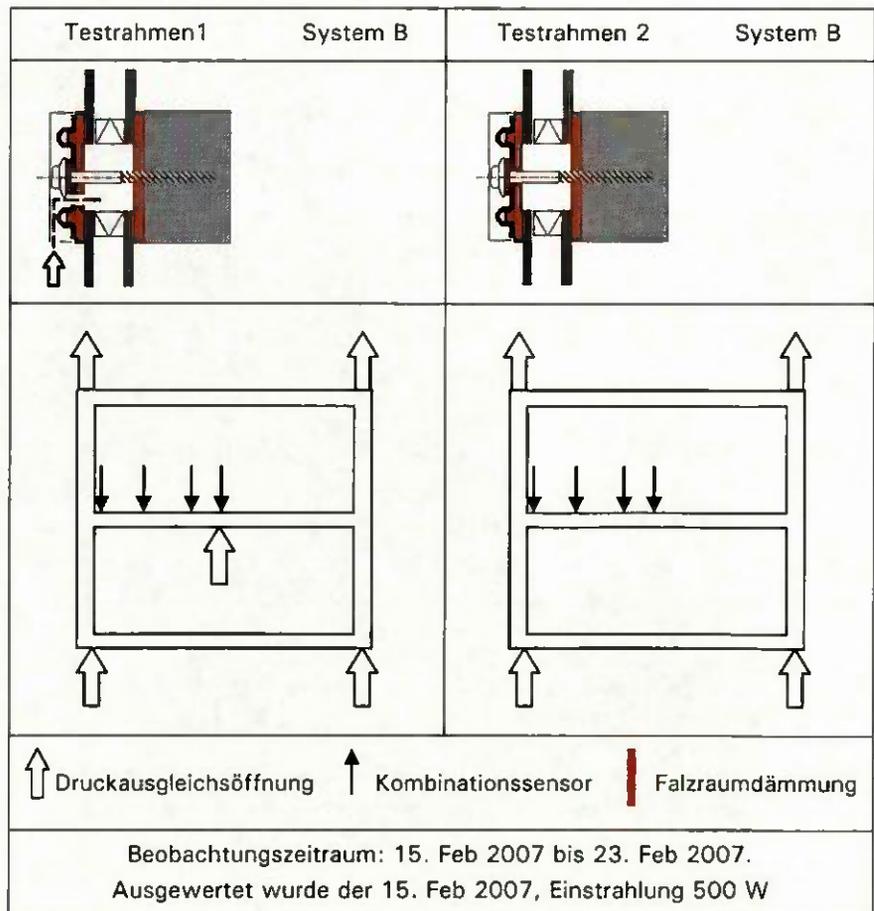
Nach den bisherigen Erkenntnissen stellt sich in der Mitte des Riegels der höchste Dampfdruck ein und eine zusätzliche Dampfdruckausgleichsöffnung in der Riegelmitte verringert den Dampfdruck im Bereich der Öffnung. Bei dem zuvor untersuchten System A ist der Falzraum durch eine Dämmung verengt. Am System B ohne Falzraumdämmung soll nun untersucht werden, ob die räumlich begrenzte Wirkung einer zusätzlichen Dampfdruckausgleichsöffnung in Riegelmitte durch eine Falzraumdämmung verursacht wird.

Probekörperaufbau

Der Probekörper 1 wurde mit einer zusätzlichen Dampfdruckausgleichsöffnung in der Mitte des Riegels ausgestattet. Die Dampfdruckausgleichsöffnung wurde als Schlitz von 5 mm x 25 mm im unteren Bereich des Druckprofils eingefräst und nach unten über das Deckprofil mit einem 5 cm versetzt angeordneten Schlitz von ebenfalls 5 mm x 25 mm fortgesetzt, siehe gestrichelte Linie in der Skizze der Tab. 26.

Der Probekörper 2 erhielt keine Dampfdruckausgleichsöffnung am Riegel. Der auftretende Dampfdruck wurde an 4 unterschiedlichen Positionen am Riegel aufgezeichnet. Die Lage der Fühler 1 bis 4 ist aus den Skizzen der Tab. 26 zu entnehmen.

Tab. 26 Probekörperaufbau



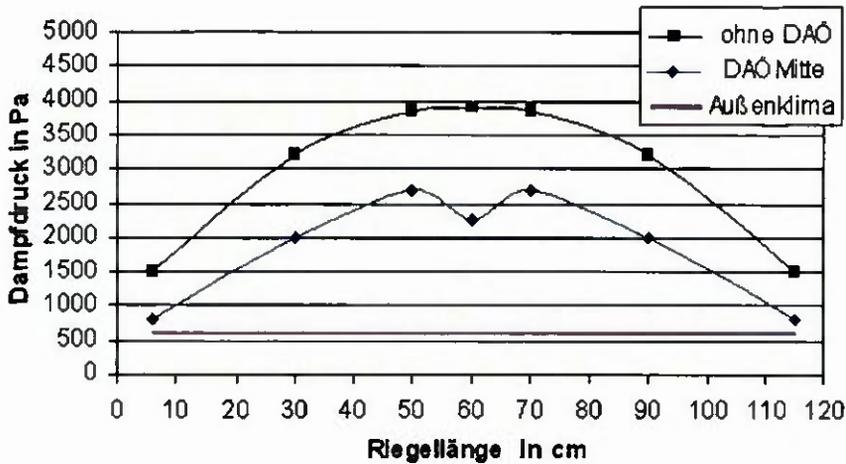


Abb. 55 maximaler Dampfdruck im Riegel System B; Vergleich ohne und mit einer zusätzlichen Öffnung in Riegelmitte

Tab. 27 Feststellungen

	Testrahmen 1	Testrahmen 2
max. Dampfdruck	ca. 2,7 kPa	ca. 3,9 kPa
Trocken 1	ca. 2 Tage	ca. 2 Tage
Trocken 2	ca. 2 Tage	ca. 4 Tage

Dampfdruckverlauf im Riegel

Testrahmen 2 ohne zusätzliche Druckausgleichsöffnung zeigt einen parabelförmigen Dampfdruckverlauf innerhalb des Riegels. In Riegelmitte werden ca. 3900 Pa erreicht. Testrahmen 1 mit Druckausgleichsöffnung zeigt auch ebenfalls einen parabelförmigen aber deutlich niedrigeren Verlauf. Im Bereich der Dampfdruckausgleichsöffnung ist auf einer Länge von ca. 20 cm der Dampfdruck nochmals um bis zu 500 Pa geringer.

Austrocknung

Der Probekörper 1 mit zusätzlicher Druckausgleichsöffnung war bereits nach ca. 2 Tagen ausgetrocknet, Probekörpers 2 war erst nach ca. 4 Tagen ausgetrocknet.

Erkenntnisse

- Eine zusätzliche Druckausgleichsöffnung senkt bei System B (ohne Falzraumdämmung) den Dampfdruck insgesamt deutlich ab (ca. 1/3), im Bereich ca. 10 cm rechts und links von der Dampfdruckausgleichsöffnung und am Übergang zu den Pfosten auf die Hälfte.
- Auch ohne Falzraumdämmung wirkt sich eine zusätzliche Dampfdruckausgleichsöffnung direkt auf einen Bereich von ca. 20 cm aus.
- Eine zusätzliche Dampfdruckausgleichsöffnung im Riegel verkürzt die Austrocknungszeit des Falzraumes, bei diesen Messungen um ca. 50%.

5.5.3 System B Einfluss Riegelmitte/Riegelseite

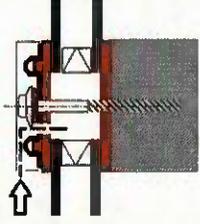
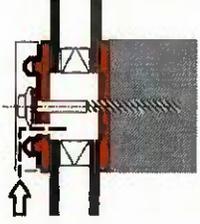
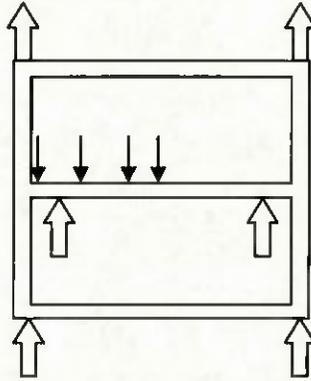
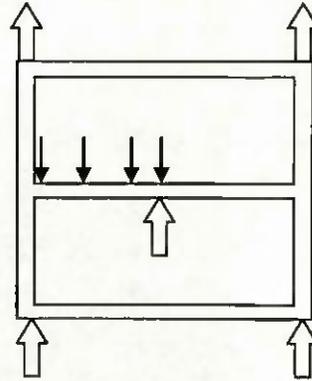
In vielen Systembeschreibungen werden zusätzliche Druckausgleichsöffnungen am Riegelende empfohlen. Folgender Versuchsaubau vergleicht zwei Druckausgleichsöffnungen am Riegelende mit einer Druckausgleichsöffnung in der Riegelmitte bei Systems B.

Probekörperaufbau

Der Probekörper 1 wurde mit zwei zusätzlichen Dampfdruckausgleichsöffnungen jeweils 12 cm vom Riegelende entfernt ausgestattet. Der Probekörper 2 wurde mit einer zusätzlichen Dampfdruckausgleichsöffnung in der Mitte des Riegels ausgestattet. Die Dampfdruckausgleichsöffnungen wurden als Schlitz von 5 mm x 25 mm im unteren Bereich des Druckprofils eingefräst und nach unten über das Deckprofil mit einem 5 cm versetzt angeordneten Schlitz von ebenfalls 5 mm x 25 mm fortgesetzt, siehe Darstellung in Tab. 28.

Der auftretende Dampfdruck wurde an 4 unterschiedlichen Positionen am Riegel aufgezeichnet. Die Lage der Fühler 1 bis 4 ist aus den Skizzen der Tab. 28 zu entnehmen.

Tab. 28 Probekörperaufbau

Testrahmen1	System B	Testrahmen 2	System B
	<p>Zwei Druckausgleichsöffnung jeweils rechts und links 12 cm vom Pfosten entfernt</p>		<p>Eine Druckausgleichsöffnung in der Mitte des Riegels</p>
			
 Druckausgleichsöffnung		 Kombinationssensor	
 Falzraumdämmung			
<p>Beobachtungszeitraum: 31. Juli bis 20. Aug 2007 Ausgewertet wurde der 1. Aug 2007, Einstrahlung 710 W</p>			

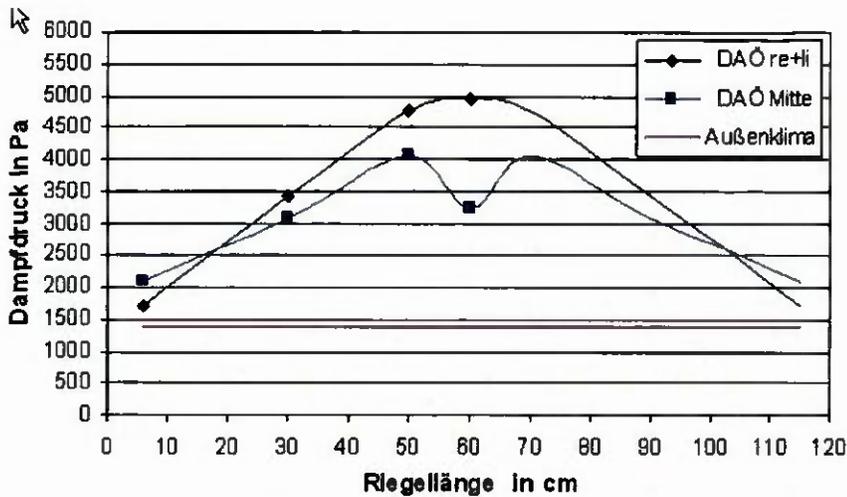


Abb. 56 maximaler Dampfdruck im Riegel System B; Vergleich: je eine Öffnung links und rechts am Riegel mit einer Öffnung in Riegelmitte

Tab. 29 Feststellungen

	Testrahmen 1	Testrahmen 2
max. Dampfdruck	ca. 5,0 kPa	ca. 4,1 kPa
Trocken 1	ca. 2Tage	ca. 2Tage
Trocken 2	ca. 2 Tage	ca. 2 Tage

Dampfdruckverlauf im Riegel

Beide Testrahmen zeigen den typischen parabelförmigen Dampfdruckverlauf innerhalb des Riegels. Der Dampfdruckverlauf bei Testrahmen 1 mit zwei zusätzlichen Dampfdruckausgleichsöffnungen ist insgesamt geringer als bei der Vergleichsmessung ohne Dampfdruckausgleichsöffnung. Der Dampfdruck an den Riegelenden im Bereich der Dampfdruckausgleichsöffnungen ist geringer als bei Testrahmen 2. Im Bereich der mittleren Dampfdruckausgleichsöffnung ist auf einer Länge von ca. 20 cm der Dampfdruck um bis zu 1800 Pa geringer als bei Testrahmen 1.

Austrocknung

Die Austrocknungszeit beträgt in beiden Fällen ca. 2 Tage.

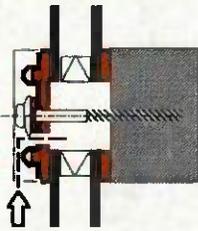
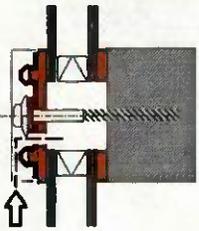
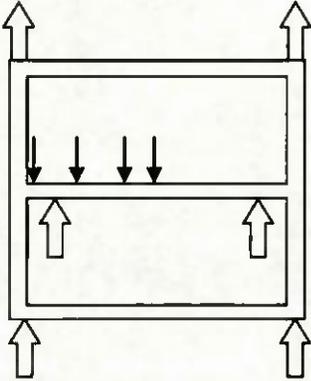
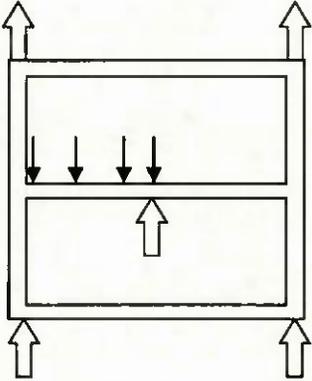
Erkenntnisse

- Eine zusätzliche Druckausgleichsöffnung in der Riegelmitte führt im Vergleich zu zwei zusätzlichen Druckausgleichsöffnungen jeweils rechts und links des Riegels zu einem geringeren Dampfdruck im Falzraum. Bei diesen Messungen verringerte sich der Dampfdruck in der Mitte um die Hälfte.
- Dampfdruckausgleichsöffnungen in der Riegelmitte haben gegenüber seitlich angebrachten Druckausgleichsöffnungen hinsichtlich des Dampfdruckes Vorteile, da sie den Bereich entlasten, in dem ansonsten die höchsten Dampfdrücke entstehen.

