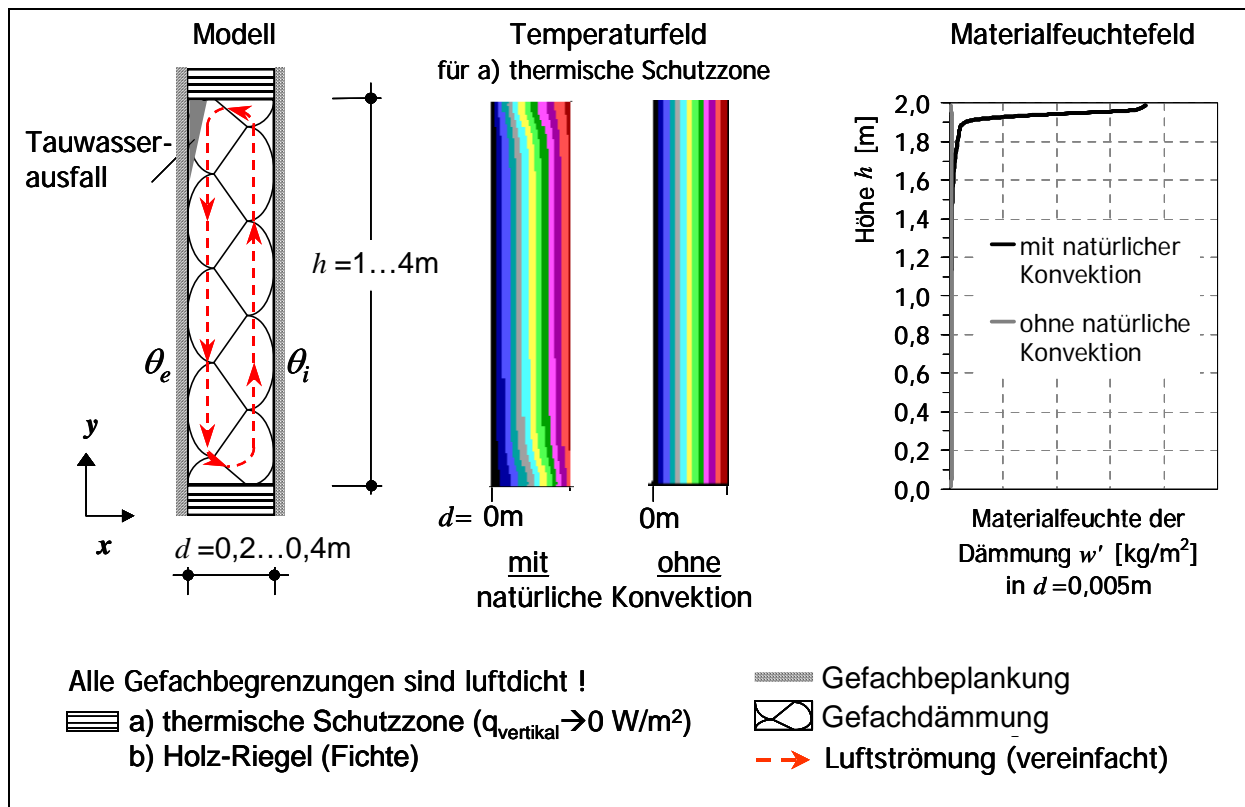


## Vermeidungsstrategien für Tauwasser- und Schimmelpilzrisiken in Außenwandgefachen, verursacht durch natürliche Konvektion in der Dämmung



**Dr.-Ing. Katrin Riesner**

(Projektbearbeiter)

Universität Rostock, AUF

Lehrstuhl für Baukonstruktionen und Bauphysik,

Projektleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. G.-W. Mainka

**2009**

Die Arbeiten wurden gefördert über die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung.

(Aktenzeichen: Z6 – 10.07.03-05.19 / II13 – 80 01 05 - 19)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

## Einführung

In hochgedämmten Holzaußenwänden wird die Gefachdämmung heute in Dicken von 200mm bis 400mm ausgebildet. Wenig diskutiert und in der bauphysikalischen Auslegung von Holzaußenwandgefachen noch nicht berücksichtigt ist ein Feuchteschadensrisiko durch natürliche Konvektion. Die Antriebskraft der natürlichen Konvektion ist die Druckdifferenz aus thermischem Auftrieb, verursacht durch hohe Lufttemperaturunterschiede an der Innen- und Außenseite des Bauteils. Hierbei entsteht bei luftdichten Gefachbeplankungen eine langsam strömende Luftwalze innerhalb eines offenporigen Gefachdämmstoffs. Mit Zunahme der Dämmstoffdicke steigt der Einfluss der natürlichen Konvektion auf den Wärme- und Feuchtetransport in der offenporigen Gefachdämmung.

Die Ergebnisse eigener Bauteilversuche und Simulationsrechnungen zeigen, dass in einigen nach Bauvorschriften ausgeführten hochgedämmten Holzaußenwandgefachen unzulässig hohe Materialfeuchten und Schimmelpilzwachstum an der oberen kalten Gefachecke durch natürliche Konvektion auftreten. Das heißt: Ein erhöhter Tauwasserausfall und daraus resultierende Schimmelpilzbildungen sind trotz Nachweis nach DIN 4108-3:2001 möglich. Das gefährdet die Dauerbeständigkeit hochgedämmter Holzkonstruktionen und kann durch Festlegung von Grenzwerten für die  $s_d$ -Werte der Gefachbeplankungen verhindert werden.

