



Dissertation

Flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen

Systemanalysen und neue Ansätze zur Planung hygrysch robuster
flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen unter Beachtung
konvektiver Feuchteinträge und temporärer
Beschattungssituationen

Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar

E206 – Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz
Institut für Hochbau und Technologie

eingereicht an der

Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Bernd Nusser M.Eng.

E0827878

Wien, im März 2012

Vakatseite

„Fürchte dich nicht davor langsam zu gehen, fürchte dich davor stehen zu bleiben.“

(Chinesische Weisheit)

Vakatseite

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Bauphysik und Geschossbau bei der Holzforschung Austria. Initiiert wurde das zugrundeliegende FFG-Forschungsprojekt „Innovative flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen“ von Dipl.-Ing. Dr. Martin Teibinger. Für die zahllosen, gewinnbringenden fachlichen Diskussionen, die mir zugestandene wissenschaftliche Freiheit und seinem Entgegenkommen bei vielen meiner Belange, möchte ich ihm herzlich danken.

Mein ausgesprochener Dank gilt auch Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar für die motivierende, inspirierende und kollegiale Betreuung bei meiner Dissertation. Unsere vielen fachlichen Gespräche haben mein bauphysikalisches Denken und somit die Ergebnisse dieser Arbeit stark geprägt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Klaus Sedlbauer, Ordinarius des Lehrstuhls für Bauphysik an der Universität Stuttgart, danke ich ebenfalls für die Bereitschaft diese Dissertation zu begutachten.

Ich möchte abschließend meinen Kollegen bei der Holzforschung Austria und den Mitarbeitern des Forschungsbereichs für Bauphysik und Schallschutz der TU-Wien für ihre stete Diskussionsbereitschaft und das sehr angenehme Arbeitsklima danken.

Vakatseite

Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Feuchtehaushalt von flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen unter variierenden Einflussfaktoren experimentell und simulationsbasiert analysiert. Es werden ebenfalls neue wissenschaftliche Methoden entwickelt, welche es ermöglichen, im Planungsprozess schnell die geeignete Dachkonstruktion zu finden.

Im ersten Teil der Arbeit werden hierfür zehn verschiedene hölzerne Flachdachkonstruktionen, bestehend aus Foliendächern, Gründächern und metallgedeckten Dächern im Realmaßstab untersucht. Die Freilandversuche erfolgen unter besonnten sowie bei sechs Aufbauten zusätzlich unter Vollzeit beschatteten Randbedingungen. Anhand der Messdaten werden die Einflussfaktoren auf den Feuchtehaushalt der verschiedenen Dachkonstruktionen ermittelt. Es wird messtechnisch nachgewiesen, dass:

- I. Beschattungen sich negativ auf den Feuchtehaushalt der Dächer auswirken
- II. ein Gründach einen ähnlichen Effekt wie eine dauerhafte Beschattung hat
- III. die untersuchten metallgedeckten Dächer sich hygrisch am günstigsten verhalten
- IV. durch die Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse (FADAB) im Vergleich zu einer PE-Folie mit $s_d > 100$ m eine deutlich stärkere Rücktrocknung von Feuchtigkeit aus dem Gefach erreicht wird
- V. eine FADAB mit höherer Spreizung im s_d -Wert Vorteile gegenüber einer FADAB mit geringerer Spreizung bringt
- VI. durch die Verwendung einer OSB anstelle einer diffusionsoffeneren MDF als innenseitige Beplankung erhöhte Feuchten im Gefach auftreten
- VII. die Luftdichtheit der OSB im Vergleich zu einer Dampfbremsbahn geringer ist
- VIII. es in den Gefachen zu Rotationsluftströmungen kommt

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein statistisch begründeter Ansatz zur Berücksichtigung von konvektiven Feuchteinträgen in Dächer präsentiert, wobei neben der Ausführungsqualität auch die Bedingungen bei der Dachfertigung berücksichtigt werden.

Es wird gezeigt, dass die Luftdichtheit des Daches ggf. einen entscheidenden Einfluss auf die Verwendbarkeit der Konstruktion hat.

Des Weiteren wird ein Verfahren hergeleitet, durch welches spezifische Beschattungssituationen bei der Tauglichkeitsbeurteilung von hölzernen Flachdächern berücksichtigt werden können, ohne dass zusätzliche Simulationen der Beschattung notwendig werden. Mit Hilfe einer Grafik zu den maximal möglichen Beschattungsdauern kann die Eignung der Dachkonstruktion schnell beurteilt werden. Das vorgestellte Verfahren wird durch eine Sensitivitätsanalyse überprüft.

Abschließend wird mit Hilfe eines Entscheidungsbaums aufgezeigt, wie die maßgebenden Faktoren auf die Dauerhaftigkeit von hölzernen Flachdächern bei der Planung praxistauglich berücksichtigt werden können.

Schlagwörter: Flachdächer, Holzbau, Luftleckage, Beschattung, Entscheidungsbaum, Konstruktionsempfehlungen

Abstract

In the course of this study the moisture behavior of flat wooden roofs is analysed. Simulations and experimental investigations under varying influencing factors are conducted. Also new scientific methods, which can be used to quickly find the suitable roof construction in the design phase, are developed.

In the first part of this work, ten different full scale flat wooden roofs (membrane roofs, green roofs and sheet metal roofs) are studied. The field experiments are carried out under sun exposed and with six roofs additionally under fulltime shaded conditions. The measured values determine the key factors of the moisture behavior of the roof constructions. The measurements show that:

- I. shading negatively impacts the moisture behavior of the roofs
- II. a green roof shows similar behavior to fully shaded conditions
- III. sheet metal roofs manage moisture best of all roof types
- IV. the inclusion of a smart vapor retarder (SVR) is able to achieve more distinct drying behavior compared to a PE-foil with $s_d > 100 \text{ m}$
- V. a SVR with a large variation of the s_d -value is more advantageous than a SVR with a lower variation
- VI. the use of OSB as inner sheeting can result in higher humidity in the cavity than a MDF which is more vapour permeable
- VII. the air tightness of OSB is lower than that of a vapor retarder membrane.
- VIII. free convection occurs in the cavities.

In the second part of the work, a statistical approach is presented to consider air exfiltration into the roofs. In addition to workmanship, the manufacturing condition of the roof is considered. It is shown that the air tightness of the roof could have a decisive impact on the usability of the roof construction.

A method is also derived by which specific shading conditions on the flat roof can be taken into account without the need for additional shading simulations. The suitability of the roof can be rated quickly using a diagram with the maximum shading durations. The proposed method is verified by a sensitivity analysis.

Finally, using a decision tree shows how the important factors in planning a hygrically robust flat wooden roof can be considered in a simple way.

Keywords: flat roof, wood construction, air leakage, shading, decision tree, recommendation of constructions

Formelzeichen

Lateinische Zeichen

a	dimensionslos	solarer Absorptionskoeffizient
a_{\min}	dimensionslos	minimal notwendiger solarer Absorptionskoeffizient
b	dimensionslos	Strömungsexponent
d	in m	Dicke in m
F_a	dimensionslos	Luftdichtheitsfaktor
g	in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Diffusionstromdichte
g_{hell}	in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Umkehrdiffusionstromdichte des hellen unbeschatteten Daches
g_{dunkel}	in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Umkehrdiffusionstromdichte des dunklen beschatteten Daches
h	in m	Höhe des zusammenhängenden Luftraums im Innenraum in m
h_e	in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Wärmeübergangskoeffizient außen
I	in W/m^2	solare Einstrahlung
I_{bes}	in W/m^2	solare Einstrahlung bei Vollzeit besonnten Situationen
I_{besch}	in W/m^2	solare Einstrahlung bei Beschattungssituationen
I_{dif}	in W/m^2	Diffusstrahlung
I_{dir}	in W/m^2	Direktstrahlung
p_v	in Pa	Wasserdampfpartialdruck im Gefach
$p_{v,\text{dunkel}}$	in Pa	Wasserdampfpartialdruck im Gefach mit dunkler Dachbahn
$p_{v,\text{hell}}$	in Pa	Wasserdampfpartialdruck im Gefach mit heller Dachbahn
$p_{v,i}$	in Pa	Wasserdampfpartialdruck im Innenraum
$p_{v,\text{Sat}}$	in Pa	Sättigungsdampfdruck im Gefach
Q	in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	Leckagevolumenstrom
Q_{50}	in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	Durchströmung der Hülle bei 50 Pa Druckdifferenz
SF	dimensionslos	Sichtfaktor zum Himmel
T_e	in K	Lufttemperatur im Außenbereich
T_i	in K	Lufttemperatur im Innenraum
t_{besch}	in Stunden	Beschattungsdauer
t_{end}	Stunde im Jahr	Endzeitpunkt der sommerlichen Rücktrocknung
t_{rueck}	in Stunden	Rücktrocknungszeitraum
t_{start}	Stunde im Jahr	Startzeitpunkt der sommerlichen Rücktrocknung
u	in M-%	Materialfeuchte der außenseitigen OSB
u_{\max}	in M-%	maximale Materialfeuchte der außenseitigen OSB
u_R	in M-%	Referenzmaterialfeuchte der außenseitigen OSB des unbeschatteten Daches
$u_{R,\max}$	in M-%	maximale Referenzmaterialfeuchte der außenseitigen OSB des unbeschatteten Daches

Griechische Zeichen

ΔIR	in W/m^2	Infrarot Zusatzverluste an den klaren Himmel
ΔP	in Pa	Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich
δ	in $kg/(m.s.Pa)$	Diffusionsleitfähigkeit des Bauteils
δ_a	in $kg/(m.s.Pa)$	Diffusionsleitfähigkeit der ruhenden Luft
ε	dimensionslos	Emissionsvermögen der Baustoffoberfläche
θ	in $^{\circ}C$	Lufttemperatur
θ^*	in $^{\circ}C$	Strahlungslufttemperatur
θ_{min}^*	in $^{\circ}C$	minimal notwendige Strahlungslufttemperatur ohne Beschattung
μ	dimensionslos	Diffusionswiderstandszahl
Υ	dimensionslos	Materialfeuchtequotient

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	II
Abstract	III
Formelzeichen	IV
Inhaltsverzeichnis	VI
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	2
2 Stand des Wissens	3
2.1 Dachkonstruktionen mit außenseitig hohen Diffusionswiderständen.....	3
2.2 Konvektive Feuchteinträge in Leichtbaukonstruktionen.....	9
2.3 Konstruktionsempfehlungen für hölzerne flachgeneigte Dachkonstruktionen ...	13
2.4 Zulässige Materialfeuchten in Holzbauteilen	15
2.5 Fazit	17
3 Experimentelle Analyse flachgeneigter Dachkonstruktionen	19
3.1 Versuchsaufbauten und Messtechnik	19
3.2 Erkenntnisse zu Foliendächern.....	23
3.3 Erkenntnisse zu Gründächern	27
3.4 Erkenntnisse zu metallgedeckten Dächern.....	29
3.5 Fazit	31
4 Neue Ansätze zur Berücksichtigung wichtiger Einflussfaktoren	33
4.1 Konvektive Feuchteinträge	33
4.1.1 Ansatz zur Quantifizierung konvektiver Feuchteinträge.....	33
4.1.2 Auswirkung konvektiver Feuchteinträge	37
4.2 Beschattungssituationen.....	43
4.2.1 Auswirkungen temporärer Beschattungen.....	43
4.2.2 Ansatz zur Ermittlung der maximal möglichen Beschattungsdauer	50
4.2.3 Sensitivitätsanalyse	56
4.2.4 Tauglichkeitskriterium	65
4.3 Konstruktionsempfehlungen	67

5	Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse	71
5.1	Neuerung gegenüber Stand des Wissens	71
5.2	Grenzen der gewonnenen Erkenntnisse.....	73
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	75
7	Literaturverzeichnis.....	79
A.1	Aufbau der experimentell untersuchten Dächer.....	85
A.2	Eingesetzte Messtechnik	91
A.3	Publikationen	93
A.3.1	Aufsatz I.....	93
A.3.2	Aufsatz II.....	107
A.3.3	Aufsatz III.....	117
A.3.4	Publikationsliste	127

1 Einführung

1.1 Problemstellung

Flachgeneigte Dachkonstruktionen aus Holz stellen und stellen einen architektonischen Trend sowohl im Wohnungsbau als auch im Objektbau dar. In den letzten Jahrzehnten wurden Holzelemente mit beidseitig stark diffusionshemmenden Schichten und Sparrenvollämmung infolge ihrer bautechnischen und wirtschaftlichen Vorteile forciert. Diese Varianten stellen jedoch ein schwer kalkulierbares Sicherheitsrisiko dar, da eindringende Feuchtigkeit keine Möglichkeit zum Austrocknen hat. Solche „dicht-dicht“-Aufbauten bilden eine regelrechte Feuchtefalle.

Abb. 1 zeigt die Auswertung von 22 Gutachten und persönlichen Gesprächen zu Schadensfällen an Flachdächern. Wie zu erkennen ist, ist ein Großteil der Schäden auf konvektive Feuchteinträge durch Leckagen in der innenseitigen Luftdichtheitsschicht zurück zu führen. Auch von Fuhrmann (2003); Hall und Hauser (2003); Mattsson (2007); Kalamees et al. (2008) werden ungenügend dichte Bauteilanschlüsse und Elektroinstallationen als typische Gründe für eine geringe Luftdichtheit von Gebäuden und konvektionsbedingte Feuchteschäden aufgeführt. Diverse gutachtliche Untersuchungen durch die Holzforschung Austria (HFA) bestätigen diese Aussagen und zeigen, dass 100 % luftdichte Konstruktionen bautechnisch so gut wie nicht auszuführen sind. Mögliche konvektive Feuchteinträge müssen deshalb bereits in der Planungsphase berücksichtigt werden und bei Konstruktionen mit hohen außenseitigen Diffusionswiderständen in den Innenraum abtrocknen können.

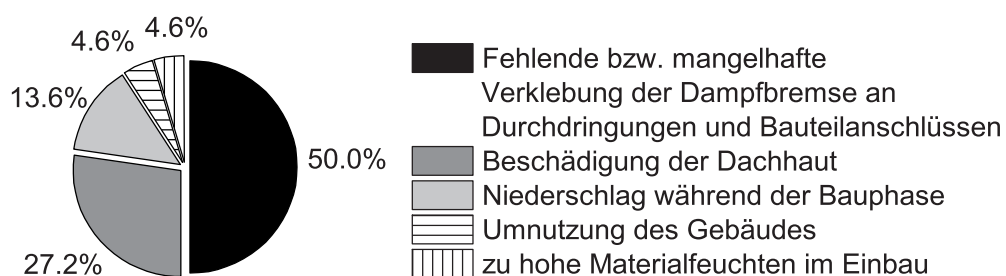


Abb. 1: Auswertung von 22 Gutachten und persönlichen Gesprächen zu Schadensfällen an Flachdächern

Aus diesem Grund werden innenseitig häufig feuchteadaptive Dampfbremsen (FADAB) [Künzel und Kaufmann (1995)] eingesetzt. Um das dadurch mögliche Rücktrocknungspotential auszuschöpfen, sind erhöhte Temperaturen im Gefach notwendig. Durch Grün-

dächer, Kiesauflagen u.ä. oder durch den Schattenwurf von Dachaufbauten und hoher benachbarter Gebäude wird eine direkte Erwärmung der Dachfläche durch die Sonne jedoch verhindert, was zu einer Feuchteakkumulation und somit zu Schäden im Dach führen kann.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist es, die maßgebenden Faktoren zur Errichtung hygrysch robuster flachgeneigter Dachkonstruktionen in Holzbauweise zu erarbeiten, quantifizierbar zu machen und für die Planungspraxis aufzuarbeiten.

Hierfür werden im Anschluss an die Literaturlauswertung zum Stand des Wissens verschiedene hölzerne Flachdachkonstruktionen (Foliendächer, Gründächer, Metaldächer) im Freiland experimentell untersucht. Anhand der so gewonnen Messdaten werden die hygryschcn Vorgänge in den verschiedenen Dachkonstruktionen analysiert und die maßgebenden Faktoren auf die Dauerhaftigkeit dieser Dächer aufgezeigt.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden neue Ansätze zur Berücksichtigung wichtiger Einflussfaktoren erarbeitet. Die präsentierten Ansätze werden durch instationäre Simulationen überprüft und bewertet.

Abschließend wird anhand eines Entscheidungsbaums aufgezeigt, wie die Interaktion der maßgebenden Einflussfaktoren und die dadurch resultierenden Konstruktionsempfehlungen für Planer praxistauglich wiedergegeben werden können.

2 Stand des Wissens

Nachfolgend wird in chronologischer Reihenfolge die Entwicklung zum aktuellen Stand des Wissens in folgenden vier Themenbereichen aufgezeigt.

- I. Dachkonstruktionen mit außenseitig hohen Diffusionswiderständen
- II. Konvektive Feuchteinträge in Leichtbaukonstruktionen
- III. Konstruktionsempfehlungen für hölzerne flachgeneigte Dachkonstruktionen
- IV. Zulässige Materialfeuchten in Holzbauteilen

2.1 Dachkonstruktionen mit außenseitig hohen Diffusionswiderständen

Dachkonstruktionen mit außenseitig hohen Diffusionswiderständen wurden in der Vergangenheit in der Regel auch innenseitig mit sehr hohen Diffusionswiderständen ausgeführt. So ist in Rick (1958) beispielsweise zu lesen: „Aus diesem Grunde muß jede Wärme-Dämmschicht mit einer Dampfsperre, einem hochdampfdichten Stoff, eingehüllt werden,...“

Jenisch und Schüle (1973) weisen stützend auf die rechnerische Untersuchung eines betonierten Flachdaches jedoch bereits auf das notwendige Rücktrocknungspotential bei Dächern mit außen stark dampfbremsenden Abdichtungen hin. Eine „...völlig dampfdichte Dampfsperre...“ sei nur dann notwendig, wenn eine stetige Zunahme der Dämmstofffeuchte zu erwarten ist. Sie empfehlen bei Wohn- und Bürobauten eine Dampfbremse mit einem s_d -Wert von 20 m, um einen maximalen Feuchtegehalt des Dämmstoffes von 500 g/m² nicht zu überschreiten.

Gemäß Künzel (1978) wird durch die Verwendung einer Dampfbremse mit einem s_d -Wert von 100 m bei außenseitiger Dachabdichtung gewährleistet, dass keine nachteilige Feuchtigkeitserhöhung im Dämmstoff auftritt. Dieser s_d -Wert wurde ebenfalls in der damaligen DIN 18530 – Massive Deckenkonstruktionen für Dächer; Planung und Ausführung, festgelegt. Es können gemäß den von Künzel getätigten experimentellen und rechnerischen Untersuchungen jedoch auch Dampfbremsen mit einem geringeren s_d -Wert verwendet werden, solange Dachabdichtung und Dampfbremse nach dem Glaser-Verfahren aufeinander abgestimmt werden.

Künzel (1995) weist durch rechnerische Untersuchungen mit WUFI® [Künzel (1994)] an Steildächern auf die Sensitivität außen dampfdichter Konstruktionen auf eindringende Feuchtigkeit und die praktisch kaum zu vermeidenden innenseitigen Leckagen hin. Eine Dampfbremse mit hohem s_d -Wert (> 100 m) wird als lediglich theoretische Lösung bezeichnet.

Künzel und Kaufmann (1995) zeigen anhand von rechnerischen Untersuchungen an einem nach außen quasi dampfdichtem und innenseitig luftdichtem nordorientierten Steildach die Wirkungsweise der damals neuartigen feuchteadaptiven Dampfbremse. Im Gegensatz zur Dachvariante mit einer Dampfbremse mit einem s_d -Wert von 2 m zeigt sich bei der Variante mit der FADAB keine Feuchteakkumulation im Dach.

Künzel und Großkinsky (1998) zeigen anhand ihrer experimentellen Untersuchungen an unbelüfteten 50° geneigten nord- und südorientierten luftdichten metallgedeckten Dächern, mit unterschiedlichen Dampfbremsen (PE-Folie, PA-Folie (FADAB), Natronkraftpapier) und innenseitigen Beplankungen (Gipskartonplatte, Spanplatte), dass der Einsatz einer FADAB im Vergleich zu einer PE-Folie mit einem s_d -Wert von 50 m Vorteile im Rücktrocknen von eingeschlossener Feuchtigkeit bringt. Alternativ kann jedoch auch eine Dampfbremse mit einem fixen s_d -Wert von 2 m verwendet werden. Es zeigt sich ebenfalls der wichtige Einfluss einer hohen Dachoberflächentemperatur auf die Rücktrocknung der eingeschlossenen Feuchte. Aufgrund der vorhandenen Umkehrdiffusion wird Kondensat auf den Dampfbremsen festgestellt. Der Einfluss der innenseitigen Beplankung ist gering, wobei ein niedrigerer s_d -Wert zu einer etwas schnelleren Rücktrocknung führt.

Künzel (1999b) weist auf die Notwendigkeit zur Ausschöpfung möglicher Rücktrocknungspotentiale für hölzerne Flachdächer und die hierfür notwendigen hohen Temperaturen im Gefach hin. Es wird anhand von Messungen an mineralischen Umkehrdächern gezeigt, dass eine Dachbegrünung vergleichbare thermische Auswirkungen auf die Dachhauttemperatur wie ein Kiesbett oder eine Deckschicht aus Pflastersteinen hat.

Gonin et al. (2003) untersuchen durch WUFI®-Simulationen das Verhalten von außenseitig abgedichteten Flachdächern aus hölzernen Hohlkastenelementen. Die Funktion der innenseitigen Dampfbremse wird bei diesen Elementen i.d.R. durch eine 3-Schichtplatte übernommen. Anhand von aufgenommenen Schadensfällen wird u.a. die Problematik der Feuchteumverteilung zwischen Ober- und Untergurt (äußere/innerer Beplankung) erläutert. Sie zeigen, dass es aufgrund des unterschiedlichen Quell und Schwindverhaltens der beiden Gurte zu einer Wölbung des Daches kommen kann.

Es wird empfohlen, die innenseitige Beplankung möglichst gering zu dimensionieren und somit den innenseitigen Diffusionswiderstand nieder zu halten. Die Hohlkastenelemente sollten nicht in kalten Gebieten eingesetzt werden, da hier das Rücktrocknungspotential zu gering ist. Es wird zusätzlich auf die Problematik einer Beschattung der Dachfläche hingewiesen. Gonin et al. diskutieren ebenfalls Untersuchungen zu Temperaturen unterhalb einer extensiven 10 cm starken Begrünung und einer 5 cm starken Kiesschicht [Kaufmann (1999)]. Wie gezeigt wird, stellen sich im Sommer unterhalb des Gründachsubstrats deutlich geringere Temperaturen als unter der Kiesschicht ein. Gemäß Gonin et al. können sich bei Gründächern somit Probleme durch Feuchteakkumulation im Dach ergeben. Es wird vermutet, dass dies bei Kiesschichten weniger stark ausgeprägt ist.

Gonin et al. weisen ebenfalls auf die unbedingt notwendige luftdichte Ausführung der

Konstruktion und die Nichtbeachtung konvektiver Feuchteinträge bei der Parameterstudie hin.

Wakili, K. G.; Frank, T. (2003); Wakili und Frank (2004) untersuchen anhand von Messungen und numerischen Simulationen des Verhalten von unterschiedlichen Flachdachaufbauten mit Auflast. Es werden insgesamt drei Flachdächer auf einem Schulpavillon, einer Sporthalle und eines Einfamilienhauses (Lager/Abstellraum) im Bereich um Zürich über 12 bzw. 9 Monate messtechnisch begleitet. Auf allen Dachabdichtungen ist eine Auflast in Form eines Kiesbetts oder einer Zementierung aufgebracht. Die Aufbauten unterscheiden sich durch die Wahl des Dämmstoffs (MIWO/Zellulose) und dem Vorhandensein einer FADAB. Die höchste raumklimatisch bedingte Feuchtelast zeigt der Schulpavillon mit einer Innentemperatur von $(21 \pm 3)^\circ\text{C}$ und einer r.LF. von $(61 \pm 14) \%$. Das Flachdach auf diesem Gebäude besitzt eine FADAB und ist mit Mineralwolle ausgedämmt. Wie die Messungen zeigen, stellt sich an der Gefachaußenseite unterhalb der Beplankung (3-Schichtplatte) eine lange andauernde hohe r.LF. von $> 90 \%$ und Materialfeuchten der außenseitigen Beplankung von $> 20 \text{ M} \%$ ein.

In den anderen Dachaufbauten dieser Untersuchung (Variante mit Zellulose und Variante ohne FADAB nur mit 3-Schichtplatte) zeigen sich solch hohe Feuchten im Gefach nicht. Es ist jedoch zu beachten, dass dort jeweils deutlich geringere raumseitige Feuchtelasten herrschen.

Gemäß Wakili und Frank (2004) können 3-Schichtplatten aufgrund ihres quasi feuchteadaptiven Diffusionswiderstandes die Funktion einer FADAB übernehmen und diese ersetzen.

Weitere Untersuchungen von Wakili, K. G.; Frank, T. (2003) über 13 Monate an extensiven Gründächern mit einer PA-Folie (FADAB) und einer PE-Folie als Dampfbremse und einer Variante ohne Dampfbremse zeigt ein nahezu identes Verhalten der drei Gründächer in Bezug auf die r.LF. an der Gefachaußenseite. In allen drei Varianten steigt die r.LF. dort für einen langen Zeitraum auf $> 80 \%$.

Die innenseitige Raumlufffeuchte beträgt bei diesen Untersuchungen etwa $(45 \pm 10) \%$.

Häupl und Petzold (2007) untersuchen, motiviert durch einen Schadensfall an einem Gründach, das hygrothermische Verhalten von hölzernen Gründächern und Bitumendächern ohne Auflast mittels numerischer Simulation. Sie kommen zu dem Schluss, dass Gründächer bei sorgfältiger, luftdichter Ausführung und trockenen Baumaterialien funktionieren können, weisen jedoch auf das fehlende Rücktrocknungspotential und das hohe Schadensrisiko von Gründächern mit Zwischensparrendämmung hin. Das Bitumendach verhält sich in den dortigen Untersuchungen deutlich günstiger.

Roßbach (2007) untersucht in ihrer Diplomarbeit anhand von WUFI[®]-Simulationen diverse Flachdachaufbauten. Sie variiert hierbei u.a. die Einbaufeuchten der Materialien, die solaren Absorptionskoeffizienten der Deckschicht, die durch innenseitige Leckagen zusätzlich eindringende Feuchtemenge (Pauschalbetrag) sowie die innen und außenseitig angebrachten s_d -Werte. Es wird gezeigt, dass Foliendächer ohne Auflast und mit dunkler Dachbahn ein hohes Rücktrocknungspotential besitzen und in diesen Dächern auf den

chemischen Holzschutz verzichtet werden kann (Gebrauchsklasse 0 nach DIN 68800). Auf eine Bekiesung oder Begrünung dieser Dächer soll gemäß Roßbach jedoch nach Möglichkeit verzichtet werden, da unplanmäßig eindringende Feuchtigkeit kaum rück-trocknen kann. Helle Dachbahnen wirken sich ähnlich wie eine Begrünung oder Bekiesung negativ auf den Feuchtehaushalt des Daches aus.

Es wird in der Arbeit auch die positive Wirkung einer Zusatzdämmung über der Dachab-dichtung hervorgehoben. Diese soll jedoch mindestens 10 cm stark ausgeführt werden, da für Dämmstärken darunter der positive Effekt kaum hervortritt bzw. sich sogar ins Negative wandeln kann. Auch bei hohen zusätzlichen Dämmstoffdicken ist auf eine eher diffusionsoffene Dampfbremse zurück zu greifen.

Bludau et al. (2008) zeigen anhand von WUFI®-Simulationen eines luftdichten Folienda-ches ohne Auflast die hygrischen Auswirkungen von hellen und dunklen Dachbahnen sowie unterschiedlichen Standorten auf ein hölzernes Flachdach mit Bitumenabdichtung. Während die Dachkonstruktion in Dubai (UAE) auch mit einer hellen Dachbahn funktio-niert, ist das Dach in Holzkirchen (D) und Kopenhagen (DK) nur mit einer dunklen Dachbahn tauglich. Bei kalten Außenklimabedingungen wie sie in Helsinki (FIN) herr-schen, versagt das Dach hingegen auch mit einer dunklen Dachbahn.

Winter et al. (2009) untersuchen anhand eines 15 monatigen Freilandversuchs in Leipzig (D) das hygrothermische Verhalten von acht unterschiedlichen Flachdachaufbauten aus Holz. Variiert wird die innenseitige Dampfbremse (FADAB mit hoher Spreizung bzw. OSB), der Dämmstoff im Gefach (MIWO bzw. Zellulose) sowie der Aufbau oberhalb der Dachabdichtung (dunkle Dachbahn ohne Auflast bzw. mit Gründach). Es wird ebenfalls je ein Dachelement mit Bekiesung und eines mit einer hellgrauen Dachbahn untersucht. Zur Simulation einer Beschattung wird 15 cm über der Dachfläche eines Folienelements eine horizontale Werkstoffplatte befestigt. Die Innenraumlufttemperatur beträgt bei den dortigen Untersuchungen etwa $(21\pm 1)^\circ\text{C}$ und die Raumlufffeuchte etwa $(50\pm 6)\%$.

Wie die Messungen zeigen, ist ein Einfluss der Dampfbremse beim Foliendach mit Mineralwollgedämmung kaum zu erkennen. Die gefachaußenseitigen r.LF. beider Kon-struktionen sind sehr ähnlich. Die Messkurven sind aufgrund von Fühlerausfällen jedoch nicht über den gesamten Untersuchungszeitraum vergleichbar.

Auf die Bedingungen in dem beschatteten Element wird nicht näher eingegangen.

Beim zellulosegedämmten Foliendach zeigt die Variante mit FADAB eine geringere r.LF. auf der Gefachaußenseite als die Variante mit einer OSB als Dampfbremse und generell eine geringere r.LF. als die Foliendächer mit Mineralwollgedämmung.

Die Gründächer mit FADAB zeigen geringere r.LF. auf der Gefachaußenseite als jene mit OSB als Dampfbremse, wobei die zellulosegedämmten Variante wiederum die ge-ringste gefachaußenseitige r.LF. zeigt.

Materialfeuchtemessungen in den Dächern zeigen lediglich in einem Foliendach mit MIWO-Dämmung Feuchten von $> 20\text{ M-}\%$ (max. $27\text{ M-}\%$) der außenseitigen OSB-Beplankung. Schimmelpilze konnten in diesem Dach nicht festgestellt werden, jedoch in einem Gründach mit nicht anliegendem Zellulosedämmstoff.

Die Klimate auf der Gefachinnenseite wurden bei den experimentellen Untersuchungen nicht erfasst.

Es werden von Winter et al. ebenfalls weiterführende Parameterstudien mit WUFI® durchgeführt. U.a. werden neben einer vollzeitigen Beschattung auch konvektive Feuchteinträge berücksichtigt. Hierfür werden Pauschalbeträge (250 g/m², 150 g/m², 50 g/m²) gleichmäßig auf sieben Wintermonate aufgeteilt und als Feuchtequelle festgelegt, d.h. z.B. für 250 g/(m².Winter) => 1,36e-8 kg/(m².s).

Stützend auf die gewonnenen Messergebnisse, die Parameterstudien und Begutachtungen gebauter Objekte kommen Winter et al. zu folgenden Schlüssen:

- I. Zellulosedämmstoff wirkt sich aufgrund seiner höheren Feuchtekapazität im Vergleich zu MIWO positiv auf den Feuchtehaushalt unbelüfteter Flachdächer aus.
- II. Eine FADAB mit hoher Spreizung ist einer OSB als innenseitige Dampfbremse eindeutig vorzuziehen.
- III. Dunkle Dachabdichtungen sind hellen vor zu ziehen.
- IV. Beschattungssituationen sind im Einzelfall zu betrachten.

Bachinger (2010) untersucht in ihrer Dissertation 25 gebaute Flachdächer in Holzrahmenbauweise mit Dachabdichtung anhand von WUFI®-Simulationen. Bei 24 der 25 Dachaufbauten sind innenseitig Dampfbremsen mit s_d -Werten von 150 m bis > 1700 m angebracht. Zur Datenerhebung führt Bachinger auch Interviews mit den beteiligten Planern und Sachverständigen durch. An 48 % der untersuchten Dachaufbauten kam es zu Feuchteschäden, wobei an den Dächern auf Gebäuden mit nachgewiesener Luftdichtheit (20 % mit $n_{50} < 0,8 \text{ h}^{-1}$) keine Schäden festgestellt werden konnten. Die rechnerischen Untersuchungen von Bachinger erfolgen ohne Berücksichtigung eines konvektiven Feuchteintrags. Wie die getätigte Simulationsstudie zeigt, hat eine Variation des s_d -Werts der Dampfbremse (150 m bis > 1700 m) keinen signifikanten Einfluss auf den Feuchtehaushalt der Dächer.

Es wird in der Studie ebenfalls der s_d -Wert der Dachabdichtung variiert. Bei Dachabdichtungen mit niederem s_d -Wert ist ein tendenziell besseres hygrisches Verhalten zu beobachten.

Als entscheidenden Einflussfaktor wird von Bachinger jedoch der solare Absorptionskoeffizient der Dachabdichtung genannt.

Um Verbesserungsvorschläge für die ausgeführten Flachdachelemente auszusprechen, beurteilt Bachinger anhand von WUFI® Simulationen u.a. den Einfluss einer Zusatzdämmung auf der außenseitigen Beplankung sowie den Einfluss von feuchteadaptiven Dampfbremsen.

Sie kommt zu dem Schluss, dass eine Zusatzdämmung die hygrische Belastung auf die außenseitige Beplankung i.A. verringert. Abhängig von der Dämmstoffdicke der Zusatzdämmung kann sich die hygrische Belastung jedoch auch verstärken. Individuelle Betrachtungen sind zur richtigen Dimensionierung der Zusatzdämmung notwendig. Anhand der Simulationsstudie zum Einsatz von FADABs verdeutlicht Bachinger, dass mit anteiligem solarem Absorptionskoeffizient der Dachbahn die Dachelemente mit FADAB ein

zunehmend günstigeres hygrisches Verhalten aufweisen als mit einer Dampfbremse mit fixem hohem s_d -Wert.

Bludau et al. (2010b) diskutieren in ihrem Beitrag die Modifikation von Solar-Strahlungsdaten, um bei instationären Simulationen eine Beschattung der Dachfläche durch geneigte PV-Module abzubilden. Das diskutierte Modell berücksichtigt neben der abgehaltenen Direktstrahlung und der reduzierten langwelligen Abstrahlung der Dachfläche auch den langwelligen Strahlungsaustausch mit dem PV-Modul. Wie Bludau et al. anhand von WUFI®-Simulationen zeigen, wirkt sich die Beschattung durch die PV-Module sehr ungünstig auf den Feuchtehaushalt in den untersuchten hölzernen Flachdachelementen aus. Noch kritischer erweist sich jedoch, aufgrund der ungestörten langwelligen Abstrahlung, eine weiße unbeschattete Dachbahn mit einem solaren Absorptionskoeffizient von 0,3.

Bludau et al. (2010a) verdeutlichen anhand von Messwerten und WUFI®-Simulationen die hygrothermischen Vorgänge in der Dämmebene eines aufdachgedämmten Daches mit Mineralwollendämmung. Die betrachteten Dachflächen setzen sich aus einer Fläche mit einer rotbraunen Dachbahn mit einem solaren Absorptionsgrad von 0,9, einer weißen Dachbahn mit 0,2 und einer Fläche, welche durch ein geneigtes PV-Modul beschattet wird. Die Messergebnisse zeigen, dass die weiße Dachbahn während des Tages etwas wärmer und während der Nacht, aufgrund der ungestörten langwelligen Abstrahlung, etwas kühler (je ~ 5 K) als die beschattete Dachfläche wird. Bludau et al. kommen zu dem Schluss, dass eine Simulation mit einem solaren Absorptionsgrad von 0,2 bei Berücksichtigung der langwelligen Abstrahlung den Beschattungseffekt durch das PV-Modul abdeckt.

2.2 Konvektive Feuchteinträge in Leichtbaukonstruktionen

Auf die Probleme durch konvektive Einträge von warmer Raumluft in Außenbauteile (Luftexfiltration) wird schon früh hingewiesen. Wilson, A. G. (1961) verdeutlicht, dass die leakagebedingte Kondensatbildung im Bauteil aufgrund des thermischen Auftriebs und der Windanströmung deutlich von der Lage des Bauteils und dem Innenklima abhängt. Er bezeichnet die Ausführungsqualität neben der Konstruktionsart und der Materialqualität als maßgebende Größe zur Steuerung des konvektiven Feuchteintrags in Bauteile.

Zur rechnerischen Berücksichtigung von Leckageströmen beziffert Janssens (1998) anhand von Messungen an drei unterschiedlichen Schadensfällen an Dächern und stützend auf eine Literaturrecherche die zu erreichende Luftdichtheit von Bauteilen mit Foliendampfbremsen nach europäischem Baustandard der 1990er Jahre mit

$$Q_{\text{Jan}} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta P \quad (2.1)$$

Q Leckagevolumenstrom in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

ΔP Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa

Künzel (1999a) empfiehlt für Holzkonstruktionen aufgrund von Luftdichtheitsuntersuchungen in Nordamerika [TenWolde et al. (1998)], die Beachtung konvektiver Feuchteinträge durch einen pauschalen Feuchtezuschlag von 250 g/m^2 während der Tauperiode.

Geißler (2001) zeigt anhand einer statistischen Auswertung von 133 Luftdichtheitsmessungen an zumeist Holzhäusern, dass Leckagen durch Installationen bei etwa 90 % aller untersuchten Gebäude auftreten. Er zeigt auch, dass der Volumenstromanteil durch Steckdosen und Lichtschalter am gesamten Luftwechsel des Gebäudes gering ist, er liegt bei etwa 5 %.

Geißler und Hauser (2002) untersuchen anhand von Experimenten und CFD-Simulationen das Gefährdungspotential von Luftexfiltration durch unterschiedliche Spaltgeometrien. Wie sich zeigt, weisen schnell durchströmte, geradlinige Spalten ein eher geringes Gefährdungspotential bzgl. Feuchteschäden auf. Der Leckageluftstrom kühlt bei der schnellen Durchströmung des Bauteils kaum ab, wodurch nur geringe Mengen an Feuchtigkeit ausfallen. Deutlich kritischer verhalten sich langsam durchströmte Leckagepfade mit Luftumlenkung an der Außenseite im Gefach. Der langsam an der kalten Beplankung vorbeistreichende Leckageluftstrom kühlt stark ab, wodurch große Mengen an Kondensat ausfallen können. Künzel et al. (2010) bezeichnen Leckagen mit solchen Strömungspfaden als „Feuchteleckagen“ im Gegensatz zu den hygrisch eher unkritischen „Wärmeleckagen“.

Hall und Hauser (2003) untersuchen in ihrer Arbeit 51 Einfamilienhäuser in Holzleichte-bauweise in Deutschland bzgl. derer Luftdichtheit. Es werden in der Arbeit ebenfalls die einzelnen Leckageströme quantitativ erfasst.

Neben Türen und Spitzbodenlücken zählen Installationen zu den am häufigsten vorkommenden leckagebehafteten Durchdringungen. Anhand zweier Gebäude errechnen sie den Volumenstromanteil durch Steckdosen und Lichtschalter am gesamten Luftwechsel des Gebäudes zu 8 % bzw. 12 %.

Sie quantifizieren die Luftvolumenströme durch einzelne Leckagen wie Steckdosen, Lichtschalter, Löcher in Folien etc. anhand von In-Situ Messungen und Laboruntersuchungen. Während die In-Situ Messungen bei einer Druckdifferenz von 50 Pa durchgeführt werden, erfolgen die Laboruntersuchungen bei abgestuften Druckdifferenzen von 10 Pa bis 50 Pa.

Kalamees (2007) untersucht 32 Einfamilienhäuser in Estland auf ihre Luftdichtheit hin, wobei 29 der 32 Häuser Holzrahmen- und die restlichen drei Stahlträgerkonstruktionen sind. Die Gebäude wurden teilweise von Hausherrn oder Fachkräften auf der Baustelle errichtet und teilweise von Hausbaufirmen vorgefertigt.

Wie zu erkennen ist, wirkt sich die Art der Fertigung stark auf die Luftdichtheit aus. Vorgefertigte Gebäude zeigten eine deutlich höhere Luftdichtheit als nicht vorgefertigte und baustellengefertigte Gebäude mit Qualitätsüberwachung zeigen wiederum eine bessere Luftdichtheit als jene ohne Qualitätsüberwachung.

Als typischen Leckagewege werden u.a. Durchdringungen elektrischer und sanitärer Installationen durch die Luftdichtheitsschicht genannt.

Kalamees et al. (2008) untersuchen 21 Einfamilienhäuser verschiedener Bauweisen (Holzbau, Ziegel, Beton) und 16 Apartments in Finnland bzgl. Luftdichtheit und Wärmebrücken. Es zeigt sich hierbei, dass im Hausbau der Anteil an Durchdringungen der innenseitigen Luftdichtheitsschicht höher ist als im Wohnungsbau.

Zirkelbach et al. (2009) entwickeln basierend auf den von Künzel (1999a) vorgeschlagenen 250 g/m² konvektiven Feuchteeintrag pro Tauperiode ein instationäres Modell zur Berücksichtigung konvektiver Feuchteinträge. Hierfür wird der Leckagevolumenstrom aufgrund „Feuchteleckagen“ linear von $\frac{1}{15}$ des Q_{50} -Werts (Durchströmung der Hüllfläche bei 50 Pa Druckdifferenz) des Gebäudes abgeleitet.

In Bezug auf die in Deutschland normativ geregelten Anforderungen an die Luftdichtheit von Gebäuden werden von Zirkelbach et al. (2009) drei Luftdichtheitsklassen A ($Q_{50} \leq 1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), B ($Q_{50} \leq 3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) und C ($Q_{50} \leq 5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) vorgeschlagen. Umgerechnet auf die Volumenströme ergeben sich daraus folgende drei Volumenstromfunktionen:

$$Q_{\text{Zir,A}} = 3,88 \cdot 10^{-7} \cdot \Delta P \quad (2.2)$$

$$Q_{\text{Zir,B}} = 1,11 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P \quad (2.3)$$

$$Q_{\text{Zir,C}} = 1,86 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P \quad (2.4)$$

Hens (2010) schlägt einen Leckageluftvolumenstrom von

$$Q_{\text{Hens}} < 1 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta P^b \quad (2.5)$$

Q Leckagevolumenstrom in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

ΔP Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa

b Strömungsexponent

zur Berücksichtigung von Luft-Exfiltrationen in Bauteile vor. Er führt ebenfalls eine Sammlung von Luftdichtheitskennwerten verschiedener Bauteile und Materialien an.