5.5.4 System C Einfluss Riegelmitte/Riegelseite

Die Erkenntnisse aus dem System B sollen Durch Messungen am System C bestätigt werden. Die Probekörper wurden mit System C ansonsten identisch aufgebaut.

Tab. 30 Probekörperaufbau

Testrahmen1	System B	Testrahmen 2	System B
	Zwei Druckausgleichsöffnung jeweils rechts und links 12 cm vom Pfosten entfernt		Eine Druckausgleichsöffnung in der Mitte des Riegels
			
Beobachtungszeitraum: 25. Apr bis 03. Mai 2007 Ausgewertet wurde der 25. Apr 2007, Einstrahlung 740 W			

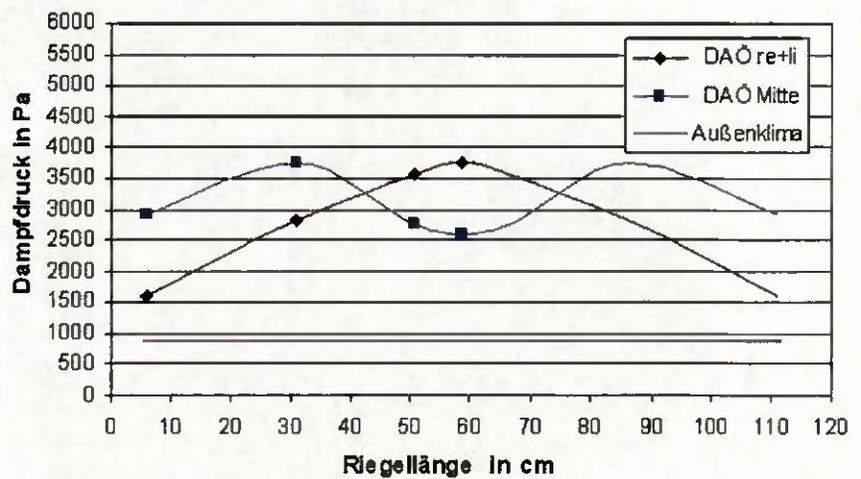


Abb. 57 Dampfdruckprofil im Riegel

Erkenntnisse

Der grundsätzliche Einfluss der Anordnung der Druckausgleichsöffnung hat sich bestätigt, siehe vorhergehenden Abschnitt.

5.5.5 System A mit mehreren Öffnungen

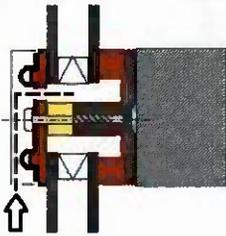
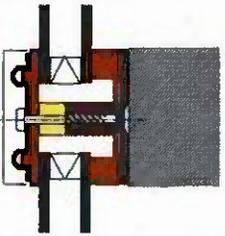
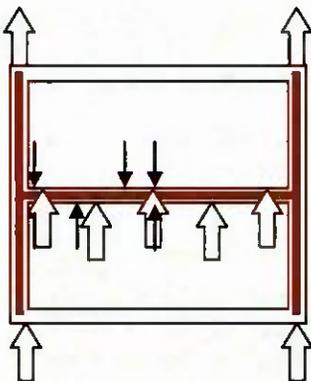
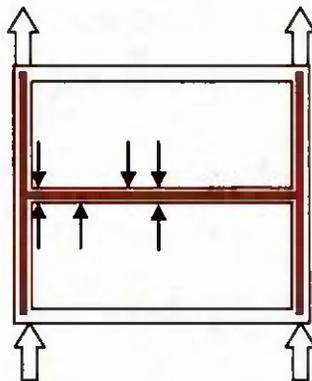
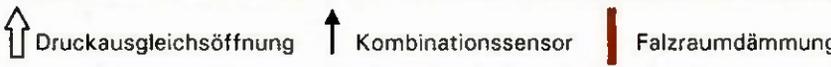
Es soll untersucht werden, wie mehrere Dampfdruckausgleichsöffnungen im Riegel den Dampfdruckverlauf beeinflussen.

Probekörperaufbau

Der Riegel des Probekörpers 1 wurde mit fünf Druckausgleichsöffnungen versehen. Drei Öffnungen in der Druckleiste befinden sich oberhalb und zwei unterhalb der Glasfaldämmung. Die Öffnungen haben von der Mitte aus einen Abstand von je 25 cm und wurden als Schlitz von 5 mm x 25 mm ausgeführt. Im Deckprofil befinden sich insgesamt drei Schlitz von 5 mm x 25 mm jeweils nach unten. Je ein Schlitz 15 cm vom Rand und ein Schlitz 5 cm außerhalb der Mitte versetzt. Daraus ergibt sich ein Versatz zwischen der Öffnung von Druckleiste und Deckprofil. Siehe auch Skizze in Tab. 31.

Der auftretende Dampfdruck wurde an 6 unterschiedlichen Positionen am Riegel aufgezeichnet. Die Lage der Fühler ist ebenfalls aus den Skizzen der Tab. 31 zu entnehmen. Der Probekörper 2 erhielt keine Druckausgleichsöffnungen am Riegel.

Tab. 31 Probekörperaufbau

Tetrastrahmen 1	System A	Tetrastrahmen 2	System A
			
			
<p>Beobachtungszeitraum: 25. Feb 2008 bis 02. März 2008. Ausgewertet wurde der 26. Feb 2008, Einstrahlung 520 W Die Messung ist direkt vergleichbar mit der Messung in Abschnitt 5.5.1</p>			

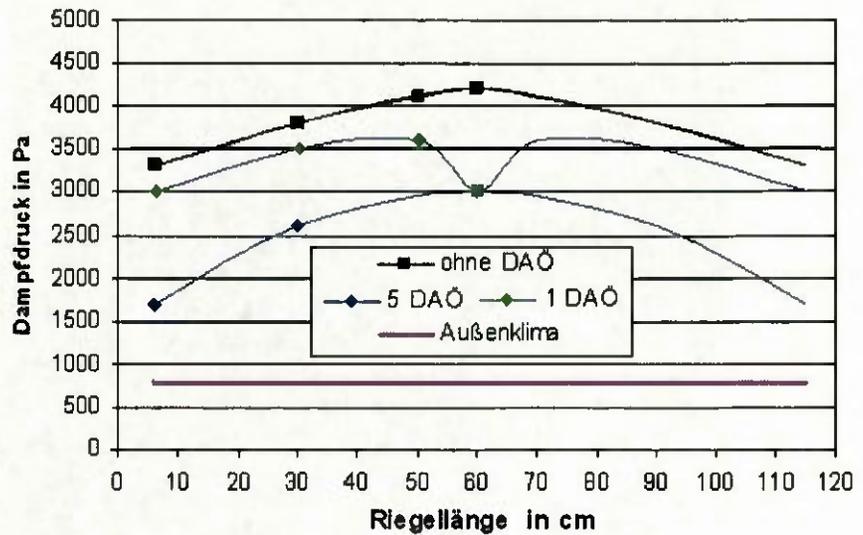


Abb. 58 Dampfdruck im Riegel, System A; Vergleich ohne Öffnung sowie mit einer Öffnung in Riegelmitte (Daten aus Kap 5.5.1) und mit fünf Öffnung verteilt über die Riegellänge

Tab. 32... Feststellungen

	Testrahmen 1	Testrahmen 2
max. Dampfdruck	ca. 3000 Pa	ca. 4200 Pa
Trocken 1	ca. 2 Tage	ca. 4 Tage
Trocken 2	ca. 2 Tage	ca. 6 Tage

Dampfdruckverlauf im Riegel

Die Werte über und unter der Falzraumdämmung sind nahezu identisch, aus diesem Grund sind in Abbildung Abb. 58 nur die Verläufe oberhalb der Falzraumdämmung dargestellt. Testrahmen 2 ohne zusätzlichen Druckausgleichsöffnung zeigt einen ca. 1200 Pa höheren Dampfdruckverlauf. Auch mit mehreren Dampfdruckausgleichsöffnungen ist der Dampfdruck in Riegelmitte wesentlich höher als an den Riegelenden. Der Einfluss des gut belüfteten Pfostens bestätigt sich auch bei diesen Messungen.

Austrocknung

Probekörpers 1 war bereits nach 2 Tagen ausgetrocknet. Probekörpers 2 benötigte 4 Tage länger und war erst nach ca. 6 Tagen ausgetrocknet.

Erkenntnisse

- Mehrere Druckausgleichsöffnungen im Riegel verringern wesentlich den Dampfdruck gegenüber einem Falzraum ohne Druckausgleichsöffnungen. Bei diesen Messungen verringerte sich der Dampfdruck um ca. 1/3
- Mehrere zusätzliche Dampfdruckausgleichsöffnungen im Riegel verkürzen die Austrocknungszeit des Falzraumes wesentlich.

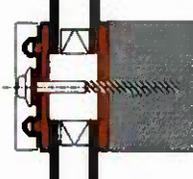
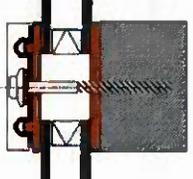
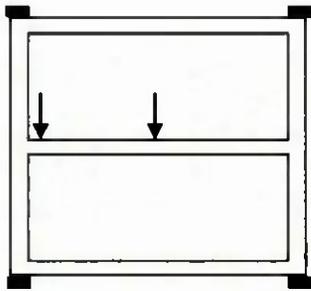
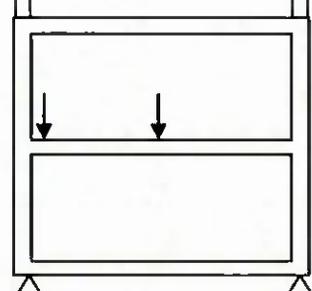
5.5.6 System B geschlossene Pfosten

Aufgrund der bisherigen Erkenntnisse wird davon ausgegangen, dass der Luftwechsel im Riegelfalzraum primär durch das thermisch bedingte Expansion bzw. Kontraktion der eingeschlossenen Luft verursacht wird. Durch dieses Pumpverhalten wird vor allem an den Riegelenden ein Luftaustausch mit der Außenluft ermöglicht. Die Riegelenden stehen mit dem Pfostenfalzraum in Verbindung, der durch thermisch induzierte Konvektion stets Luft mit dem Außenraum austauscht. Da die Systeme nicht absolut luftdicht verarbeitet werden können, liegt die Vermutung nahe, dass der Falzraum auch bei geschlossenen Pfostenenden ausreichend belüftet werden kann. Der folgende Versuch soll klären, in wie weit ein Austrocknen bei geschlossenen Pfostenenden stattfindet.

Probekörperaufbau:

Bei Testrahmen 1 wurden die offenen Enden der Pfosten oben und unten mit dauerplastischer Dichtmasse verschlossen. Testrahmen 2 bleibt unverändert.

Tab. 33 Probekörperaufbau

Testrahmen 1	System B	Testrahmen 2	System B
	<p>Pfosten oben und unten abgedichtet</p>		
			
<p>  Druckausgleichsöffnung  Kombinationssensor  Falzraumdämmung </p> <p style="text-align: center;"> Beobachtungszeitraum 21. Sep bis 25. Sep 2007 Ausgewertet wurde der 22. Sep 2007, Einstrahlung 620 W </p>			

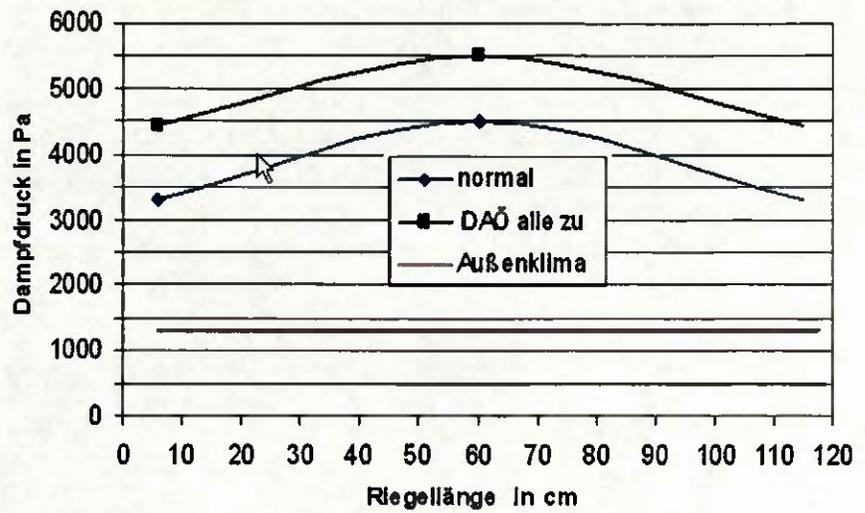


Abb. 59 Dampfdruck im Riegel, System B; Vergleich ohne Öffnung im Riegel, Pfosten oben und unten offen zu vollständig geschlossen

Tab. 34 Feststellungen

	Probekörper 1	Probekörper 2
max. Dampfdruck	ca. 5,5 kPa	ca. 4,5 kPa
Trocken 1	ca. 1 Tag	ca. 1 Tag
Trocken 2	ca. 4 Tage	ca. 4 Tage

Dampfdruckverlauf im Riegel

Der maximale Dampfdruck in Riegelmitte ist beim Testrahmen 1 um ca. 1 kPa höher als bei Testrahmen 2.

Austrocknung

Die Austrocknungszeit beträgt, begünstigt durch das Sommerklima, nur ca. 4 Tage. Trotz fehlender geplanter Druckausgleichsöffnungen zeigen sich im Trocknungsverhalten keine signifikanten Unterschiede.