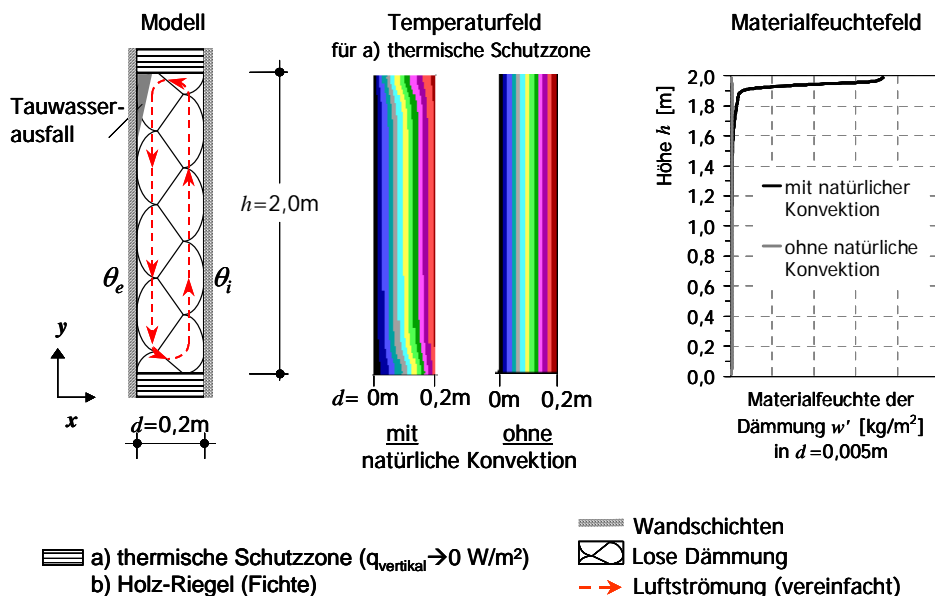


Bild 1 Untersuchungsgegenstand und Auswirkungen der natürlichen Konvektion auf den Wärme- und Feuchtetransport



a) Bauteilversuch in einer Doppelklimakammer



b) Praxisfall im Bereich einer Fensterbrüstung

Bild 2 Tauwasserausfall und Schimmelpilzbefall an der oberen kalten Gefachecke in hochgedämmten Holz-Außenwandgefachen

Die vorliegende Arbeit stellt aufbauend auf RIESNER (2003) die Zusammenhänge auf wissenschaftlicher Grundlage dar, zeigt für praxisrelevante Konstruktionen die Tauwasserschadensrisiken auf und gibt konstruktive Empfehlungen zu deren Vermeidung.

## **Einflussfaktoren auf den Tauwasserausfall durch natürliche Konvektion**

Der Feuchtetransport durch natürliche Konvektion in offenporigen Dämmstoffen wird maßgeblich durch folgende sich gegenseitig beeinflussende Faktoren verstärkt:

- hohes Feuchteangebot im Dämmstoff durch hohe Einbaufeuchten  $u_A$ , hohe Dämmstoffdicken  $d$ , eine hohe Feuchtekapazität des Dämmstoffs, eine hohe diffusionsäquivalente Luftschichtdicke  $s_{di}$  der außenseitig angrenzenden Bauteilschichten und ein niedriges Verhältnis von  $s_{di}/s_{de}$
- hohe Strömungsgeschwindigkeiten durch natürliche Konvektion im Dämmstoff, maßgeblich bestimmt durch eine hohe Dämmstoff-Luftdurchlässigkeit  $k_L$ , und ein geringes Verhältnis der Gefachabmessungen ( $h/d \rightarrow 1$ )
- kaltes Außenklima, geringe solare Strahlungsgewinne und hohe nächtliche Abstrahlung.
- eine niedrige Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  des Dämmstoffs,
- Schichtenaufbauten, die Tauwasserausfall ermöglichen

## **Untersuchungsgegenstand**

Untersucht wird ein Holz-Außenwandgefach. Die offenporige Gefachdämmung mit Dicken von 200mm bis 400mm ist zwischen der außen- und raumseitigen Gefachbeplankung angeordnet und oben und unten durch Holzriegel begrenzt. Die Gefachdämmungen sind lose Dämmstoffe (organische Granulate, organische und anorganische Fasern) und Dämmmatten (Mineralfasern, Holzfasern, Schafwolle, Hanf). Die Gefachbeplankungen bestehen innenraumseitig aus OSB-Platten und Gipskartonplatten sowie außenseitig aus Holzwerkstoffplatten (Spanplatten, diffusionsoffene Holzfaserverleimplatten und OSB-Platte als Trägerplatte für ein WDVS).