Vakatseite

2.3 Konstruktionsempfehlungen für hölzerne flachgeneigte Dachkonstruktionen

Im Merkblatt zum „Feuchteschutz bei Flachdächern in Holzbauweise“ [SVDW (2007)] werden folgende Flachdachkonstruktionen nach ihrer hyrischen Robustheit beurteilt sowie generelle Planungs- und Ausführungsempfehlungen ausgesprochen (Reihung nach abnehmender hygrischer Robustheit):

- A) Nicht durchlüftete Konstruktionen – Wärmedämmung auf der Tragkonstruktion
- B) Durchlüftete Konstruktionen
- C) Nicht durchlüftete Konstruktionen mit Wärmedämmung innerhalb der Tragkonstruktion und Zusatzdämmung
- D) Nicht durchlüftete Konstruktionen mit Wärmedämmung innerhalb der Tragkonstruktion

Die Konstruktionen C) und D) werden als gering fehlertolerant eingestuft, wodurch erhöhte Planungsaufwände notwendig werden. Dampfbremsen mit einem s_d -Wert > 10 m sind demnach nicht zulässig. Es wird auf die notwendige Luftdichtheit hingewiesen und von einer Baustellenfertigung abgeraten. Ebenfalls wird auf die negativen hygrischen Auswirkungen einer Beschattung hingewiesen.

Im Infodienst Holz spezial „Flachdächern in Holzbauweise“ [Holzabsatzfond (2008)] werden Konstruktionsempfehlungen zu folgenden Flachdachaufbauten ausgesprochen und diese im Hinblick auf Wärme-/Feuchte-/Brand- und Schallschutz sowie Holzschutz bewertet:

- A) Belüftete Flachdächer
 - 1) Volldämmung mit unterlüfteter Dachhaut und Dachabdichtung
 - 2) Volldämmung mit unterlüfteter Dachhaut und Bekiesung
 - 3) Belüftete Dämmebene und Metaldachdeckung
- B) Nicht belüftete Flachdächer mit Vollsparrendämmung
 - 1) Dachabdichtung mit innenseitiger Installationsebene
 - 2) Metaldachdeckung mit innenseitiger Installationsebene
 - 3) Dachabdichtung mit beidseitiger Beplankung (Holztafelbau)
- C) Aufdachgedämmte Flachdächer
 - 1) Aufsparrendämmung
 - 2) Aufdachdämmung auf Flächentragwerk

Grundlage der hygrothermischen Einstufung sind WUFI®-Simulationen. Um konvektive Feuchteinträge zu simulieren, wird jeweils eine zusätzliche Feuchtemenge von pauschal $250 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{Jahr})$ in den Gefachen berücksichtigt. Als Außenklima wird Holzkirchen gewählt und als Innenklima eine normale Feuchtelast gemäß WTA-Merkblatt 6-2-01/D von $(21 \pm 1)^\circ\text{C}$ und $(50 \pm 10) \% \text{ r.LF}$. Die Grenzbedingung für eine positive Beurteilung wird durch eine Materialfeuchte von 20 M-% definiert, wobei diese im ersten Jahr auch über-

schritten werden darf.

Es wird in [Holzabsatzfond (2008)] ebenfalls wiederholt auf die Notwendigkeit des Rücktrocknungspotentials unbelüfteter Flachdächer eingegangen. Die Problematik, welche eine Beschattung der Dachfläche oder eine Dachbegrünung diesbezüglich mit sich bringt, wird kurz angesprochen, ohne jedoch näher darauf einzugehen.

Winter et al. (2009) stufen stützend auf ihre oben beschriebenen Untersuchungen folgende Flachdachaufbauten als hygrisch unbedenklich ein (Aufbau von außen nach innen):

- A) Schwarze PVC-Bahn - OSB - Zellulose - FADAB
- B) Schwarze PVC-Bahn - OSB - Zellulose - OSB
- C) Gründach - OSB - Zellulose - FADAB
- D) Schwarze PVC-Bahn - OSB - MIWO - FADAB

Folgender Flachdachaufbau ist gemäß Winter et al. bei der Planung einer detaillierten Untersuchung zu unterziehen:

- E) Schwarze PVC-Bahn - OSB - MIWO - OSB

Folgende Flachdachaufbauten werden nicht empfohlen:

- F) Gründach - OSB - Zellulose - OSB
- G) Gründach - OSB - MIWO - OSB
- H) Gründach - OSB - MIWO - FADAB

Winter et al. verwenden zur Tauglichkeitsbeurteilung der Flachdachkonstruktionen u.a. die Materialfeuchtegrenzwerte gemäß DIN 68800-2. Demnach darf das Konstruktionsholz eine Holzfeuchte von 20 M-% und die eingesetzte OSB eine Materialfeuchte von 18 M-% nicht überschreiten.

Sedlbauer et al. (2010) behandeln, neben der geschichtlichen Entwicklung, die statischen und materiellen Gesichtspunkte sowie die bauphysikalischen Anforderungen (Wärme-/Feuchte-/Schall- und Brandschutz), welche beim Bau von Flachdächern beachtet werden müssen. U.a. wird anhand von Messergebnissen und WUFI®-Simulationen die Notwendigkeit des Rücktrocknungspotentials für Dächer mit Dachabdichtung aufgezeigt. Der konvektive Feuchteeintrag und dessen Auswirkungen auf hölzerne Flachdachkonstruktionen mit Zwischensparrendämmung werden ebenfalls diskutiert. In den Konstruktionsbeispielen werden hölzerne Flachdächer mit Zwischensparrendämmung jedoch nicht aufgeführt. Der Fokus liegt hierbei auf mineralischen Dächern bzw. Dachkonstruktionen mit Dämmstoff und Abdichtung oberhalb der Tragstruktur.

2.4 Zulässige Materialfeuchten in Holzbauteilen

Um auf den chemischen Holzschutz von allseits verbautem Holz verzichten zu können, darf gemäß ÖNORM B 3802-2 eine Holzfeuchte von 20 M-% über die gesamte Gebrauchsdauer nicht überschreiten werden. Diese Holzfeuchte gilt gemäß Norm als Grenzwert für das Wachstum von holzerstörenden Pilzen.

Nach Viitanen (1996) kann dieser Grenzwert nicht bestätigt werden. Demnach liegt die minimal notwendige Holzfeuchte für holzerstörende Pilze bei etwa 24 M-% - 28 M-%. Schimmelpilze können gemäß Viitanen (1996) und Sedlbauer (2001) jedoch auch bereits bei Holzfeuchten unter 20 M-% auskeimen und wachsen. Die herrschende Temperatur hat ebenfalls einen starken Einfluss auf das Pilzwachstum, wie von Viitanen und Sedlbauer gezeigt wird.

Gemäß ÖNORM B 2215 darf Bauholz zum Zeitpunkt der Fertigstellung des Bauteils 18 M-% nicht überschreiten. Zur Sicherstellung dieses Grenzwertes sind elektrische Holzfeuchtigkeits-Messgeräte mit einer Messtoleranz von max. ± 2 M-% zu verwenden. Die reale Holzfeuchte kann zum Zeitpunkt der Fertigstellung somit bis zu 20 M-% betragen.

Zur Sicherung der Dauerhaftigkeit des Bauteils darf entsprechend DIN 68800-2 das Konstruktionsholz von zwischensparrengedämmten Flachdachkonstruktionen eine Holzfeuchte von 20 M-% und die eingesetzte OSB eine Materialfeuchte von 18 M-% nicht überschreiten. Die Holzfeuchtemessung hat durch das elektrische Widerstandsmessverfahren zu erfolgen. Wie von Du et al. (1991) gezeigt wird, sind bei dieser Messmethode Abweichungen von bis zu $\pm 2,5$ M-% möglich, was in realen Holzfeuchten von bis zu 22,5 M-% resultieren kann.

Carll und Wiedenhoef (2009) diskutieren anhand von diversen Literaturangaben maximale Materialfeuchten und Dimensionsstabilitäten von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen. Demnach sollte Bauholz eine Holzfeuchte von 20 M-% nicht überschreiten. Abgeleitet aus Sorptionskurven für Holz wird von Carll und Wiedenhoef anhand einer maximalen Holzfeuchte von 20 M-% der Grenzwert für die OSB-Materialfeuchte auf 17 M-% festgelegt

OSB weist nach der Herstellung Materialfeuchten von etwa 2 M-% bis 4 M-% auf [APA (2006); ÖNORM CEN/TS 12872]. Gemäß Sonderegger und Niemz (2003) liegt die differentielle Quellung (Prozent Längenänderung pro Prozent Materialfeuchteänderung) von 18 mm dickem OSB 3 im Bereich zwischen 35 % r.LF. und 80 % r.LF. bei 0.028 %/% (parallel zu den Strands) und 0.034 %/% (senkrecht zu den Strands). Für relative Luftfeuchtebereiche zwischen 80 % und 95 % liegt sie in beide Richtungen bei 0,011 %/%. Nach ÖNORM CEN/TS 12872 sind unabhängig des Luftfeuchtebereichs 0.02 %/% bzw. 0.03 %/% Dimensionsänderung anzusetzen.

Durch ungleichmäßige Quell- und Schwindbewegungen der außen- und innenseitigen Beplankung oder durch nicht vorhandene Bewegungsfugen, kann es während der Nutzung zu einer Wölbung des gesamten Bauteils oder Quetschungen der Beplankung kommen [Gonin et al. (2003); APA (2005); Gjinolli und Vogt (2006)].

2.5 Fazit

Die Literaturlauswertung zeigt, dass das Bewusstsein über die Problematik von Flachdächern mit fehlendem Rücktrocknungspotential deutlich gestiegen ist. In Dächern mit außen stark dampfbremsenden Schichten werden deshalb verstärkt feuchteadaptive Dampfbremsen eingesetzt. Experimentelle Untersuchungen hierzu wurden jedoch zumeist an Flachdächern mit Auflast/Aufdachdämmung [Kaufmann (1999); Künzel (1999b); Wakili, K. G.; Frank, T. (2003); Wakili und Frank (2004); Bludau et al. (2010a)] oder unbelüfteten Steildächern mit Metalldeckung [Künzel und Großkinsky (1998)] durchgeführt. Zwischensparrengedämmte hölzerne Flachdächer mit Dachabdichtung ohne Auflast wurden zumeist simulationsbasierend untersucht [Gonin et al. (2003); Häupl und Petzold (2007); Roßbach (2007); Bludau et al. (2008)]. Bei den experimentellen Untersuchungen dieser Dächer wurde der Einfluss einer Beschattung nur bedingt berücksichtigt oder die Klimate an der Gefachinnenseite nicht erfasst [Winter et al. (2009)].

Wie anhand der Literaturstudie ebenfalls zu erkennen ist, kommt dem konvektiven Feuchteeintrag in Leichtbaukonstruktionen eine steigende Bedeutung zu. Um diese Einträge rechnerisch zu berücksichtigen, werden unterschiedliche Leckagevolumenströme definiert [Janssens (1998); Zirkelbach et al. (2009); Hens (2010)]. Installationen, welche die innenseitige Luftdichtheitsschicht durchdringen, fließen als typische Leckageursache [Geißler (2001); Hall und Hauser (2003); Kalamees (2007)] jedoch nie direkt in die bestehenden Ansätze mit ein. Die ebenfalls maßgebenden Fertigungsbedingungen und Ausführungsqualitäten [Wilson, A. G. (1961); Kalamees (2007)] werden nur von Zirkelbach et al. (2009) teilweise mitberücksichtigt.

Die recherchierten Konstruktionsempfehlungen für flachgeneigte Dächer aus Holz [SVDW (2007); Holzabsatzfond (2008); Winter et al. (2009); Sedlbauer et al. (2010)] berücksichtigen weder vorhandene Beschattungssituationen noch spezifische konvektive Feuchteinträge. Es werden zumeist generelle Empfehlungen zur Konstruktion flachgeneigter Dächer ausgesprochen.

Bei der Beurteilung der Tauglichkeit von hölzernen Flachdächern wurde in der Vergangenheit häufig nicht zwischen der Materialfeuchtegrenze von Konstruktionsholz und Holzwerkstoffen wie z.B. OSB, unterschieden. Anhaltende 20 M-% der außenseitigen OSB ist zur positiven Beurteilung des Flachdachaufbaus zu hoch gewählt. Freiluftkonditionierte OSB erreichen im Sommer eine Ausgleichsfeuchte von etwa 9 M-%. Für ein Dachelement mit 10,00 m Länge und 2,50 m Breite (Strand-Orientierung quer) ergibt sich gemäß Sonderegger und Niemz (2003) beim Auffeuchten von 9 M-% auf 20 M-% eine Gesamtbreitenänderung der OSB-Beplankung von 0,5 cm und eine Längenänderung auf die gesamte Elementlänge von 2,4 cm. Gemäß Norm beträgt die Breitenänderung 0,6 cm und die Längenänderung sogar 3,3 cm. Solch starke Dimensionsänderungen der außenseitigen Beplankung können zu erhöhten Zwängen im Dach führen.

Abb. 2 zeigt Sorptionskurven für Holz und OSB aus Sonderegger und Niemz (2003); Fitz et al. (2004); Niemz et al. (2004); Niemz und Sonderegger (2009) und Carll und Wiedenhoef (2009). Gemäß den literaturbasierten Kennwerten liegt die OSB-Ausgleichsfeuchte bei Bedingungen, welche bei Vollholz eine Holzfeuchte von 20 M-% erzeugen, bei 17,6 M-%. Der OSB-Grenzwert gemäß Carll und Wiedenhoef (2009) kann demnach etwas überschritten werden, allerdings nicht bis auf 20 M-%. Bei dieser Ausgleichsfeuchte können nahezu Klimawerte erreicht werden, welche eine Auskeimung von holzerstörenden Pilzen im an der OSB anliegenden Vollholz ermöglichen (in Abhängigkeit der Einwirkdauer und Temperatur).

Eine OSB Materialfeuchte von 18 M-% sollte deshalb nicht ohne Berücksichtigung der Einwirkdauer, Temperatur und Konstruktion (Dehnungsfugen) überschritten werden.

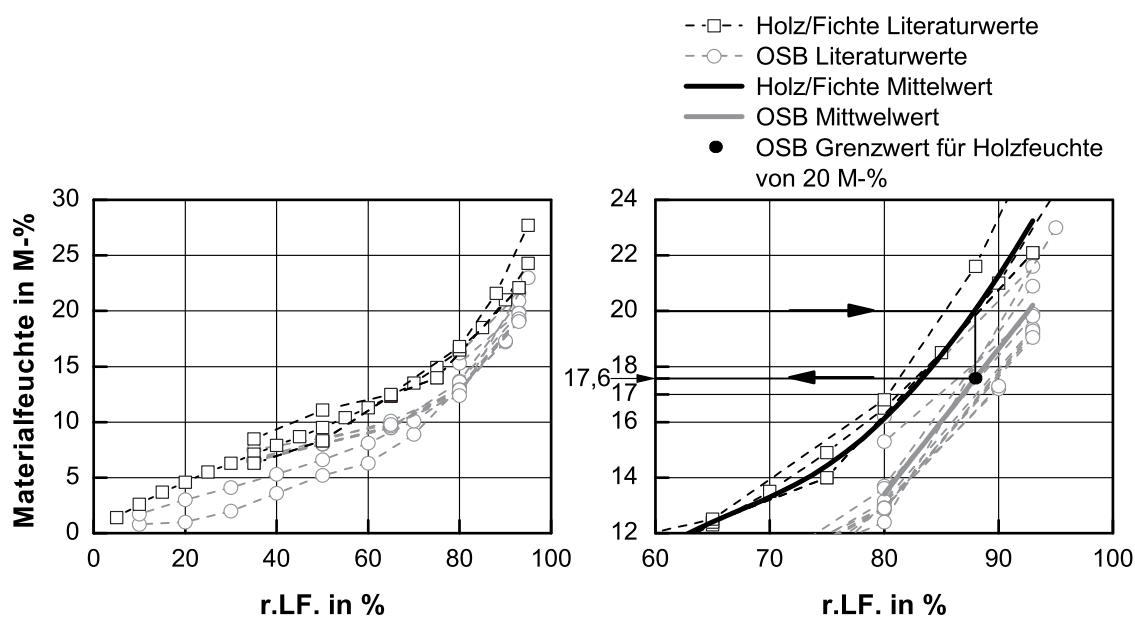


Abb. 2: Ausgleichsfeuchten von Holz/Fichte und OSB gemäß Literaturangaben aus Sonderegger und Niemz (2003); Fitz et al. (2004); Niemz et al. (2004); Niemz und Sonderegger (2009) und Carll und Wiedenhoef (2009) und die jeweils gemittelten Werte sowie der OSB-Grenzwert für maximale Holzfeuchten von 20 M-%

3 Experimentelle Analyse flachgeneigter Dachkonstruktionen

Ziel der experimentellen Untersuchungen ist es, die bzgl. Schadensfreiheit maßgebenden Einflussfaktoren auf Flachdächer zu eruieren sowie die hygrothermischen Vorgänge in den verschiedenen Flachdachsystemen messtechnisch zu erfassen. Hierfür werden 16 Flachdachaufbauten, bestehend aus zehn unterschiedlichen Dachvarianten, auf ihr hygrothermisches Verhalten hin untersucht [Teibinger und Nusser (2010a)].

Die Dachelemente befinden sich auf zwei klimatisierten Forschungshäusern in Wien, wobei eines der beiden Häuser (Haus B) von einem Gitterrost aus 50 cm breiten, vertikalen OSB-Streifen überspannt wird [Nusser et al. (2008)]. Hierdurch wird die Dachfläche von Haus B durchgehend beschattet, wobei Niederschläge die Dachfläche dennoch erreichen.

Auf Haus A sind zehn unterschiedliche Flachdachaufbauten und auf Haus B nochmals sechs der zehn Dachaufbauten von Haus A montiert. Diese sechs Aufbauten werden somit bei besonnten und Vollzeit beschatteten Randbedingungen untersucht.

In den Aufsätzen I bis III im Anhang A.3 werden die Freilanduntersuchungen diskutiert und ausgewertet. Nachfolgend werden diese Aufsätze zusammenfassend wiedergegeben und ergänzt.

3.1 Versuchsaufbauten und Messtechnik

Abb. 3 zeigt die Aufteilung der Dachfläche und die Aufbauten der verschiedenen, industriell gefertigten Dachaufbauten. Die außenseitig eingesetzte schwarze EPDM-Dachbahn weist gemäß Herstellerangaben einen s_d -Wert von 87 m auf. Als Wärmedämmung wurde Glaswolle mit $\lambda_D = 0,038 \text{ W/(m.K)}$ eingesetzt.

Um eine Interaktion der einzelnen Dachaufbauten untereinander, z.B. durch Kapillartransport zwischen den Gefachen, zu unterbinden – dieser Effekt wird von Künzel und Großkinsky (1998) beschrieben – werden alle Versuchsdachaufbauten als eigenständige Dachelemente gefertigt und die Außenkanten der Randsparren mit einer PE-Folie hygrisch abgesperrt.

In Abb. 4 sind die Messpositionen zum Erfassen der klimatischen Bedingungen und Materialfeuchten im Gefach dargestellt.

Weitere Details zu den Dachaufbauten und eingesetzten Materialien können Tab. A-1 bis Tab. A-10 in Anhang A.1 entnommen werden. Angaben zu den herrschenden Klimabedingungen und s_d -Werten der eingesetzten FADABs können dem Aufsatz I im Anhang A.3.1 entnommen werden.

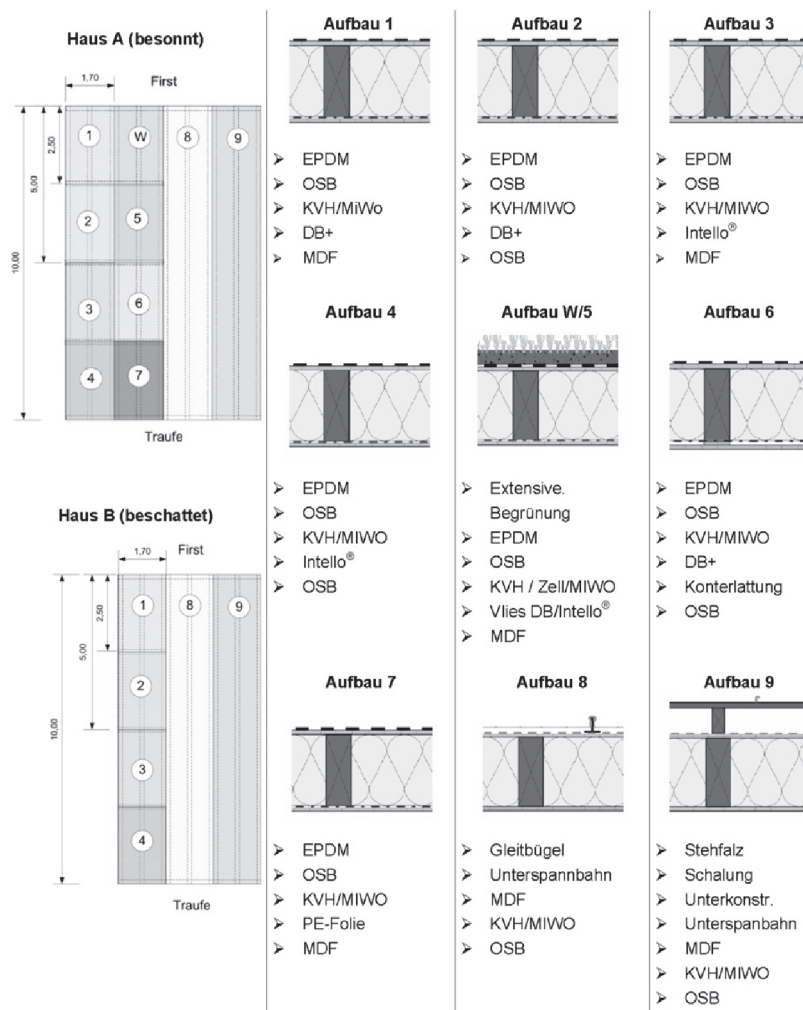


Abb. 3: Dachaufteilung der beiden Forschungshäuser A und B und Übersicht der geprüften Dachaufbauten

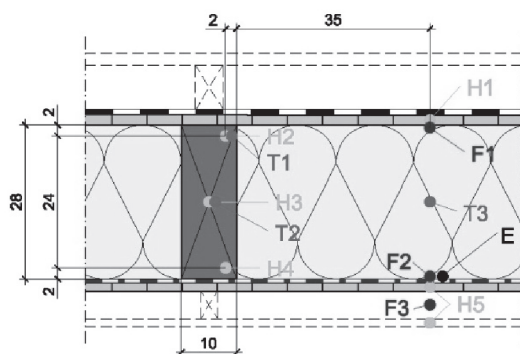


Abb. 4: Schematische Darstellung der Messpositionen im Gefach der untersuchten Dachelemente. H1...H5 = Materialfeuchte; F1...F3 = relative Luftfeuchte/Temperatur; T1....T3 = Temperatur; E = Tracergas

Die Materialfeuchtemessung erfolgt über das el. Widerstandsverfahren. Abb. 5 zeigt den Einfluss der Temperatur auf die Materialfeuchtemesswerte beim verwendeten Messverfahren. Wie sich zeigt, sinkt die Materialfeuchte mit steigender Messtemperatur (Spannung bzw. Widerstand konstant), wodurch eine Temperaturkompensation notwendig wird.

Die Materialfeuchten der OSB entsprechen fichteäquivalenten Holzfeuchten und können lediglich zur Orientierung herangezogen werden. Obwohl das verwendete Holzfeuchtemessgerät regelmäßig kalibriert wird und Vergleichsmessungen mit einem baugleichen Holzfeuchtemessgerät zwischen elektrischer Widerstandsmessung und Darrprobe eine Differenz von max. $\pm 1,0$ M-% absolut zeigt (Zielfeuchte 12,7 M-%), dienen auch die Messwerte der Fichtesparren eher der Orientierung. Abweichungen von bis zu $\pm 2,5$ M-% bei hohen bzw. niederen Materialfeuchten sind bei dieser Messmethode auch bei auf die Holzart kalibrierten Widerstandskennlinien möglich (Du et al. (1991)).

Die Luftdichtheit der Dachelemente wird mit Hilfe von Tracergassensoren in den Gefachen überprüft. Hierfür wird Ethanol in den Forschungsgebäuden zerstäubt und mit Hilfe einer Blower-Door-Anlage ein Überdruck von 50 Pa im Gebäude erzeugt. Anhand der Sensorreaktionen lässt sich die Luftdichtheit der Dachelemente qualitativ beurteilen.

Zur Klimaerfassung im Gefach werden kapazitive Luftfeuchtesensoren mit Thermistoren und Thermoelemente eingesetzt.

Details zu der eingesetzten Messtechnik können Tab. A-11 in Anhang A.2 entnommen werden.

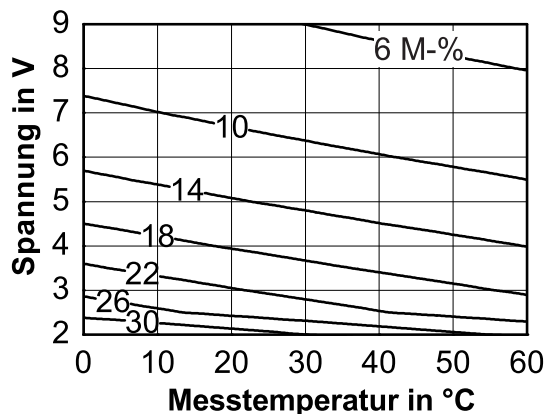


Abb. 5: Abhängigkeit der Materialfeuchte von der Messtemperatur beim verwendeten elektrischen Widerstandsmessverfahren (Spannung bzw. Widerstand konstant)

Vakatseite

3.2 Erkenntnisse zu Foliendächern

Wie sich zeigt, hängt die Tauglichkeit eines hölzernen Flachdaches mit außenseitiger Dachabdichtung wesentlich von der sommerlichen Rücktrocknung ab. Hierfür sind hohe Temperaturen auf der Dachbahn bzw. im Gefach notwendig. Die beschatteten Foliendachelemente weisen aufgrund der somit fehlenden Rücktrocknung sehr hohe und lang anhaltende r.LF. im Gefach auf (> 80 % r.LF. während 45 % des Jahres). Auch die Materialfeuchte der außenseitigen OSB-Beplankung liegt bei diesen Dachelementen teilweise im kritischen Bereich (> 20 M-%).

Abb. 6 verdeutlicht, wie sich eine Beschattung auf die Rücktrocknung auswirkt. In den oberen Grafiken sind die Wasserdampfpartialdrücke an der Gefachinnenseite in den besonnten und beschatteten Dachelementen sowie im Innenraum der Forschungshäuser aufgeführt. Die Partialdruckdifferenz zwischen Raum und Gefachinnenseite sowie die integrale Betrachtung dieser sind im unteren Teil aufgetragen. Eine negative Partialdruckdifferenz deutet auf eine mögliche Rücktrocknung hin.

Es ist zu erkennen, dass es durch die Besonnung deutlich häufiger zu einem möglichen Diffusionsstrom in den Innenraum kommt, als bei einer beschatteten Dachfläche. Bei der integralen Betrachtung der Partialdruckdifferenzen wird deutlich, dass bei konstanten innenseitigen Diffusionswiderständen die in die beschatteten Dachelemente diffusiv eingedrungene Feuchtigkeit aufgrund der durchwegs positiven Diffusionsstrombilanz nicht nach innen abtrocknen kann. Bei den besonnten Dachelementen ist dies möglich.

Aufgrund der sommerlichen Feuchteumverteilung von der Gefachaußen- zur Gefachinnenseite kann es auf der Dampfbremse zu Sommerkondensat kommen. Mit Hilfe einer innenseitigen Installationsebene ist es möglich, den Feuchtestau auf der Dampfbremse etwas zu reduzieren, wodurch das Sommerkondensat ggf. vermieden wird.

Über das Jahr betrachtet sind die in den besonnten Dachelementen an der Dampfbremse anliegenden Klimabedingungen in Bezug auf biologisches Wachstum deutlich kritischer als an der außenseitigen Beplankung. Dennoch konnte in keinem Gefach – auch nicht auf einem an der Dampfbremse angebrachten Streifen MDF – ein Befall von Schimmel festgestellt werden.

Ein zusätzlicher innenseitiger Diffusionswiderstand durch eine OSB-Beplankung anstelle einer MDF wirkt sich bei den besonnten Dachelementen aufgrund der reduzierten Rücktrocknung etwas negativ aus, wohingegen die beschatteten Dachelemente aufgrund des höheren innenseitigen Diffusionswiderstandes davon profitieren. Die Unterschiede sind durch den relativ kurzen Beobachtungszeitraums (17 Monate) jedoch gering. Ebenso zeigen sich tendenzielle Unterschiede bei Verwendung einer FADAB mit deutlich höherer/geringerer Spreizung im s_d -Wert Verlauf. Durch die Verwendung einer FADAB mit höherer Spreizung werden geringere Luftfeuchten in den Gefachen erreicht.

Es können ebenfalls Unterschiede zwischen den traufseitigen und den firstseitigen Luftfeuchten in den Gefachen festgestellt werden. Dies deutet auf vorhandene Rotationsströmungen im Gefach der Flachdachaufbauten hin, wobei die Unterschiede in den besonnten Elementen deutlich stärker ausgeprägt sind als in den beschatteten Dächern.

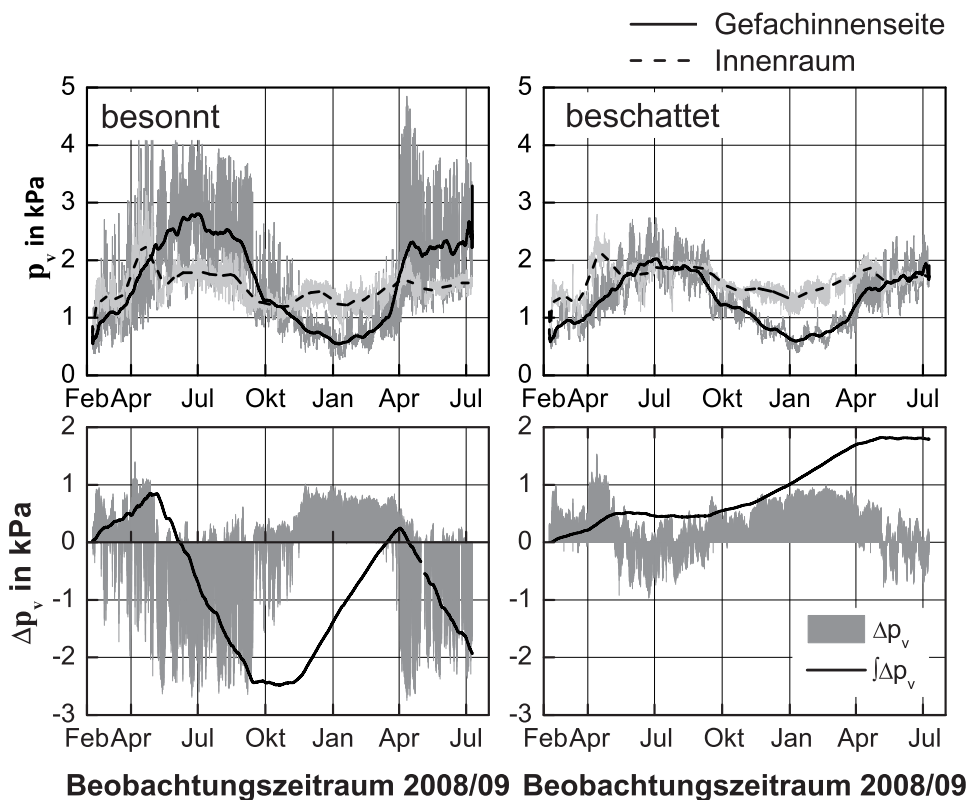


Abb. 6: Oben: Darstellung des Wasserdampfpartialdrucks in den besonnten und beschatteten Dachelementen sowie im Innenraum der Forschungshäuser¹
 Unten: Partialdruckdifferenz zwischen Raum und Gefachinnenseite sowie die integrale Betrachtung dieser. Positive Partialdruckdifferenz bedeutet Diffusionsstrom vom Innenraum in das Gefach

Um das Aufwechungs- und Austrocknungsverhalten der Dachkonstruktionen zu untersuchen wird in beiden Gebäuden im April 2008 eine erhöhte Feuchtelast ($\varphi \sim 75\% - 80\%$) und erhöhte Temperaturen im Innenraum eingestellt. Aufgrund des hohen fixen Diffusionswiderstandes der PE-Folie ist die hohe Raumluffteuchte während der Aufwechungsphase zur Erhöhung der Materialfeuchte in Element A7 jedoch nicht zielführend. Aus diesem Grund werden die Revisionsklappen in diesem Element im April 2008 für 19 Tage geöffnet, wodurch eine Materialfeuchteerhöhung entsprechend den Foliendächern mit FADAB erreicht wird.

Abb. 7 zeigt den Materialfeuchteverlauf in dem Dachelement mit PE-Folie ($s_d > 100\text{ m}$) als Dampfbremse (Element A7) und den Mittelwert aus den Dachelementen mit FADAB.

¹ Die Messwerte der Aufbauten 1-4 werden hierfür gemittelt.

Wie anhand der Grafik zu erkennen ist, liegen die mittleren Materialfeuchten in Element A7 im Zeitraum nach der Auffeuchtungsphase an allen Positionen über jenen in den Elementen mit FADAB. Vor allem an den äußeren Messpositionen ist eine Rücktrocknung der erhöhten Materialfeuchte in Element 7 kaum zu erkennen. In den Elementen mit FADAB zeigt sich die Rücktrocknung deutlich ausgeprägter.

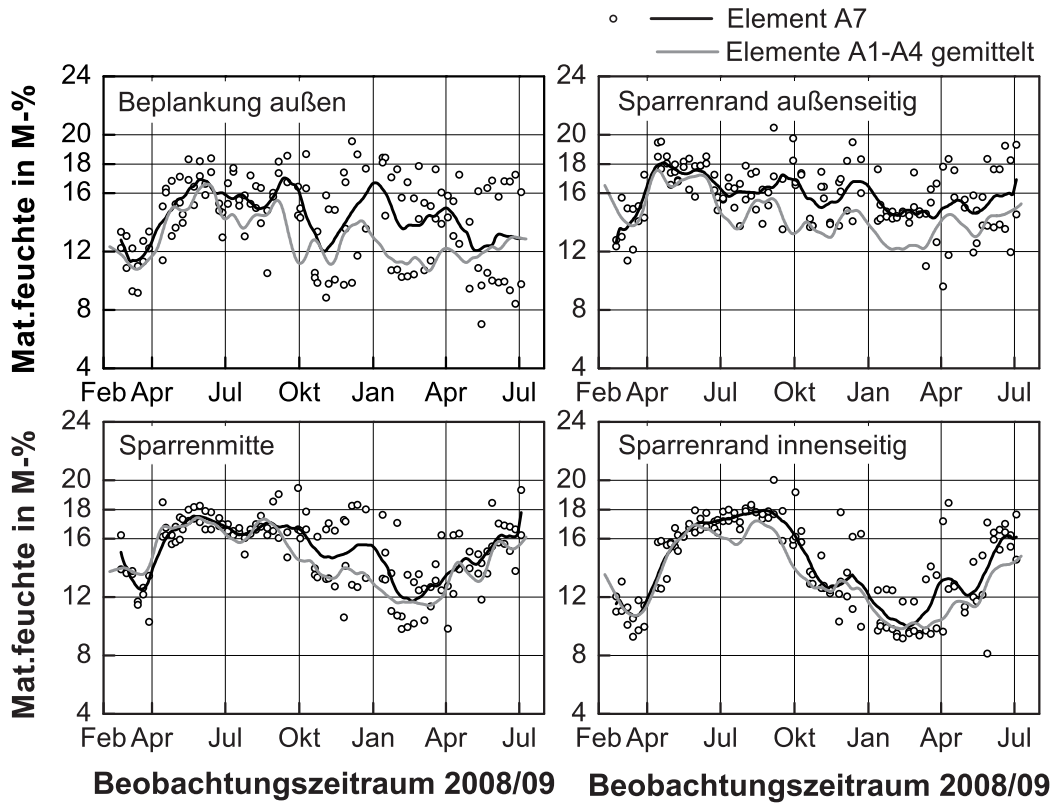


Abb. 7: Materialfeuchten (Wochenmesswerte und gleitende Monatsmittelwerte) im Foliendachelement mit PE-Dampfbremse (A7) und der Mittelwert aus den Foliendachelementen mit FADAB (A1 bis A4)

Vakatseite

3.3 Erkenntnisse zu Gründächern

Die durchgeführten Freilanduntersuchungen an Gründächern zeigen, dass die Dachhauttemperatur der Gründächer im Winter deutlich vom Niederschlag und der Dauer der vorhandenen Temperaturen abhängt. Bei einer Durchfrostung des Substrats sind auch Temperaturen an der Dachhaut unterhalb des Gefrierpunktes möglich.

Während der Sommermonate hängt die Dachhauttemperatur neben den Witterungsbedingungen vom Bewuchsgrad des Daches ab. So wird die Dachhaut eines dicht bewachsenen Gründaches nur geringfügig durch die Sonneneinstrahlung erwärmt. Bei einem dünnenschichtigen Leichtsubstrat und positiven Lufttemperaturen orientiert sich die Dachhauttemperatur im Gründach stark an der Außenlufttemperatur. Aufgrund der dadurch nur gering vorhandenen Umkehrdiffusion kommt es im Jahresverlauf zu einer Feuchteakkumulation im Dach. Während der Wintermonate stellt sich an der Gefachaußenseite aufgrund dessen eine lang andauernde, hohe r.LF. ein (> 80 % r.LF. während 52 % des Jahres), welche dort zu erhöhten Materialfeuchten führt (20 M-%).

Im Vergleich zur Mineralwolle besitzt Zellulose stark sorptive Eigenschaften [Montensen-Hedegaard et al. (2005)], wodurch sich geringere Materialfeuchten im Gefach einstellen, was auch Untersuchungen in Winter et al. (2009) zeigen. Bei vorhandenen Leckagen in der innenseitigen Luftdichtheitsschicht kommt es jedoch ggf. zu einer Auffeuchtung der Zellulose und zu deutlich höheren Materialfeuchten als die hier gemessenen [Derome (2005)].

Trotz der gemäß Hukka und Viitanen (1999) in den Gefachen sehr häufig vorkommenden positiven Schimmelwachstumsbedingungen kann weder in dem Gründachelement mit Zellulosedämmung noch in jenem mit Mineralwolle Schimmel entdeckt werden.

Vakatseite

3.4 Erkenntnisse zu metallgedeckten Dächern

Die untersuchten metallgedeckten Dächer verhalten sich in hygrischer Hinsicht günstig. Es zeigt sich, dass eine Dampfbremsbahn bei diesen Dächern nicht zwingend erforderlich ist. Bei einem beschattungsfreien Dach und geeigneter Eindeckung bzw. Hinterlüftung kann die innenseitige OSB als Dampfbremse ausreichen.

Eine Eindeckung mit Gleitbügelblechen entsprechend der untersuchten Dächer ermöglicht einen quasi diffusionsoffenen Aufbau. Aus dem Gefach nach außen diffundierende Feuchtigkeit kann bei den untersuchten Dachkonstruktionen mit Gleitbügelblecheindeckung entweichen. Dass sich eine Reduktion des Abstandes zwischen Metallbahn und außenseitiger Beplankung, z.B. durch hohe Schneelast oder Verformungen negativ auf das hygrische Verhalten des Dachelements auswirkt, kann nicht ausgeschlossen werden.

Das hinterlüftete Dach zeigt bei den gegebenen Versuchsbedingungen sowohl in Bezug auf das Klima im Gefach wie auch im Hinblick auf die dortigen Materialfeuchten das günstigste Verhalten. Trotz einer dauerhaften Beschattung und des dadurch geringen Luftvolumenstroms in der Hinterlüftungsebene konnten in dem beschatteten hinterlüfteten Dach keine erhöhten Materialfeuchten und nur äußerst selten positive Schimmelwachstumsbedingungen festgestellt werden. Auch in der Hinterlüftungsebene konnte kein Feuchtestau verzeichnet werden.

Wie auch in den EPDM-Foliendächern, so zeigen sich in den metallgedeckten Dächern erhöhte Luftfeuchten auf der Firstseite, was auf Rotationsströmungen im Gefach hindeutet.

Wie die Luftdichtheitsmessungen mit Tracergas an den Versuchsdächern gezeigt haben, weisen die Dachelemente mit Metalleindeckung, welche als Dampfbremse lediglich eine OSB besitzen, eine geringere Luftdichtheit auf, als jene Elemente in denen eine Dampfbremsbahn verwendet wird (vgl. Bild 4 in Aufsatz III im Anhang).

Vakatseite

3.5 Fazit

Anhand der gewonnenen Messergebnisse können die untersuchten Dachvarianten nach abnehmender hygrischer Robustheit folgendermaßen gereiht werden:

- A) Hinterlüftete Dächer
- B) Dächer mit Gleitbügelblecheindeckung
- C) Foliendächer ohne Auflast
- D) Gründächer

Die untersuchten metallgedeckten Dächer verhalten sich hierbei aufgrund ihres quasi diffusionsoffenen Aufbaus deutlich günstiger als die untersuchten Dächer mit Abdichtung. Vor allem bei Dachkonstruktionen mit funktionierender Hinterlüftung ist der Diffusionsstrom in die Hinterlüftungsebene und der dortige Feuchteabtransport ausreichend, um eine schädliche Feuchteakkumulation im Dach zu verhindern.

Die Schadensfreiheit von außenseitig abgedichteten hölzernen Flachdächern hängt hingegen maßgeblich von ihrem Rücktrocknungspotential ab. Hierfür sind im Sommer erhöhte Temperaturen im Gefach und möglichst geringe innenseitige Diffusionswiderstände notwendig. Eine Beschattung der Dachfläche, sehr geringe solare Absorptionskoeffizienten der Dachbahn oder Dampfbremsen mit fixem hohem s_d -Wert wirken sich deshalb äußerst negativ auf den Feuchtehaushalt und somit auf die Dauerhaftigkeit von hölzernen Dächern mit Abdichtung aus. Gründächer zeigen ein ähnlich kritisches Verhalten wie Vollzeit beschattete Foliendächer.

Vakatseite

4 Neue Ansätze zur Berücksichtigung wichtiger Einflussfaktoren

Wie in den vorhergehenden Abschnitten gezeigt wird, hängt die Funktionstauglichkeit von flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen mit außenseitiger Abdichtung im Wesentlichen von ihrem Rückrocknungspotential ab.

Der Grad der notwendigen Rückrocknung wird wiederum von der Feuchtelast auf das Bauteil bestimmt, welche neben den klimatischen Bedingungen von der Ausprägung des konvektiven Feuchteintrags beeinflusst wird.

Nachfolgend werden neue Ansätze zur Berücksichtigung des konvektiven Feuchteintrags und des, durch eine Beschattung der Dachfläche, reduzierten Rückrocknungspotentials vorgestellt.

4.1 Konvektive Feuchteinträge

Eine der typischen Gründe für eine geringe Luftdichtheit von Gebäuden und konvektionsbedingte Feuchteschäden liegt neben ungenügend dichten Bauteilanschlüssen häufig bei den Elektroinstallationen [Fuhrmann (2003); Hall und Hauser (2003); Mattsson (2007); Kalamees et al. (2008)].

Nachfolgend wird ein Ansatz vorgestellt, welcher es ermöglicht, konvektive Feuchteinträge in Dächer unter Beachtung von Fertigungs- und Montagebedingungen sowie der Ausführungsqualität zu quantifizieren. Anhand von Simulationen wird abschließend aufgezeigt, wie sich konvektive Feuchteinträge auf den Feuchtehaushalt hölzerner Flachdächer mit Dachabdichtung auswirken.