Erkenntnisse

→ Bei geschlossenen Dampfdruckausgleichsöffnungen der Pfosten ist der Verlauf des Dampfdrucks im Riegel bei signifikant erhöhten Werten ähnlich.

→ Die Austrocknungszeit wird unter sommerlichen Bedingungen nicht wesentlich beeinflusst. Offensichtlich sind die verbleibenden Fugen für eine konvektive Feuchteabfuhr aus den Pfosten noch ausreichend.

5.5.7 Einfluss von Wind

Wie bereits erläutert reduzieren zusätzliche Öffnungen im Riegel das Dampfdruckniveau. Die direkte Wirkung ist dabei beidseitig auf ca. 10 cm begrenzt. Abb. 60 verdeutlicht dies noch mal am System B an einem windigen Tag mit Windgeschwindigkeiten von 1 bis 2 m/s.

Die blaue Kurve zeigt den Dampfdruck im Falzraum direkt an einer Druckausgleichsöffnung, die rote Kurve den Dampfdruck ca. 10 cm seitlich davon. Ein leichter veränderlicher Wind reicht demnach aus, um den Dampfdruck im Falzraum in direkter Nähe zur Druckausgleichsöffnungen zu senken. 10 cm von der Öffnung entfernt wird der Dampfdruck nur wenig beeinflusst.

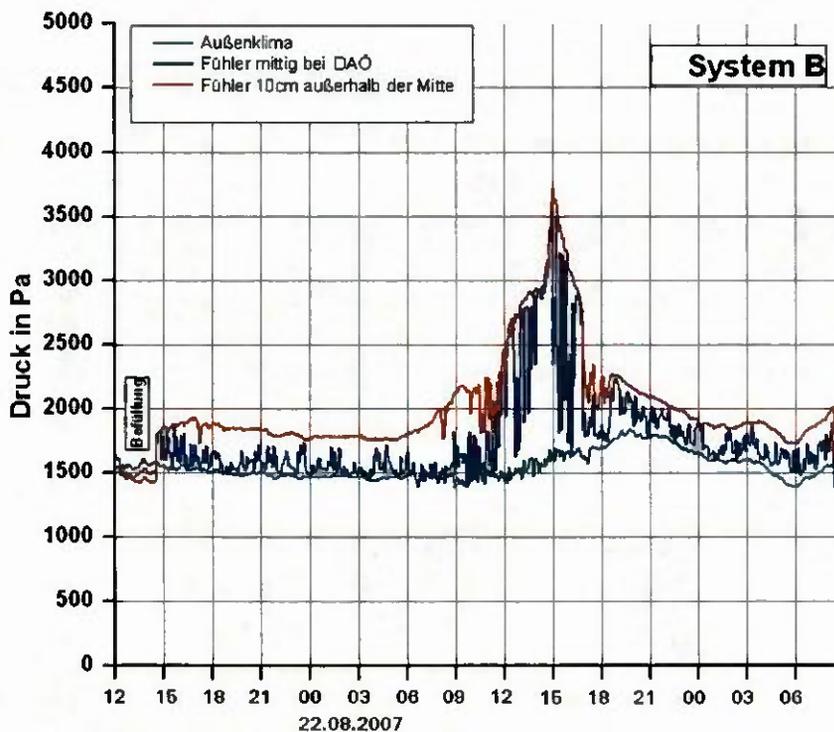
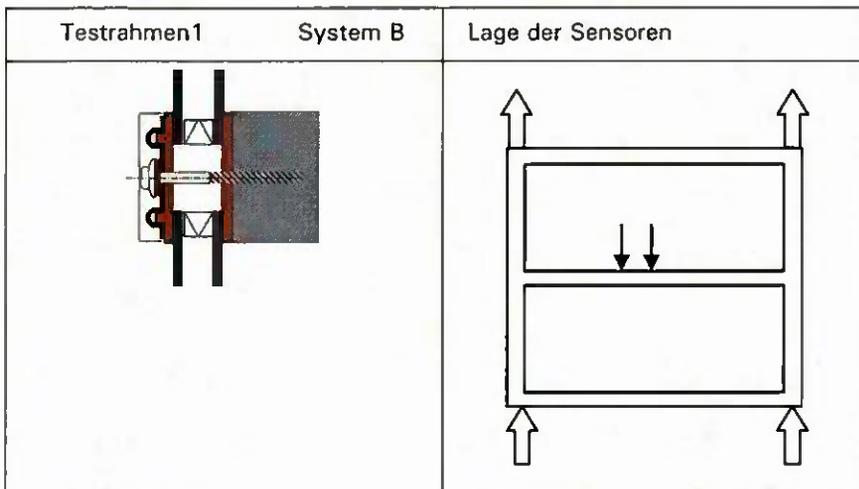


Abb. 60 Darstellung des Dampfdruckprofils im Riegel direkt an einer Druckausgleichsöffnung und 10 cm daneben.

5.5.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Dampfdruck im Pfostenfalraum

Durch die Dampfdruckausgleichsöffnungen am oberen und unteren Ende der Pfosten ist stets ein ausreichender Luftwechsel zwischen Pfostenfalraum und der Außenluft gegeben. Es wurden nur geringe und kurzfristige Dampfdruckanstiege festgestellt. Dies gilt auch, wenn im Pfosten eine Falraumdämmung eingebaut ist.

Treibende Kraft ist im Wesentlichen eine Temperaturdifferenz zwischen Glasfalraum und Außen. Bereits diffuse Einstrahlung genügt, um eine thermisch induzierte Strömung im Pfostenfalraum zu erzeugen.

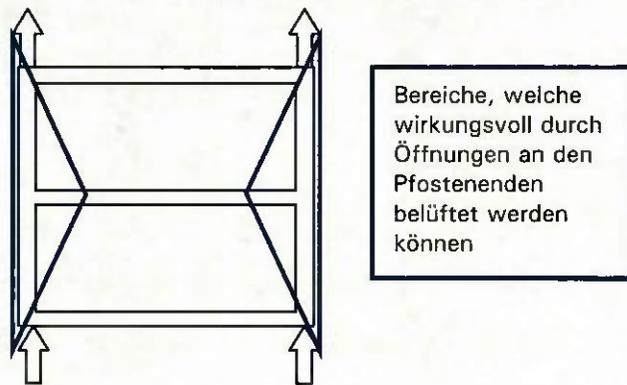


Abb. 61 Schematische Darstellung der gut belüfteten Bereiche durch Dampfdruckausgleichsöffnungen oben und unten an den Pfostenenden

Dampfdruck im Riegelfalraum

Die mit Abstand höchsten Dampfdrücke wurden in der Riegelmitte gemessen. Der Dampfdruck fällt rechts und links Richtung Pfosten ab, siehe Abb. 62. Der Falraum beginnt vom Pfostenanschluss her auszutrocknen, im mittleren Bereich hält sich die Feuchtigkeit am längsten. Es ist zu vermuten, dass der Luftwechsel im Riegelfalraum primär durch transiente Druckunterschiede verursacht wird, bedingt durch Windböen und durch thermisch bedingte Expansion/Kompression der Luft im Glasfalz. Reine Diffusionsprozesse verlaufen zu langsam und können die beobachteten Austrocknungszeiten des Glasfalzraumes im Riegel nicht erklären. Diffusion kann jedoch auf kurzen Distanzen zum Trocknungsprozess beitragen.

Da eine Temperaturänderung von 3°C eine Volumenänderung von 1% bzw. bei einem fiktiven „luftdichten“ isochoren System einen Druck von 1 kN/m^2 erzeugen würde, genügen schon kleine Fugen z.B. an Pfosten-Riegel-Verbindungen für einen Luftaustausch.

Zusätzliche Dampfdruckausgleichsöffnungen im Riegelfalraum

Einzelne Dampfdruckausgleichsöffnungen in der Riegelmitte verringerten den Dampfdruck in einem begrenzten Bereich um diese Druckausgleichsöffnung. Der Bereich ist auf ca. 20 cm bis 30 cm begrenzt, siehe Abb. 63.

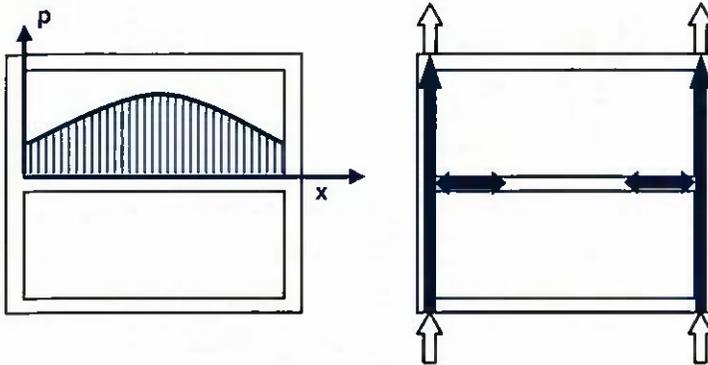


Abb. 62 links: Schematische Darstellung des Dampfdruckverlaufs im Riegelfalzraum
rechts: Schematische Darstellung der Luftbewegung in den Falzräumen

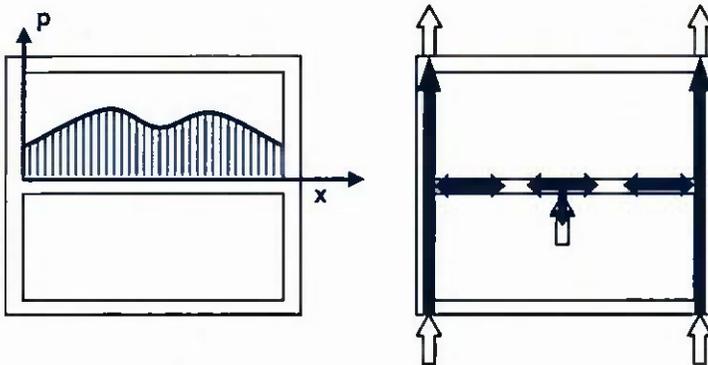


Abb. 63 links: Schematische Darstellung des Dampfdruckverlaufs im Riegelfalzraum
rechts: Schematische Darstellung der Luftbewegung in den Falzräumen

Aufgrund der beobachteten relativ hohen und unterschiedlichen Dampfdrücke längs des Riegels ist eine Durchströmung wie in Abb. 64 rechts angedeutet ausgeschlossen. Dies stimmt mit der theoretischen Druckverteilung einer Kaminströmung mit ähnlichen Ein- und Ausströmwiderständen überein. Eine Druckausgleichsöffnung in einem auf halber Pfostenhöhe angebrachten Riegel wirkt nicht als Zu- bzw. Abströmöffnung für eine Luftströmung zum Pfosten.

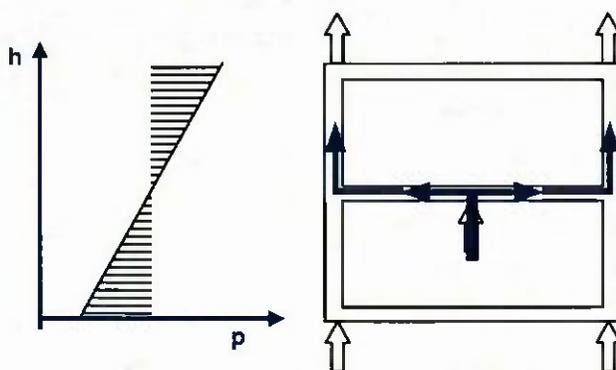


Abb. 64 links: Schematische Darstellung des Luftdruckverlaufs im Pfosten (Kamineffekt)
rechts: Schematische Darstellung einer erwünschten aber aufgrund des Luftdruckverlaufs nicht erfolgten Durchströmung der Riegelfalzräumen.

Zwei Dampfdruckausgleichsöffnungen jeweils an der Riegelseite

Zwei Dampfdruckausgleichsöffnungen an der Riegelseite ergeben ebenfalls ein parabelförmiges Dampfdruckprofil mit deutlich geringeren Maximalwerten, siehe Abb. 65.

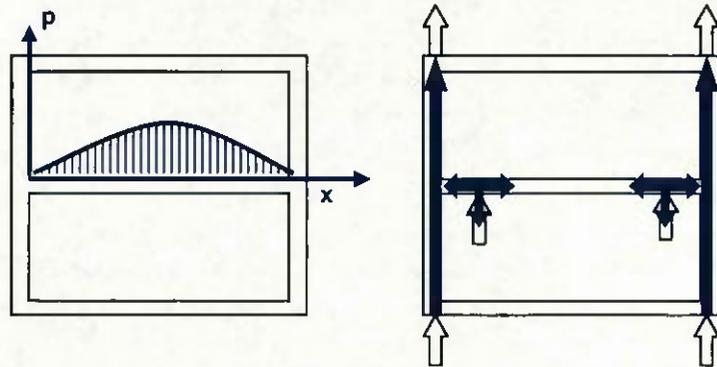


Abb. 65 links: Schematische Darstellung des Dampfdruckverlaufs im Riegelfalzraum mit zwei zusätzlichen Druckausgleichsöffnungen an den Riegelseiten.
rechts: Schematische Darstellung der Lüftungsmechanismen in den Falzräumen.

Dampfdruckausgleichsöffnungen in der Riegelmitte haben gegenüber seitlich angebrachter Dampfdruckausgleichsöffnungen leichte Vorteile, da sie den Bereich belüften in dem ansonsten der höchsten Dampfdruck vorliegt.

Mehrere Dampfdruckausgleichsöffnungen im Abstand von 25 cm

Der Einbau mehrerer Druckausgleichsöffnungen reduziert den Dampfdruck über die Riegellänge am wirkungsvollsten, siehe Darstellung der Abb. 66.