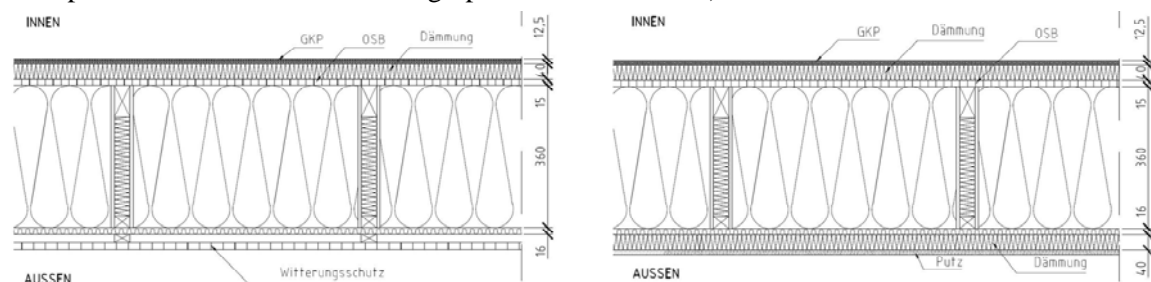


Bild 2 Horizontalschnitt von zwei Holzrahmen-Außenwänden

## **Untersuchungsmethoden**

Die Untersuchungen werden in **4 Stufen** geführt:

- **Stufe 1:** Simulationsrechnungen für Holz-Außenwanddämmungen zu Einflüssen auf den Feuchtetransport durch natürliche Konvektion in einer Parameterstudie,
- **Stufe 2:** Simulationsrechnungen zum konvektiven Feuchtetransport für praxisrelevante Holz-Außenwandkonstruktionen mit weiteren Randbedingungen,
- **Stufe 3:** Versuche in einer Doppelklimakammer an 8 Holz-Außenwandgefache mit bauaufsichtlich zugelassenen Dämmstoffen für einen Winter-Frühjahrs Klimazyklus
- **Stufe 4:** Vergleich der Versuchsergebnisse mit Ergebnissen aus Simulationsrechnungen, die den Versuch nachbilden.

## Simulationssoftware WINHAM2D

Die Simulationsrechnungen wurden mit WINHAM2D durchgeführt. Der durch natürliche Konvektion hervorgerufene Wärme-, Luft- und Feuchtetransport in Dämmstoffen lässt sich mit diesem an der TU Chalmers / Schweden entwickelten 2D-WINDOWS-Programm mit üblichen und messbaren Materialeigenschaften simulieren. Für Außenwanddämmungen wurde diese Software validiert. Mit dieser wissenschaftlichen Software waren sehr hohe Rechenzeiten, z. T. von mehreren Tagen erforderlich. Des Weiteren konnten aufgrund numerischer Begrenzungen nicht alle klimatischen Randbedingungen und Bauteilaufbauten berechnet werden. Da sich in WINHAM2D einzelne Wärme- und Feuchtetransportmechanismen für die Berechnung auswählen lassen, wird über Differenzbildung von je zwei Simulationen mit *bzw.* ohne natürliche Konvektion der Einfluss der natürlichen Konvektion für die einzelnen Wandaufbauten mit der jeweils zu untersuchenden Wärmedämmung ausgewiesen. Die WINHAM2D-Berechnungsergebnisse werden auf die unzulässige Erhöhung von Materialfeuchten und auf das Vorhandensein hygrothermischer Klimabedingungen für Schimmelpilzwachstum nach SEDLBAUER (2001) hin ausgewertet.

### Klima

Simulationsrechnungen wurden in Stufe 1 für das Feuchtereferenzjahr aus Schweden (FRJ 1962/63), mit den Außenklima von Holzkirchen (1991), von Davos (1996) und von Wismar (2006) durchgeführt. Die Außenklimaten von Holzkirchen (1991) und Davos (1996) beziehen sich auf eine Nordwand mit Diffusstrahlung und der Strahlungsabsorption  $a$  einer hellen Oberfläche mit  $a=0,4$ . Die Auswertung der Klimadaten zeigt für das Klima von Davos 1996 den größten Einfluss der natürlichen Konvektion auf den Feuchtetransport auf.

Die Bauteilversuche wurden in einer Doppelklimakammer über 12 Wochen durchgeführt. Das in den Warmkammern simulierte Innenraumklima betrug  $23 \pm 3^\circ\text{C}$  bei  $55 \pm 5\%$  r.F.. Das instationäre Außenklima in der Kaltkammer entsprach nahezu Realklima aus einer Winter-Frühjahr-Periode. In der 6-wöchigen Winterperiode wird die Materialfeuchte im Gefach aufgrund der Dampfdruckdifferenz kontinuierlich ansteigen. Die 6-wöchige Frühjahrsperiode zeigt das Austrocknungspotential der Baustoffe in der Wandkonstruktion auf. Aufgrund der niedrigen Temperaturen tritt kein Schimmelpilzwachstum im Winter auf. Lokal erhöhte Materialfeuchten durch natürliche Konvektion brauchen im Frühjahr länger zum Austrocknen. Hier kann es durch natürliche Konvektion zum Schimmelpilzwachstum im Dämmstoff und zu unzulässig hohen Feuchten in angrenzenden Gefachriegeln und in Holzwerkstoffen kommen.

## Untersuchungsergebnisse

### Materialeigenschaften

Für die Untersuchungen waren Messergebnisse zur Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit, Sorption, Diffusionswiderstandszahl, Anfangsfeuchte und der Luftdurchlässigkeit erforderlich. Die Dämmstoffe haben Luftdurchlässigkeiten im Bereich von  $3\text{E}-10\text{m}^2$  (Zellulose) bis  $359\text{E}-10\text{m}^2$  (organisches Granulat 1). Die Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  der Dämmstoffe liegt zwischen 1 und 3. Mit den Dämmstoffen wird ein großer Bereich der Feuchtespeicherfähigkeit erfasst.