4.1.1 Ansatz zur Quantifizierung konvektiver Feuchteinträge

Zur Quantifizierung des konvektiven Feuchteintrags in die Konstruktion aufgrund von Leckagen an der innenseitigen Luftdichtheitsschicht, werden die Baupläne von 50 Einfamilienhäusern (EFH) mit insgesamt 646 Räumen bezüglich ihrer Elektroinstallationen und anderweitigen Durchdringungen ausgewertet. Die Gebäude wurden größtenteils im Jahr 2008 errichtet, was Abb. 8 zeigt. Bei den untersuchten Gebäuden handelt es sich durchwegs um Holzrahmenbaukonstruktionen von fünf großen österreichischen Fertighausunternehmen.

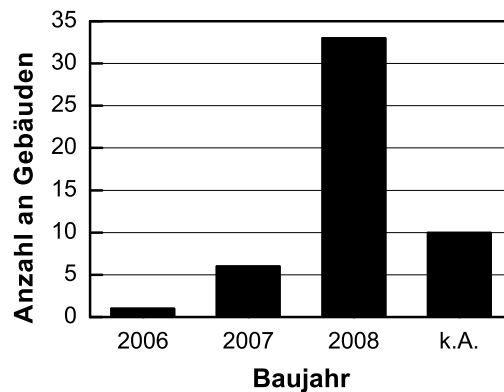


Abb. 8: Altersprofil der 50 ausgewerteten Einfamilienhäuser

Aufgrund des u.a. höhenabhängigen thermischen Auftriebs und der dadurch entstehenden Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich verursachen Leckagen im Dachbereich während den Wintermonaten sehr hohe Luft-Exfiltrationsströme in das Bauteil.

Zunächst werden deshalb die Decken und Dächer von 531 Räumen auf die Anzahl von Lichtkabelausschlüssen hin untersucht. Heizungs- und Lüftungsinstallationen, Telekommunikationsleitungen oder auch Steckdosen stellen nur einen geringen Anteil an Durchdringungen in den ausgewerteten Decken und Dächern dar und werden nicht beachtet. Die Anzahl der Lichtkabelausschlüsse wird in m^2 Raumgrundfläche angegeben.

Wie Abb. 9 entnommen werden kann, liegt das 95%-Quantil an Lichtkabelausschlüssen in Decken/Dächern pro m^2 Raumgrundfläche bei $0,48 \text{ m}^2$.

Neben den Lichtkabelausschlüssen in den Decken und Dächern werden auch potentielle Durchdringungen der innenseitigen Luftdichtheitsschicht in den Außenwänden erfasst.

Insgesamt werden folgende potentielle Leckageursachen ausgewertet:

- I. Lichtkabelausschlüssen in Decken und Dächern
- II. Heizung-/ Klima-/Sanitärinstallationen
- III. Stromkabelausschlüsse
- IV. Lichtschalter u.ä.
- V. Steckdosen
- VI. Telekommunikationsanschlüsse
- VII. Sonstige Elektroinstallationen (z.B. Verteilerdosen, etc.)

Abb. 9 zeigt ebenfalls die Häufigkeiten der potentiellen Leckagen pro m^2 Wandfläche (Leckageursachen II-VII). Es werden hierfür insgesamt 445 Räume mit durchdringungsbehafteten Außenwänden ausgewertet und eine mittlere Raumhöhe von 2,60 m vorausgesetzt. Räume ohne Durchdringung in der Außenwand fließen nicht in die Auswertung mit ein.

Wie zu erkennen ist, sind bei einer Leckagedichte von $0,48 \text{ m}^2$ die 95 %-Quantile aller erfassten potentiellen Leckagen inbegriffen.

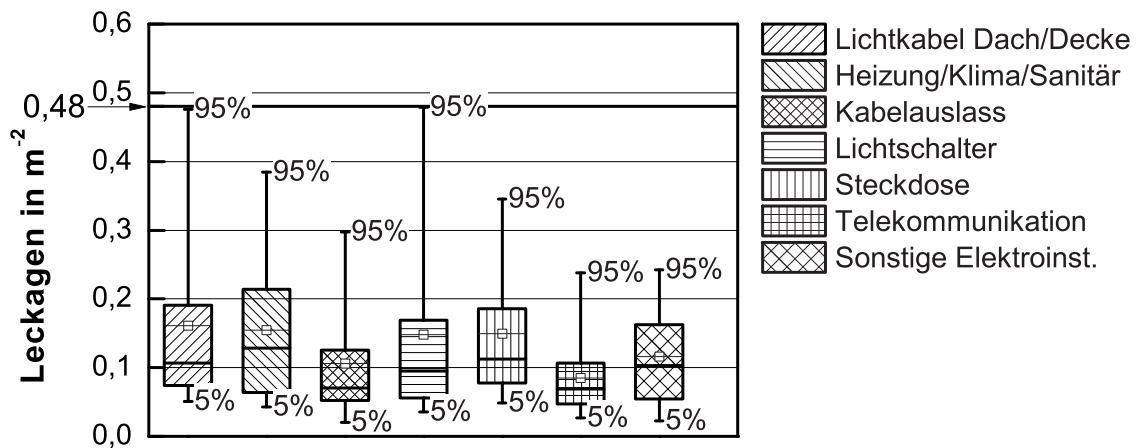


Abb. 9: Potentielle Leckagen pro m² Grund-/Wandfläche in den Decken/Dächern und Außenwänden von 50 Einfamilienhäusern

Hall und Hauser (2003) untersuchen in ihrer Arbeit u.a. den Luftvolumenstrom bei verschiedenen Druckdifferenzen durch ein nicht abgeklebtes Elektrokabel entsprechend Abb. 10.



Abb. 10: Nicht abgeklebte Durchdringung eines Elektrokabels durch die Dampfbremse [Hall und Hauser (2003)]

Unter der Annahme, dass die gemäß Abb. 9 erfassten Leckagen verallgemeinert durch ein solch nicht abgeklebtes Elektrokabel repräsentiert werden können, beschreibt Gleichung (4.1) den Leakagevolumenstrom bei einer Kabelauslassdichte von 0,48 m². Hierfür wird der für Spalt- und Rissleckagen typische Strömungsexponent von 2/3 verwendet [Hens (2007); Mattsson (2007); Richter et al. (2008)]. Abb. 11 zeigt den an die Messwerte von Hall und Hauser angepassten Verlauf der Leakagevolumenstromfunktion.

$$Q = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P^{2/3} \quad (4.1)$$

- Q Leakagevolumenstrom in m³/(m².s)
- ΔP Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa

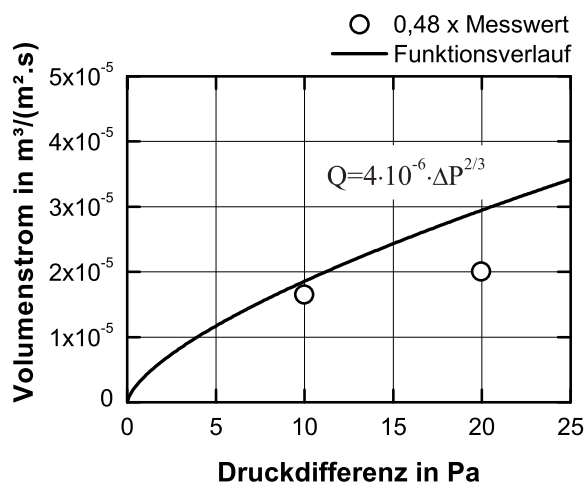


Abb. 11: An Messwerte von Hall und Hauser (2003) angepasste Leckagevolumenstromfunktion für ein nicht abgeklebtes Elektrokabel bei einer Leckagedichte von 0,48 m⁻²

Zur Quantifizierung möglicher Luftleckagen müssen auch die Fertigungsbedingungen und die Ausführungsqualität bedacht werden, wie die Erhebungen von Kalamees (2007) zeigen. Unter Baustellenbedingungen gefertigte Konstruktionen sind anfälliger für Luftleckagen als im Werk unter optimierten Bedingungen vorgefertigte Elemente. Ebenso wird durch eine Blower-Door-Messung mit Leckageortung die Wahrscheinlichkeit von unentdeckten Leckagen verringert, was Bachinger (2010) zeigt.

Zur Berücksichtigung dieser Faktoren wird der Luftdichtheitsfaktor F_a eingeführt. Gleichung (4.1) wird dementsprechend erweitert:

$$Q = 4 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta P^{2/3} \cdot F_a^{-1} \tag{4.2}$$

- Q Leckagevolumenstrom in m³/(m²·s)
- ΔP Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa
- F_a Luftdichtheitsfaktor

Durch den Luftdichtheitsfaktor werden in Anlehnung an die Luftdichtheitsklassen gemäß Zirkelbach et al. (2009) vier Luftdichtheitsklassen (LDK) für flachgeneigte hölzerne Dachelemente definiert, welche in Tab. 1 aufgeführt sind. Den vorgefertigten Dachelementen (LDK A+) wird demnach der geringste Leckagevolumenstrom zugeordnet. Jenen Dachelementen mit den geringsten Anforderungen (LDK C) wird hingegen der höchste Leckagevolumenstrom zugeordnet. Dachelemente der LDK A+ können im Vergleich zu den Elementen der restlichen LDKs das geringste Rücktrochnungspotential aufweisen, weshalb bei diesen Elementen ein besonderes Augenmerk auf eine geringe Einbaufeuchte gelegt werden muss. Durch die Forderungen nach einer vorgefertigten Bauzeitenabdichtung wird das Risiko der Auffeuchtung während der Bauphase reduziert. Zusätzlich wird durch die geforderte Überprüfung der Materialfeuchten (z.B. durch ÜA- bzw. CE-Kennzeichnung des Bauteils) der Einbau von trockenen Baustoffen sehr wahrscheinlich.

Tab. 1: Definition der Luftdichtheitsklassen (LDK) für Dachelemente mit zugehöriger Gebäudeluftdichtheit n_{50} und Luftdichtheitsfaktor F_a

LDK	A+	A	B	C
Definition	<ul style="list-style-type: none"> - Dachelement vorgefertigt - Dampfbremssfolie und beidseitige Beplankung - vorgefertigte Bauzeitenabdichtung - geprüfte Materialfeuchten (z.B. durch ÜA- od. CE-Kennzeichnung) - Durchdringungen mit Manschetten oder eingehaust 	<ul style="list-style-type: none"> - Durchdringungen mit Manschetten oder eingehaust - Blower-Door inkl. Leckageortung 	<ul style="list-style-type: none"> - Durchdringungen mit Manschetten oder eingehaust - Blower-Door inkl. Leckageortung 	<ul style="list-style-type: none"> - Luftdichtheit nach Stand der Technik
n_{50}	nicht gemessen	$\leq 1.5 \text{ h}^{-1}$	$\leq 3.0 \text{ h}^{-1}$	nicht gemessen
F_a	8	4	2	1

4.1.2 Auswirkung konvektiver Feuchteinträge

Um den Einfluss der konvektiven Feuchteinträge zu untersuchen, werden numerische 1-D Simulationen mit WUFI® Pro V.5.1 durchgeführt. Ab WUFI® Pro V.5 können konvektive Feuchteinträge durch den Ansatz von Zirkelbach et al. (2009) berücksichtigt werden. Trocknungsfördernde Luftvolumenströme vom Gefach in den Innenraum, wie sie während der Sommermonate auftreten können, werden durch WUFI® nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse liegen somit „auf der sicheren Seite“.

Abb. 12 zeigt einen Vergleich der Leckagevolumenströme durch die hier definierten Luftdichtheitsklassen und durch jene gemäß Zirkelbach et al. (2009). Die linke Grafik zeigt die Luftvolumenströme bis zu einer Druckdifferenz von 50 Pa, die rechte Grafik zeigt jene für die im Hausbau eher relevante thermisch induzierte Druckdifferenz bis 7 Pa.

Wie in der rechten Grafik zu erkennen ist, liegen die Volumenströme in den durch die oben definierte LDK zumeist etwas über den Volumenströmen nach Zirkelbach et al. Die Volumenströme durch die LDK B und der Klasse B nach Zirkelbach et al. zeigen in den Druckdifferenzen zwischen 5 Pa und 7 Pa jedoch nur geringe Differenzen. Durch die LDK A+ werden etwas geringere Luftvolumenströme erzeugt als durch die Klasse A nach Zirkelbach et al.

Bei höheren Druckdifferenzen (linke Grafik in Abb. 12), welche z.B. durch Überlagerung der Windsogkräfte, des thermischen Auftriebs und des Überdrucks durch Luftinfiltration auftreten können [Etheridge und Sandberg (1996); TenWolde et al. (1998); Djebbar et al. (2003); Schmidt und Kornadt (2010)], übersteigen die Volumenströme durch den linearen Ansatz von Zirkelbach et al. (2009) jene aus dem oben definierten exponentiellen Ansatz.

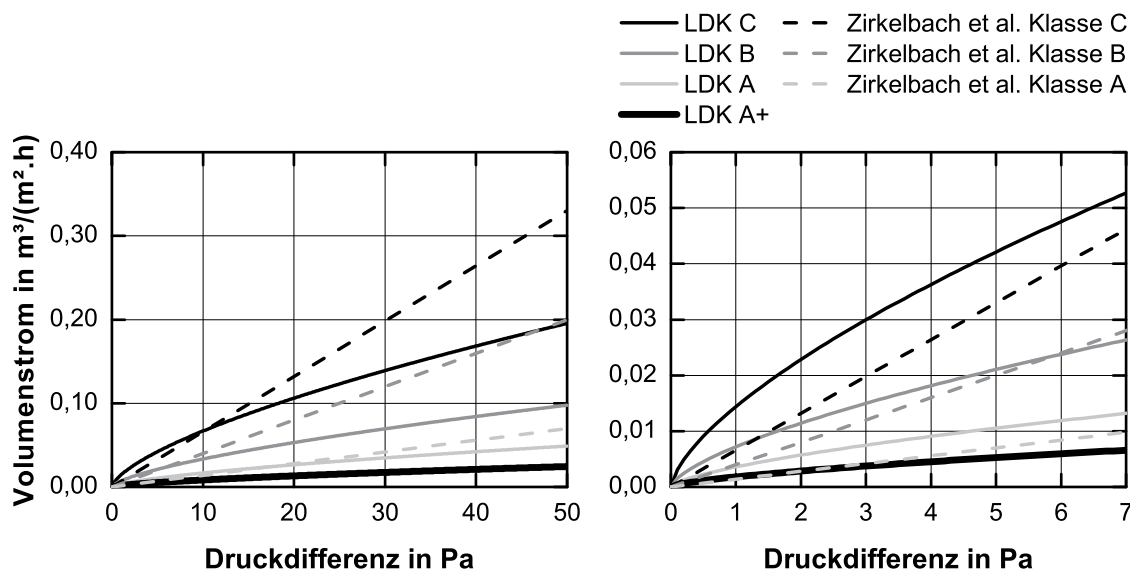


Abb. 12: Vergleich der Leckagevolumenströme durch die vier definierten Luftdichtheitsklassen (LDK A+ bis C) mit den Klassen von Zirkelbach et al. (2009)

Für die Simulationen wird der Q_{50} -Wert in WUFI[®] dahingehend verändert, dass die in WUFI[®] hinterlegte lineare Volumenstromfunktion die Potenzfunktion nach Gleichung (4.2) geeignet schneidet. Als Schnittpunkt wird eine gemäß Gleichung (4.3) (aus Hens (2007)) errechnete winterliche Druckdifferenz festgelegt.

$$\Delta P = 0,0215 \cdot h \cdot (T_i - T_e) \tag{4.3}$$

- ΔP Druckdifferenz zwischen Innenraum und Außenbereich in Pa
- h Höhe des zusammenhängenden Luftraums im Innenraum in m
- T_i Lufttemperatur im Innenraum in K
- T_e Lufttemperatur im Außenbereich in K

Abb. 13 links zeigt beispielhaft die Druckdifferenz aufgrund des thermischen Auftriebs nach Gleichung (4.3) in einem Gebäude in Holzkirchen (D) mit einer Innentemperatur von $(21 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ und einem maximalen zusammenhängenden Luftraum von 8 m Höhe. Die rechte Grafik in Abb. 13 zeigt die Volumenstromfunktionen der LDK A+ bis C und die angepassten WUFI[®] Funktionen. Zur Anpassung der WUFI[®]-Funktionen an die LDK A+, A und B wird jeweils ein Schnittpunkt bei einer Druckdifferenz von 5 Pa gewählt (siehe Abb. 13 links). Zur Anpassung an die LDK C wird ein Schnittpunkt bei 5,3 Pa gewählt. Die so gewählten Schnittpunkte resultieren in Q_{50} -Werten in WUFI[®] entsprechend Tab. 2.

Wie sich anhand der rechten Grafik in Abb. 13 zeigt, sind die Differenzen zwischen den Luftvolumenströmen der beiden Ansätze für die relevanten winterlichen Druckdifferenzen nun sehr gering.

Tab. 2: Q_{50} -Werte in WUFI® zur Anpassung der beiden Leckagevolumenstromfunktionen für ein Gebäude am Standort Holzkirchen (D), Innentemperatur (21 ± 1) °C, Raumhöhe 8 m

LDK	WUFI® Q_{50} -Wert in $m^3/(m^2 \cdot h)$
A+	0,79
A	1,58
B	3,16
C	6,19

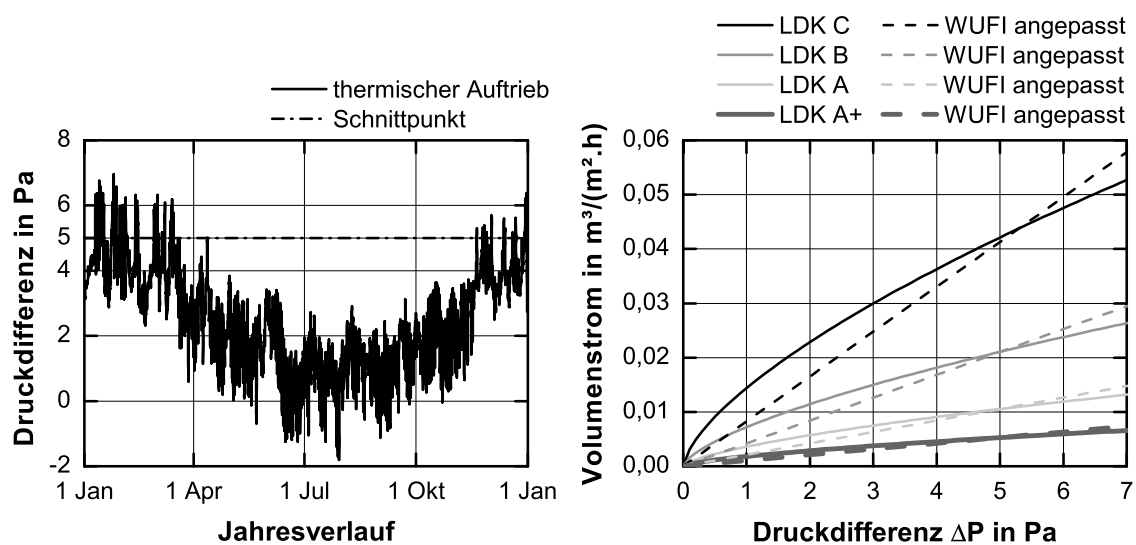


Abb. 13: Links: Druckdifferenz aus thermischem Auftrieb (Standort Holzkirchen (D), Innentemperatur (21 ± 1) °C, Raumhöhe 8 m) und Schnittpunkt zur Anpassung der WUFI® Volumenstromfunktionen
Rechts: Volumenstromfunktion der LDK A+ bis C und die angepassten WUFI®-Funktionen

Die Auswirkung von konvektiven Feuchteinträgen wird anhand der Materialfeuchte der außenseitigen OSB eines Flachdachaufbaus mit unbeschatteter Dachbahn untersucht. Der Diffusionswiderstand der Dampfbremse beträgt konstant 2 m, der restliche Aufbau entspricht jenem in Tab. A-4 im Anhang A.1. Es werden Innenklimata entsprechend den Feuchtelasten aus dem WTA-Merkblatt 6-2-01/D verwendet (Abb. 14). Die Innentemperaturen betragen jeweils (21 ± 1) °C. Tab. 3 zeigt die Variationen, welche bei den Simulationen vorgenommen werden.

Wie Abb. 15 oben zeigt, steigt die Materialfeuchte der außenseitigen OSB mit abnehmender Luftdichtheit deutlich an. Eine Erhöhung des solaren Absorptionskoeffizienten verringert den Einfluss der Luftdichtheit, jedoch steigt dieser wieder deutlich bei einer Erhöhung der Raumluftfeuchte, was Abb. 15 Mitte und Abb. 15 unten verdeutlichen.

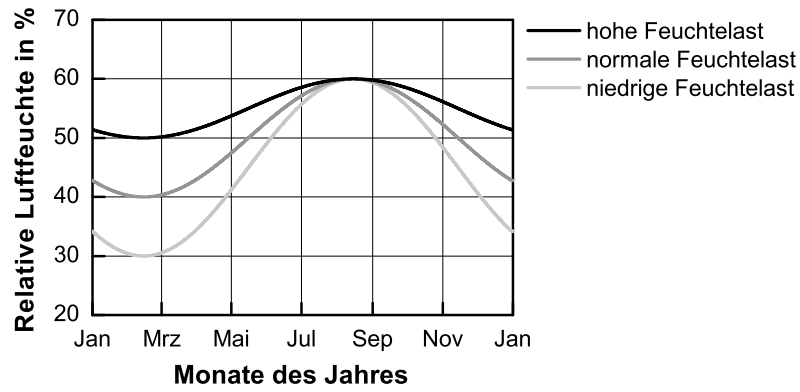


Abb. 14: Relative Luftfeuchten im Innenraum entsprechend den Feuchtelasten aus WTA-Merkblatt 6-2-01/D

Tab. 3: Variationen zur Untersuchung der Auswirkung von konvektiven Feuchteinträgen

Variante	I (Abb. 15 oben)	II (Abb. 15 Mitte)	III (Abb. 15 unten)
Innenklima nach WTA	normale Feuchtelast	normale Feuchtelast	hohe Feuchtelast
solarer Absorptionskoeffizient der Dachbahn	0,65	0,9	0,9

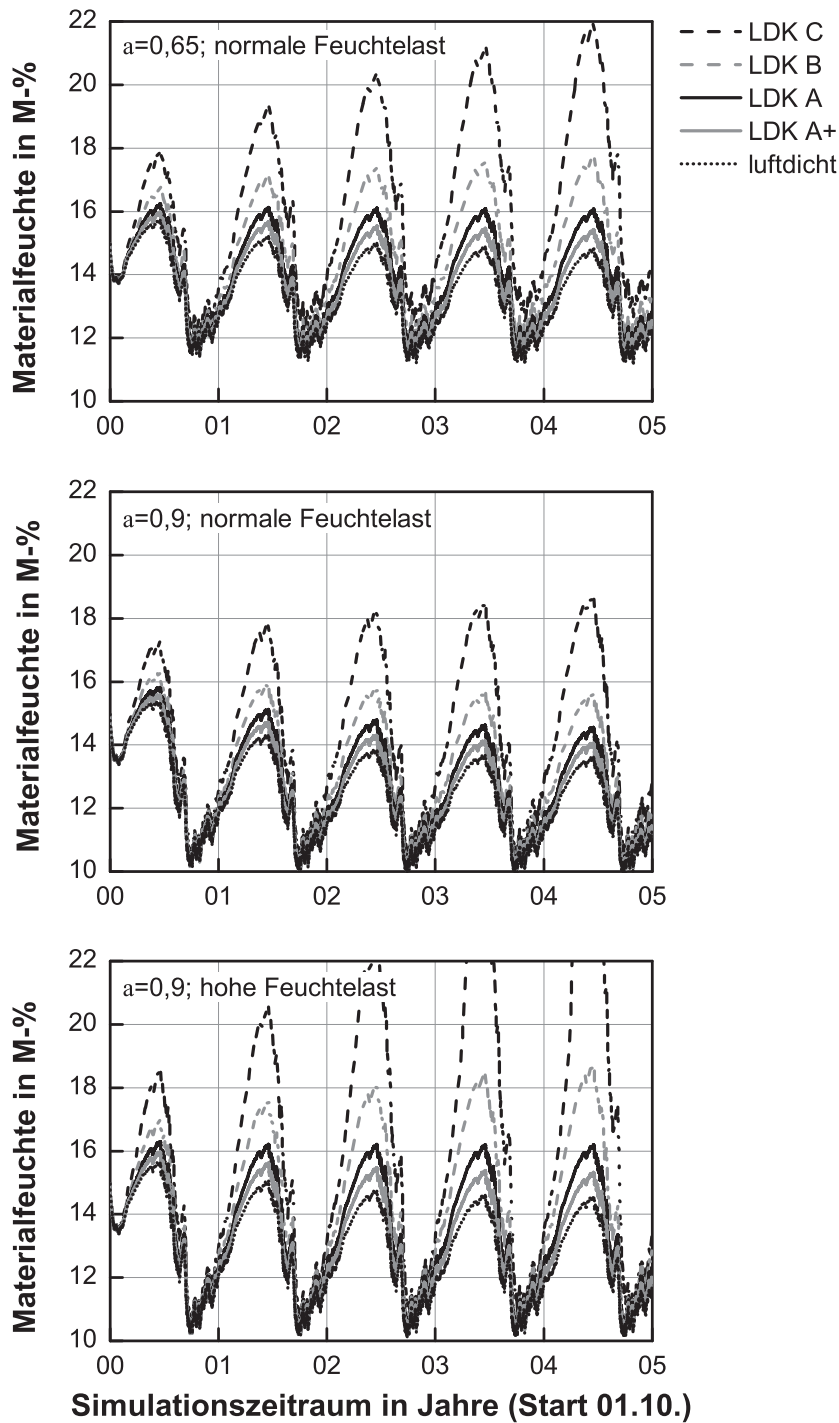


Abb. 15: Einfluss der Luftdichtheitsklasse auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB eines unbeschatteten Flachdachs am Standort Holzkirchen (D)
 Oben: helle Dachbahn ($a = 0,65$) bei normaler Feuchtelast im Innenraum
 Mitte: dunkle Dachbahn ($a = 0,9$) bei normaler Feuchtelast im Innenraum
 Unten: dunkle Dachbahn ($a = 0,9$) bei hoher Feuchtelast im Innenraum

Vakatseite

4.2 Beschattungssituationen

Die Rücktrocknung von Feuchtigkeit aus dem Gefach eines Flachdaches mit Dachabdichtung startet mit Erhöhung des Wasserdampfpartialdruckes im Gefach über jenen im Innenraum. Hierfür sind erhöhte Temperaturen im Gefach notwendig, wofür i.d.R. die Sonneneinstrahlung auf das Dach benötigt wird.

Nachfolgend wird anhand von Simulationen aufgezeigt, wie sich temporäre Beschattungen auf den Feuchtehaushalt von hölzernen Flachdächern mit Dachabdichtung auswirken.

Anschließend wird ein Ansatz hergeleitet, welcher es ermöglicht, die maximal mögliche Beschattungsdauer für Flachdachkonstruktionen in Holzrahmenbauweise ohne zusätzliche Simulationen der Beschattung zu ermitteln und ihre Tauglichkeit für spezifische Beschattungssituationen zu beurteilen.

Abschließend wird der vorgestellte Ansatz anhand einer Sensitivitätsanalyse überprüft.

4.2.1 Auswirkungen temporärer Beschattungen

Eine Beschattung über die Mittagszeit, wodurch die maximale Strahlungsdichte von der Dachfläche abgehalten wird, reduziert den möglichen Umkehrdiffusionsstrom und somit die sommerliche Rücktrocknung am stärksten. Eine bauliche Situation, welche diesen Effekt hervorruft zeigt Abb. 16. Lediglich durch die Änderung des Azimuts A (Horizontalwinkel) der Sonne kann der betrachtete Punkt besonnt werden. Der Höhenwinkel H der Sonne ist für Mitteleuropa auch am 21. Juni hierfür zu gering, was dem Sonnenstandsdiagramm für Wien in Abb. 17 entnommen werden kann.

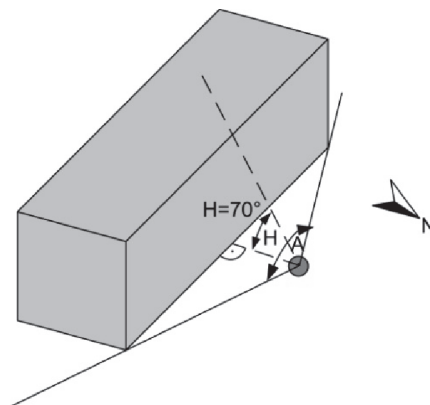


Abb. 16: Schematische Darstellung einer möglichen baulichen Situation in Mitteleuropa durch welche lediglich der veränderliche Azimut A der Sonne eine direkte Besonnung des betrachteten Punktes ermöglicht

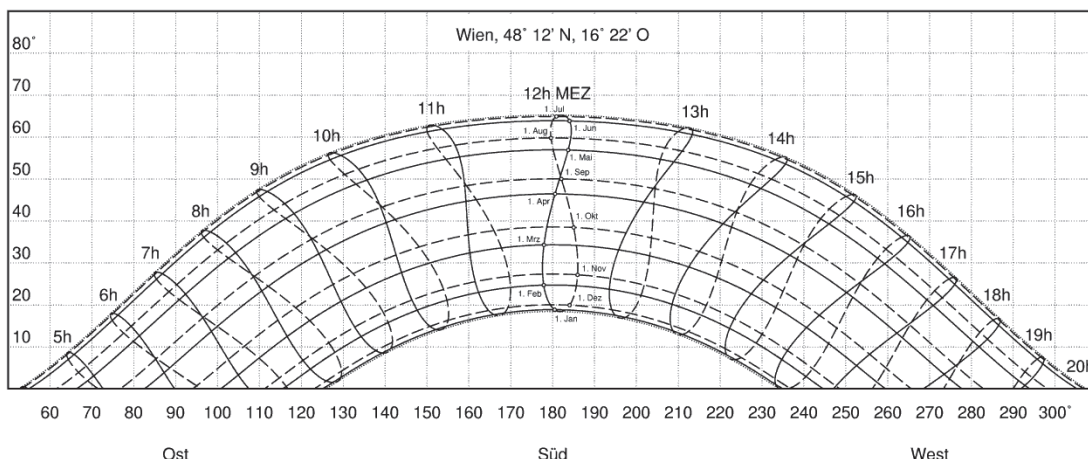


Abb. 17: Sonnenstandsdiagramm für Wien. Die Abszisse zeigt den Azimut A und die Ordinate den Höhenwinkel H der Sonne [SdW]

Die gemäß Finkensteiner et al. (2006) errechneten Azimutwinkel der Sonne am Standort Klagenfurt (46° Nord) sind in Abb. 18 aufgetragen². Es wird anhand dieser Grafik ebenfalls der Zusammenhang zwischen Sonnenazimut und Beschattungsdauer verdeutlicht. Wird der betrachtete Punkt am Dach am 21. Juni zwischen 10 Uhr und 13:30 Uhr (Normalzeit) beschattet, d.h. bei einem Sonnenazimut zwischen 123° und 224°, so beginnt das Beschattungsintervall am 21. Dezember hingegen bereits um etwa 7:30 Uhr und dauert bis etwa 15 Uhr.

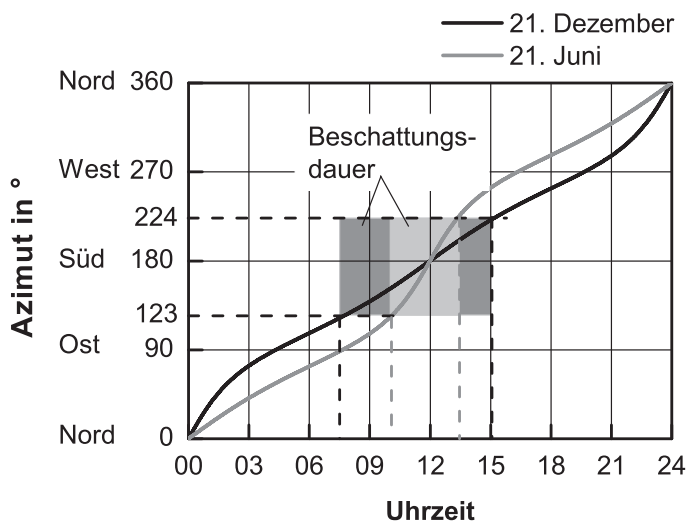


Abb. 18: Tagesverlauf des Azimut an der Winter- und Sommersonnenwende am Standort Klagenfurt (46° Nord) sowie Darstellung möglicher Beschattungsdauern

² Die Analemma (gestreckte Achten in Abb. 17) wird bei diesem vereinfachten Ansatz nicht berücksichtigt, d.h. der Azimut beträgt um 12:00 Uhr jeweils 180° und verläuft umgekehrt symmetrisch zum 21. Juni bzw. zum 21. Dezember 12:00 Uhr.

Abb. 19 zeigt beispielhaft die Beschattungsdauer im Jahresverlauf, wenn das Dach am 21. Juni zwischen 11 Uhr und 13 Uhr (Normalzeit) aufgrund der Azimutänderung der Sonne beschattet wird (Lösungsfunktion). Ebenfalls aufgetragen ist die für die Simulation verwendete Stufenfunktion, welche durch Runden auf volle Stundenwerte gewonnen wird.

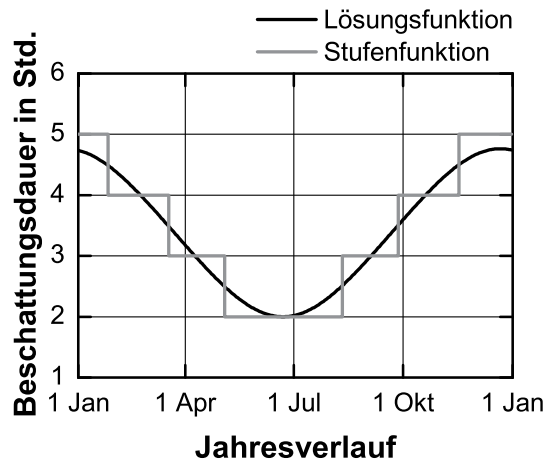


Abb. 19: Beschattungsdauer im Jahresverlauf (Lösungsfunktion) bei einem Beschattungsbeginn am 21. Juni um 11 Uhr (Normalzeit) in Holzkirchen (D) und einer Beschattungsdauer von 2 Stunden, sowie die zur Simulation verwendete Stufenfunktion mit vollen Stundenwerten

Für Situationen ohne benachbarte Objekte ergibt sich die solare Einstrahlung auf den betrachteten Punkt durch Gleichung (4.4). Bei schattenwerfenden Objekten entsprechend Abb. 16, verändert sich die solare Einstrahlung aufgrund der fehlenden Sonneneinstrahlung und des reduzierten Sichtfaktors zum Himmel. Für weitere Berechnungen der Solarstrahlung bei möglichen Beschattungssituationen wird die Diffusstrahlung deshalb generell durch einen Sichtfaktor (SF) von 0,5 reduziert.

Für die Zeit während der Besonnung wird die eintreffende Solarstrahlung durch Gleichung (4.5) und für die Zeit der Beschattung durch Gleichung (4.6) berechnet.

$$I_{\text{bes}} = I_{\text{dir}} + I_{\text{dif}} \quad (4.4)$$

$$I_{\text{besch}} = I_{\text{dir}} + \text{SF} \cdot I_{\text{dif}} \quad \text{während Besonnung} \quad (4.5)$$

$$I_{\text{besch}} = \text{SF} \cdot I_{\text{dif}} \quad \text{während Beschattung} \quad (4.6)$$

- I_{bes} solare Einstrahlung bei Vollzeit besonnten Situationen W/m^2
- I_{besch} solare Einstrahlung bei Beschattungssituationen in W/m^2
- I_{dir} Direktstrahlung in W/m^2
- I_{dif} Diffusstrahlung in W/m^2
- SF Sichtfaktor zum Himmel (0,5)

Nachfolgend werden die Auswirkungen einer temporären Beschattung auf den Feuchtehaushalt von Flachdachkonstruktionen untersucht. Simuliert werden Foliendachelemente entsprechend Aufbau 4 in Tab. A-4 im Anhang A.1

Als Standort wird zunächst Holzkirchen gewählt. Der solare Absorptionskoeffizient der Dachbahn wird auf $a = 0,6$ und die Luftdichtheitsklasse auf B festgelegt. Es wird eine normale Feuchtelast gemäß WTA-Merkblatt 6-2-01/D verwendet.

Abb. 20 links zeigt den Einfluss der Uhrzeit des Beschattungsbeginns, wenn die Beschattungsdauer jeweils 2 Std. beträgt. Wie zu erkennen ist, wirkt sich eine Beschattung symmetrisch um 12 Uhr am negativsten auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB aus. Es wird auch deutlich, dass eine Beschattung am Nachmittag zu etwas höheren Materialfeuchten führt als eine Beschattung am Vormittag.

Die rechte Grafik in Abb. 20 verdeutlicht die Auswirkung der Beschattungsdauer auf den Materialfeuchtegehalt der außenseitigen OSB. Bei einer Beschattungsdauer von 4 Std. symmetrisch um 12 Uhr (Normalzeit) wird die zulässige Materialfeuchte von 18 M-% überschritten.

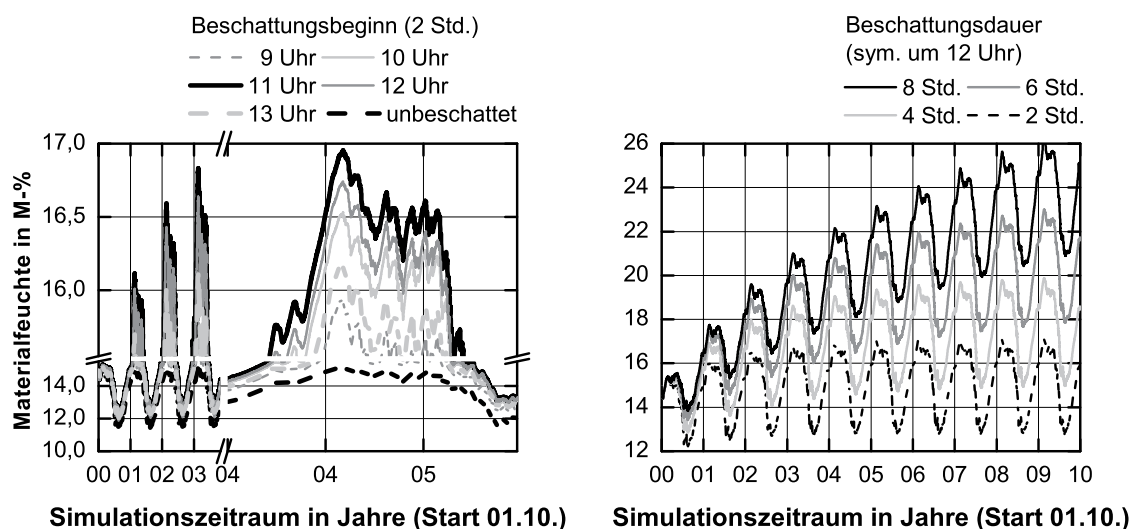


Abb. 20: Links: Einfluss des Beschattungsbeginns (Normalzeit) am 21. Juni bei einer Beschattungsdauer von 2 Std, Standort Holzkirchen (D), solarer Absorptionskoeffizient $a = 0,6$, normale Feuchtelast, LDK B
 Rechts: Auswirkung unterschiedlicher Beschattungsdauern wenn diese symmetrisch um 12 Uhr (Normalzeit) erfolgen, Standort Holzkirchen (D), solarer Absorptionskoeffizient $a = 0,6$, normale Feuchtelast, LDK B

Wie sich der solare Absorptionkoeffizient auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB auswirkt zeigt Abb. 21 links. Die Randbedingungen entsprechen jenen der vorherigen Simulationen, jedoch wird eine Beschattungsdauer von 4 Stunden (symmetrisch um 12 Uhr) angenommen. Es ist zu erkennen, dass erst ab einem solaren Absorptionskoeffizienten $> 0,7$ die kritische Materialfeuchte von 18 M-% nicht mehr überschritten wird.

Anhand von Abb. 21 rechts wird der Einfluss des Standortes sichtbar. Während die Dachkonstruktion mit einem solaren Absorptionsgrad von 0,9 bei einer Beschattungsdauer von 4 Stunden in Klagenfurt und Holzkirchen (D) keine schädliche Materialfeuchte an der außenseitigen OSB aufweist, steigt diese am kalten Standort Helsinki (FIN) auf kritische Werte an.

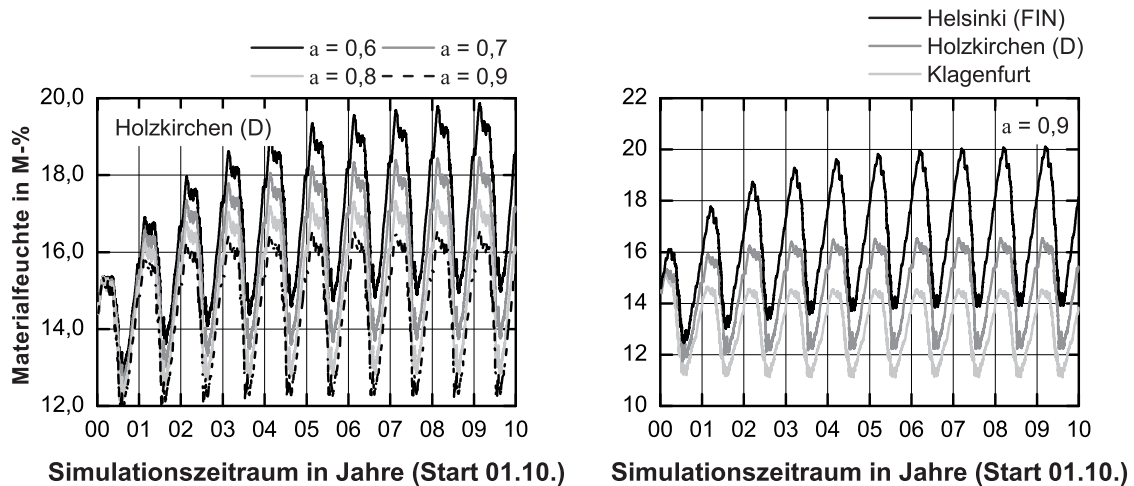


Abb. 21: Links: Einfluss des solaren Absorptionskoeffizienten auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB bei einem Beschattungsbeginn am 21. Juni um 10 Uhr (Normalzeit) und einer Beschattungsdauer von 4 Stunden, Standort Holzkirchen (D), normale Feuchtelast, LDK B
Rechts: Auswirkung unterschiedlicher Standorte, normale Feuchtelast, LDK B, solarer Absorptionskoeffizient $a = 0,9$

Wie sich verschiedene Beschattungssituationen in Kombination mit unterschiedlichen konvektiven Feuchteinträgen auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB auswirken, wird durch Abb. 22 ersichtlich. Die beiden Grafiken zeigen die Auswirkung unterschiedlicher Beschattungsdauern am 21. Juni (symmetrisch um 12 Uhr Normalzeit) und unterschiedlicher konvektiver Feuchteinträge (Q_{50} -Wert in WUFI®) auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB. Aufgetragen ist der Quotient aus der maximalen Materialfeuchte der außenseitigen OSB im 10. Simulationsjahr (u_{max}) und der Materialfeuchtegrenze von 18 M-%. Wird der Wert 1 überschritten, so übersteigt die Materialfeuchte der außenseitigen OSB 18 M-%.