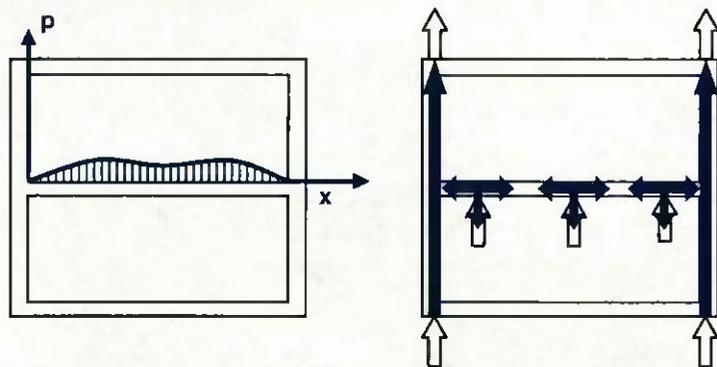


Abb. 66 links: Schematische Darstellung des Dampfdruckverlaufs im Riegelfalzraum mit mehreren zusätzlichen Druckausgleichsöffnungen.
rechts: Schematische Darstellung der Lüftungsmechanismen in den Falzräumen.

6 Wasserbrückenbildung im Falzraum

Aufgrund der Oberflächenspannung vereinigt sich in den Riegel-Falzraum gelangendes Wasser auf horizontalen Flächen zu größeren Wassertropfen, meist auf der oberen Kante der unteren Verglasung. Bei Systemen mit Falzraumdämmung sammelt sich das Wasser zunächst auf der oberen Dämmstofffläche. Ist der Abstand zwischen Dämmstoff und Verglasung gering genug, so kann es zu einer Brückenbildung zwischen Isolierglasrand und Dämmstoffoberfläche kommen. Hierdurch verringert sich die freie zur Verdunstung zu Verfügung stehende Oberfläche und die Austrocknungszeit verlängert sich.

Aus diesem Grund wurde untersucht, bis zu welchem Abstand zwischen Falzraumdämmung und Isolierglasrand sich bei den vorliegenden Materialien Wasserbrücken bilden. Für die Tropfenform bzw. für den Kontaktwinkel des Wassers zur den Oberflächen ist die Oberflächenspannung die wesentliche Größe. Hierzu wurden keine systematischen Untersuchungen durchgeführt. Die vorliegenden Ergebnisse dienen daher nur zur Orientierung. Allerdings wären allgemeingültige Aussagen auf Grundlage einer weitergehenden Untersuchung wünschenswert.

Durchführung

An einem Riegelstück des Systems A mit Falzraumdämmung wurde als obere Füllung eine Acrylglasleiste eingesetzt. Das Acrylglas ermöglicht eine direkte Beobachtung des Falzraums. So kann die Tropfenform bzw. eine Brückenbildung visuell leicht festgestellt werden. Mit einer Spritze wurde zwischen Außendichtung und Füllung Regenwasser in 0,5 Milliliter Schritten in den Falzraum eingebracht, siehe Abb. 67 links. Damit wurde ein Wassereintritt von außen durch die Druckprofildichtung simuliert. Der Abstand zwischen Falzraumdämmung und Füllungsrand wurde von 2 mm bis 6 mm variiert.

Abb. 68 bis Abb. 70 zeigen die Tropfenbilder des eingebrachten Regenwassers. Während bei Abständen unter 4 mm schon kleine Tropfen (0,5 ml) Brücken bilden, sind bei einem Abstand von 6 mm auch größere Tropfen hierzu nicht mehr in der Lage.

In einer zweiten Versuchsreihe sollten praxisrelevante Oberflächen, also eine übliche Falzraumdämmung und ein marktübliches Isolierglas getestet werden. Nachteilig bei diesem Aufbau (siehe Abb. 67 rechts) ist, dass nun Tropfenform und eine eventuelle Brückenbildung nur von der Seite beobachtet werden kann.

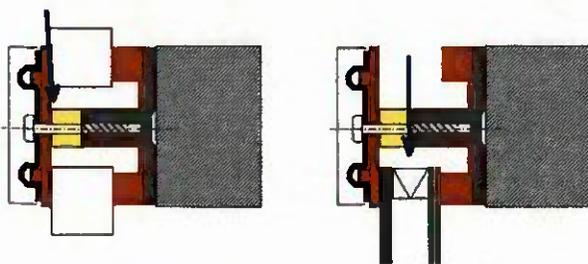


Abb. 67 Wasserbrückenbildung im Glasfalz
links: Versuchsaufbau mit Acrylglas; rechts Versuchsaufbau mit Isolierglas

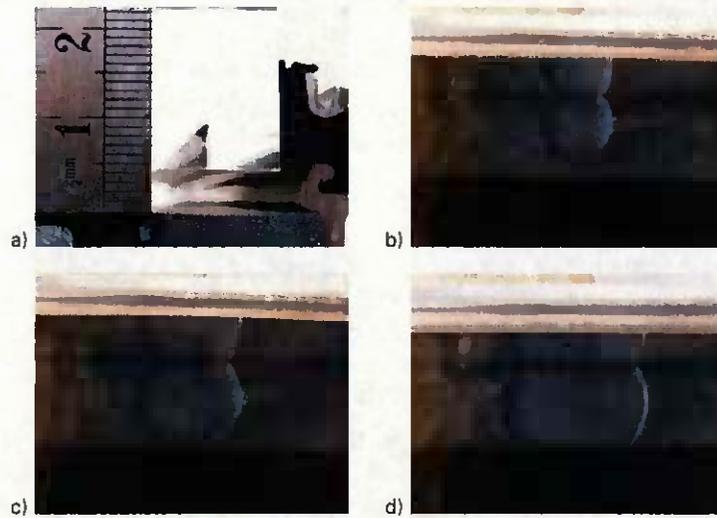


Abb. 68 a) Abstand 4 mm; b) Tropfen 0,5 ml; c) Tropfen 1 ml; d) Tropfen 2 ml
Eingebrachte Tropfen führen zu einer Brückenbildung.

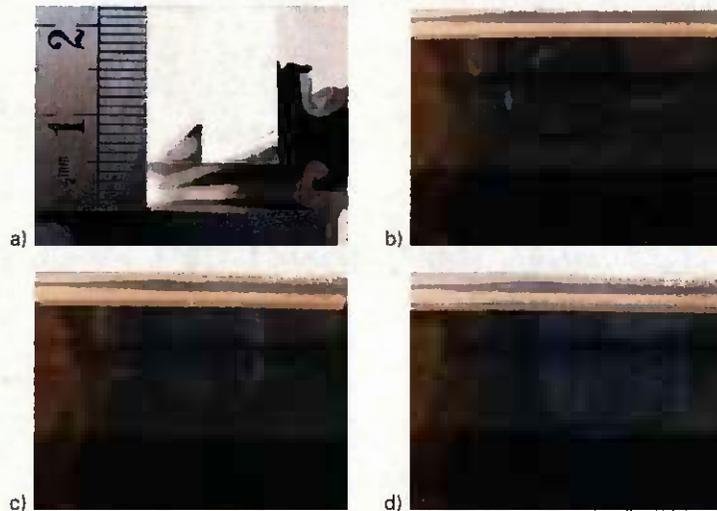


Abb. 69 a) Abstand 5 mm; b) Tropfen 0,5 ml; c) Tropfen 1 ml; d) Tropfen 2 ml
Ab einer Tropfengröße von 1 ml bildet sich eine Brücke.

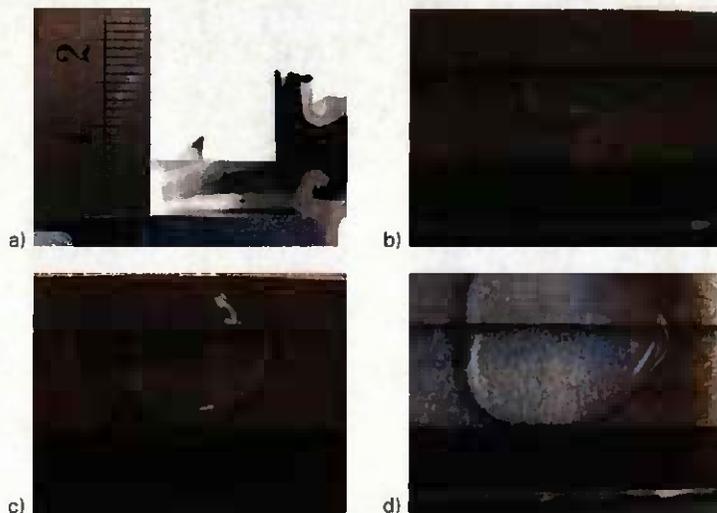


Abb. 70 a) Abstand 6 mm; b) Tropfen 0,5 ml; c) Tropfen 1 ml; d) Tropfen 2 ml
Auch große Tropfen von 2 ml bilden keine Brücke

Das Regenwasser wurde wieder in 0,5 Milliliter Schritten mit einer Spritze von oben durch die Falzraumdämmung in den unteren Falzraum eingebracht. Der Abstand zwischen Falzraumdämmung und Isolierglasrand wurde von 4 mm bis 7 mm variiert. Abb. 70 und Abb. 71 zeigen die Tropfenbilder des eingebrachten Regenwassers vom Riegelende aus.

Bei einem Abstand von ca. 4 mm bilden sich deutlich Wasserbrücken aus. Bis zu einem Abstand von 6 mm bleiben noch kleinere Brücken bestehen, wobei größere Tropfen zunehmend weniger Kontakt zur Falzraumdämmung haben. Erst bei einem Abstand von 7 mm tropft Wasser ohne Brückenbildung ab.

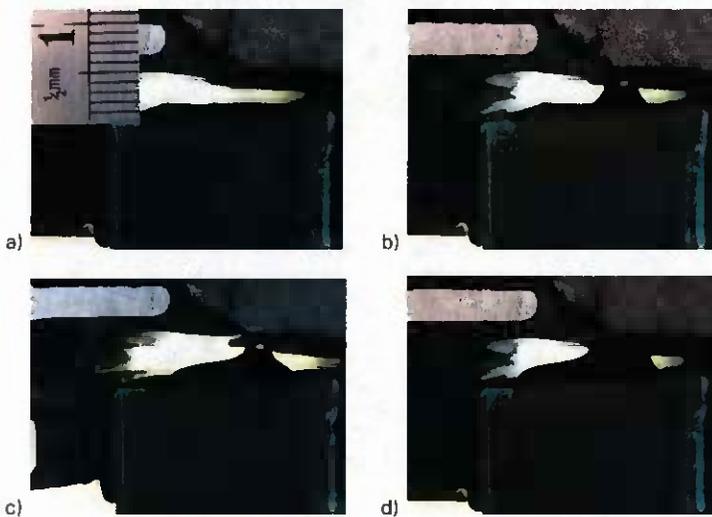


Abb. 71 a) Abstand 5 mm; b) Tropfen 0,5 ml; c) Tropfen 1 ml; d) Tropfen 2 ml. Eingebrachte Tropfen führen zu einer Brückenbildung.

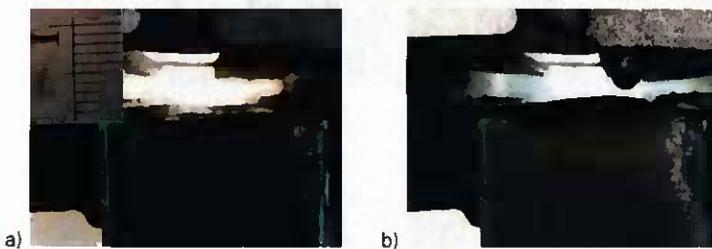


Abb. 72 Bei einem Abstand zwischen Falzraumdämmung und Verglasung von ca. 7 mm tropft das Wasser ab, es bildet sich keine Brücke mehr.

7 Versuche an Testfassaden

7.1 Vergleich Testelemente – Testfassade

Die Testfassade dient als Referenz zu den Untersuchungen an den Testelementen. An der Testfassade wurden während der Datenaufzeichnung keine Veränderungen wie künstliche Feuchtebelastung oder Umbauten vorgenommen. Vielmehr sollen die an den Testrahmen im Labormaßstab gewonnenen Daten durch eine natürlich bewitterte Fassade praxisrelevanter Größe ergänzt werden. Außerdem sollten zusätzlich Holzfeuchtemessungen unter realen Bedingungen durchgeführt werden.

7.2 Aufbau der Testfassade

Vor der Südwestwand der Prüfhalle des ift Rosenheim wurde eine Testfassade mit 6 m Breite und 3,5 m Höhe aufgebaut, siehe Abb. 73. Zwischen der Fassade und der Außenwand ergibt sich ein Innenraum von ca. 1,6 m Breite. Bodenplatte und Seitenwände konnten von einem Vorprojekt übernommen werden. Als Dach wurde eine zweistufige Sparrenkonstruktion aufgebaut. Über die komplette Länge konnte so eine regensichere 10 cm breite Abluftöffnung geschaffen werden. In Verbindung mit drei Zuluftöffnungen von ca. 30 cm x 80 cm in der Bodenplatte konnte im Sommer eine Überhitzung wirkungsvoll verhindert werden. Zwischen September und April wurden die Zuluft- und Abluftöffnungen verschlossen und das Sparrendach mit einer Zwischensparrendämmung und luftdichter Dampfbremse versehen.

Die Testfassade besteht aus 3 gleichgroßen, leiterförmigen Teilen der Fassadensysteme Typ A, B und C wie in Kapitel 2.5 beschrieben. Die drei Fassadentypen wurden unabhängig aufgebaut, so dass zwischen den Falzräumen keine Verbindung besteht. Die Falzräume der Pfostenprofile sind oben und unten geöffnet, so dass hier ein Druckausgleich möglich ist.



Abb. 73 Außenansicht der Testfassade an der Prüfhalle des ift Rosenheim

Für die Pfosten- und Riegelprofile wurde Brettschichtholz der Dimension 60 mm x 140 mm verwendet. Das Brettschichtholz wurde mit dem Holzschutzmittel „Aidol Holzschutzlasur – Eiche hell“ behandelt. Dadurch wird ein üblicher UV-Schutz und Wetterschutz erreicht.

Ausgefacht wurde die Fassade mit Wärmeschutz-Isolierglas (Aufbau: 6–16Ar–:6, thermisch verbessertes Randverbundsystem, $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$). Die Systeme wurden nach Herstellerangaben montiert und mit pressblanken Abdeckprofilen versehen.