- nichthygroskopische Mineralfasern,
- fünf organische Dämmstoffe mit  $u_{23^\circ/90\%} \sim 3,6 - 11\text{M.}\%$ ,
- drei organische Dämmstoffe mit  $u_{23^\circ/90\%} \sim 17 - 18,5\text{M.}\%$  und
- ein hochhygroskopischer organischer Dämmstoff mit  $u_{23^\circ/90\%} = 51\text{M.}\%$ .

Die Luftdurchlässigkeit  $k_L$  der Gefachbeplankung wird durch Werte aus der Literatur und aus eigenen Messungen bestimmt. Die Auswertung der Messergebnisse aus der Literatur ergibt für gleichartige Materialien zum Teil eine Schwankungsbreite von ein bis zwei Zehnerpotenzen. Alle untersuchten Gefachbeplankungs-Materialien unterschreiten den durch die DIN 4108-7 gesetzten oberen Grenzwert von  $q_{50} = 3,0\text{m}^3/(\text{m}^2\text{h})$  deutlich und können damit als Luftdichtigkeitsschicht von Holz-

Außenbauteilen eingesetzt werden. Am Beispiel der MDF-Platte der Fläche von  $0,09\text{m}^2$  wurde der Einfluss von Fugen an Bauteilen untersucht. Setzt man die Luftdurchlässigkeit der MDF-Platte ohne Fuge zu 100%, dann erhöht sich bei nicht abgeklebter und fest angepresster „Nut und Feder-Fuge“ die Luftdurchlässigkeit auf 215% und bei zusätzlicher Abklebung mit Luftdichtigkeits-Klebeband auf 160%.

Die gemessenen Diffusionswiderstandszahlen  $\mu$  der Holzwerkstoffplatten weichen zum Teil erheblich von Werten aus den bauaufsichtlichen Zulassungen ab. Das beeinflusst die  $s_d$ -Werte der Gefachbeplankungen und kann bei diffusionsoffenen Bauweisen zu erhöhten Feuchteschadensrisiken führen. Bei unplanmäßiger Feuchtebelastung oder bei dem planerisch zu berücksichtigenden Feuchtetransport aus natürlicher Konvektion wird sich das Feuchteschadensrisiko zusätzlich erhöhen. Daher wird die Einführung eines Sicherheitsfaktors für das  $s_{di}/s_{de}$ -Verhältnis empfohlen, der Schwankungen in den Diffusionswiderstandszahlen  $\mu$  der Bauplatten berücksichtigt.

### Stufe 1 Parameterstudie

Schwerpunkte der Parameterstudie in ca. 270 Simulationsrechnungen mit WINHAM2D sind die Gefach-Innenabmessungen, die Ausbildung der Gefachränder, die Dämmstoffeigenschaften, der Feuchtetransport von / zu den Holzrahmen (oben und unten) und das Jahresklima. In einigen Simulationen ist an der Schichtgrenze Dämmstoff Gefachriegel eine Luftsperrschicht angeordnet, um den konvektiven Feuchtetransport in der Dämmung ohne Überlagerung mit dem Feuchtetransport zwischen angrenzenden Schichten zu erfassen. Aus den Simulationsergebnissen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

1. *Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  des Dämmstoffs:* Praxisübliche Diffusionswiderstandszahlen  $\mu$  des offenporigen Dämmstoffs erhöhen bei diffusionsoffenen Bauweisen das Feuchteschadensrisiko durch natürliche Konvektion erheblich. Dieses Risiko lässt sich vorrangig durch das  $s_{di}/s_{de}$ -Verhältnis verringern. Empfohlen wird das  $s_{di}/s_{de}$ -Verhältnis von 10.

2. *Abmessungen des Dämmstoffs: Dicke  $d$  und Höhe  $h$ :* Die Dicke  $d$  ist ein Haupteinflussparameter auf das Feuchteschadensrisiko aus natürlicher Konvektion (vergleichbar zur Dämmstoffluftdurchlässigkeit  $k_L$  und  $s_{di}/s_{de}$ ). Die Höhe  $h$  ist von geringem Einfluss.

3. *Luftdurchlässigkeit angrenzender Schichten bei  $\Delta p=5\text{Pa}$  (ohne Luftleckagen):*

Die Luftdurchlässigkeit angrenzender Schichten ist weniger maßgebend als die Luftdurchlässigkeit des Dämmstoffs  $k_L$ , das  $s_{di}/s_{de}$ -Verhältnis und die Feuchtespeicherung des Dämmstoffs.

Bei geringem  $s_{di}/s_{de}$ -Verhältnis und bei extrem diffusionsoffener Bauweise erhöht die praxisrelevante Luftdurchlässigkeit weit mehr das Feuchteschadensrisiko durch Konvektion als bspw. das Klima und die Sonnenstrahlung (N-Wand).

Die Luftdurchlässigkeit der Gefachbeplankung hat bei hygroskopischen Dämmstoffen einen höheren Einfluss auf Tauwasserschadensrisiken als bei nicht hygroskopischen Dämmstoffen.

Die Luftdurchlasswiderstände der Gefachbeplankungen sind mit  $R_{Li} \gg R_{Le}$  zu wählen.