Die obere Grafik in Abb. 22 zeigt das Verhalten eines Dachelements mit einem solaren Absorptionskoeffizienten von 0,9. Die untere Grafik zeigt das Verhalten des Dachelements mit einem solaren Absorptionskoeffizienten von 0,6. Als Standort wird Holzkirchen festgelegt.

Wie zu erkennen ist, wird die Auswirkung der beiden Parameter t_{besch} und Q_{50} auf die Materialfeuchte der außenseitigen OSB stark von der Ausprägung des jeweils anderen Parameters bestimmt. Mit Zunahme beider Parameter zeigt sich anfangs eine progressive Auswirkung auf die Materialfeuchte. Bei der Variante mit $a = 0,6$ reduziert sich der Ein-

fluss auf die Materialfeuchte von t_{besch} und Q_{50} bei sehr hohen Werten dieser beiden Parameter wieder. Es ist auch zu erkennen, dass der Einfluss von t_{besch} und Q_{50} mit abnehmendem solaren Absorptionskoeffizienten zunimmt.

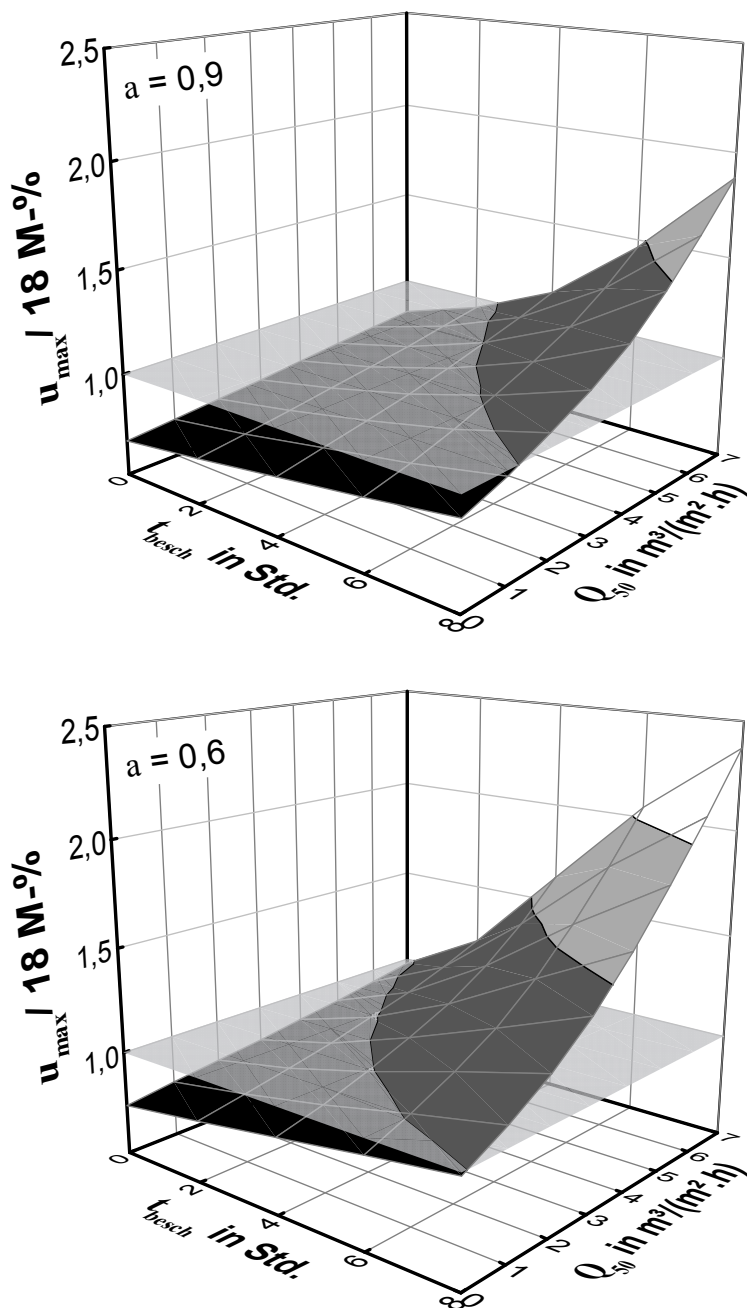


Abb. 22: Einfluss der Beschattungsdauer t_{besch} (symmetrisch um 12 Uhr Normalzeit am 21. Juni) und des konvektiven Feuchteintrags (Q_{50} -Wert in WUFI®) auf den Quotienten aus der maximalen Materialfeuchte der außenseitigen OSB im 10. Simulationsjahr (u_{max}) und der Materialfeuchtegrenze von 18 M-%. Standort Holzkirchen (D), normale Feuchtelast, Raumhöhe 8 m
 Oben: solarer Absorptionskoeffizient der Dachbahn $a = 0,9$
 Unten: solarer Absorptionskoeffizient der Dachbahn $a = 0,6$

Zur Abschätzung des Einflusses der Stufenfunktion mit Stundenzeitschritten anstelle der Lösungsfunktion auf die Ergebnisse der Beschattungssimulation, wird die eben diskutierte Variante mit $a = 0,6$ weiter betrachtet.

Abb. 23 links zeigt nochmals die Lösungsfunktion und die Stufenfunktion bei 60 Minuten Zeitschrittweiten, zusätzlich aufgetragen ist eine weitere Stufenfunktion mit einer Zeitschrittweite von 15 Minuten. Die Lösungsfunktion wird hiermit deutlich exakter beschrieben.

Die rechte Grafik in Abb. 23 zeigt den Vergleich der maximalen Materialfeuchte bei Variation der Zeitschrittweite, der Beschattungsdauer und des konvektiven Feuchteintrags. Dargestellt ist der Quotienten der maximalen Materialfeuchte der außenseitigen OSB bei 15 Minuten und 60 Minuten Zeitschritten im 10. Simulationsjahr. Wird der Wert 1 unterschritten, so werden durch 15 Minuten Zeitschritte geringere Materialfeuchten erreicht.

Wie zu erkennen ist, liegt die maximale Materialfeuchte bei 15 Minuten Zeitschritten immer unterhalb jener durch 60 Minuten Zeitschritte. Es ist eine tendenzielle Zunahme der Unterschreitung mit zunehmender Feuchtebelastung auf das Dach zu beobachten. Die Unterschiede sind mit einer maximalen relativen Unterschreitung von 2,3 % jedoch gering. Durch die Verwendung der Lösungsfunktion anstelle der Stufenfunktion mit 15 Minuten Zeitschrittweite sind nur geringfügig andere Ergebnisse zu erwarten.

Aufgrund der schwach ausgeprägten Differenzen zwischen den Ergebnissen bei Verwendung der Stufenfunktionen mit 60 Minuten und 15 Minuten Zeitschrittweite und der deutlich gesteigerten Simulationsdauer und Datenmenge bei Verwendung von geringen Zeitschrittweiten, werden bei den nachfolgenden Simulationen jeweils Stufenfunktionen mit 60 Minuten Zeitschrittweite verwendet.

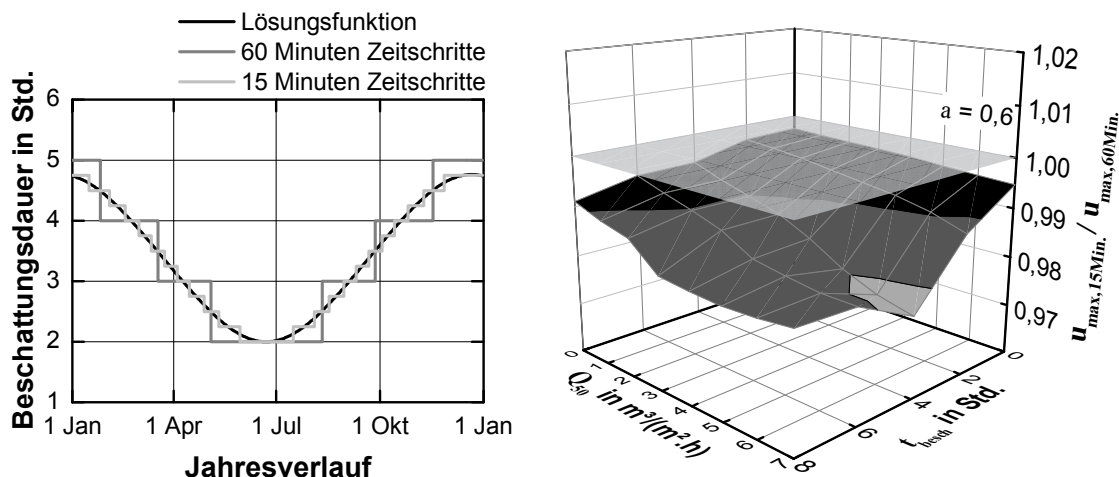


Abb. 23: Links: Beschattungsdauer im Jahresverlauf (Lösungsfunktion) bei einem Beschattungsbeginn am 21. Juni um 11 Uhr (Normalzeit) in Holzkirchen (D) und einer Beschattungsdauer von 2 Stunden, sowie die zur Simulationen verwendete Stufenfunktionen mit 60 Minuten und 15 Minuten Zeitschrittweiten
 Rechts: Quotient der maximalen Materialfeuchte der außenseitigen OSB im 10. Simulationsjahr bei Simulation mit Stufenfunktionen mit 15 Minuten ($u_{\max,15\text{Min.}}$) und 60 Minuten ($u_{\max,60\text{Min.}}$) Zeitschrittweiten unter Variation der Beschattungsdauer t_{besch} (symmetrisch um 12 Uhr Normalzeit am 21. Juni) und des konvektiven Feuchteintrags (Q_{50} -Wert in WUFI®)

4.2.2 Ansatz zur Ermittlung der maximal möglichen Beschattungsdauer

Der nachfolgend präsentierte Ansatz zur Ermittlung der maximal möglichen Beschattungsdauer verfolgt die Idee, dass ein temporär beschattetes Dach mit hohem solaren Absorptionskoeffizienten (dunkle Dachabdichtung) eine vergleichbare sommerliche Rücktrocknung aufweist, wie ein unbeschattetes Dach mit niederem Absorptionskoeffizienten (helle Dachabdichtung).

Für die weitere Betrachtung wird davon ausgegangen, dass der größte Teil der sommerlichen Rücktrocknung zwischen Anfang April und Ende September erfolgt, was auch die getätigten Messungen zeigen.

Vereinfachend wird vorausgesetzt, dass die Rücktrocknung lediglich auf diffusive Weise erfolgt. Ein konvektiver Abtransport von Feuchtigkeit aus dem Gefach wird nicht berücksichtigt.

Gleichung (4.7) zeigt die Zusammenhänge der Wasserdampfdiffusionsstromdichte während der sommerlichen Umkehrdiffusion.

$$g = -\delta \cdot \frac{dp_v}{dx} \quad (4.7)$$

$$= \frac{\delta_a}{\mu} \cdot \frac{p_v - p_{v,i}}{d}$$

- g Diffusionstromdichte in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- p_v Wasserdampfpartialdruck im Gefach in Pa
- $p_{v,i}$ Wasserdampfpartialdruck im Innenraum in Pa
- d Durchströmte Dicke in m
- δ Diffusionsleitfähigkeit des Bauteils in $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
- δ_a Diffusionsleitfähigkeit der ruhenden Luft in $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$
- μ Diffusionswiderstandszahl

Damit das „helle“ unbeschattete und das „dunkle“ beschattete Dach die selbe Rücktrocknung aufweisen, müssen ihre Umkehrdiffusionsstromdichten einander entsprechen.

$$\int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} g_{\text{hell}} = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{end}}} g_{\text{dunkel}} \quad (4.8)$$

- g_{hell} Umkehrdiffusionstromdichte des hellen unbeschatteten Daches in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- g_{dunkel} Umkehrdiffusionstromdichte des dunklen beschatteten Daches in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- t_{start} Startzeitpunkt der sommerlichen Rücktrocknung (1. April)
- t_{end} Endzeitpunkt der sommerlichen Rücktrocknung (30. September)

Zur Reduktion der Einflussfaktoren wird lediglich der Partialdruck im Gefach der beiden Dächer als divergierend angesetzt. Die Diffusionsleitfähigkeit der Luft sowie die Diffusionswiderstandszahl des Bauteils werden für beide Dächer als ident angenommen. Nachfolgend wird anstelle des Integrals die kumulative Summe genutzt und stundenweise vorliegende Klimadaten verwendet.

$$t_{\text{rueck}} = \{t_{\text{start}}, t_{\text{start}} + 1, \dots, t_{\text{end}} - 1, t_{\text{end}}\} \quad (4.9)$$

$$\sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{hell},i} = \sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{dunkel},i} \quad (4.10)$$

- t_{rueck} Rücktrocknungszeitraum in Stundenintervallen
- t_{start} Startzeitpunkt der sommerlichen Rücktrocknung (1. April)
- t_{end} Endzeitpunkt der sommerlichen Rücktrocknung (30. September)
- $p_{v,\text{hell}/\text{dunkel}}$ Wasserdampfpartialdruck im Gefach mit heller/dunkler Dachbahn in Pa

Eine weitere Vereinfachung erfolgt durch die Annahme von gleichwertigen relativen Luftfeuchten in beiden Gefachen. Gleichung (4.10) kann somit durch theoretische Sättigungsdampfdrücke beschrieben werden.

$$\sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{Sat,hell},i} = \sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{Sat,dunkel},i} \quad (4.11)$$

$p_{v,\text{Sat,hell/dunkel}}$ theoretischer Sättigungsdampfdruck im Gefach mit heller/dunkler Dachbahn in Pa

t_{rueck} Rücktrocknungszeitraum in Stundenintervallen

Die Sättigungsdampfdrücke können gemäß ÖNORM EN ISO 13788 durch Gleichung (4.12) bzw. (4.13) errechnet werden.

$$p_{v,\text{Sat}} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} \quad \text{für } \theta \geq 0 \text{ °C} \quad (4.12)$$

$$p_{v,\text{Sat}} = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}} \quad \text{für } \theta < 0 \text{ °C} \quad (4.13)$$

$p_{v,\text{Sat}}$ Sättigungsdampfdruck in Pa

θ Lufttemperatur in °C

Zur Ermittlung der verwendeten Sättigungsdampfdrücke wird die Strahlungslufttemperatur an den Dachelementen verwendet (aus Zürcher und Frank (2010)).

$$\theta^* = \theta + \frac{a \cdot I}{h_e} - \frac{\varepsilon \cdot \Delta \text{IR}}{h_e} \quad (4.14)$$

θ^* Strahlungslufttemperatur in °C

θ Lufttemperatur außen in °C

a solarer Absorptionskoeffizient

I solare Einstrahlung in W/m^2

h_e Wärmeübergangskoeffizient außen in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

ε Emissionsvermögen der Baustoffoberfläche

ΔIR Infrarot Zusatzverluste an den klaren Himmel in W/m^2

Richtwerte: - bei horizontaler Ausrichtung (50 bis 100) W/m^2

- bei vertikaler Ausrichtung (10 bis 60) W/m^2

(untere Werte: warme, feuchte Luft; obere Werte: kalte, trockene Luft)

Abb. 24 zeigt den Vergleich der Strahlungslufttemperatur mit der Dachoberflächentemperatur gemäß WUFI[®]-Simulation eines dunklen Foliendaches ($a = 0,9$) entsprechend Tab. A-4 im Anhang A.1 in Klagenfurt und die somit möglichen Sättigungsdampfdrücke. Eine langwellige Wärmeabstrahlung wird hierbei nicht berücksichtigt. Wie zu erkennen ist, zeigt sich nur ein geringer Unterschied in den Temperaturen. Aufgrund der geringen thermischen Trägheit und des hohen Wärmedurchgangswiderstandes der untersuchten Leichtbaukonstruktionen kann die Dachoberflächentemperatur gut mit der Strahlungslufttemperatur abgeschätzt werden. Die geringe Abweichung bei den Temperaturen resultiert naturgemäß in etwas größeren Differenzen der möglichen Sättigungsdampfdrücke, welche nachfolgend jedoch vernachlässigt werden.

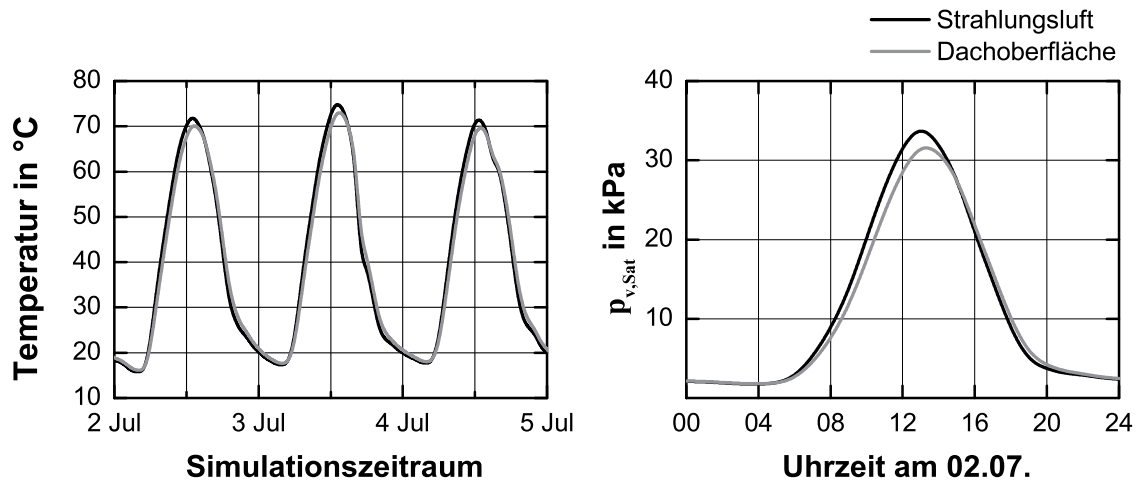


Abb. 24: Links: Strahlungslufttemperatur und Dachoberflächentemperatur eines dunklen Flachdaches ($a = 0,9$) in Holzleichtbauweise
 Rechts: Aus der Strahlungslufttemperatur und Dachoberflächentemperatur resultierende Sättigungsdampfdrücke

Unter der Voraussetzung, dass die Emissivität der Dachabdichtungen der hellen und dunklen Dachelemente, ihre Wärmestrahlungsverluste und ihr außenseitiger Wärmeübergangswiderstand übereinstimmen, hängt Gleichung (4.11) lediglich von dem solaren Absorptionskoeffizienten der Dachbahn sowie der solaren Einstrahlung ab. Weist das helle Dach (a_{\downarrow}) keine Beschattung auf, so kann Gleichung (4.11) lediglich durch eine verringerte solare Einstrahlung auf das dunkle Dach (a_{\uparrow}) wahr werden.

Eine spezifische Beschattung des dunklen Daches erfüllt diese Forderung, wodurch man zu Gleichung (4.15) gelangt.

$$\sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{Sat}}(\theta_{\text{min},i}^*) = \sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{Sat}}(\theta_i^*) \quad (4.15)$$

- $p_{v,\text{Sat}}$ theoretischer Sättigungsdampfdruck im Gefach in Pa
- t_{rueck} Rücktrocknungszeitraum in Stundenintervallen
- θ_{min}^* minimal notwendige Strahlungslufttemperatur ohne Beschattung in °C
- θ^* Strahlungslufttemperatur mit Beschattung in °C

Durch Gleichsetzen der beiden Strahlungslufttemperaturen werden die maßgebenden Einflüsse ersichtlich.

$$a_{\text{min}} \cdot I_{\text{bes}} = a \cdot I_{\text{besch}} \quad (4.16)$$

- a_{min} minimal notwendiger solarer Absorptionskoeffizient (hell)
- a vorhandener solarer Absorptionskoeffizient (dunkel)
- I_{bes} solare Einstrahlung bei Vollzeit besonnten Situationen W/m^2
- I_{besch} solare Einstrahlung bei Beschattungssituationen in W/m^2

Mit Hilfe instationärer Simulationen kann der minimal notwendige solare Absorptionskoeffizient a_{\min} so bestimmt werden, dass das zu überprüfende Dachelement bei Vollzeit besetzten Randbedingungen ein zu definierendes Tauglichkeitskriterium (Abschnitt 4.2.4) nicht verletzt.

Durch Variation der Beschattungsdauer und demensprechender Adaption der solaren Einstrahlung I_{besch} (Gleichung (4.5) und (4.6)) in der Strahlungslufttemperatur θ^* (Gleichung (4.14)) kann durch Gleichung (4.17) abschließend die maximal mögliche Beschattungsdauer bestimmt werden.

$$0 = \sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{Sat}}(\theta_{\min,i}^*) - \sum_{i \in t_{\text{rueck}}} p_{v,\text{Sat}}(\theta_i^*) \quad (4.17)$$

- $p_{v,\text{Sat}}$ theoretischer Sättigungsdampfdruck im Gefach in Pa
- t_{rueck} Rücktrocknungszeitraum in Stundenintervallen
- θ_{\min}^* minimal notwendige Strahlungslufttemperatur ohne Beschattung in °C
- θ^* Strahlungslufttemperatur mit Beschattung in °C

Abb. 25 zeigt beispielhaft den sich so ergebenden Jahresverlauf der maximal möglichen Beschattungsdauer bei einem Beginn der Beschattung am 21. Juni um 10 Uhr (Normalzeit) in Klagenfurt für die solaren Absorptionskoeffizienten $a_{\min} = 0,6$ und $a = 0,9$.

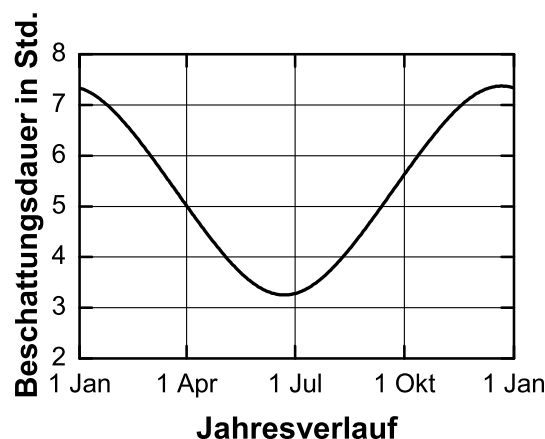


Abb. 25: Maximal mögliche Beschattungsdauer bei einem Beschattungsbeginn am 21. Juni um 10 Uhr (Normalzeit) in Klagenfurt für die solaren Absorptionskoeffizienten $a_{\min} = 0,6$ und $a = 0,9$

Um eine Aussage zu der maximal möglichen Beschattungsdauer für verschiedene Beschattungsstartzeitpunkte machen zu können, wird ein Diagramm entsprechend Abb. 26 vorgeschlagen. Die Grafik zeigt beispielhaft die maximal mögliche Beschattungsdauer in Abhängigkeit des Beschattungsbeginns (Normalzeit) für die solaren Absorptionskoeffizienten $a_{\min} = 0,6$ und $a = 0,9$ in Klagenfurt (vgl. Abb. 25).

Abb. 27 zeigt ebenfalls die maximal möglichen Beschattungsdauern, jedoch für die solaren Absorptionskoeffizienten $a_{\min} = 0,8$ und $a = 0,9$.

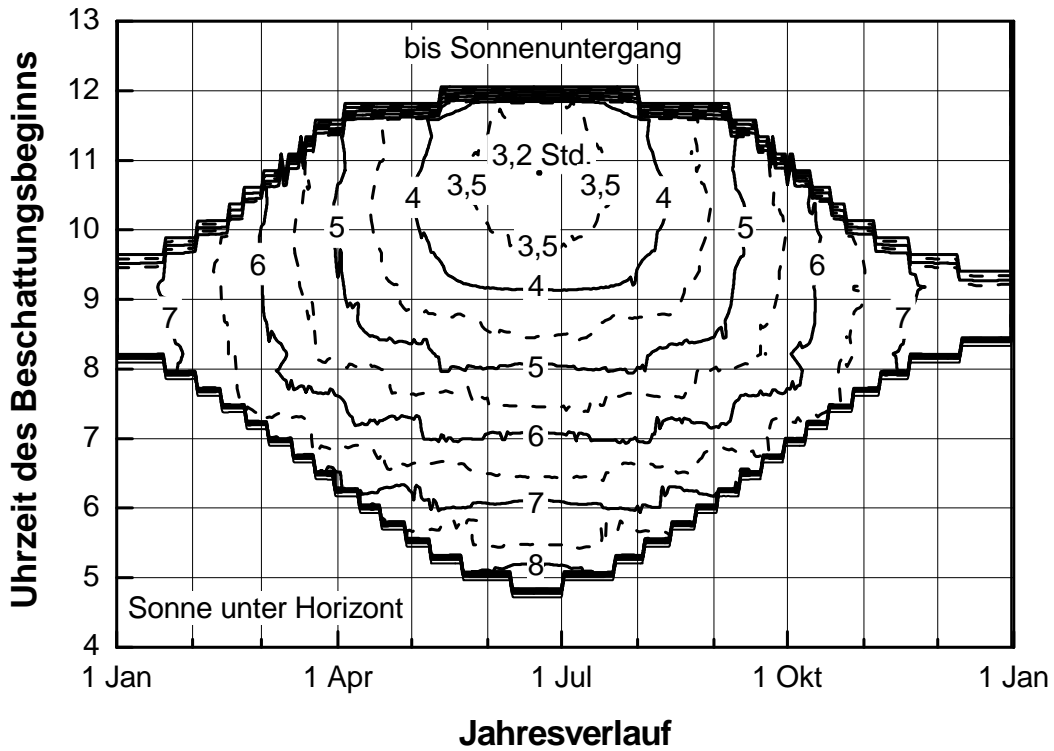


Abb. 26: Maximal mögliche Beschattungsdauer in Abhängigkeit des Beschattungsbeginns (Normalzeit, MEZ) in Klagenfurt für die solaren Absorptionskoeffizienten $a_{min} = 0,6$ und $a = 0,9$

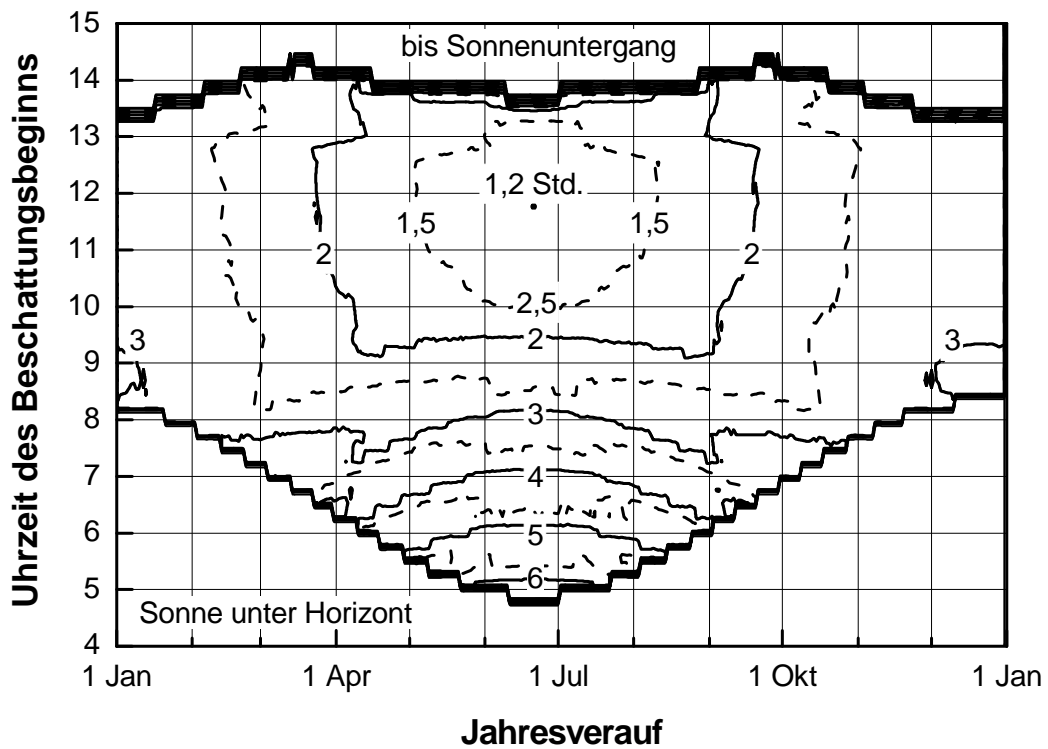


Abb. 27: Maximal mögliche Beschattungsdauer in Abhängigkeit des Beschattungsbeginns (Normalzeit, MEZ) in Klagenfurt für die solaren Absorptionskoeffizienten $a_{min} = 0,8$ und $a = 0,9$

4.2.3 Sensitivitätsanalyse

Anhand der nachfolgenden Sensitivitätsanalyse wird überprüft, in wie weit die Annahme zutrifft, dass ein gemäß Gleichung (4.17) spezifisch beschattetes Dach mit dunkler Dachabdichtung (a_{\uparrow}) eine vergleichbare Rücktrocknung wie ein unbeschattetes helles Dach ($a_{\min,\downarrow}$) aufweist und wie sich verschiedene Einflussfaktoren auf die Ergebnisse des gewählten Ansatzes auswirken.

Hierfür wird anhand von numerischen Simulationen mit WUFI® die Wirkung der errechneten Beschattungsdauern auf Flachdächer entsprechend dem Aufbau in Tab. A-4 im Anhang A.1. untersucht. Soweit nicht anders angegeben wird als Standort Klagenfurt und als Innenklima jenes gemäß der normalen Feuchtelast aus WTA-Merkblatt 6-2-01/D verwendet. Es wird, falls nicht anders angegeben, ein konvektiver Feuchteeintrag entsprechend der Luftdichtheitsklasse B angesetzt.

Als Beurteilungskriterium wird der Quotient aus den Materialfeuchten der außenseitigen OSB der beiden Dächer mit a und a_{\min} herangezogen. Die OSB-Materialfeuchte des Daches mit a_{\min} dient als Referenzfeuchte.

$$Y = \frac{u}{u_R} \quad (4.18)$$

Y	Materialfeuchtequotient
u	Materialfeuchte der außenseitigen OSB des beschatteten Daches in M-%
u_R	Materialfeuchte der außenseitigen OSB des unbeschatteten Daches in M-% (Referenzmaterialfeuchte)

Nachfolgend werden die Einflüsse folgender Parameter untersucht:

- I. Solarer Absorptionskoeffizient
- II. Uhrzeit der Beschattungsbeginns
- III. Feuchtelast
- IV. Dampfbremse
- V. Standort

4.2.3.1 Einfluss der solaren Absorptionskoeffizienten

Um den Einfluss der solaren Absorptionskoeffizienten a_{\min} und a auf den Quotienten Y zu untersuchen, werden Berechnungen mit der ermittelten maximalen Beschattungsdauer bei einem Beschattungsbeginn am 21. Juni um 10 Uhr (Normalzeit) durchgeführt.

Tab. 4 zeigt die Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten, welche im Zuge der Sensitivitätsanalyse untersucht werden.

Tab. 4: Untersuchte Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten a_{\min} und a

Variante	I	II	III	IV	V	VI
a_{\min}	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,8
a	0,6	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9

Abb. 28 links zeigt den Verlauf des Quotienten γ während des gesamten simulierten Zeitraums für verschiedene Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten. Abb. 28 rechts zeigt die zugehörigen Referenzmaterialfeuchten. Die Verläufe des eingeschwungenen, letzten Simulationsjahrs sind jeweils detaillierter dargestellt. Wie zu erkennen ist, übersteigt die Materialfeuchte des Daches mit Beschattung die Referenzmaterialfeuchte zumeist etwas. Die maximale Überschreitung der Referenzfeuchte erfolgt im 1. Quartal und beträgt 6,3 % bei der Kombination $a_{\min} = 0,6$ und $a = 0,9$ mit $u_R = 13,9$ M-%.

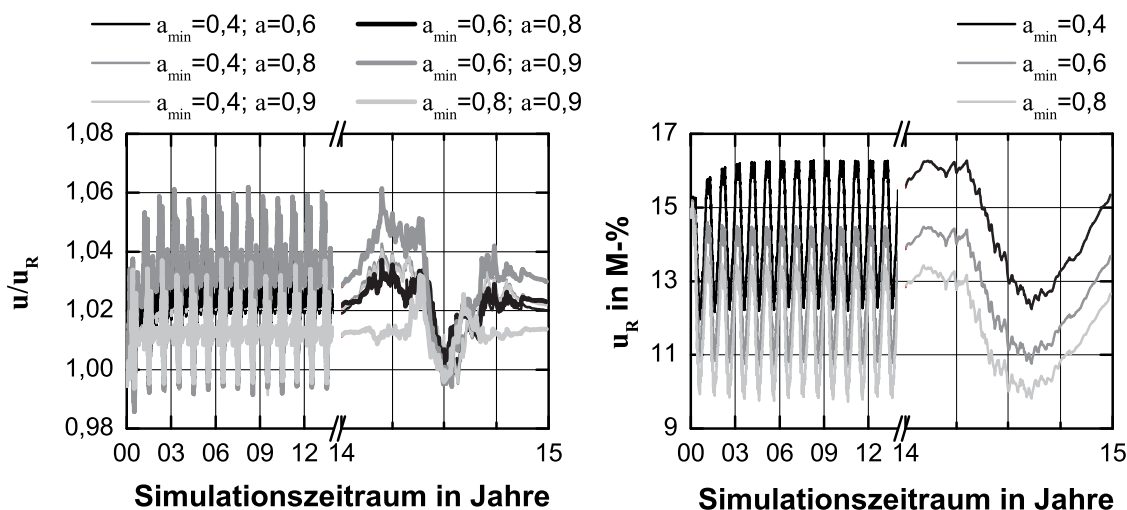


Abb. 28: Links: Materialfeuchtequotient während des gesamten Simulationszeitraums für verschiedene Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten a_{\min} und a
 Rechts: Referenzmaterialfeuchte des unbeschatteten Daches während des gesamten Simulationszeitraums für verschiedene minimale solare Absorptionskoeffizienten a_{\min}

Anhand von Abb. 29 wird die Abhängigkeit des Materialfeuchtequotienten von der Referenzmaterialfeuchte ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass der maximale Materialfeuchtequotient zumeist im Bereich der maximalen Referenzfeuchte liegt, jedoch nicht mit ihr zusammenfällt. Im ersten Halbjahr ist im Allgemeinen eine Korrelation zwischen der Referenzfeuchte und dem Materialfeuchtequotienten zu erkennen. Im zweiten Halbjahr zeigt sich dieser Zusammenhang kaum.

Ein allgemein gültiger Zusammenhang zwischen den solaren Absorptionskoeffizienten und dem Quotienten γ ist nicht zu erkennen.

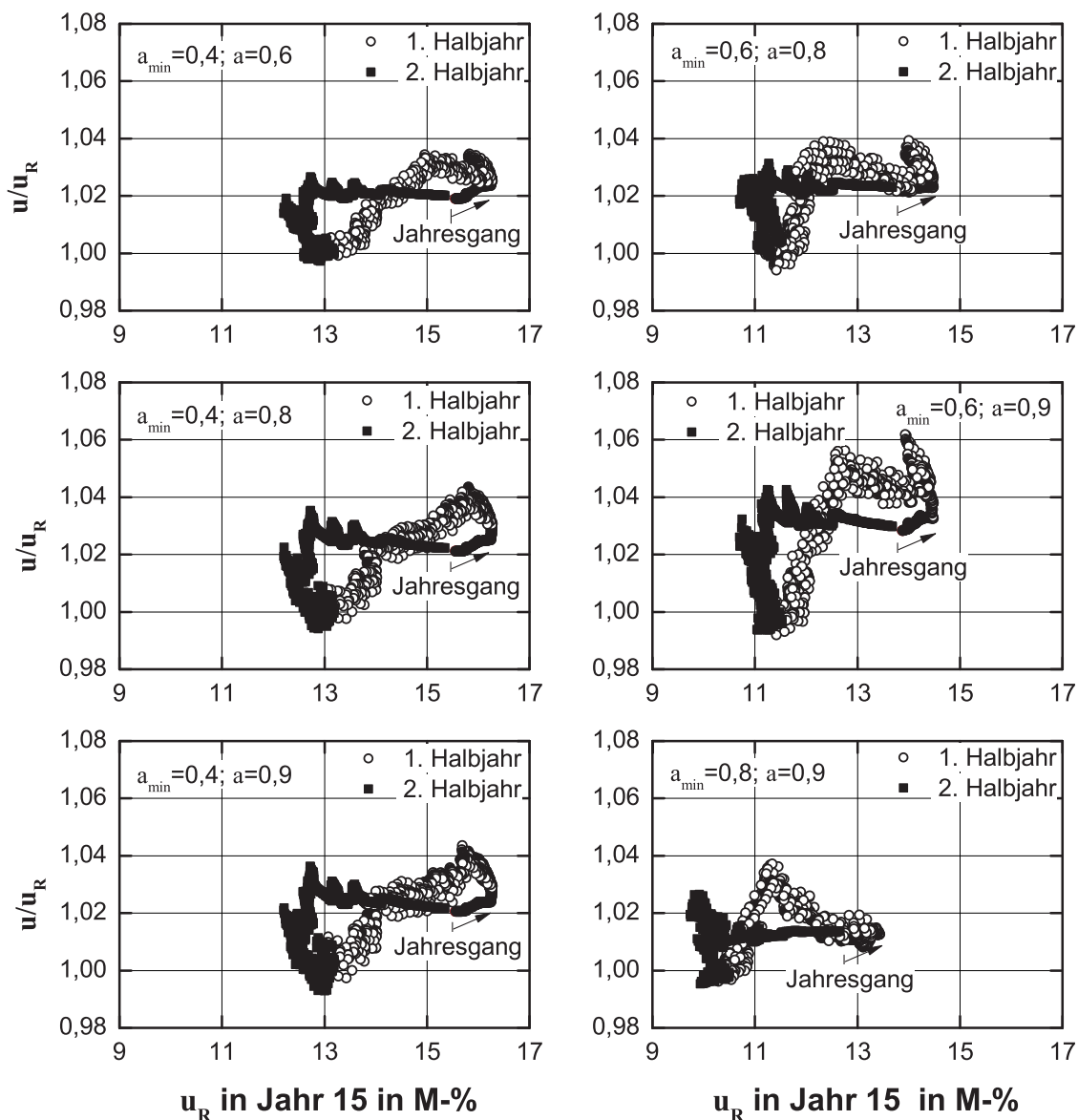


Abb. 29: Materialfeuchtequotienten in Abhängigkeit von der Referenzfeuchte u_R im letzten Simulationsjahr bei verschiedenen Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten a_{min} und a

4.2.3.2 Einfluss des Beschattungsbeginns

Um den Einfluss des Beschattungsbeginns auf den Materialfeuchtequotienten zu untersuchen, werden Berechnungen mit den solaren Absorptionskoeffizienten $a_{min} = 0,6$ und $a = 0,9$ durchgeführt. Diese Kombination weist gemäß Abb. 29 den höchsten Materialfeuchtequotienten γ auf. Zur Kontrolle wird zusätzlich die Kombination $a_{min} = 0,8$ und $a = 0,9$ untersucht.

Tab. 5 zeigt die verschiedenen untersuchten Startzeitpunkte der Beschattung am 21. Juni.

Tab. 5: Untersuchte Startzeitpunkte der Beschattung am 21. Juni (Normalzeit)

Variante	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Beschattungsbeginn (Uhrzeit)	5	7	9	11	12	13	15	17	19

Abb. 30 zeigt die Verläufe der maximal möglichen Beschattungsdauern bei Variation des Beschattungsbeginns am 21. Juni für die beiden Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten. Die gestrichelten Linien verdeutlichen, dass die Beschattung für den Rest des Tages erfolgen kann.

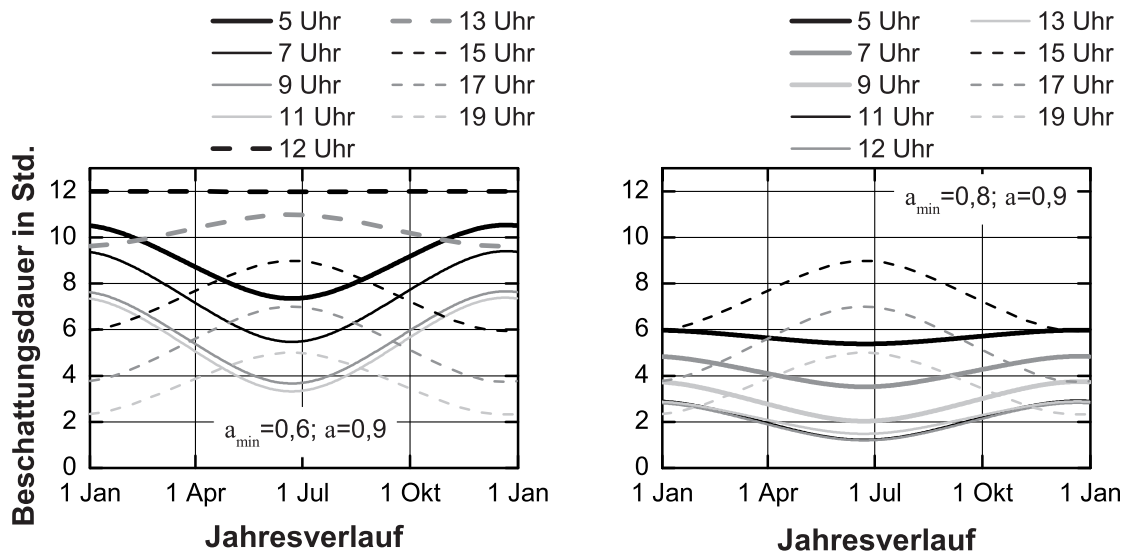


Abb. 30: Maximal mögliche Beschattungsdauer im Jahresverlauf in Abhängigkeit des Startzeitpunktes der Beschattung am 21. Juni (Normalzeit) für zwei Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten a_{\min} und a

In Abb. 31 sind die maximalen Materialfeuchtequotienten (γ_{\max}) in Abhängigkeit des Beschattungsbeginns für die untersuchten Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass γ_{\max} für Beschattungen ab der Mittagszeit abnimmt. Bei einem Beschattungsbeginn vor 12 Uhr zeigt sich hingegen keine eindeutige Abhängigkeit zwischen dem maximalen Materialfeuchtequotienten und der Uhrzeit des Beschattungsbeginns. Der maximale Materialfeuchtequotient wird jeweils bei einem Beschattungsbeginn um 11 Uhr erreicht.

Ermöglicht die errechnete Beschattungsdauer eine Beschattung für den Rest des Tages (vgl. Abb. 30), so erzeugen beide Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten maximale Materialfeuchtequotienten von < 1 .