7.3 Messtechnik

7.3.1 Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit im Falzraum

In den Falzräumen wurden insgesamt 40 Sensoren für relative Luftfeuchte und Temperatur eingebaut. Die Sensoren wurden mit Hilfe von Distanzklötzen mittig im Falzraum positioniert. Die Steckbuchse der Fühler wurde mit einer Kabelschelle an die Distanzklötze geschraubt oder mit einem Aluminium Klebeband fixiert, um eine sichere Position zu gewährleisten, siehe Abb. 74 bis Abb. 76.

Aufgrund des engen Falzraumes im System A wurden die Kabel nicht im Falzraum geführt, sondern ca. 10 cm nach dem Fühler durch die raumseitige Dichtung nach innen geführt. Die Stelle der Kabeldurchführung wurde mit Dichtstoff versiegelt. Die folgenden Bilder zeigen die eingebauten Fühler bzw. die Fühlerkabelbefestigung.



Abb. 74 System A Einbau der Sensoren im Falzraum



Abb. 75 System B
Einbau der Sensoren im Falzraum

Abb. 76 System C
Einbau der Sensoren im Falzraum

Abb. 77 zeigt die Lage der einzelnen Sensoren (Temperatur und Luftfeuchte) in den Falzräumen der Fassade

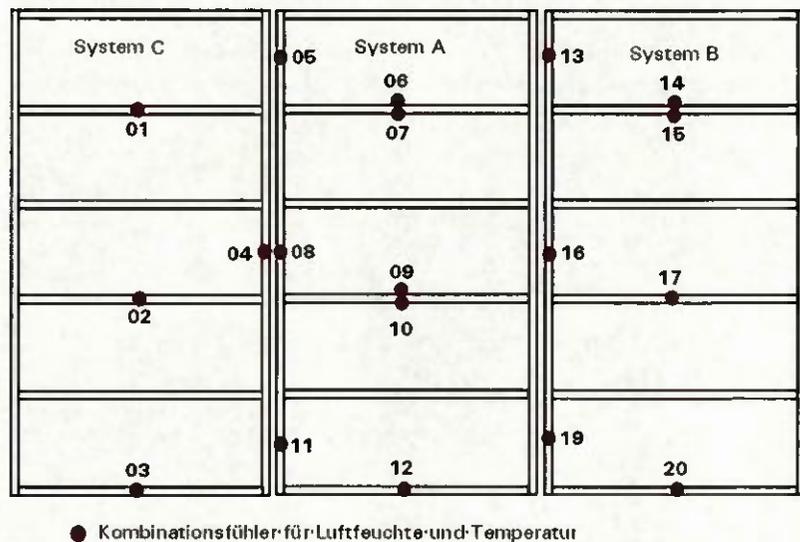


Abb. 77 Lage und Kennung der Sensoren an der Testfassade (Ansicht von außen)

7.3.2 Außenklima, Solarstrahlung, Regensensor

Für die Aufzeichnung des Außenklimas, der Solarstrahlung und des Niederschlags wurden baugleiche Messgeräte wie bei den Testelementen verwendet, siehe Kapitel 4.2. Abb. 78 zeigt beispielhaft das vor der Fassade installierte Solarimeter zur Erfassung der Einstrahlung.



Abb. 78 Solarimeter an der Testfassade

7.3.3 Raumseitige Klimatisierung

Auf der Raumseite sollte „natürliches“ Innenraumklima herrschen. Eine Klimatisierung auf DIN 4108 Normklima mit 20°C und 50% relativer Feuchte in engen Grenzen war nicht vorgesehen. Im Sommer wurden bedarfsweise die Belüftungsöffnungen geöffnet und die Türe zur dahinter liegenden Prüfhalle offen gehalten. Mit diesen Maßnahmen wurde ein ausreichend stabiles Innenklima erreicht.

Um im Winter auf der Raumseite der Testfassade ein gleichmäßiges Klima von 18-20°C und ca. 50 % relative Luftfeuchte zu erreichen, war es erforderlich, den Raum von der ift Prüfhalle abzutrennen und gesondert zu beheizen und zu befeuchten. Dazu wurden im Innenraum der Testfassade ein selbstständig regelnder Luftbefeuchter und ein elektrischer Heizlüfter installiert. Die Verbindungstüre zwischen der ift Prüfhalle und dem Innenraum der Testfassade wurde geschlossen gehalten



Abb. 79 Luftbefeuchter und Heizlüfter im Innenraum der Testfassade

7.3.4 Holzfeuchte

Zur Erfassung der Holzfeuchte der Pfosten und Riegelhölzer wurde das Messsystem Hydromette M4050 der Fa. GANN eingesetzt. An den Holzprofilen wurden Elektroden mit isoliertem Schaft und unterschiedlichen Längen mit einer Bohrlehre mit einem Abstand von 29 mm an folgenden drei Positionen installiert, siehe Abb. 80

- Position 1: Fühler in der Mitte des Holzprofils im Bereich des Falzraumes
- Position 2: Fühler im Bereich der Dichtung
- Position 3: Fühler in der Mitte des Holzprofils auf der Raumseite.

Zur Vereinfachung der Datenerfassung wurden die Elektroden an zwei Umschalter Typ KTMU10 der Fa. Gann angeschlossen. Zur Anwendung kamen nur Steckverbindungen aus Edelstahl.

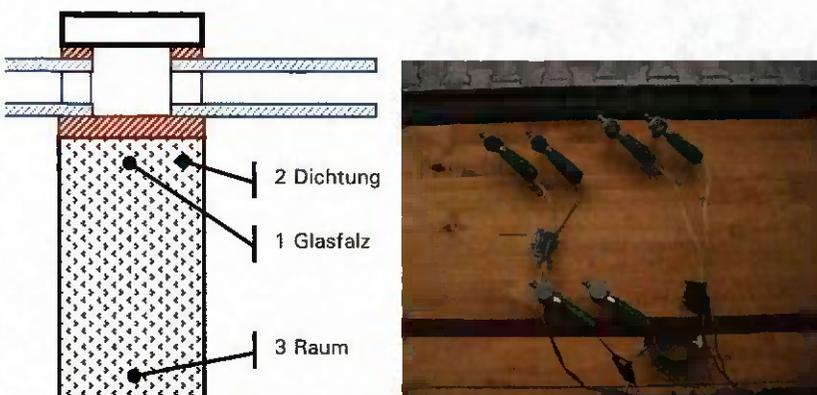


Abb. 80 Position der Messelektroden zur Bestimmung der Holzfeuchte

Lage der Holzfeuchtemessstellen

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Dampfdruckmessungen an den Testelementen, siehe Kapitel 5.5.8 wurden die Holzfeuchtemessstellen jeweils in Riegelmitte und zusätzlich auf halber Höhe der Pfosten installiert. Beim diffusionsoffenen System C wurden weitere Messstellen im untersten Riegel und zweitobersten Riegel eingebaut. Eine Übersicht über die Messstellen ist zeigt Abb. 81.

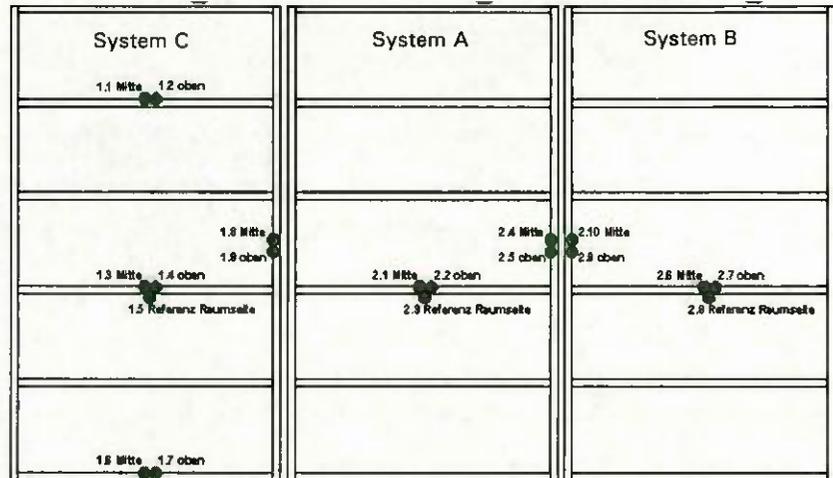


Abb. 81 Lage der Holzfeuchtemessstellen

7.3.5 Datenerfassung

Die Datenerfassung erfolgt durch Auslesen der einzelnen Messstellen mit dem elektronischen Holzfeuchtemessgerät Hydromette M4050. Weiterhin werden die Außentemperatur und die Raumlufttemperatur aufgenommen.

Bei der Auswertung der Holzfeuchte wurden die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Messverfahrens berücksichtigt. Hierzu wurde die Temperatur der Messstelle im Holzquerschnitt auf Grundlage von Isothermenberechnungen abhängig von der Außentemperatur abgeschätzt und die Werte entsprechend der Angabe des Messgeräteherstellers korrigiert. Die Temperaturkorrektur lag bei maximal 1% der Holzfeuchte und damit im Bereich der erreichbaren Genauigkeit des Messverfahrens.

Beim System A ist auf der Außenseite des Holzprofils ein Grundprofil aus Aluminium aufgeschraubt. Da sich die Messelektroden bei Position 1 in einem geringen Abstand (5 mm) zu diesem Profil befinden, wurde der Einfluss des Aluminiumprofils auf die Messergebnisse untersucht. Durch Vergleichsmessungen mit und ohne Aluminiumprofil wurde festgestellt, dass es zu keiner signifikanten Abweichung der Messwerte kommt.

7.4 Messergebnisse

7.4.1 Falzraumklima

Die Messdaten der Testfassade wurden im Zeitraum Jan 2007 bis Dezember 2007 in 4 min kontinuierlich (4 min Intervalle) aufgezeichnet. Die folgenden Diagramme zeigen jeweils für die Systeme A, B und C für unterschiedliche Glasfalzpositionen die maximale, die mittlere und die minimale Temperatur sowie den mittleren Wasserdampfdruck. Die Mittelwerte gelten jeweils für den angegebenen Zeitraum.

Abb. 82 zeigt den Mittelwert des Dampfdrucks und der Temperatur im Januar 2007 an insgesamt 18 Messstellen der Testfassade. Die Kennung der Messstellen ergibt sich aus Abb. 77. Die mittlere Temperatur liegt bei allen Messstellen ähnlich bei $12 \pm 2^\circ\text{C}$, ebenso die Minimaltemperaturen bei $2 \pm 2^\circ\text{C}$.

Auffällig ist, dass sich bei Pfosten und Riegel jeweils ein Temperaturgefälle von 4°C über der Fassadenhöhe ergibt, besonders deutlich ist dies im Pfosten von System B (dunkle Balken, Kennung T13, T16, T19). Dies gilt im Prinzip auch bei solarer Einstrahlung mit Temperaturen bis 38°C . Insgesamt ist die Temperatur im Glasfalz bei System A um 2 bis 3°C höher.

Der mittlere Dampfdruck ist in allen drei Systemen ähnlich im Bereich von 700 bis 900 Pa, wobei System A die signifikant höheren Werte aufweist.

Die folgenden Abb. 83 bis Abb. 89 zeigen in gleicher Darstellung Feb 07, Mai 07, Aug 07 und Nov 07. Es höchsten Temperaturen treten im Mai in den Riegeln mit ca. 65°C auf, wobei System A mit fast 70°C noch etwas höher liegt. Die Pfostentemperatur liegt mit etwas über 50°C deutlich darunter.

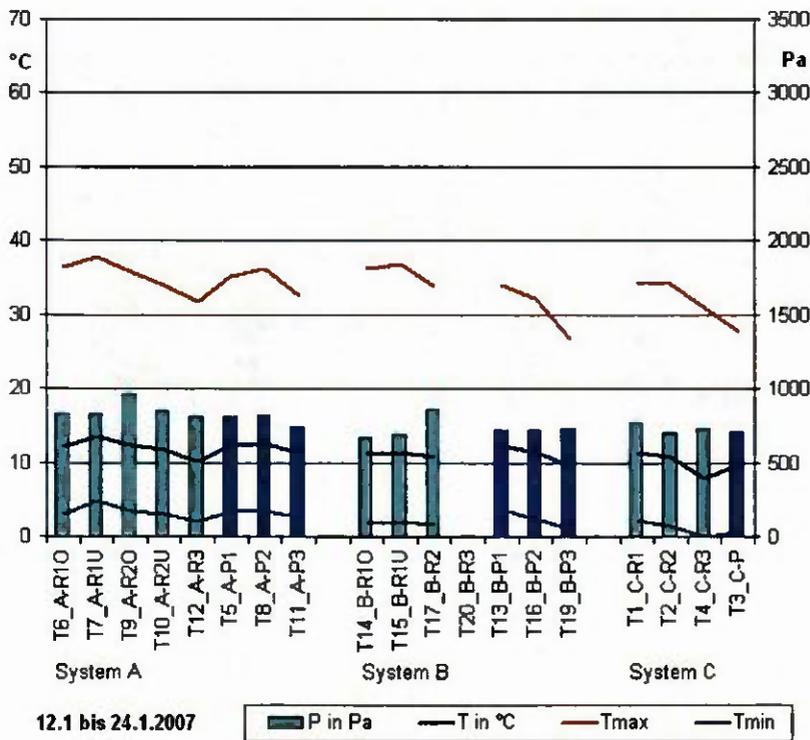


Abb. 82 Dampfdruck und Temperatur (Minimalwert, Mittelwert und Maximalwert) der Testfassade im Januar 2007. Werte jeweils in Mitte der Riegelprofile (helle Balken) und in den Pfosten auf unterschiedlicher Höhe (dunkle Balken)