4. *Feuchtetransport von / zu den oberen und unteren Holzriegeln:*

*hygroskopische Dämmstoffe:* kein maßgebender Einfluss

*mittlere Feuchtespeicherfähigkeit der Dämmung:* Verringerung der Dämmstofffeuchte durch Feuchtetransport zu angrenzenden Hölzern

*nicht hygroskopische Dämmstoffe:* Erhöhung der Dämmstofffeuchte durch Feuchtetransport von angrenzenden Hölzern

5. *Wärmedurchlasswiderstand der inneren und äußeren Beplankungen:*

*$s_d$ -Wert der Gefachbeplankungen mit  $s_{di} = s_{de}$  und extrem diffusionsoffene Bauweise mit  $s_{de} < 0,2\text{m}$ :* kein Einfluss von Innendämmungen, deutliche Verringerung der maximalen lokalen Dämmstofffeuchte durch natürliche Konvektion mit steigender Außendämmung

*$s_{di}/s_{de} = 10$ :* zu vernachlässigender Einfluss

6. *Wärmedurchlasswiderstand der oberen und unteren Gefachränder (angrenzend an Holzriegel):* Wärmebrücken verringern den lokalen Feuchteanteil aus natürlicher Konvektion an der oberen kalten Gefachecke, jedoch mit vergleichsweise geringem Einfluss.

7. *Jahresklima und Sonnenstrahlung:* Wird Strahlung nicht berücksichtigt, dann gibt es nur geringe Unterschiede zwischen den untersuchten Klimaten von Mittel- und Nordeuropa. Die Strahlung (N-Wand) verringert das konvektive Feuchteschadensrisiko. Für den konvektiven Feuchtetransport wird das Klima von Davos (1996) als Feuchtereferenzjahr für Mittel- und Nordeuropa empfohlen.

## Stufe 2 – WINHAM2D-Simulationen an Wandkonstruktionen

Es wurden Berechnungen an praxistypischen Holz-Außenwandaufbauten und mehreren Gefach-Dämmstoffen unter einem jahreszeitlichen Klimazyklus mit einem realitätsnahen Modell für die Wandkonstruktionen durchgeführt. Die Gefachdämmungen haben Abmessungen von  $h \times d = 2\text{m} \times 0,36\text{m}$ . Der Anteil der natürlichen Konvektion an Materialfeuchteerhöhungen in der Dämmung, in den Gefachriegeln und in der kaltseitigen Gefachbeplankung wurde durch Ergebnisvergleich von Simulationen mit und ohne Berücksichtigung von natürlicher Konvektion ermittelt. Auf Basis der Berechnungsergebnisse ergibt sich:

- *Wand 1a* mit  $s_{di} / s_{de} = 55$  ( $s_{di} = 2,2\text{m}$ ;  $s_{de}=0,04\text{m}$ ) und dem Verhältnis der Luftdurchlasswiderstände der Gefachbeplankungen innen  $R_{Li}$  und außen  $R_{Le}$  mit  $R_{Li} \gg R_{Le}$ ;
  - ausreichender Tauwasserschutz und kein hygrothermisches Schimmelpilzwachstumsrisiko
- *Wand 1b* mit  $s_{di} / s_{de} = 11$  ( $s_{di} = 2,2\text{m}$ ;  $s_{de}=0,2\text{m}$ );  $R_{Li} = R_{Le}$ 
  - ausreichender Tauwasserschutz im Gefach (Dämmung, Gefachbeplankung und Gefachriegel) für Gefachdämmungen mit  $k_L \leq 140\text{E}\cdot 10\text{m}^2$  und mit  $u_{23^\circ/80\%} \leq 10\text{M}\cdot\%$  und
  - kein hygrothermisches Schimmelpilzwachstumsrisiko für Dämmstoffe mit  $k_L \leq 180\text{E}\cdot 10\text{m}^2$  und mit  $u_{23^\circ/80\%} \leq 10\text{M}\cdot\%$
- *Wand 2* mit  $s_{di} / s_{de} = 4$  ( $s_{di} = 2,2\text{m}$ ;  $s_{de}=0,6\text{m}$ );  $R_{Li} = R_{Le}$ 
  - ausreichender Tauwasserschutz im Gefach (Dämmung, Gefachbeplankung und Gefachriegel) für Gefachdämmungen mit  $k_L \leq 75\text{E}\cdot 10\text{m}^2$  und mit  $u_{23^\circ/80\%} \leq 10\text{M}\cdot\%$  und
  - kein hygrothermisches Schimmelpilzwachstumsrisiko für Dämmstoffe mit  $k_L \leq 75\text{E}\cdot 10\text{m}^2$  und mit  $u_{23^\circ/80\%} \leq 10\text{M}\cdot\%$
- *Wand 3a* mit WDVS:  $s_{di} / s_{de} = 4$  ( $s_{di} = 10\text{m}$ ;  $s_{de}=2,3\text{m}$ );  $R_{Li} < R_{Le}$  und  $R_{Li} = R_{Le}$ 
  - ausreichender Tauwasserschutz im Gefach (Dämmung, Gefachbeplankung und Gefachriegel) für nichthygroskopische Gefachdämmungen mit  $k_L \leq 70\text{E}\cdot 10\text{m}^2$  und mit  $u_{23^\circ/80\%} \leq 0,5\text{M}\cdot\%$  und
  - hygrothermisches Schimmelpilzwachstumsrisiko für offenporige Gefachdämmungen mit  $k_L > 60\text{E}\cdot 10\text{m}^2$  und mit  $u_{23^\circ/80\%} > 10\text{M}\cdot\%$
- *Wand 3b* mit WDVS:  $s_{di} / s_{de} = 1,3$  ( $s_{di} = 3\text{m} \rightarrow$  Erfassung praxisüblicher Luftleckagen nach KÜNZEL, 2003 und TenWolde, 1999) ;  $R_{Li} < R_{Le}$ 
  - kein ausreichender Tauwasserschutz im Gefach (Dämmung, Beplankung, Gefachriegel) und hygrothermisches Schimmelpilzwachstumsrisiko in der Gefachdämmung
- *Wand 3c* mit WDVS ohne Trägerplatte:  $s_{di} / s_{de} = 15,7$  ( $s_{di} = 3,14\text{m}$ ;  $s_{de, \text{Putz}}=0,2\text{m}$ );  $R_{Li} = R_{Le}$ 
  - ausreichender Tauwasserschutz im Gefach (Dämmung, Gefachbeplankung und Gefachriegel) und kein hygrothermisches Schimmelpilzwachstumsrisiko für die Gefachdämmung mit  $k_L \leq 31\text{E}\cdot 10\text{m}^2$  und  $u_{23^\circ/80\%} = 10\text{M}\cdot\%$