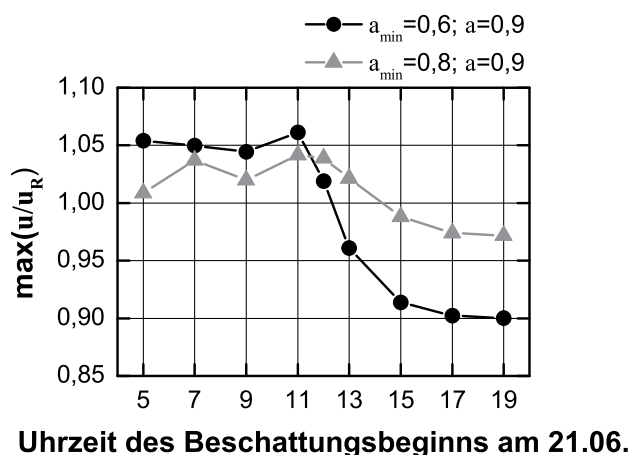


Abb. 31: Maximaler Materialfeuchtequotient in Abhängigkeit des Beschattungsbeginns (Normalzeit) am 21. Juni für zwei Kombinationen der solaren Absorptionskoeffizienten a_{\min} und a

4.2.3.3 Einfluss der Feuchtelast

Um den Einfluss der Feuchtelast auf den Materialfeuchtequotienten γ zu untersuchen, werden die Raumlufffeuchte und der konvektive Feuchteeintrag variiert. Die solaren Absorptionskoeffizienten werden auf $a_{\min} = 0,6$ und $a = 0,9$ festgelegt. Es wird ein Beschattungsbeginn am 21. Juni um 11 Uhr (Normalzeit) angenommen. Bei dieser Kombination ergibt sich gemäß Abb. 31 der höchste Materialfeuchtequotient.

Die Feuchtelaststufen werden folgendermaßen definiert, wobei die sommerliche Raumlufffeuchte jeweils 60 % beträgt:

- 30/60 LDK A+ (8m): Raumlufffeuchte im Winter 30 %, Luftdichtheitsklasse (LDK) A+, Höhe der zusammenhängenden Luftsäule 8 m
- 40/60 LDK A (8m): Raumlufffeuchte im Winter 40 %, Luftdichtheitsklasse (LDK) A, Höhe der zusammenhängenden Luftsäule 8 m
- 50/60 LDK B (8m): Raumlufffeuchte im Winter 50 %, Luftdichtheitsklasse (LDK) B, Höhe der zusammenhängenden Luftsäule 8 m
- 60/60 LDK C (8m): Raumlufffeuchte im Winter 60 %, Luftdichtheitsklasse (LDK) C, Höhe der zusammenhängenden Luftsäule 8 m
- 60/60 LDK C (16m): Raumlufffeuchte im Winter 60 %, Luftdichtheitsklasse (LDK) C, Höhe der zusammenhängenden Luftsäule 16 m

Abb. 32 links zeigt den Verlauf des Quotienten γ während des gesamten simulierten Zeitraums für verschiedene Feuchtelasten auf das untersuchte Flachdach. Abb. 32

rechts zeigt die zugehörigen Referenzmaterialfeuchten. Die Verläufe des letzten Simulationsjahrs sind jeweils detaillierter dargestellt.

Wie zu erkennen ist, steigt der Materialfeuchtequotient bei erhöhten Feuchtelasten (ab 60/60 LDK C 8 m) auf über 1,1 an. Auch die zugehörigen Referenzmaterialfeuchten steigen aufgrund der erhöhten Feuchtelasten auf über 18 M-% an.

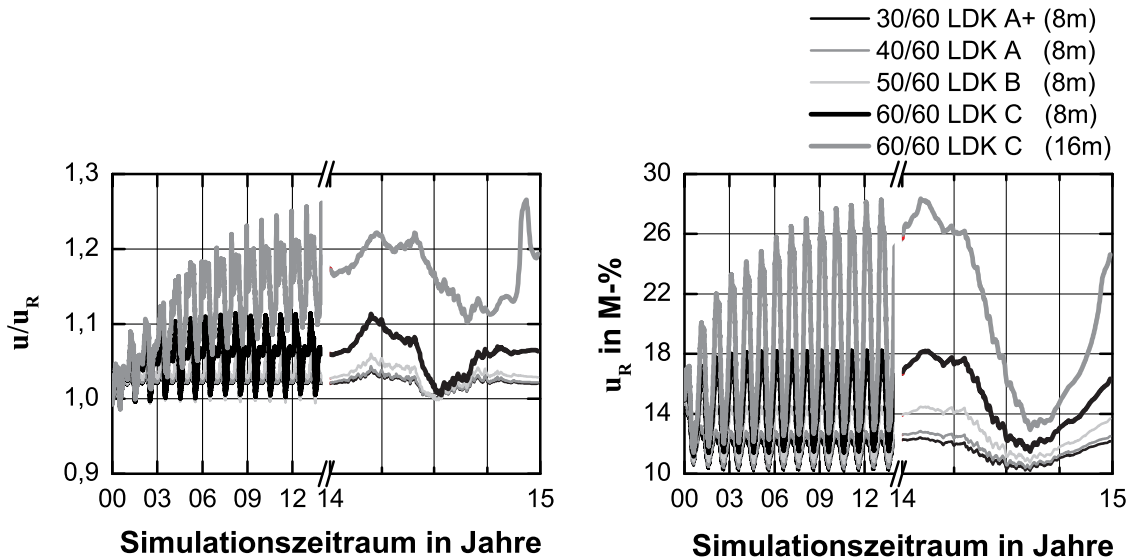


Abb. 32: Links: Materialfeuchtequotient während des gesamten Simulationszeitraums bei verschiedenen Feuchtelasten
 Rechts: Referenzmaterialfeuchte des unbeschatteten Daches während des gesamten Simulationszeitraums bei verschiedenen Feuchtelasten

Anhand von Abb. 33 wird die Abhängigkeit des Materialfeuchtequotienten von der Referenzmaterialfeuchte ersichtlich. Bis auf die nicht eingeschwungene Variante mit der äußerst hohen Feuchtelast (60/60 LDK C (16m)) ist ein einheitlicher, deutlicher Zusammenhang zwischen der maximalen Referenzmaterialfeuchte und dem maximalen Materialfeuchtequotienten zu erkennen.

Bei der Variante 60/60 LDK C (8m) mit einer maximalen Referenzmaterialfeuchte von 18,2 % steigt der Materialfeuchtequotient auf 1,11 an.

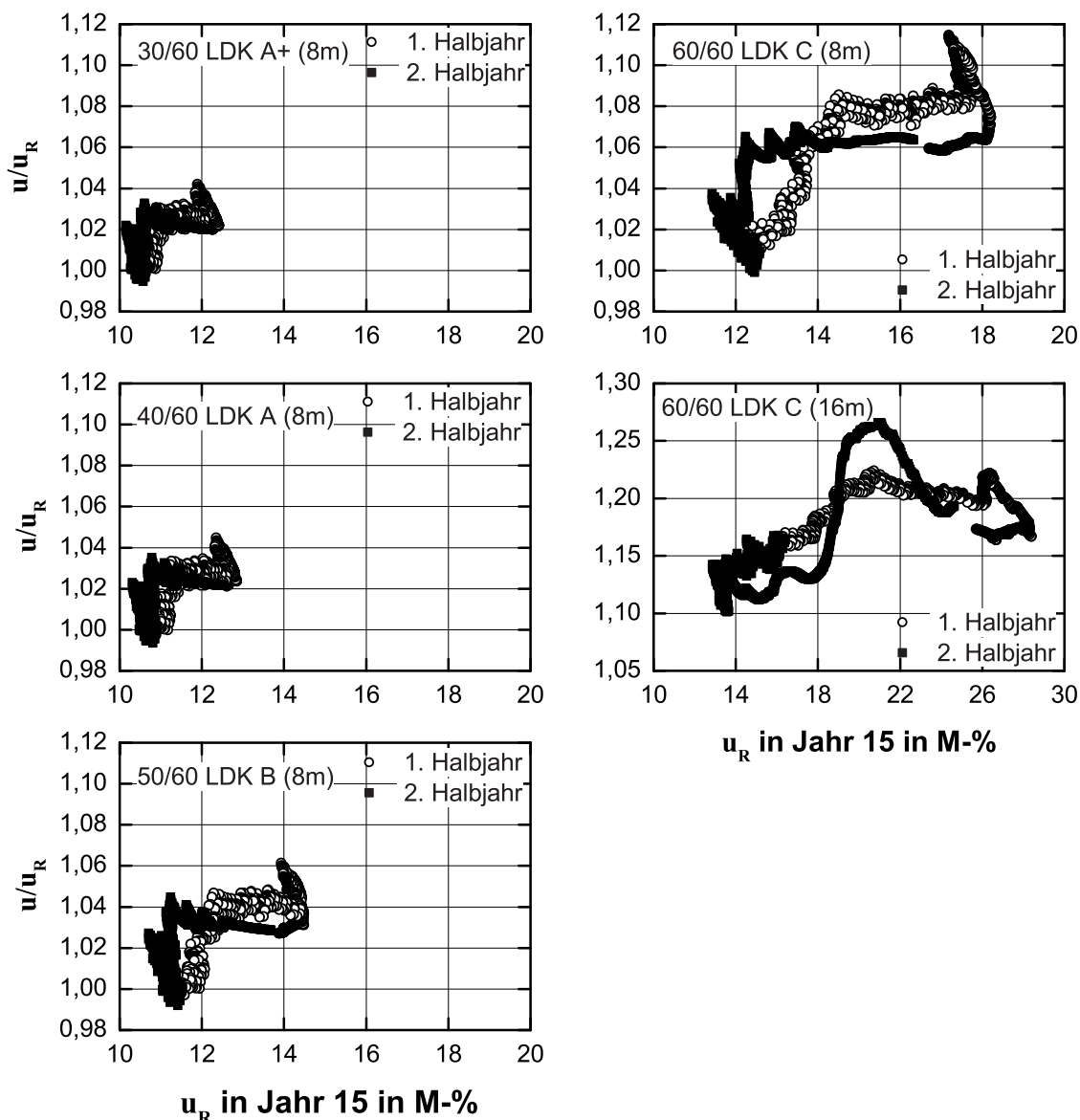


Abb. 33: Materialfeuchtequotienten in Abhängigkeit von der Referenzfeuchte u_R im letzten Simulationsjahr bei Variation der Feuchtelast

4.2.3.4 Einfluss der Dampfbremse

Wie oben beschrieben, wird im Ansatz der Diffusionswiderstand der Konstruktionen mit a und a_{min} als ident angenommen. Beim Einsatz von feuchteadaptiven Dampfbremsen kann diese Vereinfachung jedoch zu Fehlern führen, da sich die relativen Luftfeuchten an der Dampfbremse zwischen besonnten und beschatteten Dachelementen aufgrund der Feuchteumverteilung deutlich unterscheiden, was wiederum zu unterschiedlichen s_d -Werten der FADAB führt.

Zur Untersuchung des Einflusses der Dampfbremse auf den Materialfeuchtequotienten wird in den nachfolgenden Berechnungen der Einfluss der Feuchtelast durch Anpassen der konvektiven Feuchteinträge auf ähnliche Referenzfeuchten hin minimiert. Die sola-

ren Absorptionskoeffizienten werden auf $a_{\min} = 0,6$ und $a = 0,9$ festgelegt. Es wird ein Beschattungsbeginn am 21. Juni um 11 Uhr (Normalzeit) angenommen.

Nachfolgend wird der Einfluss folgender Dampfbremsen mit unterschiedlichen s_d -Werten auf den Materialfeuchtequotienten untersucht:

- I. Feuchteadaptive Dampfbremse Pro Klima Intello® (Spreizung im s_d -Wert 15,0 m – 0,03 m)
- II. Feuchteadaptive Dampfbremse Isover Vario® KM (Spreizung im s_d -Wert 4,5 m – 0,09 m)
- III. Dampfbremse mit konstantem s_d -Wert von 2 m

Abb. 34 links zeigt den Verlauf des Quotienten γ während des gesamten simulierten Zeitraums beim Einsatz verschiedener Dampfbremsen, Abb. 32 rechts zeigt die zugehörigen Referenzmaterialfeuchten. Die Verläufe des letzten Simulationsjahrs sind jeweils detaillierter dargestellt.

Anhand der Untersuchungen lässt sich kein maßgebender Unterschied im Materialfeuchtequotienten durch Variation der Dampfbremse erkennen. Die unterschiedliche Spreizung im s_d -Wert der feuchteadaptiven Dampfbremsen hat nur eine geringe Auswirkung auf diesen. Den höchsten Materialfeuchtequotient von 1,085 erreicht die Variante mit $s_d = 2$ m. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass diese Variante eine etwas höhere Referenzfeuchte zeigt.

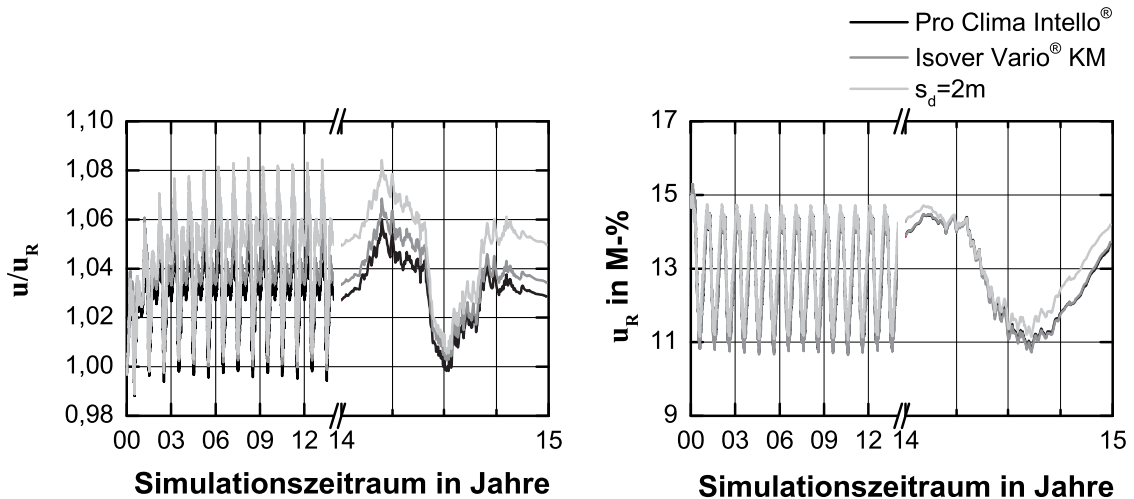


Abb. 34: Links: Materialfeuchtequotient während des gesamten Simulationszeitraums bei Verwendung zweier feuchteadaptiver Dampfbremsen mit unterschiedlich großer Spreizung im s_d -Wert und einer Dampfbremse mit konstantem s_d -Wert Rechts: Referenzmaterialfeuchte des unbeschatteten Daches während des gesamten Simulationszeitraums bei Verwendung der verschiedenen Dampfbremsen. Der konvektive Feuchteeintrag wurde auf ähnliche Referenzfeuchten hin modifiziert.

4.2.3.5 Einfluss des Standorts

Der Standort des Daches beeinflusst durch die Außenlufttemperatur und die solare Einstrahlung den Feuchtehaushalt im Gefach. Vor allem der solaren Einstrahlung kommt im oben präsentierten Ansatz aufgrund des angenommenen Rücktrocknungszeitraums (01. April bis 31. September) eine wichtige Bedeutung zu. Zur Untersuchung des Einflusses des Standortes werden die Materialfeuchtequotienten der Dächer an folgenden Standorten ermittelt:

- I. Wien – Innere Stadt
- II. Klagenfurt
- III. Helsinki (FIN)

Abb. 35 zeigt die Klimabedingungen in den drei Städten wie sie für die Simulationen verwendet werden. Wie anhand der linken Grafik zu erkennen ist, herrschen in Helsinki nahezu während des ganzen Jahres deutlich kältere Außentemperaturen als in Wien und Klagenfurt. Auch die Strahlungsintensität liegt in Helsinki annähernd das ganze Jahr unter den Werten der beiden anderen Städte, was die rechte Grafik in Abb. 35 zeigt. Die Sommer sind in Helsinki deutlich kürzer. Wien und Klagenfurt weisen eine ähnliche Strahlungsintensität auf, jedoch sind die Temperaturen in Klagenfurt geringer als in Wien.

In den Simulationen wird der Einfluss der Feuchtelast durch Anpassen der konvektiven Feuchteinträge auf ähnliche Referenzfeuchten hin minimiert.

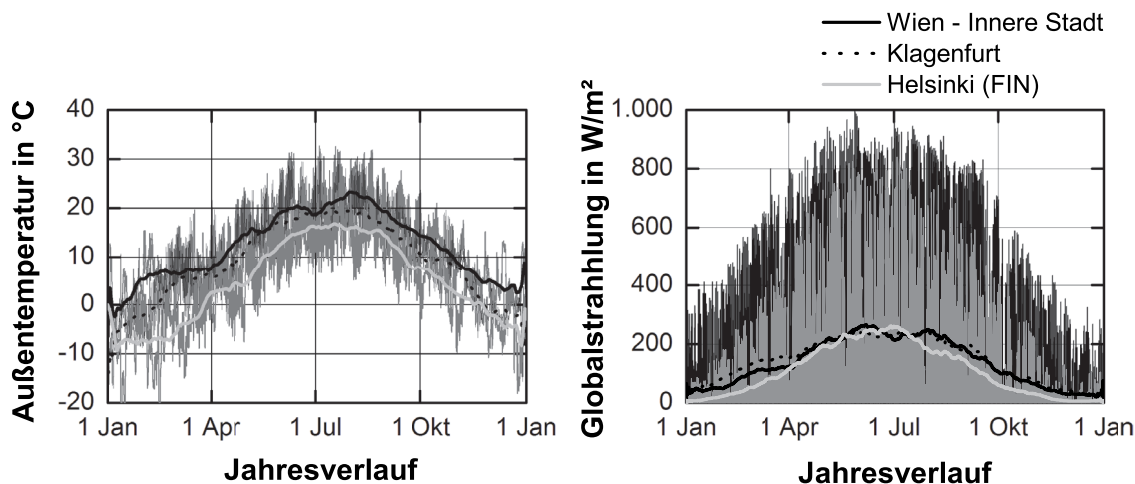


Abb. 35: Vergleich der Klimabedingungen (Stundenwerte und gleitende Monatsmittelwerte) zwischen Wien – Innere Stadt, Klagenfurt und Helsinki (FIN), welche zur Ermittlung des Einflusses des Standorts verwendet werden.

Abb. 36 links zeigt den Verlauf des Quotienten γ während des gesamten simulierten Zeitraums für die Standorte Wien, Klagenfurt und Helsinki. Die Grafik rechts zeigt die zugehörigen Referenzmaterialfeuchten. Die Verläufe des letzten Simulationsjahrs sind jeweils detaillierter dargestellt. Wie zu erkennen ist, erzeugt das Klagenfurter Klima den

höchsten und jenes in Helsinki den geringsten Materialfeuchtequotienten. Dies kann ggf. auf die Differenz der Strahlungsintensitäten zurückgeführt werden. Der maximale Materialfeuchtequotient beträgt beim Klagenfurter Klima 1,07 bei einer maximalen Referenzfeuchte von 15,7 M-%.

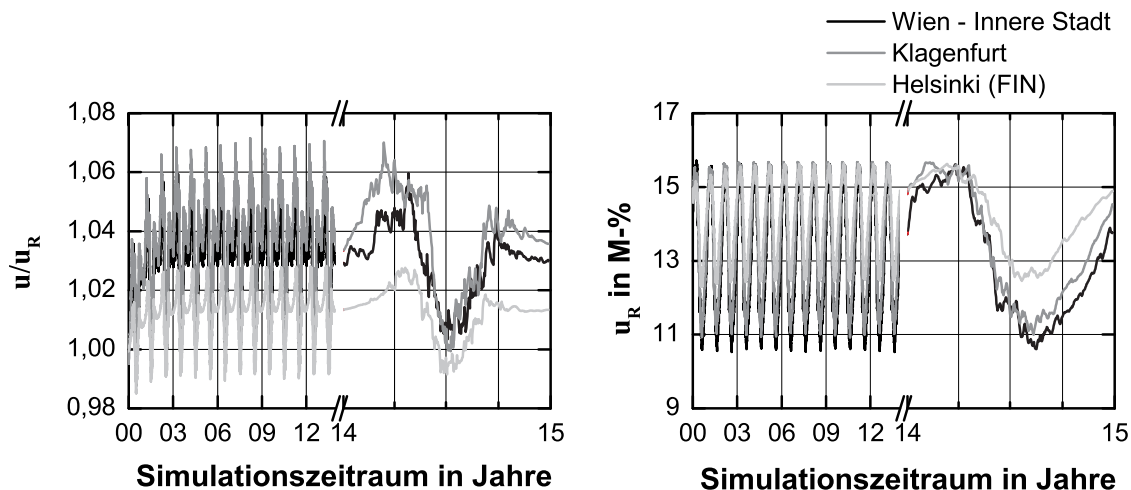


Abb. 36: Links: Materialfeuchtequotient während des gesamten Simulationszeitraums an unterschiedlichen Standorten
 Rechts: Referenzmaterialfeuchte des unbeschatteten Daches während des gesamten Simulationszeitraums an unterschiedlichen Standorten. Der konvektive Feuchteeintrag wurde auf ähnliche Referenzfeuchten hin modifiziert.

4.2.4 Tauglichkeitskriterium

Wie sich anhand der Sensitivitätsanalyse zeigt, hängt der Materialfeuchtequotient deutlich von der Feuchtelast ab. Bei Referenzmaterialfeuchten von $u_{R,max} > 18$ M-% übersteigt die OSB-Materialfeuchte im beschatteten Dach jene im unbeschatteten Referenzdach um über 10 % relativ.

Als Tauglichkeitskriterium zur Bestimmung von a_{min} wird deshalb eine OSB-Materialfeuchte von $u_{R,max} \leq 16$ M-% empfohlen. Die OSB-Materialfeuchte des beschatteten Daches liegt dann bei einer relativen Überschreitung von 10 % bei maximal 17,6 M-%, was dem in Abschnitt 2.5 hergeleiteten Grenzwert für OSB entspricht.

Vakatseite

4.3 Konstruktionsempfehlungen

Um den Wissenstransfer bzgl. der wichtigen Einflussfaktoren auf Flachdächer und die daraus resultierenden Konstruktionsmodifikationen anwenderfreundlich für die Planungspraxis umzusetzen, entstand eine Broschüre zur Planung und Wartung flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen [Teibinger und Nusser (2010b)]. In dieser werden die notwendigen Grundlagen, durchzuführende Wartungstätigkeiten und konstruktive Lösungen zur Planung und zum Erhalt von hygrisch robusten hölzernen Dachkonstruktionen aufgeführt.

Den Kerninhalt der Planungsbroschüre bilden die in Abhängigkeit der Luftdichtheitsklassen, der Beschattungsbedingungen und des Innenklimas vorgeschlagenen hölzernen Flachdachkonstruktionen. Mit Hilfe des entwickelten Entscheidungsbaums in Abb. 37 können alle wichtigen Faktoren schnell und zielführend berücksichtigt werden.

In Anlehnung an Abschnitt 4.2 werden zur Definition der Anforderung an die Dachkonstruktionen in der Planungsbroschüre verschiedene „Beschattungsklassen“ eingeführt. Im Weiteren wird hierfür der besser bezeichnende Ausdruck „Beschattungsresistenzklassen“ (BRK) verwendet. In Tab. 6 sind die definierten Beschattungsresistenzklassen mit der jeweils maximal möglichen Beschattungsdauer angegeben. Die Beschattungsdauer darf zwischen Mitte Mai und Anfang August nicht überschritten werden.

Tab. 7 zeigt beispielhaft die Konstruktionsempfehlungen wie sie in der Planungsbroschüre wiedergegeben werden. In Abhängigkeit der notwendigen Beschattungsresistenzklasse werden der notwendige solare Absorptionskoeffizient der Dachbahn und die s_d -Werte der innenseitigen Beplankung sowie der Dampfbremse empfohlen.

Tab. 6: In der Planungsbroschüre definierte Beschattungsresistenzklassen mit maximal möglicher Beschattungsdauer zwischen Mitte Mai und Anfang August [Teibinger und Nusser (2010b)]

Beschattungsresistenzklasse (BRK)	Maximale Dauer der Beschattung
A	$\leq 4^1$ Std. / $\leq 6^2$ Std.
B	$\leq 2^1$ Std. / $\leq 4^2$ Std.
C	$\leq 1^1$ Std. / $\leq 2^2$ Std.
D	keine Beschattung zulässig!

¹ wenn 13 Uhr Ortszeit überschritten wird

² vor oder nach 13 Uhr Ortszeit

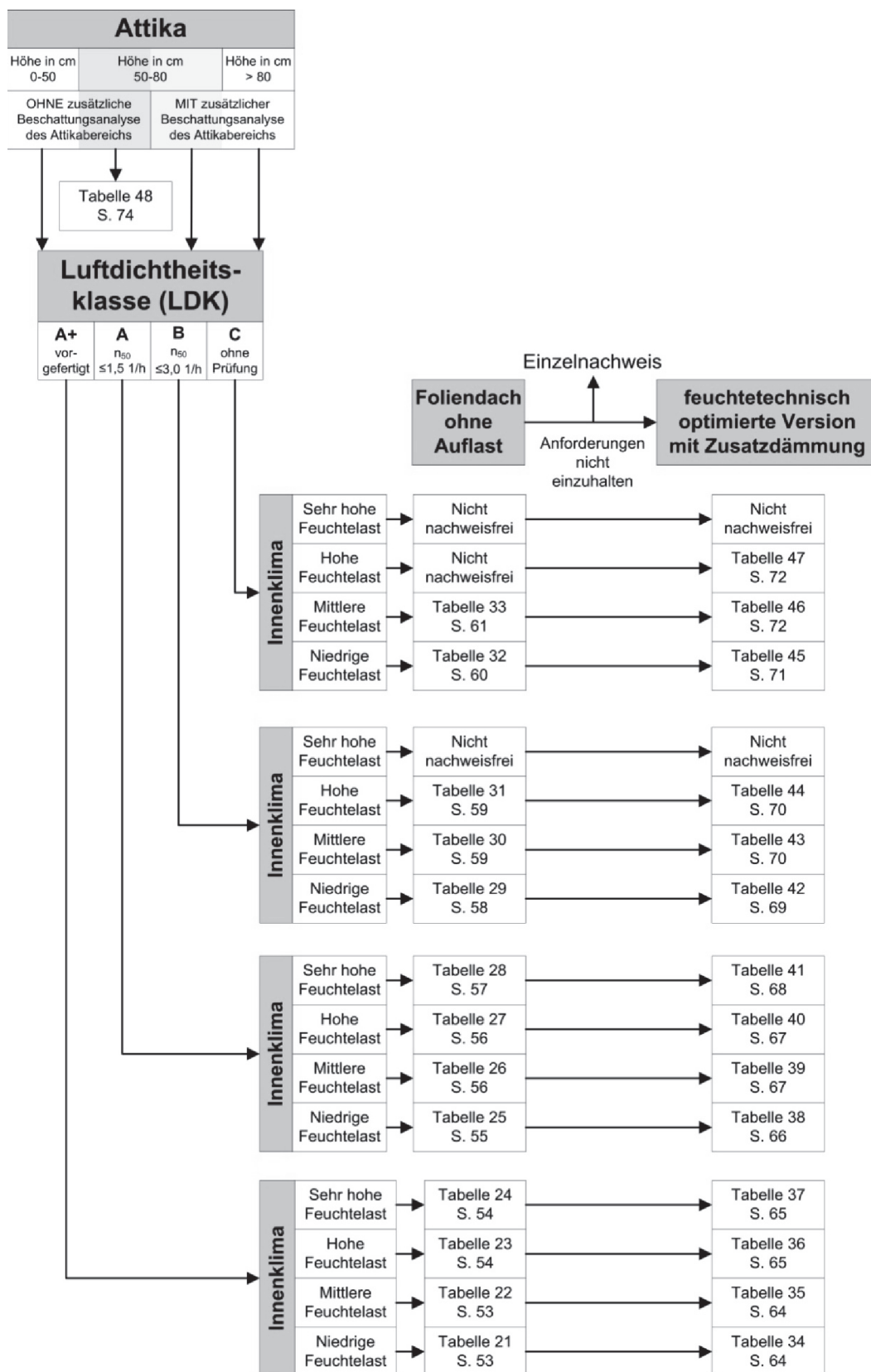


Abb. 37: In der Planungsbrochüre enthaltener Entscheidungsbaum zum Finden einer hygrothermisch tauglichen Flachdachkonstruktion [Teibinger und Nusser (2010b)]

Tab. 7: Beispielhafte Konstruktionsempfehlung in der Planungsbroschüre mit Bauteilkomponenten und resultierende Beschattungsresistenzklassen A-D für nachweisfreie vollgedämmte Foliendächer ohne Auflast für Dachelemente der LDK A und bei niedriger Feuchtlast im Innenraum [Teibinger und Nusser (2010b)]

inneren Beplankung	s _d -Wert der Dampfbremse	Beschattungsresistenzklasse bei a der Dachbahn		
		0,6 ≤ a < 0,8 (z.B. hellgrün, hellgrau)	0,8 ≤ a < 0,9 (z.B. dunkelbraun, dunkelgrau)	a ≥ 0,9 (z.B. schwarz)
≤ 3.0 m (z.B. OSB, MDF, GKF)	S _{d(φ=30%)} ≥ 3.5 m S _{d(φ=85%)} ≤ 1.0 m		D	C
	S _{d(φ=30%)} ≥ 9.0 m S _{d(φ=85%)} ≤ 1.0 m	D	B	A
≤ 0.2 m (z.B. MDF, GKF)	2 m		D	C
	S _{d(φ=30%)} ≥ 3.5 m S _{d(φ=85%)} ≤ 1.0 m	D	B	A

Legende: gelb: mit dieser Dachbahn nicht nachweisfrei

grün: nachweisfrei für die angegebene Beschattungsresistenzklasse (Tab. 6)

Vakatseite

5 Bewertung der gewonnenen Erkenntnisse

5.1 Neuerung gegenüber Stand des Wissens

Anhand der experimentellen Untersuchungen werden die hygrothermischen Vorgänge in verschiedenen flachgeneigten Dachelementen aufgezeigt. Den bisher zumeist simulationsbasierten Studien stehen nun detaillierte Klima- und Materialfeuchtemesswerte aus dem Gefach der Dachelemente gegenüber. Durch die messtechnische Analyse der einzelnen Dachaufbauten wird der Einfluss von Faktoren wie einer vorhandenen Beschattungssituation, der Temperaturamplitudendämpfung und des Bewuchsgrades des Gründaches, der Durchfrostung des Gründachsubstrats, der Feuchtepufferung durch Zellulose und der Wirkung einer Hinterlüftungsebene oder von Metallbahnumbördelungen ersichtlich. Auch werden die hygrischen Auswirkung einer abgehängten Decke und der Einfluss der Dampfbremse und der innenseitigen Beplankung durch die gewonnenen Messdaten verdeutlicht.

Im gewählten Ansatz zur Quantifizierung von konvektiven Feuchteinträgen in Bauteile wird erstmals anhand einer statistischen Auswertung eine theoretische Leckagedichte für Umfassungskonstruktionen hergeleitet. Durch die definierten Luftdichtheitsklassen werden nun ebenfalls die Fertigungsbedingungen des Daches bei der Berechnung des konvektiven Feuchteintrags berücksichtigt.

Durch den neuen Ansatz zur Berücksichtigung von Beschattungssituationen kann die maximale Beschattungsdauer für jeden Beschattungsbeginn aufgrund der Azimutänderung der Sonne bestimmt werden, ohne jeweils eine hygrothermische Simulation unter Beachtung der Beschattung durchzuführen. Mit Hilfe des gezeigten Diagramms zu den maximalen Beschattungsdauern kann nun die Verwendbarkeit des Dachaufbaus für eine bestimmte Beschattungssituation schnell beurteilt werden.

Es werden erstmalig Konstruktionsempfehlungen für flachgeneigte Dächer aus Holz unter Berücksichtigung spezifischer konvektiver Feuchteinträge ausgesprochen. Ebenso wird zum ersten Mal eine mögliche Beschattung der Dachfläche sowie der solare Absorptionsgrad der Dachbahn bei der Auswahl der geeigneten Konstruktion bedacht. Mit Hilfe des präsentierten Entscheidungsbaumes kann der Planer alle Einflussfaktoren auf die Konstruktionswahl zielführend berücksichtigen.

Vakatseite

5.2 Grenzen der gewonnenen Erkenntnisse

Die Freilanduntersuchungen wurden in Wien und somit bei eher mildem Außenklima durchgeführt. Für kältere Standorte können sich ggf. kritischere Klima- und Materialfeuchten in den Elementen einstellen. Aufgrund des gewählten Innenklimas und der dadurch erhöhten Feuchtelast wurden die Dachelemente jedoch trotzdem einer hohen hygrischen Belastung ausgesetzt.

Durch die Beschattungskonstruktion wird der Sichtfaktor zum Himmel und somit der langwellige Strahlungsaustausch mit der Umgebung deutlich reduziert. Hierdurch entstehen nachts, aufgrund der reduzierten Wärmeabstrahlung, etwas günstigere Bedingungen auf der Dachbahn/Eindeckung. Während des Tages erreicht aufgrund des niederen Sichtfaktors jedoch nur ein geringer Anteil der Diffusstrahlung die Dachoberfläche, wodurch wiederum etwas ungünstigere Bedingungen als ggf. im Realfall entstehen.

Alle experimentell untersuchten Dachelemente wurden auf Leckagen der innenseitigen Luftdichtheitsschicht hin geprüft. Ein konvektiver Feuchteeintrag in die Dachelemente mit Dampfbremse kann für den Zeitraum der Untersuchungen ausgeschlossen werden. Hierdurch werden im Vergleich zum Realfall optimierte jedoch besser quantifizierbare Randbedingungen erzeugt.

Der Ansatz zur Berücksichtigung von konvektiven Feuchteinträgen basiert auf einer statistischen Auswertung zu den potentiellen Durchdringungen und Verallgemeinerungen zum Leckagevolumenstrom durch diese. Auch wird eine zumindest gleiche Luftdichtheit an einer anderen Position im Gefach mit geringem anliegenden Luftdruck (Außenbereich, abgeschlossener Innenraum mit geringerem thermischen Auftrieb) vorausgesetzt. Nur so kann es zu einer Durchströmung des Gefaches mit Raumluft kommen.

Durch die so gewählten Annahmen besitzt der präsentierte Ansatz Unsicherheiten, welche jedoch aufgrund mangelnder Datenbasis nicht quantifiziert werden können. Zirkelbach et al. (2009) verwenden wie gezeigt einen anderweitigen Ansatz, die resultierenden Volumenströme sind jedoch mit jenen aus dem hier präsentierten Ansatz vergleichbar. Auch liegt die gewonnene Leckagestromfunktion im von Hens (2010) vorgeschlagenen Bereich.

Da der Ansatz auf dem Luftvolumenstrom durch ein nicht abgeklebtes Elektrokabel, welches eine Dampfbremse durchdringt, beruht, können große Leckagen wie Elementfugen oder größere Löcher in der Luftdichtheitsschicht hiermit nicht berücksichtigt werden.

Die eingeführten Luftdichtheitsklassen berücksichtigen u.a. die Luftdichtheit des Gebäudes, auf welchem die Dachelemente aufgebracht sind. Im gewählten Ansatz sinkt der konvektive Feuchteeintrag in die Konstruktion mit zunehmender Luftdichtheit des Gebäudes. Theoretisch ist es jedoch möglich, dass durch eine steigende Luftdichtheit des Gebäudes der thermische Auftrieb zunimmt, wodurch der konvektive Feuchteeintrag in

die Dachelemente ebenfalls ansteigt. Dieser Effekt wird im gewählten Ansatz nicht berücksichtigt.

Eine gute Luftdichtheit des Gebäudes kann auch auf eine hohe Fertigungsqualität der Dachelemente hindeuten, wie in Bachinger (2010) gezeigt wird. Durch die Reduktion des Leckagevolumenstroms bei Verbesserung des n_{50} -Wertes soll bei den ausführenden Betrieben zusätzlich das Bestreben nach einer besseren Gebäudeluftdichtheit gefördert werden.

Im Ansatz zur Berechnung der möglichen Beschattungsdauer wird die Besonnung des betrachteten Punktes durch die Änderung des Sonnenazimutes (Horizontalwinkel) ermöglicht. Eine Besonnung aufgrund des sich ändernden Höhenwinkels der Sonne sowie eine Beschattung an verschiedenen nicht zusammenhängenden Stunden des Tages wird beim verwendeten Ansatz nicht berücksichtigt.

Der zur Berechnung der Solarstrahlung bei Beschattungssituationen verwendete Sichtfaktor von 0,5 ist sehr gering gewählt. Dieser ist im Grunde nur für Punkte, welche direkt an einer schattenwerfenden Wand o.ä. liegen, gültig. Die Berechnung liegt dadurch zumeist auf der „sicheren Seite“. Nicht berücksichtigt werden mit diesem Sichtfaktor schattenwerfende Objekte, welche den betrachteten Punkt überragen, wie z.B. Vordächer oder PV-Anlagen.

Durch den gewählten Ansatz zur Berechnung der maximal möglichen Beschattungsdauer lassen sich die maximalen Materialfeuchten im beschatteten Dach nicht exakt festlegen. Nach der ausgesprochenen Empfehlung zum Tauglichkeitskriterium ($u_{R,max} \leq 16 \text{ M-\%}$) liegt die maximale Materialfeuchte um bis etwa 10 % relativ darüber.

Wie gezeigt wird, hängt der Materialfeuchtequotient deutlich von der Feuchtelast auf das Dachelement ab. Bei hoher Feuchtelast entsteht in den beschatteten Dächern im Vergleich zu den besonnten Dächern deutlich mehr Feuchtigkeit. Um diese diffusiv abzutransportieren, muss der Diffusionsstrom in den beschatteten Dächern auch deutlich größer sein als in den besonnten, was im Ansatz nicht abgebildet wird. Ggf. kann dies durch einen passenden Korrekturfaktor berücksichtigt werden, welcher auf $p_{v,Sat,(\theta_i^*)}$ in Gleichung (4.17) aufgeschlagen wird.

Die getätigte Sensitivitätsanalyse wurde noch nicht erschöpfend durchgeführt. So ist z.B. der Einfluss einer höheren Wärmekapazität des Daches noch nicht betrachtet worden. Eine allgemein gültige Aussage zur Verwendbarkeit des Ansatzes zur Berechnung der maximal möglichen Beschattungsdauer kann somit noch nicht gemacht werden.

Um die Planungsbroschüre in vollem Umfang einsetzen zu können, sind die Kennwerte der verwendeten Materialien notwendig. Vor allem der solare Absorptionsgrad der Dachbahn, im Optimalfall der gealterten, verschmutzten Dachbahn, ist selten vom Hersteller zu erfahren. Ebenfalls muss vor der Planung abgeschätzt werden, in welche Beschattungskategorie das Dachelement eingeordnet werden muss. Hierfür ist ggf. eine gesonderte Beschattungsanalyse mit geeigneter Software notwendig.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist es, die maßgebenden Faktoren zur Errichtung hygrisch robuster flachgeneigter Dachkonstruktionen in Holzbauweise zu erarbeiten, quantifizierbar zu machen und für die Planungspraxis aufzuarbeiten.

Anhand der durchgeführten Freilanduntersuchungen an 16 hölzernen Flachdachkonstruktionen können die wichtigen Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit dieser Dächer ermittelt und die hygrischen Vorgänge in den Gefachen analysiert werden. Es zeigt sich, dass geringe Dachoberflächentemperaturen, wie sie z.B. durch eine Beschattung oder einen Gründachaufbau auftreten, im Gefach zu lange andauernden, hohen relativen Luftfeuchten von $\geq 80\%$ und dadurch zu erhöhten Materialfeuchten führen. Eine dauerhafte Beschattung wirkt sich deshalb äußerst negativ auf das hygrische Verhalten aller untersuchten Dachvarianten aus.

Durch die Verwendung von Dampfbremsen mit konstant hohem Diffusionswiderstand wird die Rücktrocknung von vorhandener Feuchtigkeit aus dem Gefach nahezu ausgeschlossen. Bei Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse kann eine Rücktrocknung im Gegensatz dazu nachgewiesen werden.

Eine feuchteadaptive Dampfbremse mit höherer Spreizung im s_d -Wert-Verlauf führt zu geringeren Feuchten im Gefach als eine feuchteadaptive Dampfbremse mit geringerer Spreizung.

Es kann ebenfalls ein Trend zu höheren Luftfeuchten im Gefach bei Verwendung einer OSB anstelle einer diffusionsoffenen MDF als innere Beplankung nachgewiesen werden.

Die Gründächer weisen wie die beschatteten Dachelemente ein eher kritisches Verhalten auf. Durch die fehlenden Trocknungsbedingungen sind diese Dächer wenig fehlertolerant.

Generell verhalten sich die untersuchten metallgedeckten Dächer mit quasi diffusionsoffenem Aufbau nach außen am günstigsten. Es zeigt sich, dass eine Dampfbremsbahn bei solchen Dächern nicht zwingend erforderlich ist, sondern diese bei einem beschattungsfreien Dach und einer geeigneten Eindeckung bzw. einer geeignete Hinterlüftung durch eine OSB ersetzt werden kann. Das hinterlüftete Dach weist bei den gegebenen Versuchsbedingungen – auch bei der dauerhaften Beschattung – das günstigste Verhalten auf.

Die untersuchten Dachvarianten können nach abnehmender hygrischer Robustheit somit folgendermaßen gereiht werden:

- A) Hinterlüftete Dächer
- B) Dächer mit Gleitbügelblecheindeckung
- C) Foliendächer ohne Auflast
- D) Gründächer

Der maßgebende Faktor zur Dauerhaftigkeit von hölzernen Dächern mit Dachabdichtung ist das vorhandene Rückrocknungspotential. Die notwendige Ausprägung der Rückrocknung hängt von der Feuchtelast auf die Konstruktion ab. Leckagen in der innenseitigen Luftdichtheitsschicht, welche sich unter baupraktischen Bedingungen nicht zu 100 % vermeiden lassen, erhöhen die notwendige Rückrocknung. Beschattungen der Dachfläche hingegen führen zu einer reduzierten Rückrocknung von Feuchtigkeit aus dem Gefach.

Konvektive Feuchteinträge sowie etwaige Beschattungssituationen müssen deshalb bereits bei der Planung von Dächern mit Dachabdichtung berücksichtigt werden.

Um die konvektiven Feuchteinträge zu quantifizieren wird anhand einer statistischen Auswertung von 646 Räumen eine theoretische Leckagedichte für Umfassungskonstruktionen und hieraus ein theoretischer Leckagevolumenstrom hergeleitet. Der Grad der konvektiven Feuchteinträge hängt u.a. von den Fertigungsbedingungen und von der Ausführungsqualität ab. Diese Faktoren werden durch die Definition von vier Luftdichtheitsklassen (LDK) A+, A, B und C berücksichtigt. Dächer der LDK A+ erfahren hierbei den geringsten und Dächer der LDK C den höchsten konvektiven Feuchteeintrag. Wie gezeigt wird, kann die Tauglichkeit der Konstruktion maßgeblich von der verwendeten Luftdichtheitsklasse abhängen.

Durch vorhandene Beschattungssituationen wird die Rückrocknung von Feuchtigkeit aus dem Gefach stark reduziert. Anhand des präsentierten Ansatzes zur Bestimmung der maximal möglichen Beschattungsdauer kann die Tauglichkeit eines Dachaufbaus für spezifische Beschattungssituationen beurteilt werden. Hierfür ist lediglich eine Simulation des unbeschatteten Daches notwendig. Über den minimal notwendigen Rückrocknungsdiffusionsstrom wird auf die maximal mögliche Beschattungsdauer geschlossen. Weitere hygrothermische Simulationen unter Berücksichtigung der jeweiligen Beschattungszeiten sind hierfür nicht notwendig.