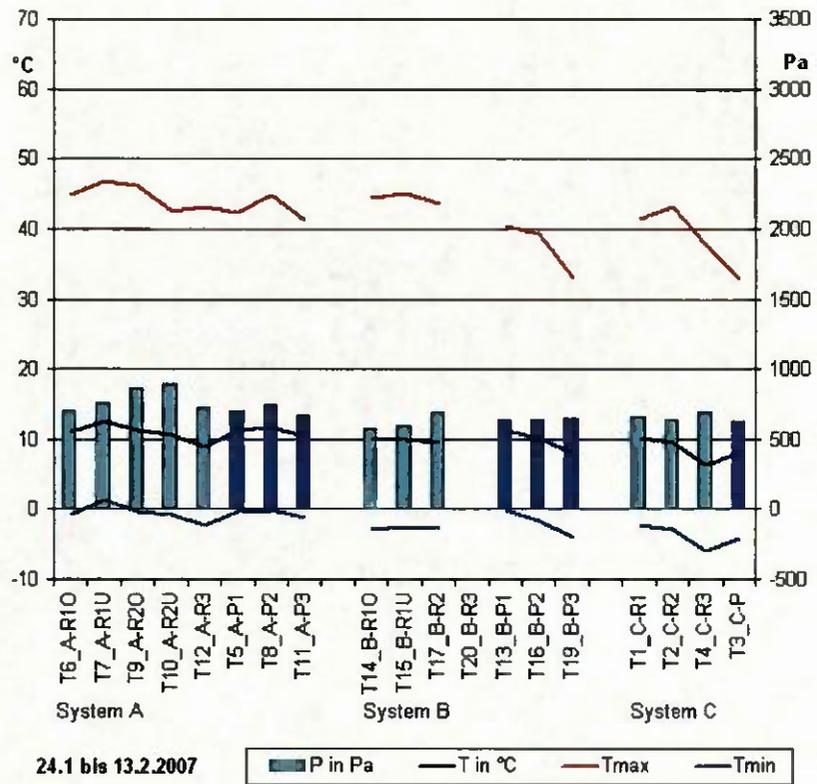


Abb. 83 Dampfdruck und Temperatur der Testfassade im Januar/Februar 2007

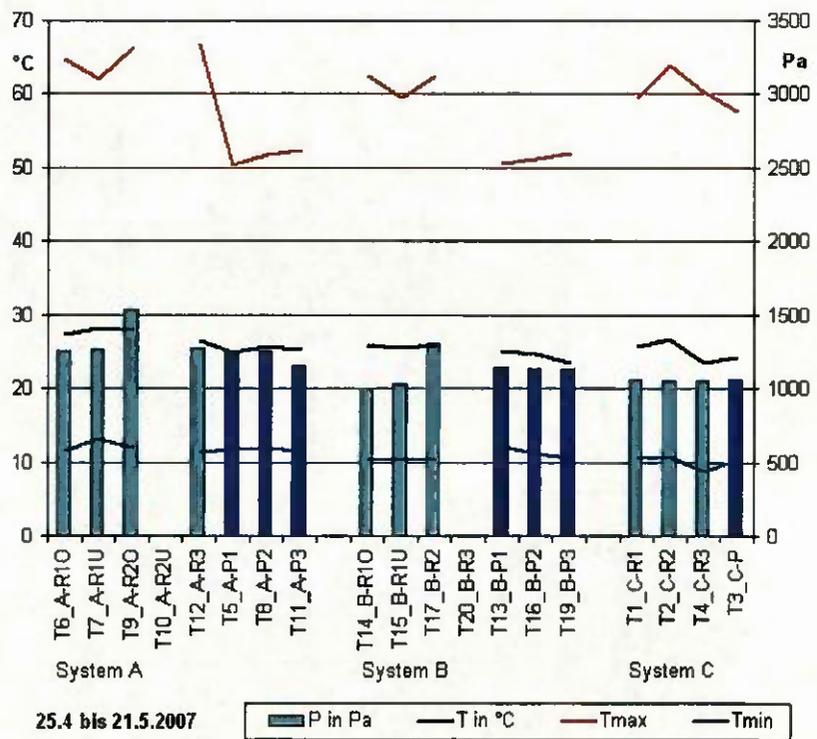


Abb. 84 Dampfdruck und Temperatur der Testfassade im April/Mai 2007.

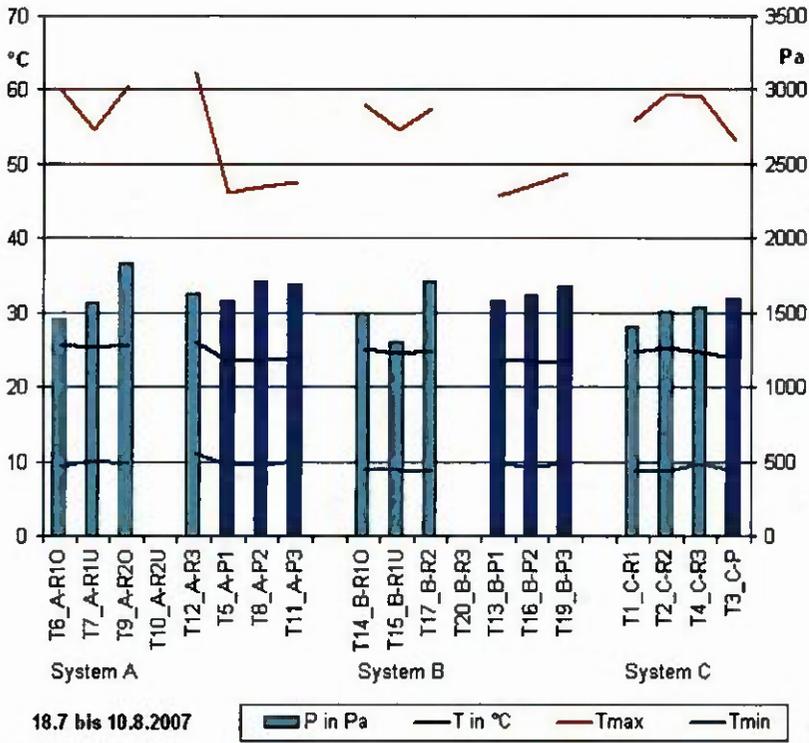


Abb. 85 Dampfdruck und Temperatur der Testfassade im Juli/August 2007.

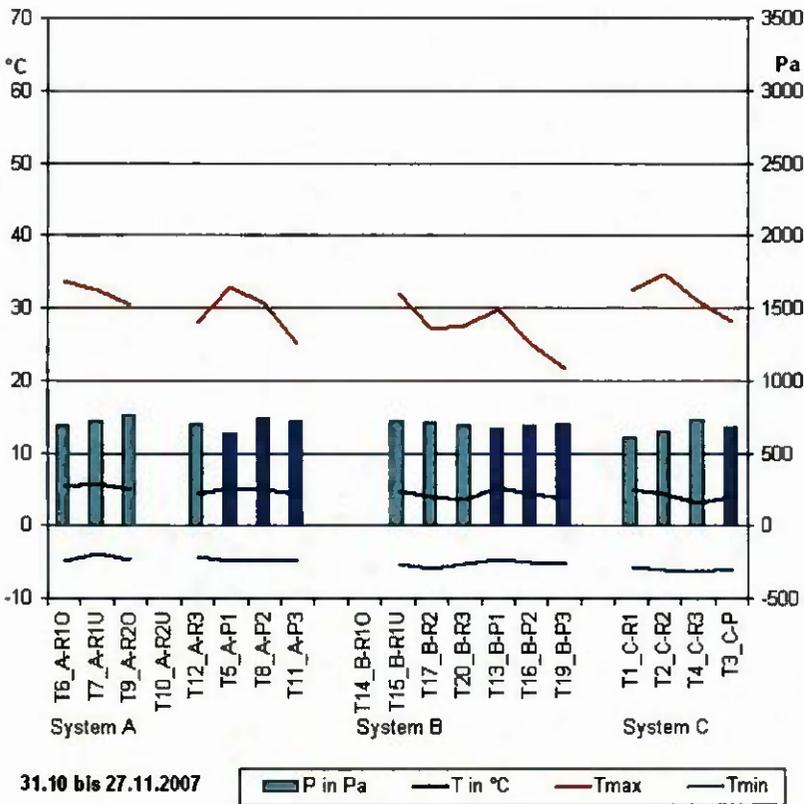


Abb. 86 Dampfdruck und Temperatur der Testfassade im November.

Der Jahresverlauf des mittleren Dampfdrucks der Systeme A, B und C (gemittelt über alle Messstellen in Pfosten und Riegel) ist in Abb. 89 dargestellt. System B und C verhalten sich sehr ähnlich, wobei das diffusionsoffene System C im Sommer noch etwas geringere Werte zeigt. System A hat zu Beginn der Messungen 10 bis 50% höhere Werte, welche im Sommer und Herbst jedoch nur noch geringfügig über den Werten der Systeme B und C liegen.

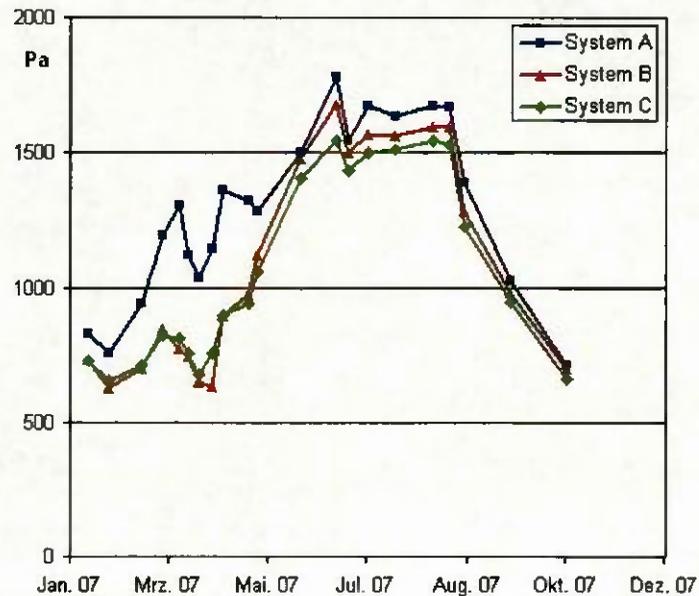


Abb. 87 Jahresverlauf des mittleren Dampfdruck im Glasfalzraum der Systeme A, B und C.

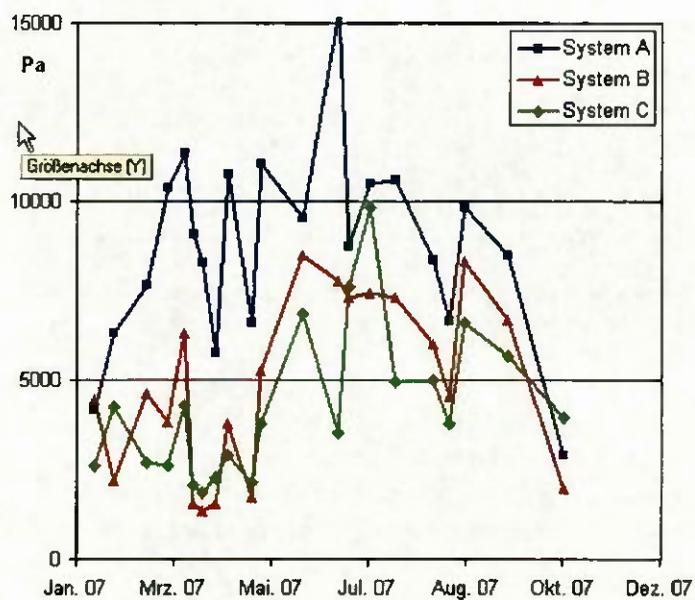


Abb. 88 Jahresverlauf des maximalen Dampfdruck im Glasfalzraum der Systeme A, B und C.

Der maximal auftretende Dampfdruck von 15 kPa liegt um einen Faktor 10 über den Mittelwerten und entspricht bei 60°C einer relativen Luftfeuchte von 75%. System A weist hier die höchsten Temperaturen und Dampfdrücke auf. Der unsystematische Verlauf des maximalen Dampfdrucks erklärt sich aus einzelnen Niederschlagsereignissen.

Wie Abb. 89 zeigt, wirkt sich Schlagregen direkt am Dampfdruckverlauf des darauf folgenden Tages aus. Jeweils am Nachmittag des 20.07.2007 und 24.07.2007 gab es Gewitter mit Starkregen, siehe blaue Linie in Abb. 89. System A zeigt am nächsten Tag bei Sonneneinstrahlung einen starken Dampfdruckanstieg, System B und insbesondere System C reagieren wesentlich schwächer. Am zweiten Tag nach der Schlagregenbelastung ist der starke Dampfdruckanstieg in System A bereits zurückgegangen und liegt im für System A üblichen Bereich.

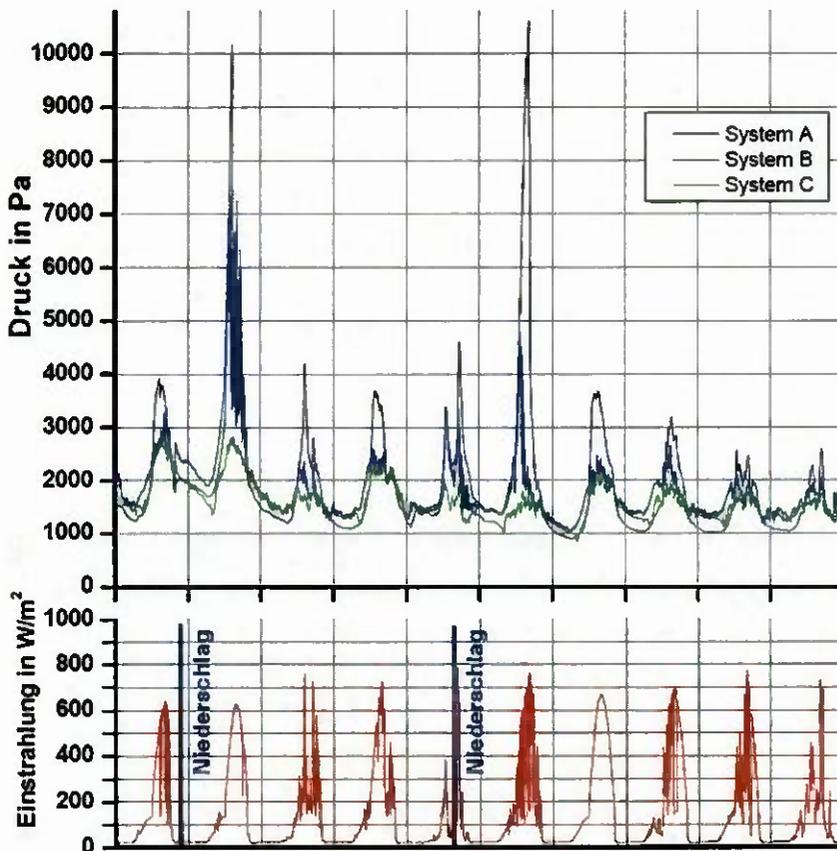


Abb. 89 Vergleich des Dampfdruckverlaufes im Riegelglasfalz der Systeme A, B und C im Sommer nach Niederschlägen (Zeitraum 20.07 bis 30.07.2007)

System A reagiert besonders in den Riegeln mit hohem Dampfdruck. Abb. 90 zeigt den typischen Dampfdruckverlauf eines Tages mit klarem Wetter an der Testfassade bei System A. Der Dampfdruck in der Mitte des Riegels steigt gegenüber dem Außenklima mit zunehmender Einstrahlung an. Die ist nur möglich, wenn im Glasfalz „verstecktes“ Wasser durch die steigende Temperatur in die Gasphase übertritt, aber wegen der engen Falzraumquerschnitte konvektiv nur wenig abgeführt wird.