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass in Wand 1 mit  $s_{di} / s_{de} = 55$  mit  $s_{de} = 0,04\text{m}$  und in Wand 3c mit  $s_{di} / s_{de} = 15,7$  und  $s_{de, \text{Putz}}=0,2\text{m}$  für Gefachdämmungen der Dicke  $d = 360\text{mm}$  einen ausreichenden Tauwasserschutz für die Dämmstoffe gegeben ist. Ein hohes Tauwasserschadensrisiko besteht in Holzaußenwandgefachen an Nordfassaden mit einer Gefachdämmung von  $d > 300\text{mm}$

und einem WDVS aus Polystyrolplatten auf Trägerplatte ( $s_{de}=2,3m$ ) bei  $s_{di} \geq 10m$  und den in der Baupraxis zulässigen Luftleckagen ( $DIN4107-7: n_{50} \leq 3h^{-1}$ ).

### Stufe 3 – Bauteilversuche

Für acht Gefache ohne Luftleckagen wird nachgewiesen, ob natürliche Konvektion in offenporigen Dämmstoffen der Dicke  $d$  von 400mm zu Tauwasserschadensrisiken führt. Dazu werden die Materialfeuchten der Gefachdämmung, der Holzriegel und der Gefachbeplankungen sowie Schimmelpilzbefall und Tauwasserausfall an der Schichtgrenze von Dämmstoff und kaltseitig angrenzender Holzwerkstoffplatte über die gesamte Versuchsdauer untersucht. Die Bauart von sieben Gefachen mit den Abmessungen der Gefachdämmung von  $h \times d = 1,32m \times 0,4m$  unterscheidet sich in 4 eingebauten bauaufsichtlich zugelassenen Dämmstoffen (hohe, mittlere und niedrige Feuchtespeicherefähigkeit) und in drei verschiedenen Gefachbeplankungen. Ein weiterer Probekörper ist in 6 Gefache von  $h \times d = 0,5m \times 0,4m$  geteilt und hat 6 verschiedene Gefachdämmungen.

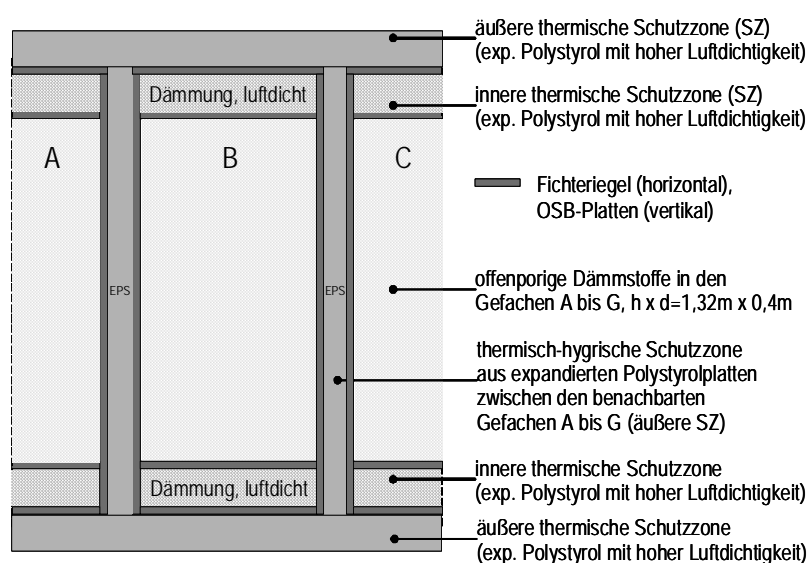


Bild 3 Prinzipskizze zum Aufbau eines Probekörpers und deren Einbau in den Prüfrahmen

Mit  $s_d$ -Werten aus Produktdatenblättern wurden für die Bauteilversuche  $s_{di}/s_{de}$ -Verhältnisse von 9,1 bis 1,3 geplant. Parallel zu den Bauteilversuchen durchgeführte  $s_d$ -Wert-Messungen zeigten erhebliche Abweichungen auf. Die  $s_{di}/s_{de}$ -Verhältnisse lagen tatsächlich im Bereich von 4,3 bis 2,3.