In der Praxis kann die Beurteilung der Tauglichkeit der Dachkonstruktion durch die vorgestellte Grafik zu den maximal möglichen Beschattungsdauern erfolgen. Sobald – unabhängig vom Datum – die Uhrzeit des Beschattungsbeginns und die Dauer der Beschattung bekannt sind, kann die Konstruktion hiermit beurteilt werden.

Die entstandene Planungsbroschüre dient dazu, alle relevanten Faktoren bei der Planung von flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen praxisgerecht zu berücksichtigen. Der darin enthaltene Entscheidungsbaum führt den Planer gezielt zu der geeigneten Dachkonstruktion.

Um das empfohlene Tauglichkeitskriterium von $u_{R,max} \leq 16$ M-% auch für andere Parameterkonstellationen abzusichern, ist eine weiterführende Sensitivitätsanalyse durchzuführen, wobei jedenfalls der Einfluss der solaren Strahlungsintensität tiefergehend zu betrachten ist. Die erweiterte Sensitivitätsanalyse hat aufgrund der vielfältigen Varianten nach Möglichkeit mit einem automatisierten stochastischen Berechnungskonzept zu erfolgen [Holm (2001)].

Holm (2001) zeigt auch, dass die Oberflächenübergangswiderstände an den Bauteilgrenzen einen wichtigen Einfluss auf das hygrothermische Bauteilverhalten haben. Da schattenwerfende Objekte die Luftströmungsverhältnisse und somit den außenseitigen Wärmeübergangswiderstand am Dach beeinflussen können, sollte der Zusammenhang Beschattung-Wärmeübergangswiderstand in weiterführenden Studien untersucht werden.

Wie die Luftdichtheitsmessungen mit Tracergas an den Versuchsdächern verdeutlichen, weisen Dachelemente, welche als Dampfbremse lediglich eine OSB besitzen, im Vergleich zu Elementen, in denen eine Dampfbremsbahn verwendet wird, eine geringere Luftdichtheit auf. Inwieweit die geringere Luftdichtheit der OSB baupraktisch relevant ist, ist anhand weiterer Untersuchungen zu betrachten.

Bzgl. der Luftströmungsverhältnisse in Flachdächern besteht ebenfalls weiterer Forschungsbedarf. Die getätigten Messungen lassen auf Rotationsströmungen in den voll ausgedämmten Gefachen schließen. Wie sich diese bei einer Teildämmung des Gefaches, ggf. in Kombination mit einer Teilbeschattung durch eine Attika o.ä. auswirken, sollte in zukünftigen Forschungsarbeiten untersucht werden. Typische Schadensfälle an Flachdächern mit teilgedämmten Gefachen wurden z.B. von Mohrmann (2007) und Oswald (2009) dokumentiert.

Vakatseite

7 Literaturverzeichnis

- APA (2005): *Buckling of Wood Structural Panel Sheating*. APA, (Technical Note, D481).
- APA (2006): *Moisture-Related Dimensional Stability*. APA, (Technical Topics, TT-028A).
- Bachinger, J. (2010): *Feuchteverhalten von Flachdachaufbauten im Holzleichtbau. Insbesondere von nicht hinterlüfteten Flachdächern, deren Dämm- und Trägerebene zwischen Dampfsperre /-bremse und Dachhaut angeordnet ist*. Dissertation, Wien, TU Wien, Fakultär für Architektur und Raumplanung.
- Bludau, C.; Künzle, H. M.; Zirkelbach, D. (2010a): *Hygrothermal Performance of Flat Roofs with Construction Moisture*. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI, December 5-9, Clearwater Beach, Florida, Proceedings.
- Bludau, C.; Schmidt, T.; Künzle, H. M. (2010b): *Hygrothermal effects in lightweight roofs shaded by PV-elements*. Thermophysics, November 3-5, Valtice, Czech Republic, Proceedings, S. 56–62.
- Bludau, C.; Zirkelbach, D.; Künzle, H. M. (2008): *Surface Temperatures on Flat Roofs and Hygrothermal Consequences*. Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries - NSB, June 16-18, S. 213–220.
- Carll, C. G.; Wiedenhoft, A. C. (2009): *Moisture-Related Properties of Wood and the Effects of Moisture on Wood and Wood Products*. Moisture Control in Buildings. The Key Factor in Mold Prevention. 2. Aufl., ASTM International, S. 54–79.
- Derome, D. (2005): *Moisture Accumulation in Cellulose Insulation Caused by Air Leakage in Flat Wood Frame Roofs*. Journal of Thermal Envelope and Building Science, Jg. 28, H. 3, S. 269–287.
- DIN 68800-2, 2009-11: *Holzschutz; Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau [ENTWURF]*. Deutsches Institut für Normung.
- Djebbar, R.; van Reenen, D. et al. (2003): *Envelope air pressure design load: an approach for hygrothermal analysis of retrofitted high-rise masonry wall assemblies*. National Research Council of Canada CRC, Institut for Research in Construction, Ottawa, Ontario, Canada, (Forschungsbericht, NRCC-46111).
- Du, Q. P.; Geissen, A.; Noack, D. (1991): *Die Genauigkeit der elektrischen Holzfeuchtemessung nach dem Widerstandsprinzip*. Holz als Roh- und Werkstoff, Jg. 49, S. 1–6.
- Etheridge, D.; Sandberg, M. (1996): *Building Ventilation. Theory and Measurement*. John Wiley and Sons Ltd.
- Finkensteiner (jetzt Fülle), C.; Fechner, H.; Häupl, P. (2006): *Modellierung von kurzweiliger solarer Strahlung bei der hygrothermischen Bauteilsimulation – numerische Lösung und analytischer Ansatz*. Bauphysik, Jg. 28, H. 1, S. 1–12.
- Fitz, C.; Krus, M.; Zillig, W. (2004): *Untersuchungen zum Feuchteschutz von Leichtbaukonstruktionen mit Bauplatten aus Holzwerkstoffen*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Bericht, HTB-10/2004).
- Fuhrmann, W. (2003): *Luft- und Winddichtheit von Holzhausbauten. Einfluss der Konstruktionsarten und Ausbaustufen*. 2. Aufl., Holzforschung Austria, Wien, (Forschungsbericht, HFA-Nr.: 357).

- Geißler, A. (2001): *Auswertung von Messergebnissen zur Luftdichtheit von Gebäuden*. GesundheitsIngenieur, Jg. 122, H. 1, S. 31–37.
- Geißler, A.; Hauser, G. (2002): *Abschätzung des Risikopotentials infolge konvektiven Feuchtetransports*. Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik, (Forschungsbericht, AIF-Nr.:12764).
- Gjinolli, A. E.; Vogt, J. J. (2006): *In Service Moisture Problems and Structural Performance of OSB Panels*. World Conference on Timber Engineering - WCTE, August 6-10, Portland, OR, USA, Proceedings.
- Gonin, M.-A.; Weber, H.; Blaser, C. (2003): *Hohlkastenelemente als Tragkonstruktion für Dächer*. Schweizer Hochschule für die Holzwirtschaft, Biel, Schweiz, (Forschungsbericht, 2613-HB-01).
- Hall, M.; Hauser, G. (2003): *In situ Quantifizierung von Leckagen bei Gebäuden in Holzbauart*. Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik, (Forschungsbericht, AIF-Nr. 12611 N).
- Häupl, P.; Petzold, H. (2007): *Hygrothermische Untersuchungen an begrünten Flachdächern*. 12. Bauklimatisches Symposium, 29.-31. März., Dresden, Tagungsband, S. 893–900.
- Hens, H. S. (2007): *Building Physics - Heat, Air and Moisture. Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises*. Ernst, Wilhelm & Sohn.
- Hens, H. S. (2010): *Applied Building Physics. Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties*. Ernst, Wilhelm & Sohn.
- Holm, A. (2001): *Ermittlung der Genauigkeit von Instationären thermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes*. Dissertation, Universität Stuttgart, Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- Holzabsatzfond (Hg.) (2008): *Flachdächer in Holzbauweise*. Informationsdienst Holz Spezial, H 555.
- Hukka, A.; Viitanen, H. (1999): *A mathematical model of mould growth on wooden material*. Wood Science and Technology, Jg. 33, H. 6, S. 475–485.
- Janssens, A. (1998): *Reliable control of interstitial condensation in lightweight roof systems, calculation and assessment methods*. Dissertation, Catholic University Leuven, Belgium.
- Jenisch, R.; Schüle, W. (1973): *Die Austrocknung der Baufeuchte bei nicht belüfteten Flachdächern*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Mitteilung, 6).
- Kalamees, T. (2007): *Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia*. Building and Environment, Jg. 42, H. 6, S. 2369–2377.
- Kalamees, T.; Korpi, M. et al. (2008): *The distribution of the air leakage places and thermal bridges in Finnish detached houses and apartment buildings*. Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. - NSB, June 16-18, S. 1095–1102.
- Kaufmann, P. (1999): *Extensiv begrünte Flachdächer - ein Gewinn für die Siedlungsentwässerung*. Berner Fachhochschule Architektur Bau und Holz HSB, Burgdorf, Biel, Abteilung Bauingenieurwesen.
- Künzel, H. (1978): *Feuchtigkeitshaushalt bei Flachdächern mit Dampfsperren und Dachbahnen aus PVC-weich*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Mitteilung, 34).

- Künzel, H. M. (1994): *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Dissertation, Universität Stuttgart, Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- Künzel, H. M. (1995): *Vorsicht bei nachträglicher Steildachdämmung*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Mitteilung, 269).
- Künzel, H. M. (1999a): *Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser - quo vadis*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Mitteilung, 355).
- Künzel, H. M. (1999b): *Einfluß der Deckschicht auf die Temperaturverhältnisse in Flachdächern*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Mitteilung, 354).
- Künzel, H. M.; Großkinsky, T. (1998): *Feuchtesicherheit unbelüfteter Blechdächer; auf die Dampfbremse kommt es an!* WKSB, Jg. 43, H. 42, S. 22–27.
- Künzel, H. M.; Kaufmann, A. (1995): *Feuchteadaptive Dampfbremse für Gebäudedämmungen*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, (IBP-Mitteilung, 268).
- Künzel, H. M.; Zirkelbach, D.; Schafaczek, B. (2010): *Berücksichtigung der Wasserdampfkongvektion bei der Feuchteschutzbeurteilung von Holzkonstruktionen*. WKSB, H. 63, S. 25–33.
- Mattsson, B. (2007): *Studies on building air leakage. A transient pressurisation method, measurements and modelling*. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Mohrmann, M. (2007): *Feuchteschäden beim Flachdach*. Holzbau - die neue quadriga, H. 3, S. 13–17.
- Montensen-Hedegaard, L.; Rode, C.; Peuhkuri, R. H. (2005): *Full scale tests of moisture buffer capacity of wall materials*. The 7th Nordic Building Physics Symposium - NSB, June 13-15, Reykjavík, Iceland, Proceedings.
- Niemz, P.; Poblete, H. et al. (2004): *Einfluss der hydrothermischen Behandlung von Pinus radiata D. Don auf ausgewählte Eigenschaften des Holzes*. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, Jg. 155, H. 12, S. 540–543.
- Niemz, P.; Sonderegger, W. (2009): *Untersuchungen zum Sorptionsverhalten von Holzwerkstoffen*. Bauphysik, Jg. 31, H. 4, S. 244–249.
- Nusser, B.; Neubauer, G.; Polleres, S. (2008): *Angewandte Bauforschung. Forschungsgebäude zu hygrothermischen Bauteiluntersuchungen unter Realbedingungen errichtet*. HFA-Magazin, Jg. 6, H. 1, S. 3–5.
- ÖNORM B 3802-2, 1998-04-01: *Holzschutz im Hochbau - Chemischer Schutz des Holzes*. Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM EN ISO 13788, 2002-01-01: *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren*. Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM CEN/TS 12872, 2007-10-01: *Holzwerkstoffe - Leitfaden für die Verwendung von tragenden Platten in Böden, Wänden und Dächern [VORNORM]*. Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM B 2215, 2009-07-15: *Holzbauarbeiten - Werkvertragsnorm*. Österreichisches Normungsinstitut.
- Oswald, R. (2009): *Fehlgeleitet*. deutsche bauzeitung, H. 7, S. 74–79.
- Richter, E.; Fischer, H.-M. et al. (2008): *Lehrbuch der Bauphysik. Schall - Wärme - Feuchte - Licht - Brand - Klima*. Vieweg + Teubner.

- Rick, A. W. (1958): *Das flache Dach. Baustoffliche, bauphysikalische und ausführungstechnische Gedanken zur Gestaltung flacher Dächer*. Heidelberg, Straßenbau, Chemie und Technik Verlagsgesellschaft.
- Roßbach, S. (2007): *Feuchteberechnung von Flachdächern in Holzbauweise*. Diplomarbeit, Hochschule Biberach.
- Schmidt, J.; Kornadt, O. (2010): *Convective Moisture Transfer through Walls and Wall Components*. First European Conference on Moisture Measurement - Aquametry, October 5-7, Weimar, Bd. 1, S. 527–534.
- SdW: *Sonnenstandsdiagramm Wien*. Online verfügbar unter http://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Sonnenstandsdiagramm_Wien.png, zuletzt geprüft am 29.12.2011.
- Sedlbauer, K. (2001): *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*. Dissertation, Universität Stuttgart, Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- Sedlbauer, K.; Schnuck, E. et al. (2010): *Flachdach Atlas. Werkstoffe, Konstruktionen, Nutzungen*. 1. Aufl., Birkhäuser Verlag.
- Sonderegger, W.; Niemz, P. (2003): *Untersuchung zur Quellung und Wärmeausdehnung an ausgewählten Faser-, Span- und Furnier-Holzwerkstoffen*. ETH-Zürich, Professur Holzwissenschaft, (Forschungsbericht, ETHZ/HW-HP-LZfP Nr. 17).
- SVDW (Hg.) (2007): *Feuchteschutz bei Flachdächern in Holzbauweise*. Schweizer Verband Dach und Wand. Uzwil, Schweiz, (Merkblatt, FD 2/07).
- Teibinger, M.; Nusser, B. (2010a): *Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen* Holzforschung Austria. Wien. (Forschungsbericht, HFA-Nr.: P412).
- Teibinger, M.; Nusser, B. (2010b): *Planungsbroschüre. Flachgeneigte Dächer aus Holz*. Wien, Eigenverlag, (HFA-Schriftenreihe, 29).
- TenWolde, A.; Carll, C. G.; Malinauskas, V. (1998): *Air pressures in wood frame walls. Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference, December 6-10, Clearwater Beach, Florida, Proceedings*, S. 665–675.
- Viitanen, H. (1996): *Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time*. Dissertation, Uppsala. Swedish Univ. of Agricultural Science Dept. of Forest Products.
- Wakili, K. G.; Frank, T. (2003): *Feuchteadaptive Dampfbremsen. Spezialfragen der Bauphysik*. Veranstaltung vom 12. Dezember, ETH Zürich.
- Wakili, K. G.; Frank, T. (2004): *A Humidity Dependent Vapour Retarder in Non-ventilated Flat Roofs. In Situ Measurements and Numerical Analysis*. Indoor and Built Environment, Jg. 13, H. 6, S. 433–441.
- Wilson, A. G. (1961): *Air Leakage in Buildings*. National Research Council of Canada CRC, (Canadian Building Digest, CBD-23).
- Winter, S.; Fülle, C.; Werther, N. (2009): *Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von flach geneigten Dächern in Holzbauweise mit oberer dampfdichter Abdichtung unter Einsatz ökologischer Bauprodukte zum Erreichen schadensfreier, markt- und zukunftsgerichteter Konstruktionen*. Leipzig, (Forschungsbericht, DGFH: Z 6 - 10.08.18.7-07.18).
- WTA-Merkblatt 6-2-01/D, 2002: *Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse*. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V.

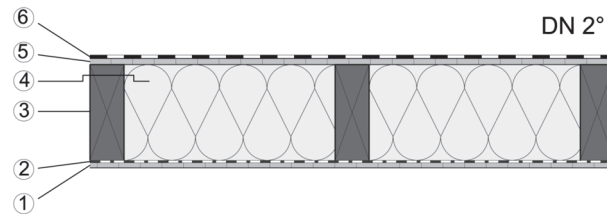
Zirkelbach, D.; Künzle, H. M. et al. (2009): *Dampfkonvektion wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen*. 4th International Symposium on Building and Ductwork Airtightness - BUILDAIR, October 1-2, Berlin, Proceedings.

Zürcher, C.; Frank, T. (2010): *Bauphysik. Bau und Energie*. 3. Aufl., vdf Hochschulvlg.

Vakatseite

A.1 Aufbau der experimentell untersuchten Dächer

Tab. A-1: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 1



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	ρ in kg/m ³	λ in W/(m ² *k)	μ
1	MDF	15	510 ¹	0.09 ¹	11 ¹
2	Feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima DB+)	0.3 ¹	643 ¹	-	2.000-14.000 ¹
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 ²	0,09 ²	130 ²
4	Glaswolle	2x 140	14,5 ¹	0.038 ¹	1 ¹
5	OSB/3	18	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 ¹	1400 ¹	-	58.000 ¹

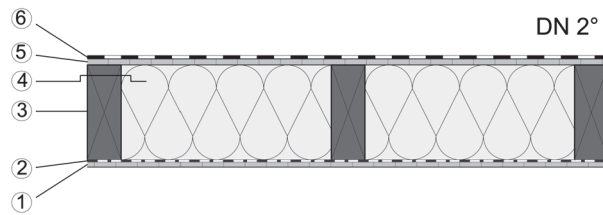
¹Herstellerangaben ²www.masea-ensan.com (<http://153.96.181.7>)

Tab. A-2: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 2

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	ρ in kg/m ³	λ in W/(m ² *k)	μ
1	OSB3	15	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
2	Feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima DB+)	0.3 ¹	643 ¹	-	2.000-14.000 ¹
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 ²	0,09 ²	130 ²
4	Glaswolle	2x 140	14,5 ¹	0.038 ¹	1 ¹
5	OSB/3	18	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 ¹	1400 ¹	-	58.000 ¹

¹Herstellerangaben ²www.masea-ensan.com (<http://153.96.181.7>)

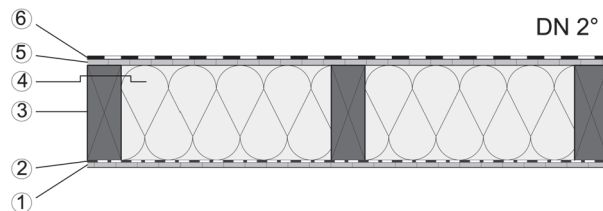
Tab. A-3: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 3



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	ρ in kg/m ³	λ in W/(m ² ·K)	μ
1	MDF	15	510 ¹	0.09 ¹	11 ¹
2	Feuchtheadaptive Dampfbremse (pro clima INTELLO®)	0.2 ¹	500 ¹	-	150-75.000 ¹
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 ²	0,09 ²	130 ²
4	Glaswolle	2x 140	14,5 ¹	0.038 ¹	1 ¹
5	OSB/3	18	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 ¹	1400 ¹	-	58.000 ¹

¹Herstellerangaben ²www.masea-ensan.com (http://153.96.181.7)

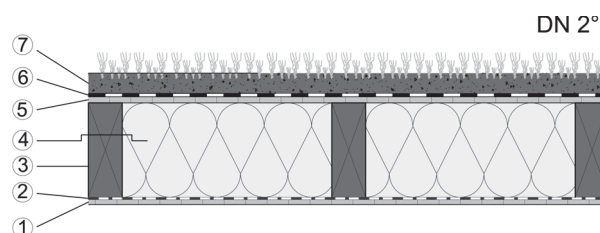
Tab. A-4: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 4



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	ρ in kg/m ³	λ in W/(m ² ·K)	μ
1	OSB/3	15	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
2	Feuchtheadaptive Dampfbremse (pro clima INTELLO®)	0.2 ¹	500 ¹	-	150-75.000 ¹
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 ²	0,09 ²	130 ²
4	Glaswolle	2x 140	14,5 ¹	0.038 ¹	1 ¹
5	OSB/3	18	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 ¹	1400 ¹	-	58.000 ¹

¹Herstellerangaben ²www.masea-ensan.com (http://153.96.181.7)

Tab. A-5: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau W



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	ρ in kg/m ³	λ in W/(m ² *K)	μ
1	MDF	15	510 ¹	0.09 ¹	11 ¹
2	ISOCELL FH Vliesdampfbremse	0.3 ¹	300 ¹	-	7.350 ¹
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 ²	0,09 ²	130 ²
4	Zellulose eingeblasen	280	38-65 ¹	0.038 ¹	1 ¹
5	OSB/3	18	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 ¹	1400 ¹	-	58.000 ¹
7	Schutzvlies + extensive Begrünung	10+70	-	-	-

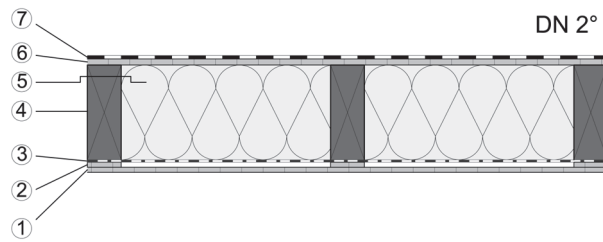
¹Herstellerangaben ²www.masea-ensan.com (<http://153.96.181.7>)

Tab. A-6: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 5

Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	ρ in kg/m ³	λ in W/(m ² *K)	μ
1	MDF	15	510 ¹	0.09 ¹	11 ¹
2	Feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima INTELLO [®])	0.2 ¹	500 ¹	-	150-75.000 ¹
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 ²	0,09 ²	130 ²
4	Glaswolle	2x 140	14,5 ¹	0.038 ¹	1 ¹
5	OSB/3	18	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 ¹	1400 ¹	-	58.000 ¹
7	Schutzvlies + extensive Begrünung	10+70	-	-	-

¹Herstellerangaben ²www.masea-ensan.com (<http://153.96.181.7>)

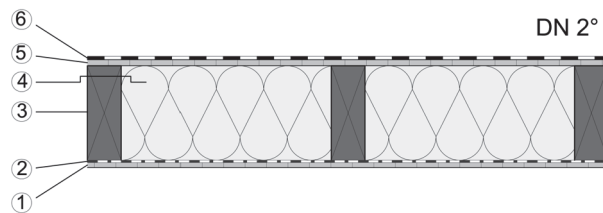
Tab. A-7: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 6



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	ρ in kg/m ³	λ in W/(m ² K)	μ
1	OSB/3	15	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
2	Unterkonstruktion (OSB3-Streifen)	15	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
3	Feuchtheadaptive Dampfbremse (pro clima DB+)	0.3 ¹	643 ¹	-	2.000-14.000 ¹
4	KVH-Fichte	100 x 280	455 ²	0,09 ²	130 ²
5	Glaswolle	2x 140	14,5 ¹	0.038 ¹	1 ¹
6	OSB/3	18	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
7	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 ¹	1400 ¹	-	58.000 ¹

¹Herstellerangaben ²www.masea-ensan.com (http://153.96.181.7)

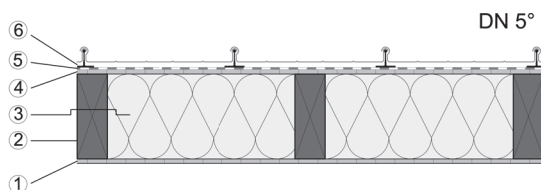
Tab. A-8: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 7



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	ρ in kg/m ³	λ in W/(m ² K)	μ
1	MDF	15	510 ¹	0.09 ¹	11 ¹
2	PE-Folie	0.2 ¹	-	-	> 500.000 ¹
3	KVH-Fichte	100 x 280	455 ²	0,09 ²	130 ²
4	Glaswolle	2x 140	14,5 ¹	0.038 ¹	1 ¹
5	OSB/3	18	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
6	EPDM schwarz mech. befestigt	1,5 ¹	1400 ¹	-	58.000 ¹

¹Herstellerangaben ²www.masea-ensan.com (http://153.96.181.7)

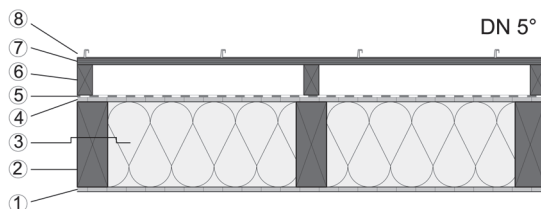
Tab. A-9: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 8



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	ρ in kg/m ³	λ in W/(m ² *k)	μ
1	OSB/3	15	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
2	KVH-Fichte	100 x 280	455 ²	0,09 ²	130 ²
3	Glaswolle	2x 140	14,5 ¹	0.038 ¹	1 ¹
4	MDF	15	510 ¹	0.09 ¹	11 ¹
5	Unterdachbahn für erhöhte Regensicherheit	0,8 ¹	500 ¹	-	62,5 ¹
6	Gleitbügelblecheindeckung silbern	1 ¹	-	-	-

¹Herstellerangaben ²www.masea-ensan.com (<http://153.96.181.7>)

Tab. A-10: Material- und Kennwertangaben zu Flachdachaufbau 9



Schicht Nr.	Bezeichnung	d in mm	ρ in kg/m ³	λ in W/(m ² *k)	μ
1	OSB/3	15	600 ¹	0.13 ¹	165 ²
2	KVH-Fichte	100 x 280	455 ²	0,09 ²	130 ²
3	Glaswolle	2x 140	14,5 ¹	0.038 ¹	1 ¹
4	MDF	15	510 ¹	0.09 ¹	11 ¹
5	Unterdachbahn für erhöhte Regensicherheit	0,8 ¹	500 ¹	-	62,5 ¹
6	Unterkonstruktion Fichte	100	455 ²	0,09 ²	130 ²
7	Rauh Schalung Fichte	22	455 ²	0,09 ²	130 ²
8	Stehfalzblech dunkel	1 ¹	-	-	-

¹Herstellerangaben ²www.masea-ensan.com (<http://153.96.181.7>)

Vakatseite

A.2 Eingesetzte Messtechnik

Tab. A-11: Eingesetzte Mess- und Regelungstechnik

Bezeichnung	Typ	Messgenauigkeit
Messanlage	ALMEMO® 5690-1M09	-
Kapazitiver Luftfeuchte- und Temperatur-Kombifühler	ALMEMO® FHA646-E1 & FHA646-E1C	± 2 % r.LF. ± 0,1 K
Thermoelemente NiCr-Ni	ALMEMO® T190-2 PVC & T190-10 Teflon	± 2,5 K
Sensor für Luftkontaminationen	FIGARO® TGS 2600	k.A.
Materialfeuchtemessgerät	Brookhuis® FMD6	± 1,0 M-% bei Fichte mit Zielfeuchte 12,7 M-%
Ultraschallvernebler	Seliger® Fogstar 300	-

Vakatseite

A.3 Publikationen

A.3.1 Aufsatz I

Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung

Teil 1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung

Bernd Nusser, Martin Teibinger, Thomas Bednar

In: Bauphysik, Jg. 32 (2010), H. 3, S. 132–143

Vakatseite

Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung¹ – Teil 1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung

Sehr hohe innenseitige Diffusionswiderstände für nichtbelüftete Dachaufbauten mit außenseitiger Folienabdichtung sind aufgrund der so geschaffenen Feuchtefallencharakteristik als kontraproduktiv anzusehen. Durch den Einsatz von feuchteadaptiven Dampfbremsen kann eine verstärkte diffusionsbedingte Rücktrocknung von Feuchtigkeit aus dem Gefach erreicht werden. Anhand von Freilanduntersuchungen werden fünf industriell gefertigte, flachgeneigte und leakagefreie hölzerne Nacktdächer mit Folienabdichtung, mit unterschiedlichen feuchteadaptiven Dampfbremsen und unterschiedlichen innenseitigen Beplankungen unter besonnten und vollzeitbeschatteten Randbedingungen messtechnisch analysiert. Dabei unterscheidet sich das hygrothermische Verhalten der verschiedenen Dachaufbauten während des 17-monatigen Beobachtungszeitraums hauptsächlich aufgrund der unterschiedlichen Solareinstrahlung. In den besonnten Dachelementen zeigen sich auf der Gefachinnenseite deutlich kritischere Klimabedingungen als auf der Gefachaußenseite. Alle beschatteten Dachelemente weisen ein sehr negatives hygrisches Verhalten auf. Trotz hoher Feuchtelast im Innenraum und in den Gefachen ist in keinem der untersuchten Dachaufbauten zum Beobachtungsende ein biologischer Befall zu entdecken.

Measuring investigations of the hygrothermal behaviour of timber flat roofs – Part 1: Non-ventilated compact roofs with waterproofing membranes. *For compact roofs with roof waterproofing membranes very high inner diffusion resistances are counterproductive. This kind of construction has virtually no drying potential. By the use of smart vapour retarders a higher diffusion based drying rate can be achieved. Five industrial manufactured, full scale low pitched and leakage free timber flat roofs with roof waterproofing membranes, different smart vapour retarders and inner sheetings were investigated under sun-exposed and full-time shaded conditions. During the 17 months long investigation period the hygrothermal behaviour of the roofs differs mainly due to the different solar irradiation. In the exposed roofs the climates at the inner side of the cavity were clearly more critical as at the outer side of the cavity. All shaded roofs showed a very critical hygrothermal performance. Despite high moisture loads in the buildings and in the cavities no mould could be found in the inspected roofs.*

¹ Dieses Thema wird in drei Aufsätzen abgehandelt. Während in Teil 1 Nacktdächer mit Folienabdichtung diskutiert werden, behandelt Teil 2 Gründachaufbauten und Teil 3 abschließend flachgeneigte Dachelemente mit Metalleindeckungen.

1 Einleitung und Problemstellung

Flachgeneigte Dachkonstruktionen aus Holz stellen und stellen einen architektonischen Trend sowohl im Wohnungsbau als auch im Objektbau dar. In den letzten Jahrzehnten wurden Holzelemente mit beidseitig diffusionsdichten Schichten und Sparrenvollämmung infolge ihrer bautechnischen (geringe Konstruktionshöhe) und wirtschaftlichen Vorteile (hoher Vorfertigungsgrad und Materialausnutzung) forciert. Bei einer hygrischen Berechnung nach Euro-Glaser [1] erhalten diese Konstruktionen zwar einen positiven Nachweis, sie stellen jedoch ein schwer kalkulierbares Sicherheitsrisiko dar, da eindringende Feuchte keine Möglichkeit zum Austrocknen hat. In der Vergangenheit mussten infolge von eingeschlossener Feuchtigkeit in der Konstruktion zum Teil schwerwiegende Schäden festgestellt werden [2], [3], [4].

Die Holzforschung Austria (HFA) führte bis dato viele Begutachtungen von flachgeneigten Dachkonstruktionen durch. Dabei zeigte sich, dass 100 % luftdichte Aufbauten bautechnisch so gut wie nicht auszuführen sind und Flachdachkonstruktionen ein dementsprechendes Rücktrocknungspotential besitzen müssen.

Häufig werden aus diesem Grund innenseitig feuchteadaptive Dampfbremsen (FADAB) [5] eingesetzt. Um das dadurch mögliche Rücktrocknungspotential auszuschöpfen, sind i. d. R. hohe Temperaturen im Gefach notwendig. Durch Gründächer, Kiesauflagen u. ä. oder durch den Schattenwurf von Dachaufbauten und hohen benachbarten Gebäuden wird eine direkte Erwärmung der Dachfläche durch die Sonne jedoch verhindert. Inwieweit eine Beschattung, sowie verschiedene innenseitige Beplankungen das hygrothermische Verhalten von hölzernen Flachdachaufbauten mit feuchteadaptiver Dampfbremse beeinflussen, ist Gegenstand der hier diskutierten Forschungsarbeit.

Die getätigten Untersuchungen wurden im Rahmen eines dreijährigen Forschungsprojektes der Holzforschung Austria in Kooperation mit der TU Wien durchgeführt und dienen u. a. der Validierung des thermisch-hygrischen Simulationsprogramms HAM3D-VIE [6] und Weiterentwicklung dieses Tools zur Berücksichtigung des Feuchteintrags und der Feuchteumverteilung aufgrund von Konvektionserscheinungen im Gefach sowie zur Entwicklung einer Risikoindexierung für Holzbauteile.

2 Getätigte Freilanduntersuchungen

Im Zuge des Forschungsprojekts „Innovative flachgeneigte hölzerne Dachkonstruktionen“ an der HFA wurden 15 Flachdachaufbauten, bestehend aus neun unterschied-



Bild 1. Südwestansicht des Forschungshauses B mit überstreichendem Beschattungselement zur Simulation einer dauerhaften Beschattung

Fig. 1. South-West perspective of test building B with shading element for simulating fulltime shade conditions

lichen Dachvarianten im Freilandversuch, messtechnisch untersucht [7]. Die Dachelemente befinden sich während der Untersuchungen auf zwei klimatisierten Forschungshäusern, wobei eines der beiden Häuser (Haus B) von einem Gitterrost aus 50 cm breiten OSB-Streifen überspannt wird (Bild 1) [8]. Hierdurch wird die Dachfläche von Haus B vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, wobei Niederschlag die Dachfläche dennoch erreicht. Dies simuliert eine andauernde Beschattung der Dachflächen.

Auf Haus A wurden neun unterschiedliche Flachdachaufbauten montiert, wobei bis auf die gemeinsame Dachbahn keinerlei Verbindung zwischen den Elementen besteht. Auf Haus B wurden nochmals sechs der neun Dachaufbauten von Haus A montiert, um diese bei beschatteten Randbedingungen zu untersuchen.

2.1 Dachaufbauten, Messpositionen und Messtechnik

Bild 2 zeigt die Aufteilung der Dachfläche und die Details zu den verschiedenen, industriell gefertigten Dachaufbauten. Die außenseitig eingesetzte schwarze EPDM weist gemäß Herstellerangaben einen s_d -Wert von 87 m auf. Als Wärmedämmung wurde Glaswolle der WLG 038 eingesetzt. In Bild 3 sind die Abmessungen der Flachdachelemente mit EPDM-Abdichtung sowie die Messpositionen

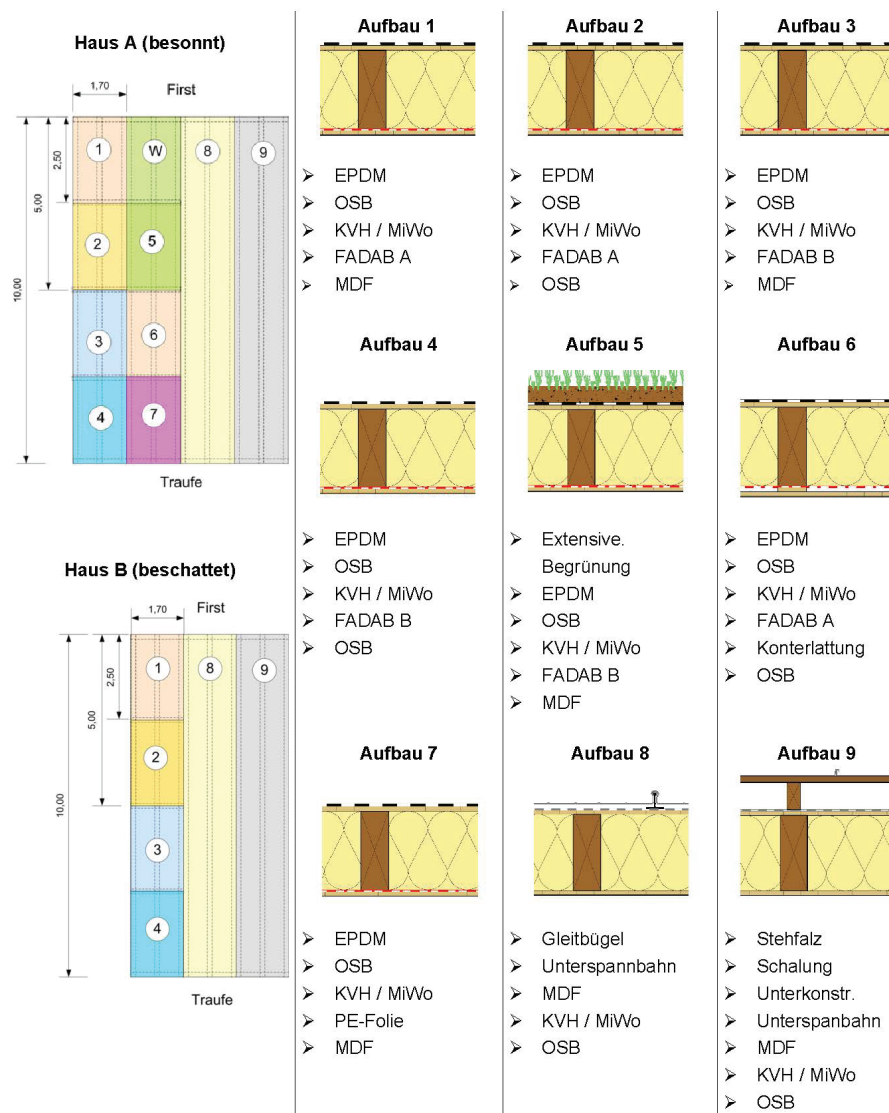


Bild 2. Dachaufteilung der beiden Forschungshäuser A und B und Übersicht der geprüften Dachaufbauten 1 bis 9

Fig. 2. Roof segmentation of test buildings A and B and overview of the investigated roof constructions 1 to 9

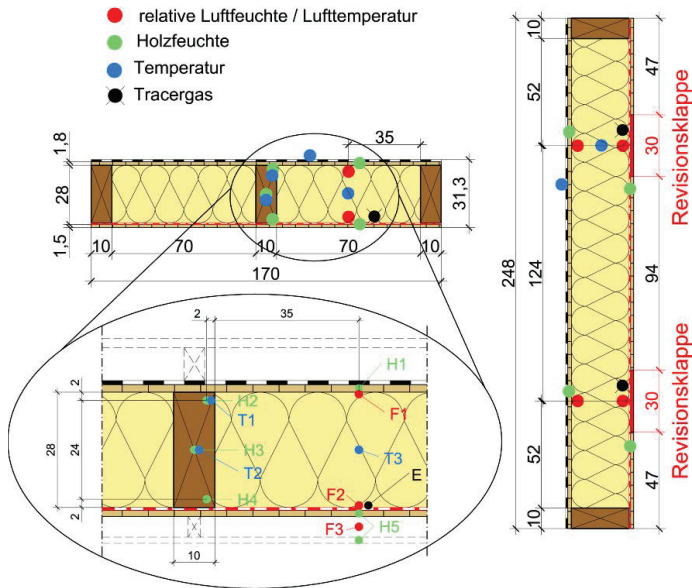


Bild 3. Schematische Darstellung der untersuchten Dachelemente 1 bis 7 mit Abmessungen der Dachelemente und Positionen der Messstellen;

$H_1 \dots H_5$ = Materialfeuchte,
 $F_1 \dots F_3$ = r.LF./Temp.,
 $T_1 \dots T_3$ = Temp.,
 E = Tracergas

Fig. 3. Schematic illustration of the investigated roof Elements 1 to 7 with dimensions of the roof elements and the measuring points;

$H_1 \dots H_5$ = Moisture content,
 $F_1 \dots F_3$ = R.H./Temp.,
 $T_1 \dots T_3$ = Temp.,
 E = Tracergas

zum Erfassen wichtiger klimatischer Bedingungen und Materialfeuchten im Gefach dargestellt.

Um eine Interaktion der einzelnen Dachaufbauten, z. B. durch Kapillartransport zwischen den Gefachen zu unterbinden – dieser Effekt wurde z. B. in [9] beobachtet – wurden alle Versuchsdachaufbauten als eigenständige Dachelemente gefertigt und die Außenkanten der Randsparren mit einer PE-Folie hygrysch abgesperrt.

Zur Klimaerfassung im Gefach und Temperaturkompensation der Holzfeuchtemessung (elektrisches Widerstandsverfahren, FMD6, Fa. Brookhuis®) wurden kapazitive Luftfeuchtesensoren mit Thermistoren (FHA646-E1/C, Fa. Ahlborn®) und Thermolemente (T190-2/10, Fa. Ahlborn®) eingesetzt. Die Luftdichtheit der Dachelemente wurde mit Hilfe von Tracergassensoren (TGS 2600, Fa. FIGARO®) in den Gefachen überprüft. Hierdurch ist eine qualitative Aussage zur Dichtheit der Dachelemente möglich.

2.2 Feuchteadaptive Dampfbremsschichten

Anhand von Bild 4 wird die Wirkungsweise von FADAB ersichtlich. Herrschen trockene Bedingungen an der Dampfbremse – entscheidend ist jeweils die mittlere anliegende relative Luftfeuchte (r.LF.) – so weisen die Dampfbremsen einen hohen s_d -Wert auf. Bei hoher r.LF. ist der s_d -Wert der Dampfbremsen hingegen deutlich geringer.

Die im Zuge dieser Untersuchungen verwendete FADAB A weist eine geringe und FADAB B eine hohe Spreizung im s_d -Wert auf.

Doch nicht nur die erläuterten FADAB sondern auch Holz und Holzwerkstoffe weisen aufgrund von Flüssigwassertransport quasi feuchteabhängige Diffusionswiderstände auf. Am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP wurden diverse hygrothermische Untersuchungen an Holzwerkstoffen sowie eine Literaturrecherche diesbezüglich durchgeführt [10]. Bild 5 zeigt die so ermittelten s_d -Wert-Bereiche von 15 mm dicken OSB und MDF. Wie zu sehen ist, sinkt der Diffusionswiderstand der beiden Holzwerkstoffe mit Zunahme der mittleren anliegenden r.LF. ebenfalls ab. Ersichtlich ist auch der große Streubereich des Kennwerts bei den OSB.