Die Pfosten sind dagegen oben und unten zum Außenklima hin geöffnet, so dass durch den thermisch indizierten Auftrieb ein effektiver Dampfdruckausgleich ermöglicht wird.

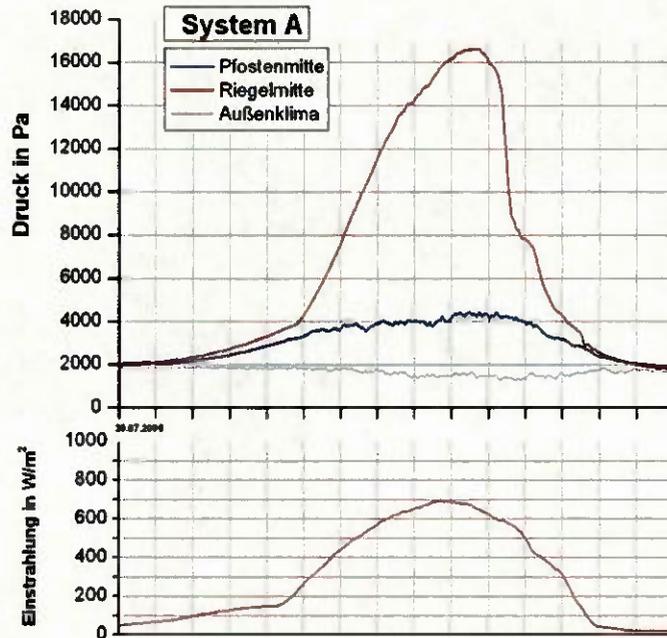


Abb. 90 Vergleich des Dampfdruckverlaufes in Pfostenmitte (rot) und in Riegelmitte (blau). Die untere Kurve zeigt die solare Einstrahlung.

Für die Feuchtebelastung eines Bauteils sind sowohl die Höhe des Dampfdrucks also auch die Einwirkungsdauer maßgebend. Abb. 91 zeigt die Gesamtbelastung in der Einheit $\text{kPa}\cdot\text{d/a}$ ($\text{kPa}\cdot\text{Tage pro Jahr}$) für die Systeme A, B und C im Jahr 2007. Die Systeme B und C sind mit ca. $400 \text{ kPa}\cdot\text{d/a}$ bzw. $390 \text{ kPa}\cdot\text{d/a}$ etwa gleichwertig, wobei das diffusionsoffene System geringfügig niedriger liegt. Das System A mit Falzraumdämmung weist demgegenüber ca. 15% höhere Gesamtfeuchtebelastung auf.

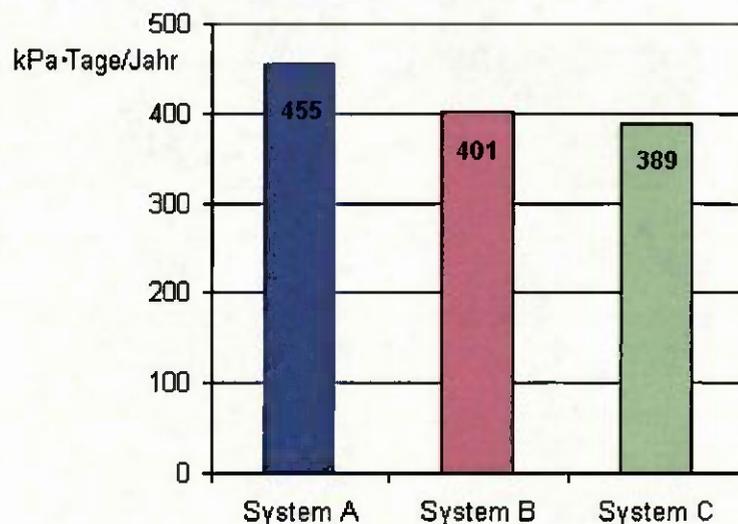


Abb. 91 Feuchtebeanspruchung im Glasfalz der Systeme A, B und C im Zeitraum Jan 07 bis Dez 07

7.4.2 Holzfeuchtigkeit

7.4.3 Ergebnisse der Holzfeuchtemessung

Zwischen September 2006 und Oktober 2007 wurden über 600 Einzelmessungen durchgeführt. Abb. 92 bis Abb. 94 zeigen die Holzfeuchte an den Riegelprofilen der Systeme A, B und C.

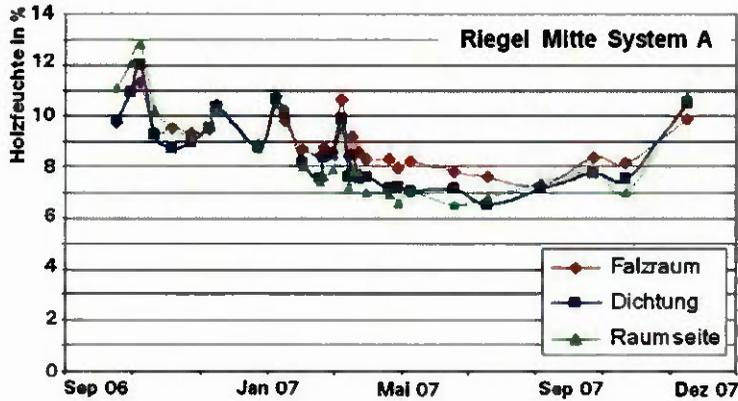


Abb. 92 Holzfeuchte am Riegel des Systems A

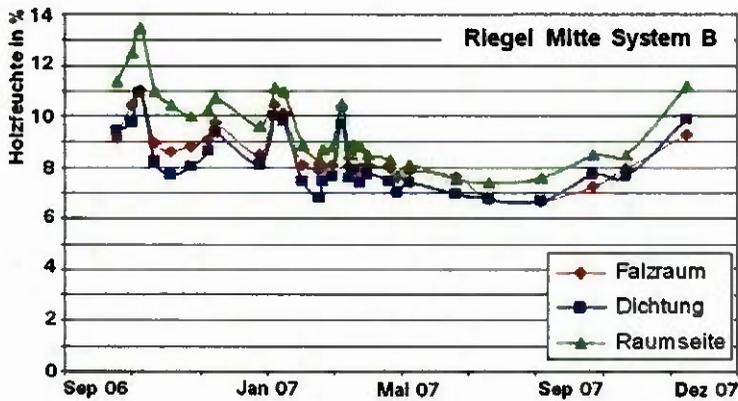


Abb. 93 Holzfeuchte am Riegel des Systems B

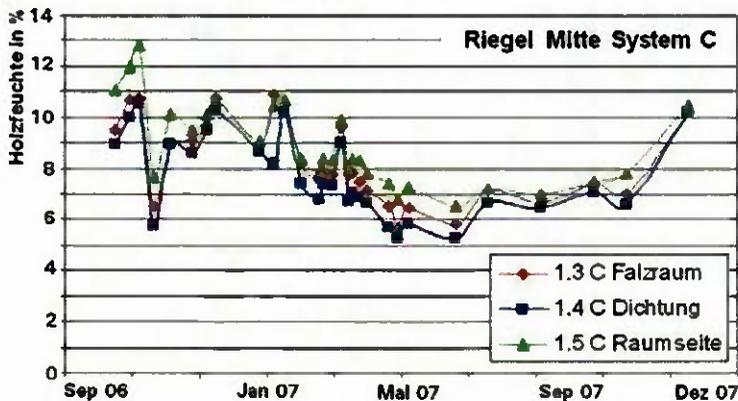


Abb. 94 Holzfeuchte am Riegel des Systems C

Feststellungen

Die Holzfeuchte der Riegelprofile liegt im Bereich zwischen 5% und 14%. Damit liegen die Werte weit unterhalb der kritischen Holzfeuchte von 20%. Erst bei länger anhaltender Holzfeuchte ab 20% und darüber besteht die Gefahr der Holzschädigung.

In der kalten Jahreszeit zwischen November 2006 und März 2007 wurden durchschnittliche Holzfeuchtigkeiten zwischen 9% und 10% gemessen. In der warmen Jahreszeit zwischen April 2007 und September 2007 lagen die Holzfeuchtigkeiten zwischen 7% und 8% und damit durchschnittlich 2% niedriger.

Aus den Diagrammen ist zu entnehmen, dass die Holzfeuchte über dem Holzquerschnitt nur geringe Abweichungen von max. 2% aufweist. Vor allem in der kalten Jahreszeit hätten auf Grund theoretischer Überlegungen auf der Außenseite des Holzquerschnittes höhere Holzfeuchten auftreten sollen. Dies wurde nicht bestätigt.

Im Vergleich der Systeme A, B und C ergaben sich nur geringe Unterschiede. Betrachtet man die Durchschnittswerte im Bereich des Falzraumes, so wurde beim diffusionsoffenen System C die geringste Holzfeuchte gemessen. System A und System B haben unwesentlich höhere Holzfeuchte. Diese Tendenz entspricht den theoretischen Erwartungen.

Das teilweise aufgrund theoretischer Überlegungen abgeleitete Risiko der Durchfeuchtung bei diffusionsdichten Systemen (System A und B) konnte nicht bestätigt werden. Dies stimmt mit den in Kapitel 2.3 beschriebenen Erfahrungen aus Gutachten überein. Eine mögliche erhöhte Feuchtebelastung des Holzes von der Seite des Glasfalzraumes durch Schlagregenbelastung konnte ebenfalls nicht festgestellt werden.

Die Austrocknung erfolgt wesentlich durch thermisch induzierte Strömungen und Expansion/Kompression der Luft in den Falzräumen durch Temperaturwechsel. Beides wird wesentlich durch die solare Einstrahlung getrieben. Nicht ausgeschlossen werden kann daher ein möglich erhöhtes Risiko bei nordseitigen oder dauerhaft verschatteten Fassaden.

8 Diffusionsversuche

Wie die Holzfeuchtemessung an der Testfassade gezeigt hat, besteht bei Fassaden mit zeitweiser Sonneneinstrahlung keine Gefahr von kritisch hoher Holzfeuchte durch raumseitige Diffusion. Das gilt auch für außenseitig diffusionsdichte Konstruktionen wie die untersuchten Systeme A und B, welche Holzfeuchten von maximal 14% erreichten.

Durch die im Folgenden beschriebenen Diffusionsversuche soll festgestellt werden, welche Holzfeuchte bei konstant ungünstigen Randbedingungen mit hoher Feuchte auftreten. Dabei soll das Temperaturfeld im Holzquerschnitt den realen Bedingungen in einer Fassade bei -10°C Außentemperatur entsprechen. Auch soll der Einfluss von Schrauben im Holzprofil untersucht werden.

8.1 Aufbau und Durchführung der Diffusionsversuche

Es wurden zwei gleichartige Probekörper (400 mm x 50 mm x 120 mm) aus Fichte ohne Beschichtung gefertigt. Die Hirnholzflächen wurden diffusionsdicht verschlossen. An beide Probekörper wurden Elektroden zur Holzfeuchtemessung analog Abschnitt 7.3.4 angebracht. Bei Probekörper 2 wurden im Bereich der Elektroden zusätzlich Holzschrauben 8 x 60 eingeschraubt. Zusätzlich wurde ein Fühler für Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur in einer Sackbohrung von der Stirnseite der Probekörper in Schraubennähe platziert. Das Holzprofil wurde auf einer Schmalseite mit Hilfe einer Kühleiste auf 8°C abgekühlt und mit den restlichen Flächen einem Feuchtklima 17°C bei 80% relativer Luftfeuchte ausgesetzt. Der Temperaturverlauf im Holzprofil entspricht etwa den Verhältnissen bei -10°C Außentemperatur, siehe die Prinzipskizze und Isothermenverlauf in Abb. 95.