Die Ergebnisse aus den Bauteilversuchen zeigen:

*Die durch natürliche Konvektion beeinflusste Materialfeuchteverteilung wurde in jedem untersuchten Gefach über Messungen im Dämmstoff, in der kaltseitigen Gefachbeplankung und in den oberen und unteren Gefachriegeln nachgewiesen.*

Die Messergebnisse aus Messungen zur relativen Luftfeuchtigkeit im Dämmstoff, den Materialfeuchten und dem Tauwasserausfall an einer Schichtgrenze sind zueinander plausibel. Der Feuchtetransport durch natürliche Konvektion führt in der Tauperiode (Winter) zu einer zum Teil unzulässigen Feuchteerhöhung in den Baustoffen der oberen kalten Gefachecke, die

- bei hygroskopischen Dämmstoffen in der Verdunstungsperiode (Frühjahr und Sommer) bei ansteigenden Außenlufttemperaturen zeitlich verzögert abnimmt und
- bei nichthygroskopischen Dämmstoffen zu einer Erhöhung von ablaufendem Tauwasser an der Schichtgrenze zur kaltseitigen Gefachbeplankung führt.

Damit ist im Frühjahr in den Gefachen mit Dämmschichtdicken von 400mm eine höhere Befallsneigung für Schimmelpilze und ggf. für holzerstörende Pilze gegeben.

Es wurde im Versuch nachgewiesen, dass

- vorrangig die Feuchtespeicherfähigkeit des Dämmstoffs, gefolgt vom  $s_{di} / s_{de}$ -Verhältnis das Tauwasserschadensrisiko durch natürliche Konvektion beeinflusst
- im Gefach mit einer Gefachdämmung der Luftdurchlässigkeit  $k_L = 70E-10m^2$  und mit einer ähnlichen Feuchtespeicherfähigkeit wie die Gefachbeplankung und die Gefachriegel bereits bei einem Verhältnis von  $s_{di} / s_{de} = 4$  und bei  $s_{de} \leq 0,5m$  kein Tauwasserschadensrisiko durch natürliche Konvektion auftritt
- im Gefach mit dem  $s_{di} / s_{de}$ -Verhältnis von 3,2, mit einer kaltseiten Gefachbeplankung von  $s_{de} \leq 0,3m$  und mit einem hohen Flüssigtransportkoeffizienten eine Feuchteakkumulation in der oberen kalten Gefachecke vorhanden ist aber keine Tauwasserschäden nachweisbar waren
- ein Gefach mit einem WDVS mit  $s_{de} = 0,9m$  und mit  $s_{di} / s_{de} = 2,3$  ein hohes Tauwasserschadensrisiko aufweist
- vertikale geschlossene Luftspalten zwischen Dämmung und Gefachbeplankung den Feuchtetransport durch natürliche Konvektion in der Dämmung und das Tauwasserschadensrisiko im Gefach stark erhöhen
- in Gefachdämmungen mit hoher Feuchtespeicherfähigkeit von  $u_{23^\circ/80\%} = 29M.-%$  und mit hoher Luftdurchlässigkeit von  $k_L = 180E-10m^2$  bei dem  $s_{di} / s_{de}$ -Verhältnis von 4,3 und einer Gefachdicke  $d = 400mm$  unzulässige Materialfeuchten im oberen Gefachriegel, in der kaltseitigen Gefachbeplankung und im Dämmstoff auftreten, die Tauwasserschäden verursachen
- bei Bauplatten eine höhere Schimmelpilzbefallsintensität als bei Dämmstoffen und den Gefachriegeln besteht.

#### **Stufe 4 – Vergleichende WINHAM2D-Simulationsrechnungen zu den Bauteilversuchen**

Die Ergebnisse zwischen Versuch und Bauteilversuch stimmen tendenziell überein, zum Teil mit sehr guter Übereinstimmung und zum Teil mit deutlichen Unterschieden. Ursachen für Unterschiede zwischen Versuch und WINHAM2D-Simulationen sind:

- keine Berechnung des Kapillartransports in WINHAM2D
- versuchsablaufbedingte zeitliche Verzögerungen beim Probekörperausbau und bei der Dämmstoffprobenentnahme zur Bestimmung der Materialfeuchte mit dem Darr-Wäge-Verfahren
- abweichende Materialeigenschaften
- lokale Abweichungen zwischen den Entnahmestellen der Dämmstoffproben im Versuch und den ausgewählten Koordinaten (Flächen) aus den WINHAM2D-Ergebnissen und
- lokale Effekte zum Feuchtetransport an den Schichtgrenzen der Materialien.

Mit dem Simulationsprogramm WINHAM2D werden Feuchteschadensrisiken aus dem gekoppelten Wärme-, Luft- und Feuchtetransport in Dämmstofffeuchten sehr gut und zu benachbarten kapillaraktiven Bauteilschichten (Gefachriegel, kaltseitige Gefachbeplankungen) tendenziell erfasst.

In einem weiteren Bearbeitungsschritt wurde die Eignung des Versuchs-Klimazyklus durch vergleichende WINHAM2D-Simulationen mit dem Klima von Davos (1996) untersucht. Für drei Gefache lagen die jeweils berechneten maximalen Holzfeuchten in der gleichen Größenordnung. Der für dieses Projekt entwickelte Versuchs-Klimazyklus hat sich als geeignet erwiesen.