2.3 Klimatische Randbedingungen

Außenklima

Die Außenklimabedingungen wurden ab Mitte April 2008 von der Wetterstation der HFA aufgezeichnet. Diese befindet sich etwa 200 m Luftlinie von den beiden Forschungshäusern entfernt. Für die Zeiten vor April 2008 können die Klimadaten der Wetterstation der TU Wien herangezogen werden. Diese befindet sich in etwa 800 m Luftlinie Entfernung zu den Forschungshäusern. Die aufgezeichneten Lufttemperaturen und relativen Luftfeuch-

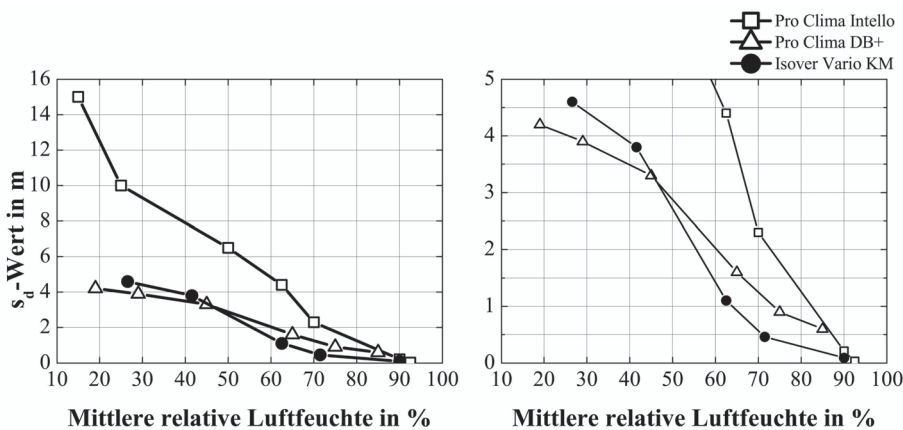


Bild 4. Darstellung der feuchteabhängigen s_d -Werte dreier am Markt erhältlicher feuchteadaptiver Dampfbremsen (Herstellerangaben)

Fig. 4. Displaying of the s_d -value dependant on relative humidity of three smart vapour retarders (manufacturer's data)

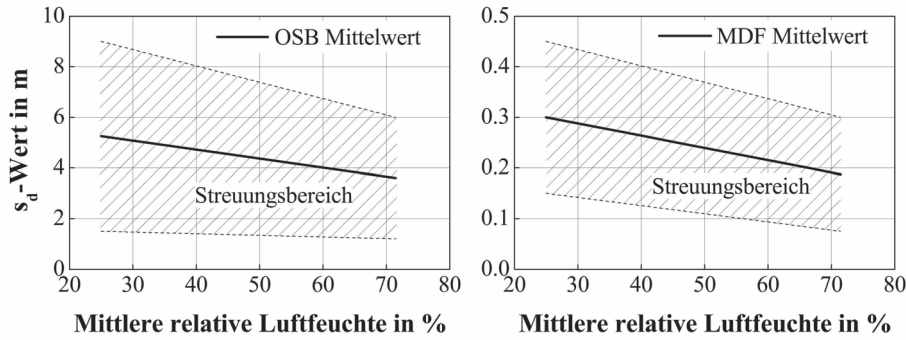


Bild 5. Abhängigkeit des s_d -Werts von 15 mm dicken OSB und MDF von der anliegenden mittleren relativen Luftfeuchte [10]

Fig. 5. Dependence of the s_d -value of 15 mm thick OSB and MDF from the mean relative humidity [10]

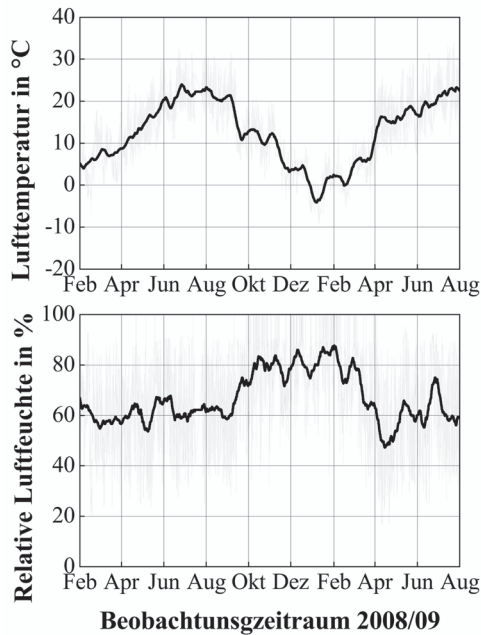


Bild 6. Außenklimabedingungen im Bereich der Forschungshäuser während des Beobachtungszeitraums (Stundenwerte dünn und gleitende Monatsmittelwerte fett)

Fig. 6. Local climate outside of the test buildings during the investigation period (hourly data thin and monthly moving average bold)

ten beider Wetterstationen können Bild 6 entnommen werden.

Aufgrund des Beschattungselements über Haus B wird der langwellige Strahlungsaustausch dieser beschatteten Dachfläche mit der Umgebung vermindert. Je nach Position am Dach liegt der Sichtfaktor zum Himmel zwischen 0,13 und 0,36.

Innenklima

Zur Steuerung des Raumklimas wurden in beiden Gebäuden Klimaanlage und Luftbefeuchter eingesetzt. Die jeweiligen Innenklimata können Bild 7 entnommen werden.

Um das Aufwechungs- und Austrocknungsverhalten der Dachkonstruktionen zu untersuchen wurde in beiden Gebäuden im April 2008 eine erhöhte Feuchtelast ($\varphi \sim 75$ bis 80 %) und erhöhte Temperaturen im Innenraum eingestellt. Im Mai 2008 wurde das Innenraumklima wieder abgesenkt. Ab November 2008 wurde wieder eine erhöhte Feuchtelast ($\varphi \sim 60$ %) eingestellt.

In Bild 8 sind die gleitenden Monatsmittelwerte der Wasserdampfpartialdrücke in den beiden Forschungshäusern A und B sowie der diesbezüglichen Randbedingungen für eine hohe Raumbelagung nach EN ISO 13788 [1] (Luftfeuchtekategorie 4) und EN 15026 [11] (hohe Belagung) aufgetragen. Zur Ermittlung der Normbedingungen wurde jeweils der IWEC Klimadatenatz für Wien verwendet. Die

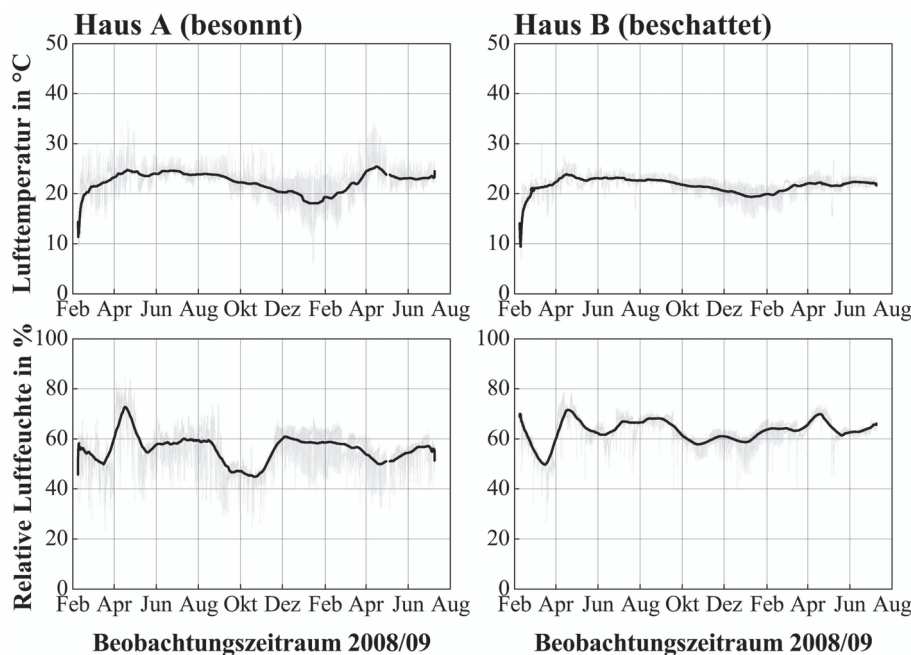


Bild 7. Innenklimabedingungen in den Forschungshäusern A und B (Stundenwerte dünn und gleitende Monatsmittelwerte fett)

Fig. 7. Climate inside the test buildings A and B (hourly data thin and monthly moving average bold)

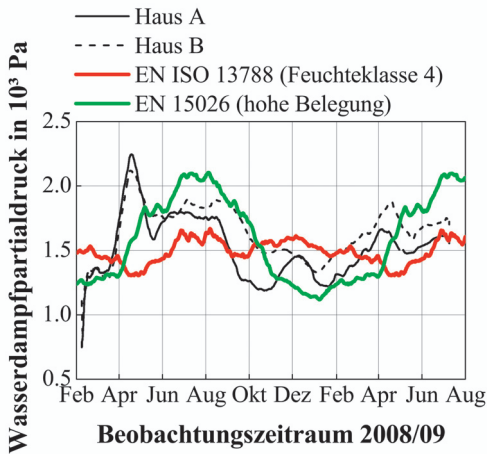


Bild 8. Wasserdampfpartialdrücke (gleitende Monatsmittelwerte) in den Forschungshäusern A und B und Normanforderungen gemäß EN ISO 13788 (Feuchteklasse 4) [1] und EN 15026 (hohe Belegung) [11]

Fig. 8. Water vapour partial pressures (monthly moving average) in the test buildings A and B and standard requirements according to EN ISO 13788 (humidity class 4) [1] and EN 15026 (high occupation) [11]

Bedingungen nach EN ISO 13788 wurden gemäß ÖNORM B 8110-2 [12] mit konstant 20 °C Innenraumtemperatur errechnet.

Wie in Bild 8 zu erkennen ist, liegen die Wasserdampfpartialdrücke in den Forschungshäusern zumeist zwischen den Werten der beiden Normvorgaben. Die Innenklimata in Haus A und B stellen für die zu untersuchenden Dachkonstruktionen eine starke hygrische Belastung dar [13].

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Luftdichtheit der Dachelemente

Alle hier diskutierten Flachdachelemente wurden mit Hilfe der Tracergasmethode auf Luftdichtheit untersucht. Keines der Elemente wies feststellbare Leckagen auf.

3.2 Klimate im Gefach

3.2.1 Generelle Betrachtung der besonnten Dachelemente

Bild 9 zeigt die Klimate (Halbstundenwerte und gleitende Monatsmittelwerte) in den besonnten EPDM-Dachelementen 1 bis 4. Die Messwerte in den vier Dachelementen zeigen geringe Unterschiede. Ähnliche messtechnische Untersuchungen in [14] weisen während des 10-monatigen Beobachtungszeitraums (01. 12. 2007–15. 09. 2008) gefachaußenseitig ebenfalls nur sehr geringe Unterschiede im r.LF-Verlauf zwischen Dachelementen mit einer FADAB (Pro Clima Intello®) oder einer OSB als innere Diffusionsbremsschicht auf. Die r.LF-Verläufe an der Gefachinnenseite wurden in [14] nicht untersucht.

Im Sommer werden bei den hier durchgeführten Untersuchungen gefachaußenseitig Spitzentemperaturen von 76 °C erreicht, gefachinnenseitig orientiert sich die Lufttemperatur in etwa an der Raumlufttemperatur in Haus A und liegt im Bereich um 23 °C. Wie den r.LF-Verläufen zu entnehmen ist, kommt es mit zunehmender Temperatur unter der außenseitigen Beplankung zu einer hohen Dynamik der r.LF. gefachaußen- wie auch gefachinnenseitig. Gefachaußenseitig entstehen im Winter r.LF. zwischen 60 und 90 %.

Auf der Gefachinnenseite zeigt sich im Vergleich zur Gefachaußenseite ein gegengleicher Verlauf der r.LF. Hier entstehen im Sommer sehr hohe r.LF. von $\geq 95 \%$ bis hin zum Sommerkondensat.

3.2.2 Generelle Betrachtung der beschatteten Dachelemente

Bei Betrachtung der Klimate in den vollzeitig beschatteten Dachelementen in Bild 10 – auch hier sind die Unterschiede zwischen den Dachelementen gering – wird deutlich, dass bedingt durch die geringeren Temperaturen auf der Dachfläche (max. 40 °C) sich eine weitaus geringere Feuchteumverteilung entwickelt. Während der Wintermonate liegt die r.LF. gefachaußenseitig jedoch über einen sehr langen Zeitraum zwischen 80 und 90 %.

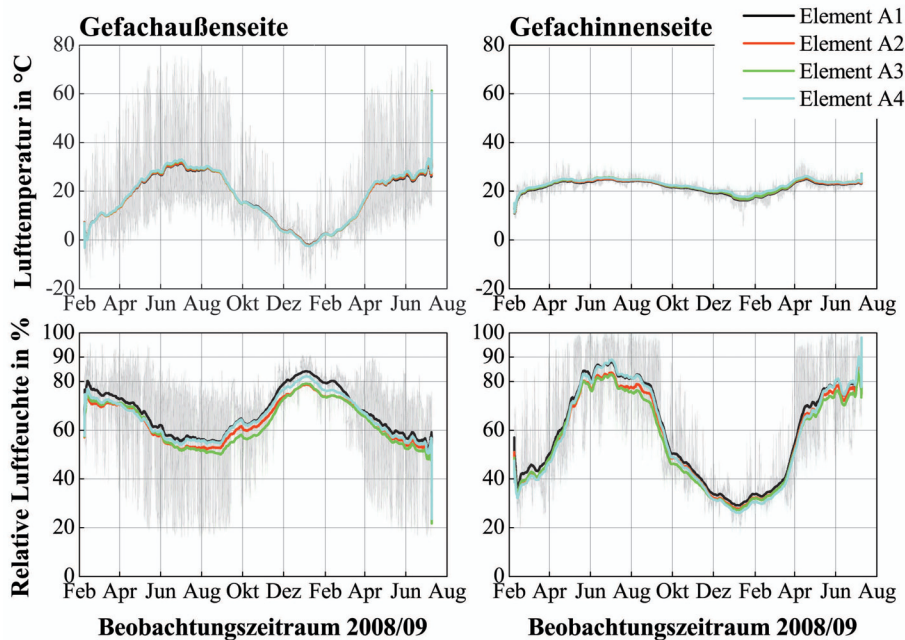


Bild 9. Klimabedingungen in den besonnten Dachelementen 1 bis 4 an der Gefachaußen- und Gefachinnenseite (Halbstundenwerte dünn und gleitende Monatsmittelwerte fett)

Fig. 9. Climate conditions within the exposed roofs 1 to 4 at the outer and inner cavity side (half-hourly data thin and monthly moving average bold)

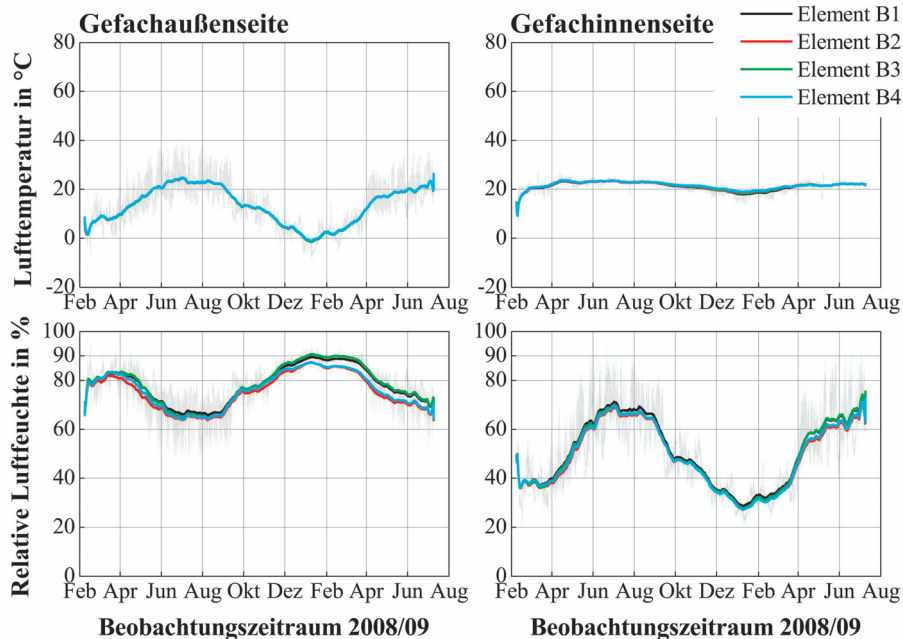


Bild 10. Klimabedingungen in den beschatteten Dachelementen 1 bis 4 auf der Gefachaußen- und Gefachinnenseite (Halbstundenwerte dünn und gleitende Monatsmittelwerte fett)
 Fig. 10. Climate conditions within the shaded roofs 1 to 4 at the outer and inner cavity side (half-hourly data thin and monthly moving average bold)

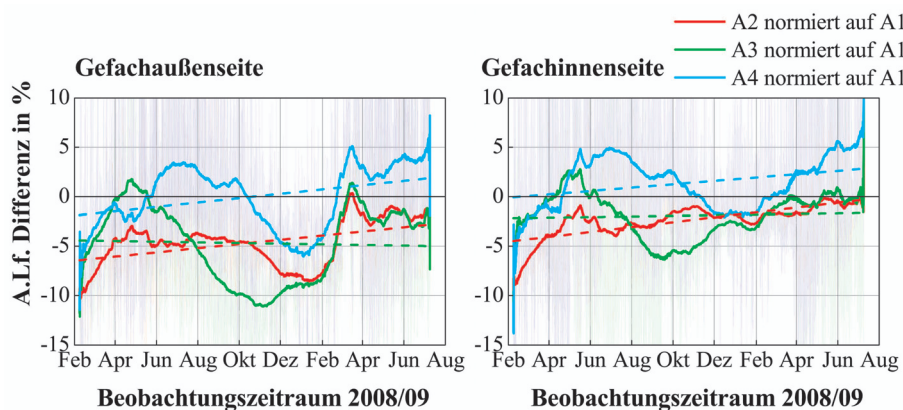


Bild 11. Differenzen der absoluten Luftfeuchte in den besonnten Dachaufbauten 2 bis 4 zum besonnten Dachaufbau 1 an der Gefachaußen- und Gefachinnenseite (Stundenwerte dünn, gleitende Monatsmittelwerte fett durchgezogen und Tendenz fett gestrichelt)
 Fig. 11. Differences of the absolute humidity within the exposed roofs 2 to 4 compared to roof 1 at the outer and inner side of the cavity (hourly data thin, monthly moving average bold continuous and trend bold dashed)

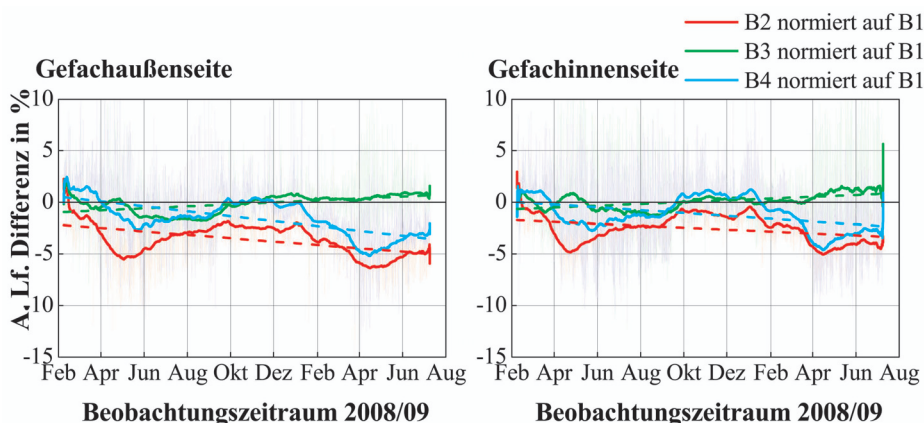


Bild 12. Differenzen der absoluten Luftfeuchte in den beschatteten EPDM-Dachaufbauten 2 bis 4 zum beschatteten Dachaufbau 1 an der Gefachaußen- und Gefachinnenseite (Stundenwerte dünn, gleitende Monatsmittelwerte fett durchgezogen und Tendenz fett gestrichelt)
 Fig. 12. Differences of the absolute humidity within the shaded roofs 2 to 4 compared to roof 1 at the outer and inner side of the cavity (hourly data thin, monthly moving average bold continuous and trend bold dashed)

3.2.3 Differenzierte Betrachtung der Dachelemente

Unterschiedliche innenseitige Diffusionswiderstände

In den Bildern 11 und 12 sind jeweils die prozentuellen Abweichungen der absoluten Luftfeuchtigkeit (a.LF.) der einzelnen Dachelemente zu Dachelement A1 bzw. B1 aufgetragen. Zusätzlich sind die Tendenzen der Abweichungen als gestrichelte Linien eingezeichnet. Zwischen Fertigung der Dachelemente und Messbeginn lagen acht Wochen. In diesem Zeitraum haben sich die Luftfeuchte-

verhältnisse in den Dachelementen bereits individuell verändert, wodurch die Differenzen zu Messbeginn zu erklären sind.

Bei Betrachtung von Bild 11 wird deutlich, dass im besonnten Dach die innenseitige Verwendung einer OSB zu einem tendenziellen Anstieg im Luftfeuchtegehalt im Vergleich zum gleichen Dachaufbau, jedoch mit innenseitiger MDF, führt.

Die Verwendung der FADAB mit höherer Spreizung im s_d -Wert-Verlauf wirkt sich im Luftfeuchteverlauf bei

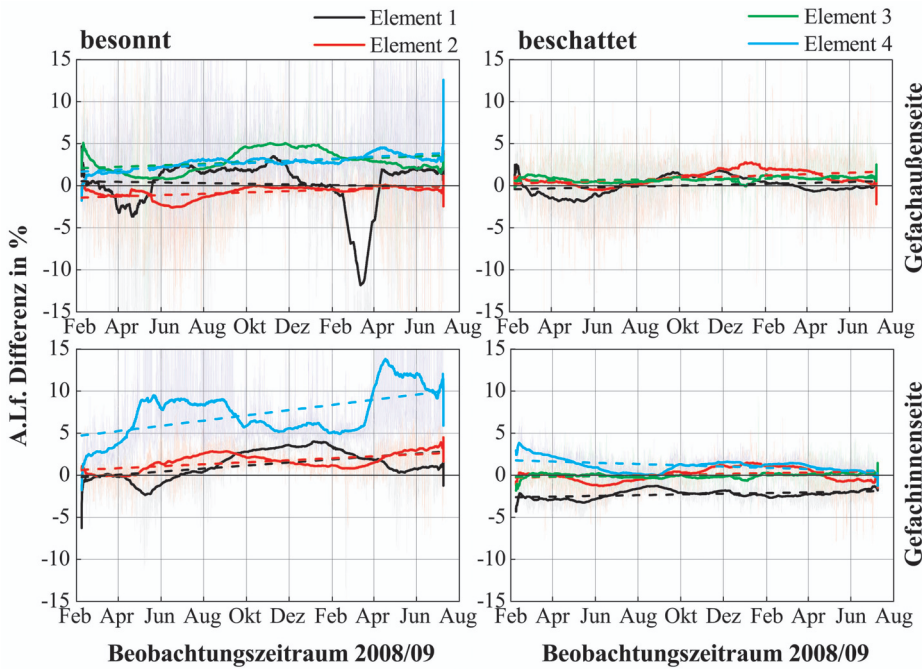


Bild 13. Differenzen der absoluten Luftfeuchte in den besonnten und beschatteten Dachaufbauten 1 bis 4 zwischen First und Traufenseite (Stundenwerte dünn, gleitende Monatsmittelwerte fett durchgezogen und Tendenz fett gestrichelt). Ein positiver Wert bedeutet höhere a.LF. auf der Firstseite Fig. 13. Differences between the absolute humidity at the ridge and the eave inside the exposed and shaded roofs 1 to 4 (hourly data thin, monthly moving average bold continuous and trend bold dashed). A positive value denotes a greater amount of absolute humidity at the ridge side

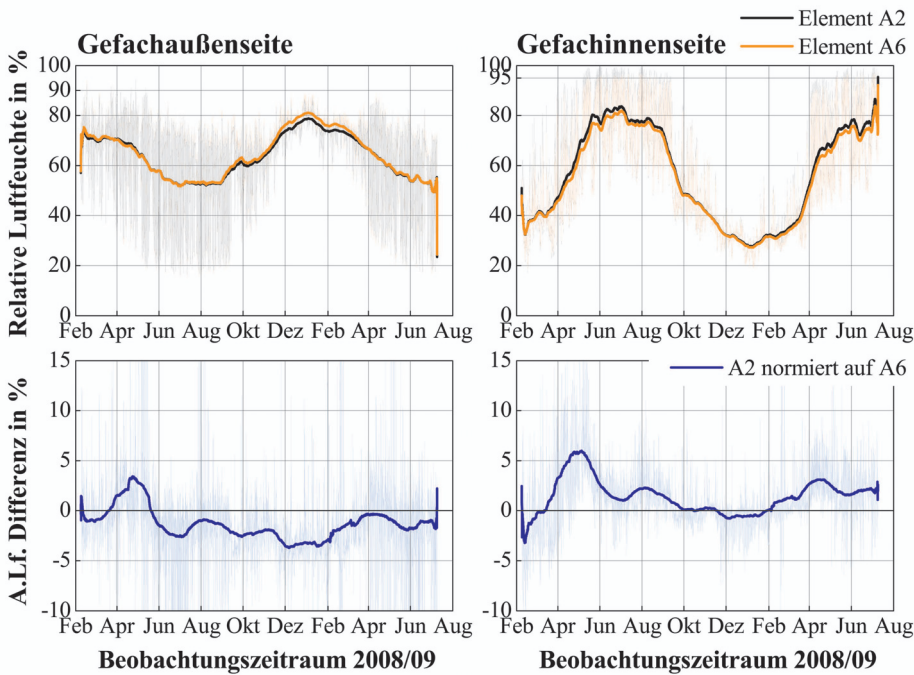


Bild 14. Oben – relative Luftfeuchte in den besonnten Dachelementen 2 und 6 (ohne und mit Installationsebene) auf der Gefachaußen- und Gefachinnenseite (Halbstundenwerte dünn und gleitende Monatsmittelwerte fett); unten – Differenzen der absoluten Luftfeuchte an der Gefachinnenseite zwischen Aufbau 2 und 4 (Stundenwerte dünn, gleitende Monatsmittelwerte fett). Ein positiver Wert bedeutet höhere a.LF. in Aufbau 2 Fig. 14. Top – relative humidity within the exposed roofs 2 and 6 (without and with inner battens) at outer and inner cavity side (half-hourly data thin and monthly moving average bold); below – difference of the absolute humidity at the inner cavity side between roof 2 and 6 (hourly data thin and monthly moving average bold). A positive value denotes a greater amount of absolute humidity in roof 2

den besonnten Dachelementen kaum aus. Die langfristigen Tendenzen beider Dachelemente mit OSB bzw. mit MDF als innenseitige Bepunktung sind während des Beobachtungszeitraums nahezu die gleichen.

Im Gegensatz zu den Verhältnissen in den besonnten Foliendächern zeigt Bild 12, dass die innenseitige Verwendung einer OSB anstelle einer MDF bei den beschatteten Dachelementen tendenziell zu einer Abnahme der a.LF. im Gefach führt. In den beschatteten Dachelementen mit MDF-Bepunktung führt die Verwendung der FADAB mit höherer Spreizung zu einer geringen Tendenz zu höheren a.LF. im Gefach.

Firstseite vs. Traufenseite

In Bild 13 ist jeweils die prozentuelle Abweichung der a.LF. zwischen der First- und der Traufenseite aufgetragen. Ist

die Abweichung positiv, so liegt am firstseitigen Fühler eine höhere a.LF. an als am traufenseitigen Fühler².

Wie zu erkennen ist, zeigt sich in den besonnten Dachelementen eine deutliche Tendenz zu höheren a.LF. an den firstseitigen Fühlern, wobei die Gefachinnenseite größere Unterschiede zeigt als die Gefachaußenseite. Die Messwerte aus den beschatteten Dachelementen zeigen keinen derart eindeutigen Verlauf, doch auch hier ist vor allem gefachaußenseitig eine Tendenz zur höheren a.LF. auf der Firstseite zu erkennen.

² Aufgrund von Fühlerausfällen kann Fühler A3 (gefachinnenseitig, traufenseitig) und Fühler B4 (gefachaußenseitig, traufenseitig) nicht zur Auswertung mit herangezogen werden.

Mit/ohne innenseitiger Installationsebene

Beim Betrachten von Bild 14 oben wird deutlich, dass im Winter die r.LF. von Dachelement A6 (mit Installationsebene) gefachaußenseitig etwas oberhalb derer von Element A2 (ohne Installationsebene) liegt.

Gefachinnenseitig zeigt sich beim Dachelement mit Installationsebene im Sommer hingegen eine etwas geringere r.LF. Hier werden im Vergleich zu dem Element mit Installationsebene nie 100 % r.LF. erreicht.

Bild 14 unten zeigt die prozentuelle Abweichung der a.LF. im Dachelement ohne Installationsebene zum Dachelement mit Installationsebene. Wie zu erkennen ist, herrschen in Element A6 (mit Installationsebene) gefachaußenseitig zwar zumeist höhere a.LF. als in Element A2 (ohne Installationsebene), gefachinnenseitig liegt die a.LF. im Sommer jedoch häufig um 5 bis 10 % unterhalb der Werte ohne Installationsebene. Die Installationsebene scheint den „Feuchtestau“ auf der Dampfbremse zu verringern, wodurch die Gefahr von Sommerkondensat dort reduziert wird.

3.3 Materialfeuchten

In Bild 15 sind die Materialfeuchten der Foliendachelemente aufgetragen (wöchentliche Messwerte und gleitende Monatsmittelwerte der einzelnen Dachelemente 1 bis 4). Die Materialfeuchten der OSB entsprechen fichteäquivalenten Holzfeuchten und können lediglich zur Orientierung herangezogen werden. Obwohl das verwendete Holzfeuchtemessgerät regelmäßig kalibriert wird und Vergleichsmessungen mit einem baugleichen Holzfeuchtemessgerät zwischen elektrischer Widerstandsmessung und Darrprobe eine Differenz von max. $\pm 1,0$ % absolut zeigten (Zielfeuchte 12,7 %), dienen auch die Messwerte der Sparren eher der Orientierung. Abweichungen von bis zu $\pm 2,5$ % bei hohen bzw. niederen Materialfeuchten sind bei dieser Messmethode auch bei auf die Holzart kalibrierten Widerstandskennlinien möglich [15].

Ein globaler Vergleich der Materialfeuchten in den besonnten Dächern mit jenen in den beschatteten Dächern zeigt, dass sich im April 2008 die Materialfeuchten in den

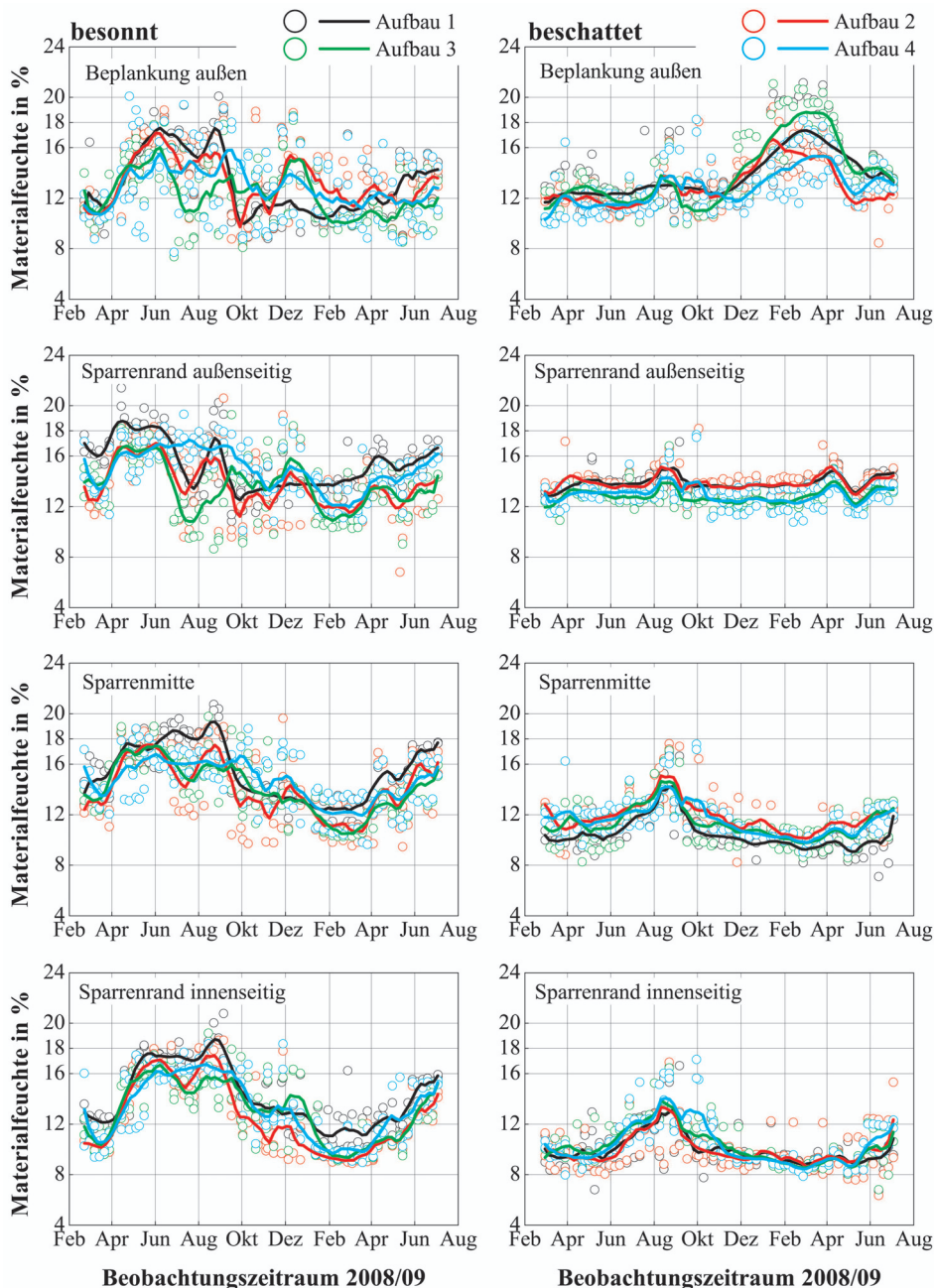


Bild 15. Temperaturkorrigierte Materialfeuchten in den besonnten und beschatteten Dachelementen 1 bis 4 an ausgewählten Messpositionen (Messwerte (wöchentlich) und gleitende Monatsmittelwerte)

Fig. 15. Temperature corrected moisture content within the exposed and shaded roofs 1 to 4 at selected measuring points (weekly measuring data and monthly moving average)

besonnten Elementen deutlich erhöhen, wohingegen sich in den beschatteten Elementen keine Änderung zeigte. Der Anstieg in den besonnten Elementen im April 2008 fällt mit der Aufwechungsphase zusammen und ist somit klar zu erklären. Die beschatteten Elemente auf Haus B zeigen jedoch trotz ähnlicher Raumklimabedingungen nahezu keine Reaktion auf die Aufwechungsphase. Dies hängt vermutlich mit den Wirkungsweisen der verwendeten FADAB zusammen. Weitere Untersuchungen hierzu sind im Gange.

Von Mai 2008 bis März 2009 sinken die Materialfeuchten in den besonnten Dachelementen tendenziell ab. Von März bis zum Ende des Beobachtungszeitraums steigen die Materialfeuchten dort wieder an, liegen jedoch weiterhin im unkritischen Bereich. In den beschatteten Dachelementen hingegen steigt die Materialfeuchte der außenseitigen Beplankung im Winter/Frühjahr 2008/09 auf teilweise über 20 % deutlich an. Die anderen Messstellen der beschatteten Dachelemente zeigen bis auf einen Peak im August 2008 – welcher auf die geringe, aber doch vorhandene Feuchteumverteilung im Gefach zurück zu führen ist – keinen Feuchteanstieg.

Werden die Materialfeuchten der einzelnen Dachelemente differenziert betrachtet, so sind zumeist nur geringe Unterschiede feststellbar. Unter den besonnten Dachelementen zeigt Element A1 (FADAB mit geringer Spreizung) tendenziell die höchsten und Element A3 (FADAB mit hoher Spreizung) die geringsten Materialfeuchten.

In den beschatteten Dachelementen zeigen sich lediglich während des Frühjahrs 2009 an der außenseitigen Beplankung stärkere Unterschiede. Element B3 (innenseitig MDF) weist hierbei die höchsten und Element B4 (innenseitig OSB) die geringsten Materialfeuchten auf. Die Verwendung einer innenseitigen OSB anstelle einer MDF wirkt sich in den beschatteten Dachelementen somit positiv auf die Materialfeuchte der außenseitigen Beplankung aus.

3.4 Biologischer Befall

Wie oben dargelegt weisen die Dachelemente 1 bis 4 eines Hauses während des Beobachtungszeitraums nur geringe Unterschiede auf. Nachfolgend werden deshalb die Messwerte dieser Dachelemente zusammengefasst und jeweils die Mittelwerte der vier Elemente zur Beurteilung herangezogen.

Ein biologischer Befall wird u. a. vom Substrat, der r.LF. und der Temperatur im Gefach, aber auch wesentlich

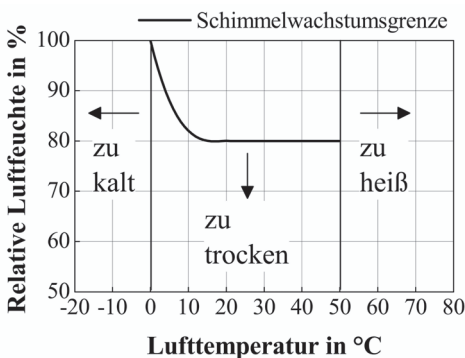


Bild 16. Grenzbedingungen für Schimmelwachstum auf freistehenden Holzoberflächen gemäß [18]
 Fig. 16. Limiting conditions for mould growth on free standing wooden surfaces according to [18]

von der Dauer der feuchten und trockenen Perioden gesteuert [16], [17]. In Bild 16 ist die Grenzkurve für Schimmelwachstum auf freistehenden Holzoberflächen dargestellt [18]. Bild 17 zeigt ebenfalls diese Grenzkurve ein-

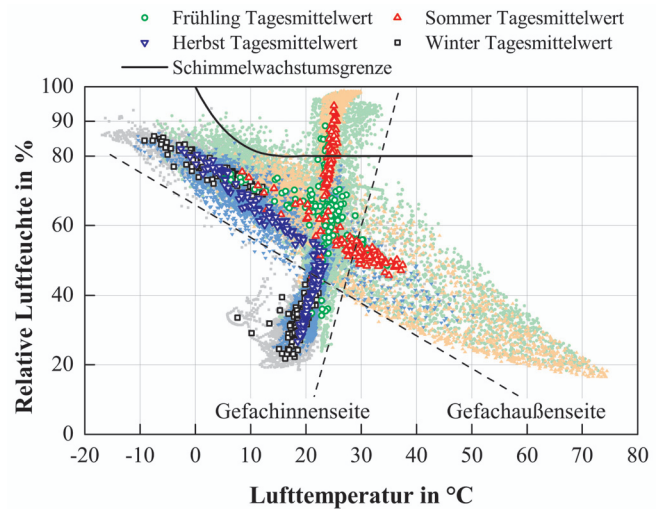


Bild 17. Klimabedingungen in den besonnten Dachelementen. Die Messwerte der Elemente 1 bis 4 wurden hierfür gemittelt. Dargestellt sind die Stundenwerte (klein) und die Tagesmittelwerte (fett) nach Jahreszeit farblich getrennt an der Gefachaußen- und Gefachinnenseite sowie die Schimmelwachstumsgrenze nach [18]

Fig. 17. Climate conditions within the exposed roofs. For this purpose the measuring values of element 1 to 4 were averaged. Displayed are the hourly data (small) and the daily mean value (bold) separated by seasons with corresponding colours at the outer and inner cavity side as well as the limiting conditions according to [18]

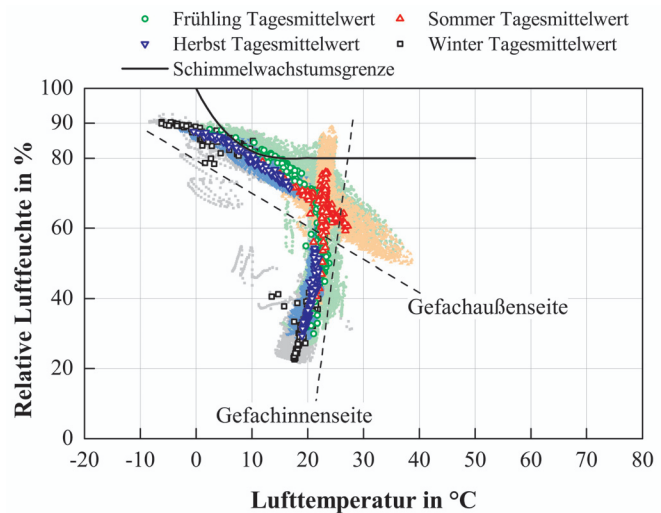


Bild 18. Klimabedingungen in den beschatteten Dachelementen. Die Messwerte der Elemente 1 bis 4 wurden hierfür gemittelt. Dargestellt sind die Stundenwerte (klein) und die Tagesmittelwerte (fett) nach Jahreszeit farblich getrennt an der Gefachaußen- und Gefachinnenseite sowie die Schimmelwachstumsgrenze nach [18]

Fig. 18. Climate conditions within the shaded roofs. For this purpose the measuring values of element 1 to 4 were averaged. Displayed are the hourly values (small) and the daily mean value (bold) separated by seasons with corresponding colours at the outer and inner cavity side as well as the limiting conditions according to [18]

schließlich der Stunden- und Tagesmittelwerte der mittleren relativen Luftfeuchten in Abhängigkeit von der herrschenden Lufttemperatur in den besonnten Dachelementen. Die Messwerte sind ähnlich den Grafikvorlagen in [19] je nach Jahreszeit der Aufnahme farblich getrennt, zusätzlich sind die jeweiligen Tagesmittelwerte fett hervorgehoben. Es zeigt sich, dass gefachaußenseitig nur einzelne Stundenwerte oberhalb der Schimmelwachstumsgrenze liegen.

Die Gefachinnenseite verhält sich hierbei wesentlich kritischer. Im Frühling und Sommer herrschen dort sehr oft Klimabedingungen oberhalb der dargestellten Schimmelwachstumsgrenze.

Die beschatteten Dachelemente in Bild 18 zeigen hingegen gefachaußenseitig häufiger r.LF. von $\geq 80\%$. Dennoch liegen dort nur verhältnismäßig wenige Stunden- und Tagesmittelwerte oberhalb der Schimmelwachstumsgrenze. Gefachinnenseitig zeigen sich durch die geringe Feuchteumverteilung in den beschatteten Dachelementen zum allergrößten Teil Messwerte $\leq 80\%$ r.LF.

Bild 19 gibt den Tagesverlauf der gemittelten Temperatur und der gemittelten relativen Luftfeuchte in den besonnten Dächern an zwei exemplarischen Sommertagen wieder. Die Feuchteumverteilung, welche mit einem Anstieg der gefachaußenseitigen Temperatur einhergeht ist deutlich zu erkennen. Während der Sommermonate treten in Abhängigkeit von der gefachaußenseitigen Temperatur

gefachinnenseitig hohe Luftfeuchteperioden ($\geq 80\%$) von 10 bis 20 Stunden Dauer auf, gefolgt von trockeneren Perioden (60 bis 80 % r.LF.) mit einer Dauern von 4 bis 14 Stunden.

Werden die Dachelemente über den Zeitraum eines Jahres betrachtet – gewählt wurde 1. Juli 2008 bis 30. Juni 2009 – so zeigt sich eine Häufigkeitsverteilung der r.LF. entsprechend Bild 20. Es ist zu erkennen, dass in den besonnten Dachelementen gefachaußenseitig während 8 % des Jahres, eine relative Luftfeuchte von $\geq 80\%$ herrscht. In den beschatteten Dachelementen liegt die relative Luftfeuchte an dieser Position während 45 % des Jahres im Bereich von $\geq 80\%$. Gefachinnenseitig zeigen die besonnten Dächer während 19 % des Jahres r.LF. von $\geq 80\%$, in den beschatteten Dachelementen hingegen nur während 2 % des Jahres.

Bild 21 zeigt den Jahresanteil von für Schimmelwachstum positive Stundenwerte gemäß der Schimmelwachstumsgrenzkurve in den besonnten und beschatteten Dachelementen. Wie zu erkennen ist, herrschen in den besonnten Dachelementen gefachaußenseitig während 0,4 % des Jahres und gefachinnenseitig während 19,0 % des Jahres positive klimatische Schimmelwachstumsbedingungen. In den beschatteten Dachelementen herrschen gefachaußenseitig während 9,2 % des Jahres und gefachinnenseitig während 2,0 % des Jahres positive klimatische Schimmelwachstumsbedingungen.