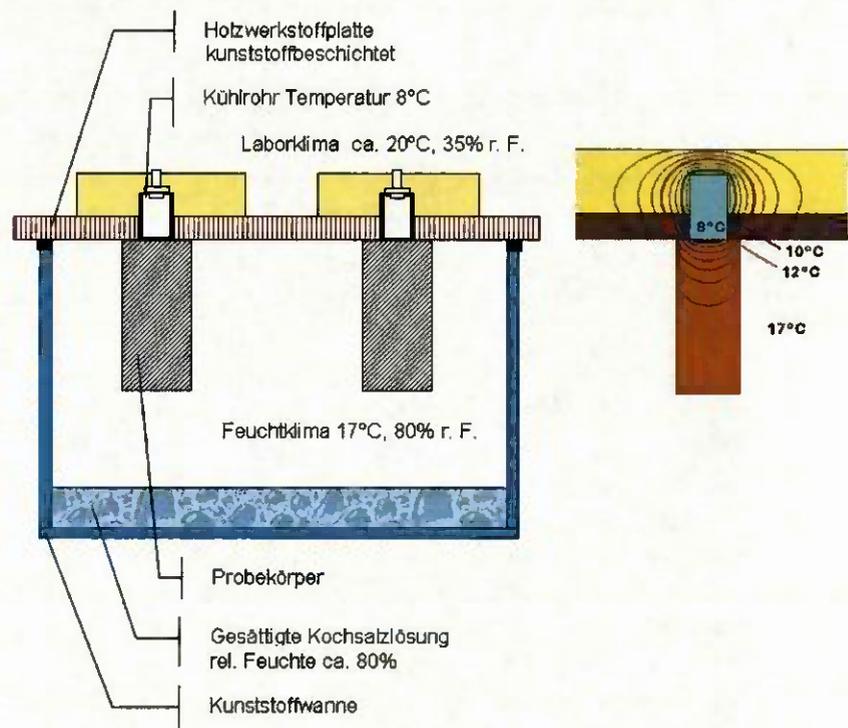


Abb. 95 links: Prinzipskizze des Diffusionsversuchs. rechts: Isothermendarstellung, die Isothermen entsprechen etwa den realen Verhältnissen bei -10°C Außentemperatur

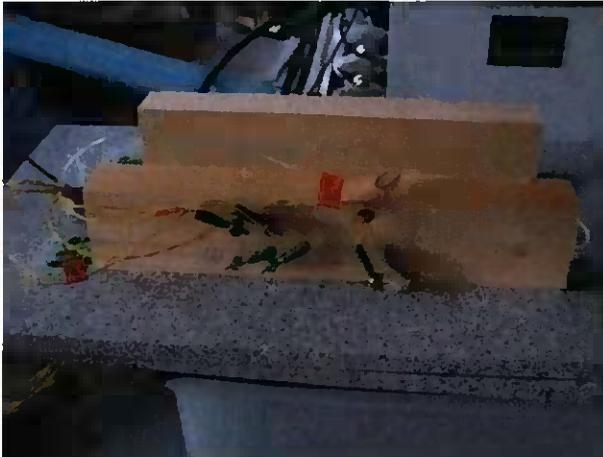


Abb. 96 Probekörper mit Messelektroden fertig montiert. Ansicht der Unterseite.

8.2 Ergebnisse der Diffusionsversuche

In der Abb. 97 sind die Messdaten über einen Zeitraum von 35 Tagen dargestellt. Durch die Kühlung der Holzoberfläche ist die gemessene Temperatur im Holz geringer als die Temperatur des Feuchtklimas. Die geringe Schwankung der relativen Luftfeuchte von ca. 3% ist Ursache der Tag/Nacht-Schwankung der Raumtemperatur und für das Diffusionsverhalten unerheblich.

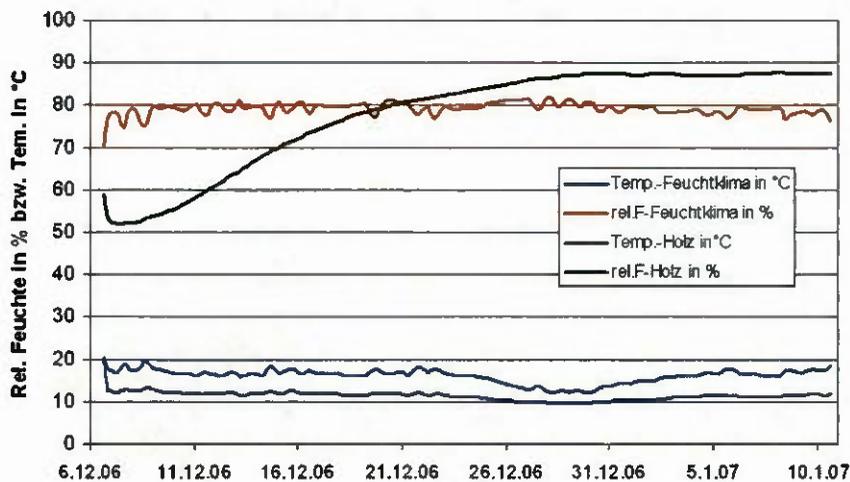


Abb. 97 Messdaten des Diffusionsversuchs.

Abb. 98 und Abb. 99 zeigen den Verlauf der Holzfeuchte an verschiedenen Stellen im Querschnitt. Nach ca. 30 Tagen wird ein stationärer Zustand erreicht. Auf der Raumseite stellen sich bei beiden Probekörpern Holzfeuchten von ca. 16% ein. Die Holzfeuchte im Bereich der Kühlleiste steigt bei beiden Probekörpern zunächst langsamer an, erreichten aber nach ca. 30 Tagen Werte um 20%. Ein Einfluss der Schrauben auf die Holzfeuchte ist nicht zu erkennen. Die Vergleichsmessung der Luftfeuchte in der Sackbohrung stimmt nach Umrechnung auf die Holzausgleichsfeuchte mit der elektrischen Holzfeuchtemessung gut überein.

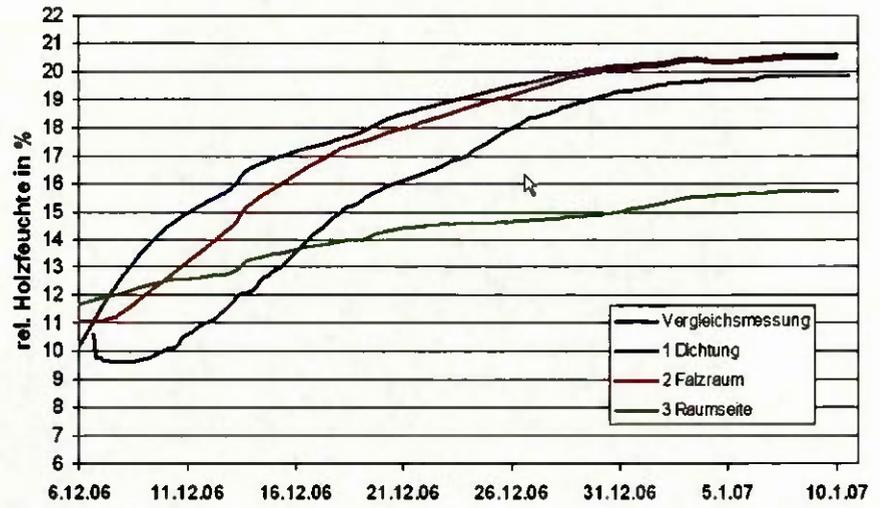


Abb. 98 Messdaten der Holzfeuchte am Probekörper 1 ohne Schraube.

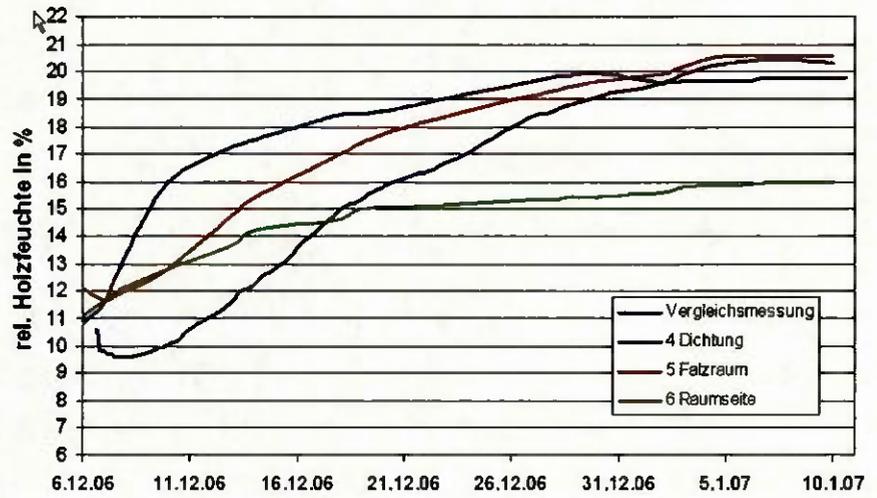


Abb. 99 Messdaten der Holzfeuchte am Probekörper 2 mit Schraube.

9 Zusammenfassung

Leichte Vorhangfassaden mit tragender Holzstruktur erfüllen meist hohe Anforderungen an Gestaltung und Ausführung. Äußere Umgebung und Innenraum zu trennen und doch zu verbinden, Energieeffizienz zu optimieren und Nachhaltigkeit zu beachten sind die aktuellen Aufgaben.

Aber auch statische und bauphysikalische Anforderungen sind auf nur wenigen cm Bautiefe zu erfüllen. Mit steigenden Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit und die Wärmedämmung der Fassade wurden im Bereich der Dämmzone optimierte Konstruktionen von Pfosten-Riegel-Fassaden entwickelt. Diese Konstruktionen widersprechen klassischen bauphysikalischen Prinzipien flächiger Holzbauteile. Verwendet werden z.B. weit außen liegende diffusionsdichte Schichten oder Dämmungen des Glasfalzraumes, welche die konvektive Feuchteabfuhr behindern.

Fragen hinsichtlich des Verhaltens bei Feuchtebeanspruchung sind insbesondere bei Fassaden mit tragender Holzgrundkonstruktion berechtigt. Fassadenkonstruktionen sind hohen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Die äußere Dichtebene kann daher bei Schlagregenbelastung einen Wassereintritt in den Glasfalz nicht vollständig verhindern. Ziel ist daher, die eindringende Menge so gering wie möglich zu halten, die unvermeidliche Restmenge aber gezielt nach außen abzuführen bzw. eine rasche Abtrocknung zu ermöglichen. Insgesamt resultiert die Feuchtigkeitsbelastung bei Holzfassaden aus:

- dem Eindringen von Wasser durch Schlagregen
- einer Dampfdiffusion von der Raumseite
- Tauwasserausfall auf raumseitigen Bauteiloberflächen.

Die Auswertung von Gutachten ergab, dass Tauwasserbildung auf der raumseitigen Oberfläche aufgrund konstruktiver Wärmebrücken und ungünstiger Geometrie zusammen mit klimatischen Randbedingungen eine der häufigsten Schadensursache darstellt. Das Risiko von Tauwasser auf raumseitige Oberflächen kann heute mit Isothermenberechnungen bewertet werden, Ursachen und Auswirkungen sind gut bekannt. Der Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung liegt auf dem Feuchteverhalten des Glasfalzraumes und auf dem Einfluss der Diffusion auf die Holzfeuchte.

Feuchteverhalten des Glasfalzraumes

Um den Einfluss unterschiedlicher Pfosten-Riegel-Konstruktionen und Ausführungsdetails auf das Feuchteverhalten vergleichend zu untersuchen, wurden Testrahmen in die Fassade der Hochschule Rosenheim eingebaut und eine Testfassade am ift Rosenheim errichtet. Untersucht wurden drei Pfosten-Riegel-Fasadensysteme auf Holztragkonstruktion:

System A: Standardsystem, diffusionsdicht

Al-Grundprofil mit Schraubkanal, Falzraumdämmung, Systemdichtungen

System B: diffusionsdicht

Flächige Glasdichtung raumseitig, offener Falzraum, Holzverschraubung

System C: diffusionsoffen

getrennte Glasdichtung raumseitig, offener Falzraum, Holzverschraubung

Mit Hilfe der Testrahmen wurde die Wirkung verschiedener Konstruktionsdetails überprüft. Hierzu wurde künstlich Feuchte in den Riegelglasfalz eingebracht und die Entwicklung von Temperatur und Luftfeuchte im Falzraum bei natürlichem Außenklima kontinuierlich erfasst. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Feuchtigkeit im Glasfalz führt bei Erwärmung durch Sonneneinstrahlung sehr schnell zu einem Anstieg des Dampfdrucks im Glasfalzraum.
- In den vertikalen oben und unten offenen Pfosten führt die rasch entstehende thermisch induzierte Strömung den Wasserdampf effektiv ab.
- In den horizontalen Riegeln fehlt dieser Antrieb; Wasserdampf wird wenig effizient abgeführt, der Dampfdruck in den Riegelprofilen ist höher.
- Einbauten zur Verbesserung der Wärmedämmung oder zur kontrollierten Wasserführung erhöhen den Dampfdruck im Riegel.
- Der höchste Dampfdruck entsteht in Riegelmitte und fällt rechts und links Richtung Pfosten ab.
- Dampfdruckausgleichsöffnungen verringern den Dampfdruck insgesamt und deutlich in einem Bereich von ca. 20 cm um die Öffnung.
- Die Austrockenzeit hängt von der solaren Einstrahlung ab und liegt im Bereich von Tagen.
- Die Austrockenzeit wird durch freie Falzräume begünstigt

Mit Hilfe der Testfassaden wurde das Verhalten der drei Fassadensysteme unter natürlicher Bewitterung und praxisnahem Innenraumklima untersucht. Wieder wurde Temperatur und Luftfeuchte im Falzraum kontinuierlich erfasst. Die wesentlichen Ergebnisse sind:

- Die an den Testelementen erhaltenen Ergebnisse wurden im Grundsatz bestätigt.
- Der mittlere Dampfdruck im Glasfalz ist in den Sommermonaten im Vergleich zum den Wintermonaten doppelt so groß.
- Der maximale Dampfdruck (Jan. bis Nov 2007) ist bei den Systemen B und C ähnlich, bei System A doppelt so groß.
- Die Gesamtfeuchtebelastung (Jan. bis Nov 2007) ist bei den Systemen B und C ähnlich, bei System A um ca. 15% höher.

Holzfeuchte der Tragkonstruktion

An der Testfassade wurde die Holzfeuchte der Tragkonstruktion der drei Fassadensysteme an der Raumseite und im Bereich der Glasdichtungen kontinuierlich erfasst. Die durchschnittliche Holzfeuchte liegt bei allen Systemen im Winter bei ca. 10%, im Sommer durchschnittlich 2% niedriger. Die Maximalwerte von ca. 14% liegen immer noch weit unterhalb der kritischen Feuchte von 20%.

Diffusionsversuche im Differenzklima ohne Einstrahlung zeigen, dass erst bei einer Raumfeuchte über 70% eine kritische Holzfeuchte erreicht wird.

Das teilweise aufgrund theoretischer Überlegungen abgeleitete Risiko der Durchfeuchtung bei diffusionsdichten Systemen (System A und B) konnte nicht bestätigt werden.