## **Schlussfolgerungen**

In der Gefachdämmung von hochgedämmten Holzrahmen-Außenwänden tritt in der kalten Jahreszeit natürliche Konvektion auf. Natürliche Konvektion in offenporigen Gefachdämmungen kann je nach Dämmstoff, Gefachabmessungen und Gefachbeplankungen über mehrere Wochen zu einem lokal begrenzten hohen Tauwasserausfall und damit zu Feuchteschäden im Gefach führen. Untersucht wurden hochgedämmte Holzaußenwandgefache mit und ohne Tauwasserschäden durch natürliche Konvektion.



Der Feuchtetransport aus natürlicher Konvektion im Dämmstoff lässt sich bauplanerisch durch Grenzwerte zum  $s_{di} / s_{de}$ -Verhältnis der Gefachbeplankungen in Abhängigkeit von der Feuchtekapazität des Dämmstoffs, der Luftdurchlässigkeit des Dämmstoffs und der Dämmstoffdicke begrenzen. Damit sind diese Tauwasserschäden bauplanerisch vermeidbar. Die erforderlichen Festlegungen zum  $s_{di} / s_{de}$ -Verhältnis der Gefachbeplankungen gehen über die gegenwärtigen Forderungen der DIN 4108-3 und der DIN 68800-2 hinaus.

Soweit keine weiteren Untersuchungsergebnisse vorliegen werden die Anforderungen von Tabelle 1 an das  $s_{di} / s_{de}$ -Verhältnis aufgestellt.

*Tabelle 1 Anforderungen an das  $s_{di}/s_{de}$ -Verhältnis zur Vermeidung von Feuchteschäden aus natürlicher Konvektion in Holz-Außenwandgefachen*

Holzaußenwand-Gefachbeplankung		Holzaußenwand-Gefachdämmung				
Tauwasserschutz	kein hygrothermisches Schimmelpilzwachstumsrisiko	Dicke	Luftdurchlässigkeit	Feuchtegehalt	WDVS (ohne Trägerplatte) mit	
mit $s_{de} \leq 0,2m$		d	$k_L$	$u_{23^\circ/80\%}$	$s_{d,Putz+WD}$	$R_{therm}$
$s_{di} / s_{de}$		(mm)	( $10^{-10}m^2$ )	(M.-%)	(m)	( $m^2K/W$ )
$\geq 10$	$\geq 10$	$\leq 400$	$\leq 50$	3 ... 10	-	-
$\geq 30$	$\geq 50$	$\leq 200$	$\leq 500$	$\leq 14$	-	-
$\geq 50$	$\geq 100$	$\leq 400$	$\leq 500$	$\leq 14$	-	-
~1000		$\leq 400$	$\leq 200$	$\leq 29$	-	-
$\geq 15$	$\geq 15$	$\leq 400$	$\leq 30$	3 ... 10	0,5	$\geq 1,2$

Nach dem gegenwärtigen Untersuchungsstand wird empfohlen, in der Bauplanung folgende Kombinationen zu vermeiden:

- hohe feuchtespeichernde Dämmstoffe und nicht hygroscopische Dämmstoffe jeweils mit einer Luftdurchlässigkeit  $k_L > 100E-10m^2$  **gekoppelt mit** hohen Dämmstoffdicken  $d > 0,2m$  bei einem geringen  $s_{di}/s_{de}$ -Verhältnis von  $s_{di}/s_{de} < 10$  und einem Verhältnis der Luftdurchlasswiderstände von  $R_{L,i} \sim R_{L,e}$  oder von  $R_{L,i} < R_{L,e}$

*Weitergehende Untersuchungen können diese Forderungen abmindern.*

Der Feuchtetransport durch natürliche Konvektion in hochgedämmten Holzaußenwandgefachen wird zudem verringert durch

- einen hohen Luftdurchlasswiderstand der raumseitigen Beplankung  $R_{L,i}$  bei Gefachdämmungen mit hoher Luftdurchlässigkeit  $k_L$  (Luftdichtigkeit in der Bauausführung mit Installationsebene)
- eine diffusionsoffene Gefachbeplankung zwischen Dämmstoff und Witterungsschutz
- den Einsatz von Dämmstoffen mit annähernd gleicher Feuchtespeicherung wie angrenzende Bauplatten und / oder Gefachriegel
- die Vermeidung eines geschlossenen Luftspaltes zwischen kaltseitiger Gefachbeplankung und Außenwanddämmung bzw. zwischen oberem Gefachriegel und Gefachdämmung (nachträgliches Nachsacken loser Dämmstoffe)
- diffusionsoffene Wärmedämmverbundsysteme mit  $s_{de,Putz} \sim 0,2m$  (im Vergleich: Tauwasserschadensrisiken in Wänden mit Gefachdämmdicken  $> 200mm$  und WDVS ( $s_{d,WDVS} \geq 0,9m$ ))

Die Aufnahme der Luftdurchlässigkeit der Dämmung und der Bauplatten in die Produktdatenblättern und Bauaufsichtlichen Zulassungen ist die Grundlage zur planerischen Vermeidung von Tauwasserschadensrisiken durch natürliche Konvektion. Die Luftdurchlässigkeit des Dämmstoffs  $k_L$  lässt sich aus dem längenbezogenen Strömungswiderstand  $r$  der Dämmstoffe ableiten.

Es wird die Einführung von Teilsicherheitsfaktoren für Feuchteschadensrisiken in die genormten Nachweise zum Tauwasserschutz empfohlen. Damit lässt sich die Planungssicherheit bei schwankenden Materialeigenschaften in diffusionsoffenen Bauweisen erhöhen.