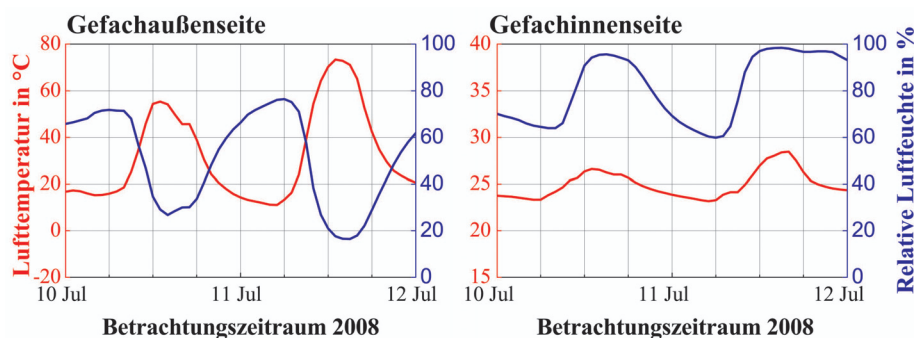


Bild 19. Tagesverläufe der Klimabedingungen in besonnten Dachelementen an der Gefachaußen- und Gefachinnenseite (Stundenwerte). Die Messwerte der Elemente 1 bis 4 wurden hierfür gemittelt

Fig. 19. Climate conditions during two days in the exposed roofs at the outer and inner cavity side (hourly data). For this purpose the measuring values of element 1 to 4 were averaged

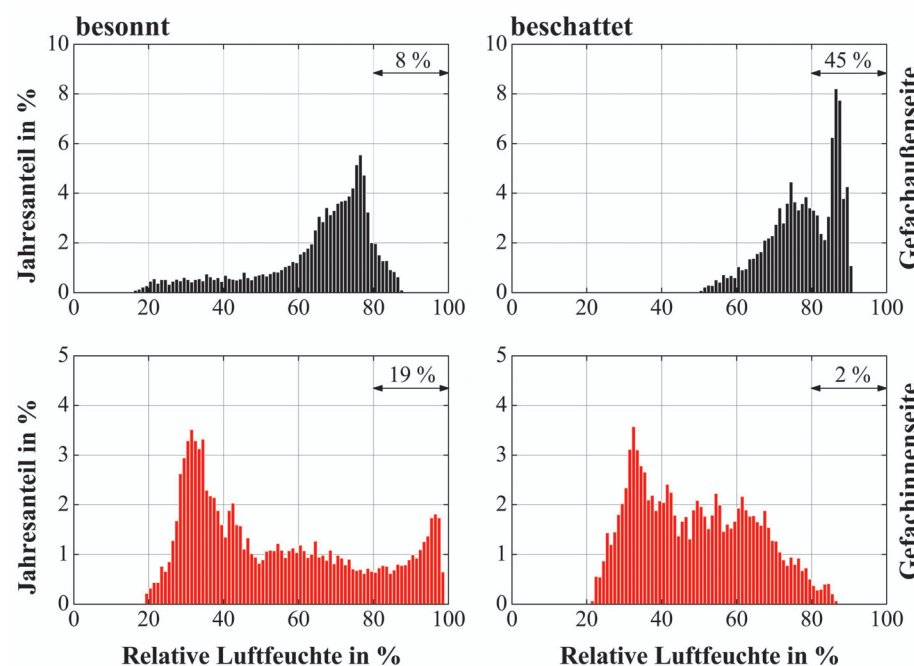


Bild 20. Häufigkeitsverteilung (Jahresanteil) der relativen Luftfeuchte an der Gefachaußen- und Gefachinnenseite in den besonnten und beschatteten Dachelementen im Zeitraum 01.07.2008 bis 30.06.2009. Die Messwerte der Elemente 1 bis 4 wurden hierfür gemittelt. Dargestellt sind ebenfalls die aufsummierten Jahresanteile für relative Luftfeuchten $\geq 80\%$

Fig. 20. Histogram (annual percentage) of the relative humidity at the outer and inner cavity side within the exposed and shaded roof elements for the period 01.07.2008–30.06.2009. For this purpose the measuring values of element 1 up to 4 were averaged. Displayed are also the summarized annual percentages for relative humidity $\geq 80\%$

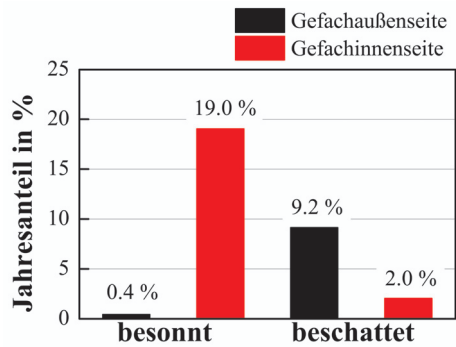


Bild 21. Häufigkeitsverteilung (Jahresanteil) für positive Schimmelwachstumsbedingungen in den besontten und beschatteten Dachelementen im Zeitraum 01. 07. 2008 bis 30. 06. 2009 gemäß [18] (vgl. Bild 16). Die Messwerte der Elemente 1 bis 4 wurden hierfür gemittelt

Fig. 21. Histogram (annual percentage) of favourable mould growing conditions within the exposed and shaded roofs during the period 01. 07. 2008–30. 06. 2009 according to [18] (cp. Fig. 16). For this purpose the measuring values of element 1 to 4 were averaged

3.5 Zustand der Dachelemente

Nach Abschluss der Messungen wurden alle Dachelemente an den Revisionsklappen von unten geöffnet. Makroskopisch und mikroskopisch konnten trotz der teilweise sehr günstigen klimatischen Schimmelwachstumsbedingungen in keinem Gefach – auch nicht auf einer oberhalb der Dampfbremse angebrachten MDF-Leisten – Schimmel oder holzersetzen Pilze entdeckt werden.

In Untersuchungen an vollgedämmten mineralischen Flachdachelementen [20] und hölzernen Flachdachelementen [21] wurde ebenfalls ein deutlich geringeres Schimmelwachstum als erwartet festgestellt. Dies wird dort u. a. mit den teilweise hohen Temperaturen von $> 40\text{ °C}$ im Gefach begründet. Bei den hier diskutierten Untersuchungen herrschen gefachinnenseitig jedoch weder solch hohe noch zu tiefe Temperaturen um das Schimmelwachstum zu behindern. Die Wahrscheinlichkeit von Schimmelwachstum wird u. a. vom Mikroklima an den Materialgrenzen und der Interaktion zwischen den einzelnen Materialien beeinflusst [22]. Dieser noch nicht quantifizierbare Einfluss führte auch in diesem Fall zu einer zu kritischen Einschätzung des Schimmelwachstumsrisikos.

4 Zusammenfassung

Die getätigten Freilanduntersuchungen haben gezeigt, dass Flachdächer mit Folienabdichtungen sehr empfindlich auf geringe Dachoberflächentemperaturen reagieren. So weisen vollzeitlich beschattete Foliendachelemente sehr hohe und lang anhaltende r.LF. im Gefach auf. Auch die Materialfeuchte der außenseitigen Beplankung liegt bei diesen Dachelementen teilweise im kritischen Bereich, weshalb eine andauernde Beschattung bei diesen Dachaufbauten vermieden werden muss.

Durch die sommerliche Feuchteumverteilung nach innen kann es bei besontten Dachelementen auf der Dampfbremse zu Sommerkondensat kommen. Es zeigt sich, dass mit Hilfe einer innenseitigen Installationsebene

der Feuchtestau auf der Dampfbremse etwas reduziert werden kann, wodurch das Sommerkondensat ggf. vermieden wird.

Über das Jahr betrachtet sind die in den besontten Dachelementen an der Dampfbremse anliegenden Klimabedingungen in Bezug auf biologisches Wachstum deutlich kritischer als an der außenseitigen Beplankung. Dennoch konnte in keinem Gefach – auch nicht auf einem an der Dampfbremse angebrachten Streifen MDF – ein Befall von Schimmel festgestellt werden, was die untersuchten Dachelemente im Hinblick auf biologischen Befall deutlich robuster erscheinen lässt als Untersuchungen an freistehenden Holzoberflächen vermuten lassen.

Ein zusätzlicher innenseitiger Diffusionswiderstand durch eine OSB-Beplankung anstelle einer MDF wirkt sich bei den besontten Dachelementen aufgrund der reduzierten Rücktrocknung etwas negativ aus, wohingegen die beschatteten Dachelemente aufgrund des höheren innenseitigen Diffusionswiderstandes davon profitieren. Die Unterschiede sind durch den relativ kurzen Beobachtungszeitraum (17 Monate) jedoch gering. Ebenso zeigen sich nur tendenzielle Unterschiede bei Verwendung einer FADAB mit deutlich höherer/geringerer Spreizung im s_d -Wert-Verlauf.

Während der Untersuchungen konnten Unterschiede zwischen den traufenseitigen und den firstseitigen Luftfeuchten festgestellt werden. Dies deutet auf vorhandene Rotationsströmungen im Gefach der Flachdachaufbauten hin.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) für die Förderung des Forschungsvorhabens sowie bei den Industriepartnern (Fa. Dachtec, Glöckel, Harrer, Kaufmann Bausysteme, Maier, Roth, Schertler und WieHag) für die materielle und finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] ÖNORM EN ISO 13788:2002-01-01 Wärme- und feuchte-technisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren, 2002-01-01.
- [2] Bonk, M., Newen, A.: Unbelüftete Flachdächer mit Vollsparrendämmung – Nässeschäden infolge eingeschlossener Baufeuchtigkeit. Bauphysik 24 (2002), H. 3, S. 177–179.
- [3] Oswald, R.: Fehlgeleitet. deutsche bauzeitung (2009), H. 7, S. 74–79.
- [4] Rizkallah, V., Pfeifer, M.: Schäden bei der Instandsetzung von Dächern: Schäden an Dächern. Ursachen, Bewertung und Sanierung. 42. Bausachverständigen-Tag im Rahmen der Frankfurter Bautage 2007, Tagungsband. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2007, S. 9–29.
- [5] Künzel, H. M., Kaufmann, A.: Feuchteadaptive Dampfbremse für Gebäudedämmungen. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. IBP-Mitteilung 268, 1995.
- [6] Bednar, Th.: Beurteilung des feuchte- und wärmetechnischen Verhaltens von Bauteilen und Gebäuden. Weiterentwicklung der Meß- und Rechenverfahren. Dissertation, TU Wien, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, 2000.

- [7] *Teibinger, M., Nusser, B.*: Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen. Forschungsbericht, HFA-Nr.: P412. Herausgegeben von Holzforschung Austria. Wien, 2010.
- [8] *Nusser, B., Neubauer, G., Polleres, S.*: Angewandte Bauforschung. Forschungsgebäude zu hygrothermischen Bauteiluntersuchungen unter Realbedingungen errichtet. HFA-Magazin 6 (2008), H. 1, S. 3–5.
- [9] *Künzel, H. M., Großkinsky, T.*: Feuchtesicherheit unbelüfteter Blechdächer; auf die Dampfbremse kommt es an! WKSB 43 (1998), H. 42, S. 22–27.
- [10] *Fitz, C., Krus, M., Zillig, W.*: Untersuchungen zum Feuchteschutz von Leichtbaukonstruktionen mit Bauplatten aus Holzwerkstoffen. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, IBP-Bericht, HTB-10/2004.
- [11] ÖNORM EN 15026:2007-06-01 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation.
- [12] ÖNORM B 8110-2, 2003-07-01: Wärmeschutz im Hochbau – Teil 2: Wasserdampfdiffusion und Kondensationsschutz.
- [13] *Holm, A.*: Applications. Indoor Environment, Energy, Durability. Report: Annex 41 Whole Building Heat, Air and Moisture Response (MOIST-EN). International Energy Agency (IEA), 2008.
- [14] *Winter, St., Fülle, C., Werther, N.*: Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von flachgeneigten Dächern in Holzbauweise mit oberer dampfdichter Abdichtung unter Einsatz ökologischer Bauprodukte zum Erreichen schadensfreier, markt- und zukunftsgerichteter Konstruktionen. Leipzig, Forschungsbericht, DGFH: Z 6 – 10.08.18.7-07.18, 2009.
- [15] *Du, Q. P., Geissen, A., Noack, D.*: Die Genauigkeit der elektrischen Holzfeuchtemessung nach dem Widerstandsprinzip. Holz als Roh- und Werkstoff 49 (1991), S. 1–6.
- [16] *Viitanen, H.*: Factors affecting the development of mould and brown rot decay in wooden material and wooden structures. Effect of humidity, temperature and exposure time. PhD thesis, Swedish Univ. of Agricultural Science, Dept. of Forest Products, Uppsala/Sweden, 1996.
- [17] *Sedlbauer, K.*: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation, Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2001.
- [18] *Hukka, A., Viitanen, H.*: A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology 33 (1999), H. 6, S. 475–485.
- [19] Technical University of Eindhoven/The Netherlands (Hrsg.): HAMLab. GRAPHICS, 23. 07. 2009. Online verfügbar unter <http://sts.bwk.tue.nl/hamlab/>, zuletzt geprüft am 05. 11. 2009.
- [20] *Holme, J., Noreng, K., Kvande, T.*: Moisture and Mould Growth in Compact Roofs – Results from a Three-Stage Field Survey. In: *Rode, C.* (Hrsg.): Proceedings of the 8th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries. Report R-189. 16–18 June, 2008. Copenhagen/Denmark, 2008, pp. 1221–1228.
- [21] *Geving, S., Holme, J.*: The Drying Potential and Risk for Mold Growth in Compact Wood Frame Roofs with Built-in Moisture. Journal of Building Physics 33 (2010), No. 3, pp. 249–269.
- [22] *Viitanen, H., Vinha, J., Salminen, K., Ojanen, T., Peuhkuri, R. H., Paajanen, L., Lähdesmäki, K.*: Moisture and Bio-deterioration Risk of Building Materials and Structures. Journal of Building Physics 33 (2010), No. 3, pp. 201–234.

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. (FH) Bernd Nusser, M.Eng. und Dipl.-Ing. Dr. Martin Teibinger
Beide:

Holzforschung Austria, Franz-Grill-Straße 7, 1030 Wien

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, TU Wien, Adolf Blamauerstraße 1–3, 1030 Wien

A.3.2 Aufsatz II

Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung

Teil 2: Nicht belüftete, extensiv begrünte Dächer mit Zellulose- und Mineralwollämmung

Bernd Nusser, Martin Teibinger, Thomas Bednar

In: Bauphysik, Jg. 32 (2010), H. 4, S. 219–226

Vakatseite

Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung¹ – Teil 2: Nicht belüftete, extensiv begrünte Dächer mit Zellulose- und Mineralwollgedämmung

Im gegenständlichen zweiten Teil dieser Aufsatzreihe werden die Messwerte aus zwei Gründachelementen, welche zum einen mit Mineralwollgedämmung und feuchteadaptiver Dampfbremse und zum anderen mit Zellulosedämmung und Vliesdampfbremse ausgeführt sind, diskutiert. Dabei zeigt sich, dass die Temperatur auf der Dachabdichtung neben den Witterungsbedingungen auch vom Bewuchsgrad des Gründaches abhängt. Aufgrund der geringen sommerlichen Umkehrdiffusion der Gründächer kommt es zu erhöhten Luftfeuchten im Gefach. Dies führt beim Gründach mit Mineralwollgedämmung zu erhöhten Materialfeuchten. Das Gründach mit Zellulosedämmung weist diese erhöhten Materialfeuchten hingegen weniger stark auf. Trotz der teilweise lang andauernden hohen Feuchtelast im Gefach der beiden Gründächer konnten weder Schimmel- noch holzerstörende Pilze in diesen entdeckt werden.

Measuring investigations of the hygrothermal behaviour of timber flat roofs – Part 2: Non-ventilated green roofs with cellulose and mineral wool insulation. *In the second part of this article serial the measuring values of two green roof elements made of mineral wool insulation with a moisture adaptive vapour retarder and cellulose insulation with a fibrous vapour retarder are discussed. It is shown that the roof surface temperature, beside the weathering conditions, depends on the level of plant coverage. Because of very low drying potential of green roofs high air humidity occurs in the cavity. This leads to higher material moisture content in the element with mineral wool insulation. The green roof element with cellulose insulation shows this higher material moisture content less pronounced. Despite high moisture loads in the cavities of both green roof elements no mould or rot could be found in the investigated roofs.*

1 Einleitung

Im ersten Teil dieser dreiteiligen Aufsatzreihe wurden die Grundlagen des 17 monatigen Freilandversuchs sowie die an den Flachdächern anliegenden klimatischen Randbedingungen aufgezeigt [1]. Im Speziellen wurde im ersten Teil das Verhalten von nicht belüfteten Nacktdächern mit Folienabdichtungen unter besonnten und Vollzeit beschatteten Randbedingungen behandelt. Im vorliegenden

¹ Dieses Thema wird in drei Aufsätzen abgehandelt. Während in Teil 1 Nacktdächer mit Folienabdichtung diskutiert werden, behandelt Teil 2 Gründachaufbauten und Teil 3 abschließend flachgeneigte Dachelemente mit Metalleindeckungen.

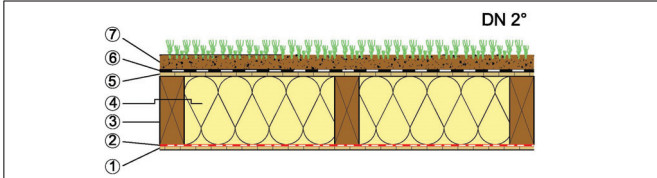
zweiten Teil werden die Messergebnisse zweier unterschiedlicher Gründachaufbauten diskutiert.

Die bei Gründächern über der Dachabdichtung angeordnete Substratschicht dämpft den gefachinnenseitigen Temperaturanstieg aufgrund solarer Einstrahlung deutlich. Dieser Effekt wird häufig zur Verbesserung des sommerlichen Wärmeschutzes genutzt, jedoch wird die Rücktrocknung von im Gefach vorhandener Feuchtigkeit hierdurch ebenfalls stark verringert. In wie weit eine extensive Begrünung mit Leichtsubstrat die Temperaturen im Gefach und somit das hygrische Verhalten von Gründächern mit Mineralwollgedämmung und feuchteadaptiver Dampfbremse (FADAB) bzw. mit Zellulosedämmung und Vliesdampfbremse beeinflusst, ist Gegenstand dieses Aufsatzes.

2 Dachaufbauten und Messpositionen

Die Aufbauten der Gründachelemente können Tabelle 1 und die Messpositionen im Gefach Bild 1 entnommen

Tabelle 1. Aufbau der untersuchten Gründachelemente AW und A5, die Dachneigung beträgt 2°
 Table 1. Assembly of the investigated green roof elements AW and A5, the roof pitch is 2°



Schicht-Nr.	Bezeichnung	
	Element AW	Element A5
1	MDF	
2	Vliesdampfbremse $s_d = 2,2 \text{ m}$	FADAB B
3	KVH-Fichte	
4	Zellulose, eingebblasen	Glaswolle
5	OSB/3	
6	EPDM Schwarz, mechanisch befestigt	
7	extensive Begrünung + Schutzvlies	

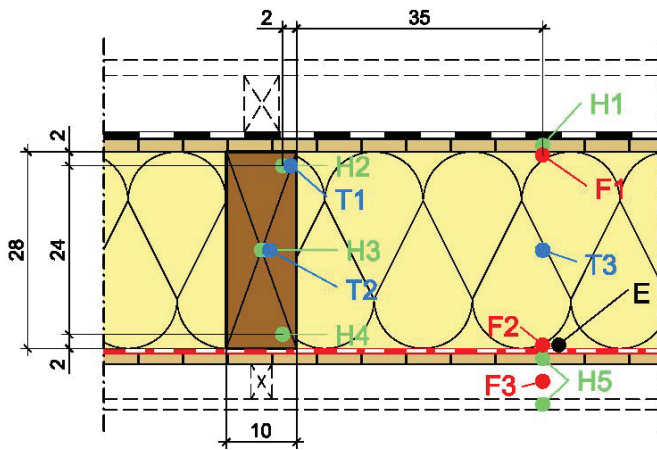


Bild 1. Schematische Darstellung der Messpositionen im Gefach der untersuchten Dachelemente; H1...H5 = Materialfeuchte; F1 ... F3 = relative Luftfeuchte/Temperatur; T1 ... T3 = Temperatur; E = Tracergas
Fig. 1. Schematical illustration of the measuring points in the cavity of the investigated roof elements; H1 ... H5 = moisture content; F1 ... F3 = relative humidity/temperature, T1 ... T3 = temperature; E = tracer gas

werden. Die Abmessungen der Gründachelemente entsprechen jenen der Foliendachelemente aus Teil 1. Zur Erfassung der Dachoberflächentemperaturen wurden Thermoelemente auf der Dachbahn bzw. direkt darunter angeordnet. Bild 2 zeigt die Dachansicht der untersuchten Gründachaufbauten direkt nach dem Einbringen des Gründachsubstrats, nach dem ersten Sommer und nach dem zweiten Sommer der Untersuchungen.

Die extensive Begrünung der beiden Dächer setzt sich oberhalb der Dachabdichtung aus folgenden Bestandteilen zusammen:

Drän-/Schutz-/Filter-/Speichermatte aus Polypropylen/Acryl

- Dicke 10 mm,
- Gewicht 800 g/m²,
- Wasserspeicherkapazität 6 l/m²;

Extensivsubstrat

- Dicke 70 mm,
- Gewicht 80 kg/m²,
- Gesamtporenvolumen > 60 %,
- maximale Wasserkapazität 35–55 Vol.%;

Saatgutmischung

- Inhalt: Gräser/Kräuter/Sedumsprossen (50 Stk./m²).

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Luftdichtheit der Dachelemente

Wie die Foliendachelemente wurde auch Element A5 mit Tracergas-Sensoren im Gefach ausgestattet. Die getätigten Untersuchungen zeigen keinen Hinweis auf Leckagen in der innenseitigen Luftdichtheitsschicht. Die Luftdichtheit von Element W wurde nicht untersucht.

3.2 Dachoberflächentemperatur

Bild 3 zeigt die Dachoberflächentemperaturen des Gründaches, des Foliendaches mit schwarzer EPDM-Dachbahn sowie die Außenlufttemperatur und die zugehörigen Niederschlagsmengen (Stundenwerte) im Winter und Sommer 2009. Wie im oberen Diagramm der Wintermesswerte zu erkennen ist, orientiert sich die Dachoberflächentemperatur bei kompletter Durchfrosthung der Begrünung stark an der Außenlufttemperatur und kann dadurch auch unter 0 °C absinken.

Mit Einsetzen der Tauperiode kommt es unterhalb des Drainagevlieses aufgrund abfließenden Schmelzwassers zu andauernden Temperaturen um den Gefrierpunkt, wie die mittlere Grafik der Wintermesswerte in Bild 3 zeigt. Erst nach vollständigem Auftauen des Substrates, hier aufgrund von Niederschlag, erhöht sich auch die Temperatur im Gründach.

Durch Schneefall und Temperaturen um 0 °C stellen sich im Gründach ebenfalls konstante Temperaturen leicht oberhalb des Gefrierpunkts ein, wie die untere Grafik der Wintermesswerte zeigt. Vor dem Einsetzen der Frostperiode schwankt die Gründachtemperatur noch mit der Außenlufttemperatur, nach dem Einsetzen der Frostperiode bleibt sie konstant. Es zeigt sich auch, dass die Schneedecke auf die Oberflächentemperatur des Foliendaches

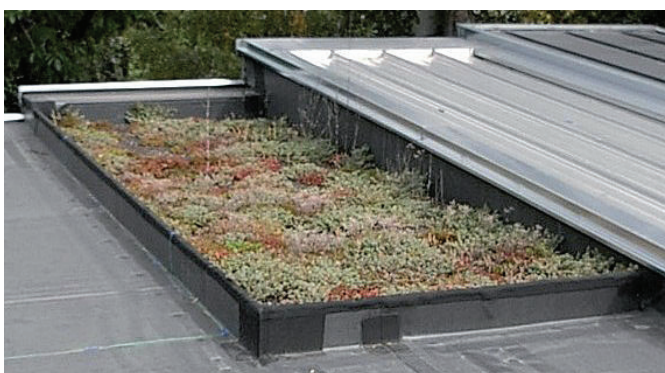


Bild 2. Dachansicht der untersuchten Gründächer; oben: Substrat nach dem Einbringen im Januar 2008, Mitte: lückenhafter Bewuchs im Oktober 2008, unten: nahezu flächendeckender Bewuchs im Oktober 2009
Fig. 2. Top view of the investigated green roofs; top: substrate after placement in January 2008, centre: incomplete plant cover in October 2008, bottom: nearly complete plant cover in October 2009

daches ebenfalls einen Einfluss hat und diese kurzzeitig konstant hält.

Durch die kurzweilige Strahlungsabsorption und die nächtliche Wärmeabstrahlung entstehen auf dem Foliendach jedoch zumeist starke Schwankungen um die Außenlufttemperatur. Es werden im Winter bei schneefreier Dachfläche Temperaturen zwischen -18 °C und 20 °C erreicht.

Die Sommermesswerte in Bild 3 verdeutlichen die Orientierung der Gründachtemperatur an der Außenlufttemperatur. Die maximalen Unterschiede betragen während der sommerlichen Höchsttemperaturen $+4\text{ K}$ und während der sommerlichen Tiefsttemperaturen $+6\text{ K}$. Die Phasenverschiebung beträgt für die Höchsttemperaturen etwa $+2$ Stunden und für die Tiefsttemperaturen etwa $+4$ Stunden. Nach einem Regenereignis zeigt sich erwartungsgemäß ein Einbruch in der Gründachtemperatur, die Differenz zwischen Außenluft- und Gründachtemperatur bleibt jedoch gering. Zu erkennen ist ebenfalls der hohe sommerliche Temperaturunterschied zwischen dem schwarzen EPDM-Dach und dem Gründach, dieser beträgt bis zu 40 K .

Beim Betrachten der gleitenden Wochenmittelwerte der Dachoberflächentemperaturen in Bild 4 wird deutlich, dass die Gründachtemperatur während des ersten Som-

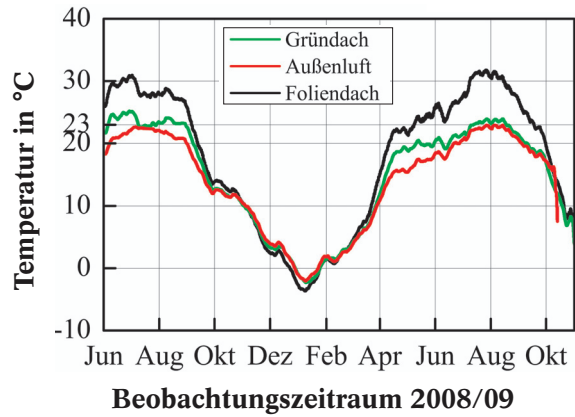


Bild 4. Dachoberflächentemperaturen (gleitende Wochenmittelwerte) der Foliendachelemente mit schwarzer EPDM-Dachbahn, des Gründaches und die Außenlufttemperatur
Fig. 4. Roof surface temperature (weekly moving average) of the elements with black bare EPDM waterproofing membrane, of the green roof and the outdoor air temperature

mers 2008 deutlich oberhalb der Außenlufttemperatur liegt, im Sommer 2009 ist dies nicht mehr der Fall. Die maßgebende Ursache hierfür ist nicht im Unterschied der Solar-

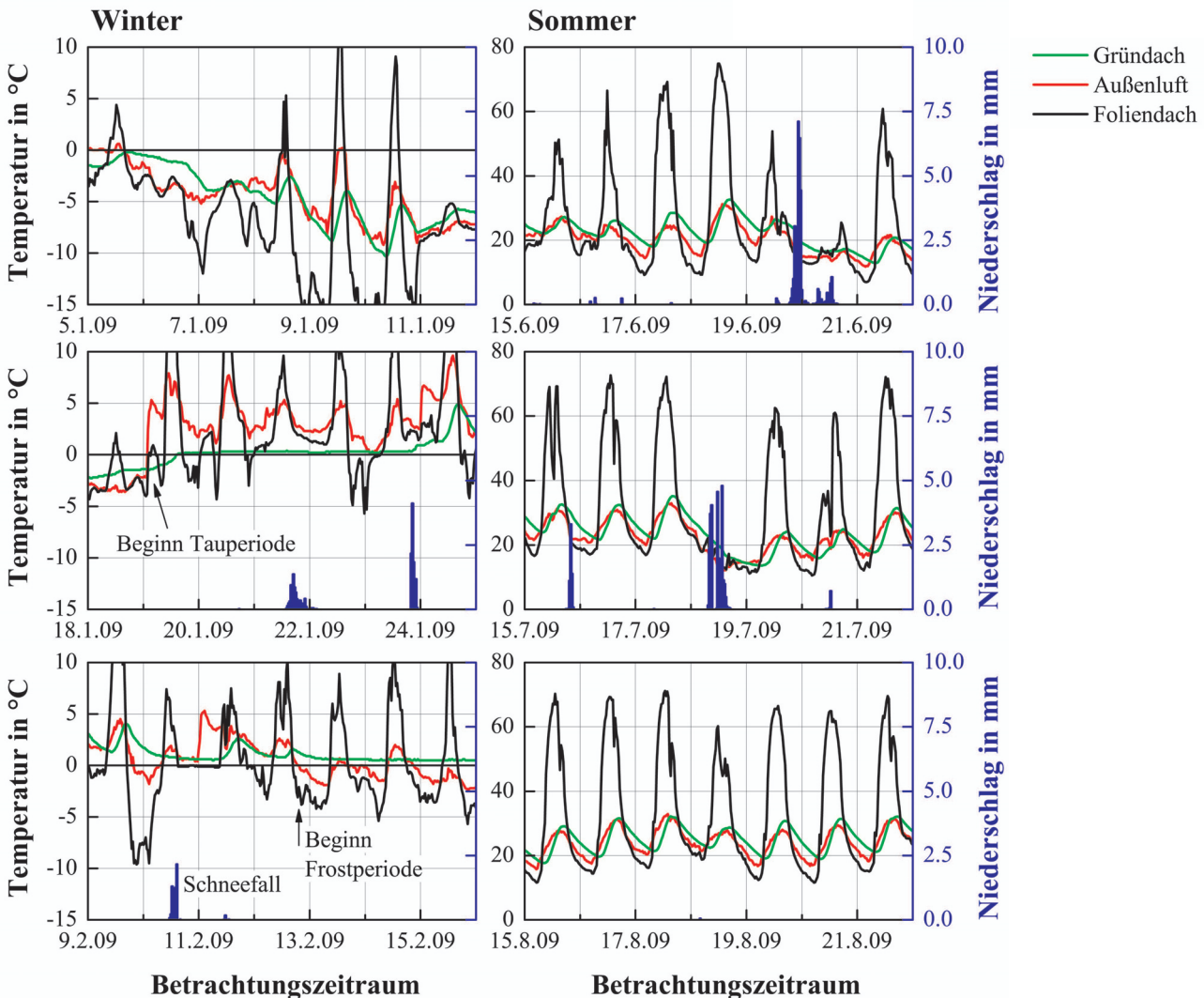


Bild 3. Dachoberflächentemperaturen (Halbstundenwerte) der Foliendachelemente mit schwarzer EPDM-Dachbahn, des Gründaches und die Außenlufttemperatur sowie die zugehörigen Niederschlagsmengen (Stundenwerte)
Fig. 3. Roof surface temperatures (half-hourly data) of the elements with black bare EPDM waterproofing membrane, of the green roof and the outdoor air temperature as well as the corresponding precipitation amount (hourly data)

strahlung oder des Niederschlags zwischen Sommer 2008 und 2009 zu finden, sondern im Bewuchsgrad des Gründaches. Im ersten Sommer der Untersuchung 2008 zeigt das Gründach noch einen lückenhaften Bewuchs (Bild 2 Mitte) während die Dachfläche im Sommer 2009 einen sehr dichten Bewuchs aufweist (Bild 2 unten). Hierdurch wird der solare Absorptionsgrad des Gründachs reduziert. Im Vergleich zum Foliendach zeigt das Gründach im Sommer geringere und im Winter kurzzeitig etwas höhere Dachoberflächentemperaturen. Die Unterschiede im Winter sind jedoch gering.

3.3 Klimate im Gefach

Anhand von Bild 5 wird ersichtlich, dass die gefachaußenseitige relative Luftfeuchte (r.LF.) in den Gründächern ganzjährig deutlich über dem, bis auf den Gründachaufbau mit A5 identischen, Foliendachelement A3 [1] liegt. Die geringen sommerlichen Dachtemperaturen an der Gefachaußenseite der Gründächer sorgen dort auch im Sommer für anhaltend hohe r.LF., wodurch hier im Winter ein deutlich höheres Niveau der r.LF. erreicht wird als in dem Foli-

endach. Während aufgrund von Temperaturspitzen auf der Dachoberfläche (Bild 3) in dem Foliendach bereits Mitte Januar die Feuchteumverteilung von der Gefachaußen- zur Gefachinnenseite beginnt, bleibt die r.LF. in den Gründächern gefachaußenseitig bis April bei etwa 90 %.

Auf der Gefachinnenseite stellt sich im Sommer aufgrund der weniger stark ausgeprägten Feuchteumverteilung der Gründächer dort eine deutlich geringere r.LF. ein als bei dem Foliendach. Im Winter liegt die r.LF. in den Gründächern gefachinnenseitig hingegen etwas höher als in dem Foliendach.

Ein direkter Vergleich der absoluten Luftfeuchte (a.LF.) des Gründachelements A5 und des Foliendachelements A3 in Bild 6 verdeutlicht, dass im Gründachelement gefachinnen- wie auch gefachaußenseitig während der Sommermonate größtenteils geringere und während der Wintermonate größtenteils höhere a.LF. herrschen als im Foliendach. Im Sommer beträgt die Differenz gefachaußenseitig bis über 300 %. Neben der diffusionsbedingten Feuchteabgabe kommt es aufgrund der hohen Temperaturen und geringen Luftfeuchten im Gefach des Foliendachs zu geringen Ausgleichsfeuchten an den Material-

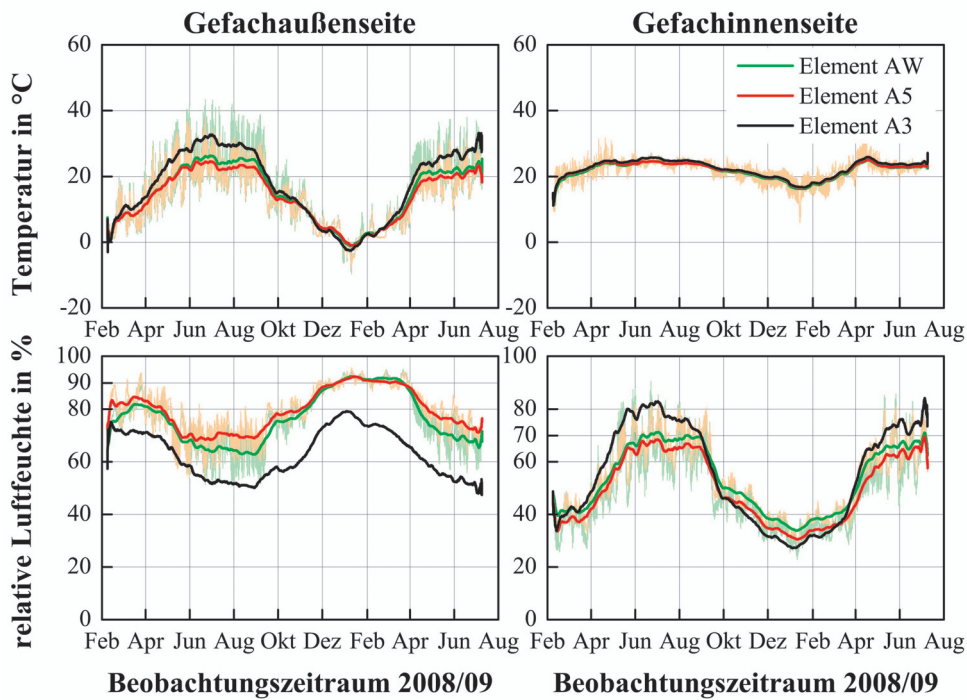


Bild 5. Klimabedingungen in den untersuchten Gründächern (zellosegedämmt AW, mineralwollege-dämmt A5) und des schwarzen Foliendaches A3 (Halbstundenwerte dünn, gleitende Monatsmittelwerte fett)

Fig. 5. Climate conditions within the investigated green (cellulose insulated AW, mineralwool insulated A5) roofs and the black roof membrane element A3 (half-hourly data thin, monthly moving average bold)

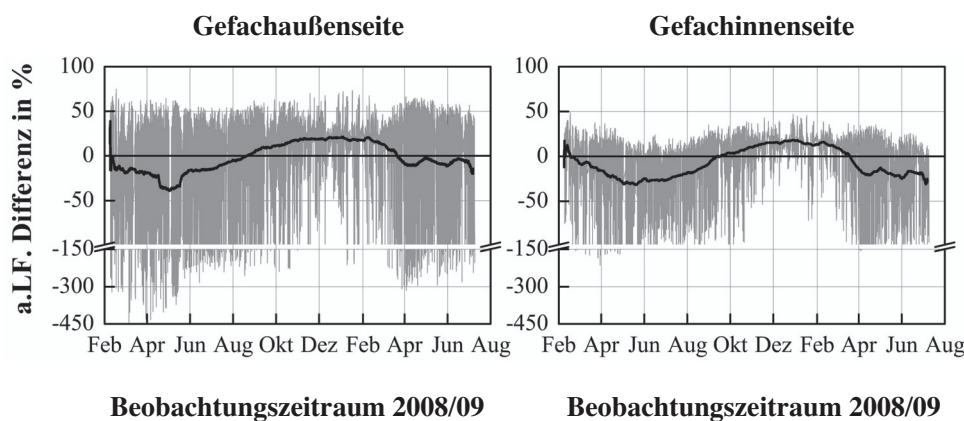


Bild 6. Differenz der absoluten Luftfeuchte zwischen Gründachelement A5 und Foliendachelement A3 in %. Ein positiver Wert bedeutet höhere absolute Luftfeuchten im Gründach (Stundenwerte dünn, gleitende Monatsmittelwert fett)

Fig. 6. Differences of the absolute humidity between green roof A5 and roof membrane element A3 in %; a positive value denotes a greater amount of absolute humidity in the green roof (hourly data thin, monthly moving average bold)

oberflächen und hierdurch zu hohen Transportkoeffizienten bzw. zu einer schnellen Wasserabgabe des Holzes und der Holzwerkstoffe [2], [3]. Verringert sich die Holzfeuchte des obersten Zentimeters eines 10 cm breiten Fichtensparrens um 1 M-%, so werden etwa 4,3 g Wasser pro lfm freigesetzt, was zu den höheren a.LF. im Foliendach führt.

3.4 Materialfeuchte

Die Materialfeuchten in den untersuchten Gründächern liegen vor allem an der Gefachaußenseite zumeist über den Werten des Foliendaches, wie Bild 7 zeigt. Hierbei erreicht Element A5 die höchsten Materialfeuchten von bis zu 20 M-% in der äußeren Beplankung und am außenseitigen Sparrenrand. Ein sommerliches Abtrocknen der erhöhten OSB-Materialfeuchte nach der Aufwechungsphase im April 2008 kann in Element A5 erst im September 2008 beobachtet werden. Im Winter 2008/09 steigt die dortige Material-

feuchte wieder auf Werte um 18 M-% an. In Element AW verringert sich die Materialfeuchte der außenseitigen OSB nach der Aufwechungsphase hingegen wesentlich schneller und deutlicher. Im Frühjahr 2009 steigt die Materialfeuchte der OSB in Element AW wieder auf Werte um 16 M-% an.

Am außenseitigen Sparrenrand kann in Element A5 ebenfalls nur ein sehr langsames Abtrocknen festgestellt werden, wobei die Holzfeuchte hier im Winter 2008/09 wieder auf Werte um 18 M-% ansteigt und sich anschließend nur langsam absenkt. In Element AW verringert sich die Holzfeuchte am außenseitigen Sparrenrand hingegen schnell und bleibt anhaltend unter den Werten von Element A5.

Die Holzfeuchteverläufe in der Sparrenmitte zeigen sich in allen drei betrachteten Dachelementen ähnlich. Am innenseitigen Sparrenrand weist Element AW wieder eine starke Holzfeuchteabsenkung auf, wobei zwischen August 2008 und Januar 2009 auch die Holzfeuchtwerte des Foliendaches A3 unterschritten werden.

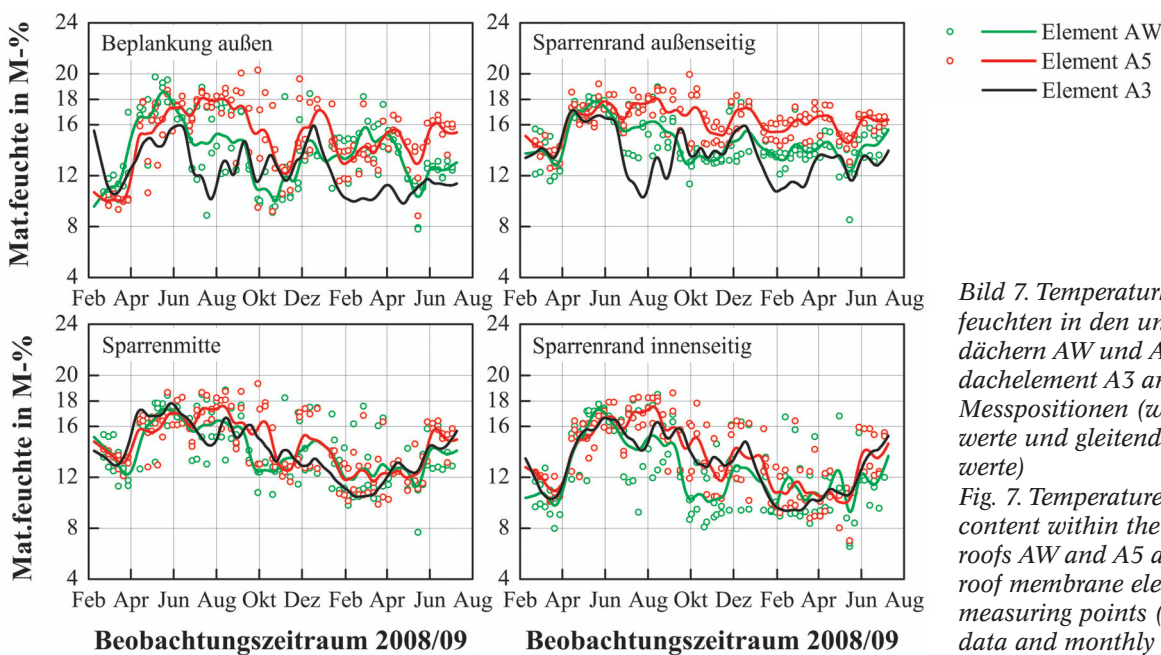


Bild 7. Temperaturkorrigierte Materialfeuchten in den untersuchten Gründächern AW und A5 sowie im Foliendachelement A3 an ausgewählten Messpositionen (wöchentliche Messwerte und gleitende Monatsmittelwerte)

Fig. 7. Temperature corrected moisture content within the investigated green roofs AW and A5 as well as within the roof membrane element A3 at selected measuring points (weekly measuring data and monthly moving average)

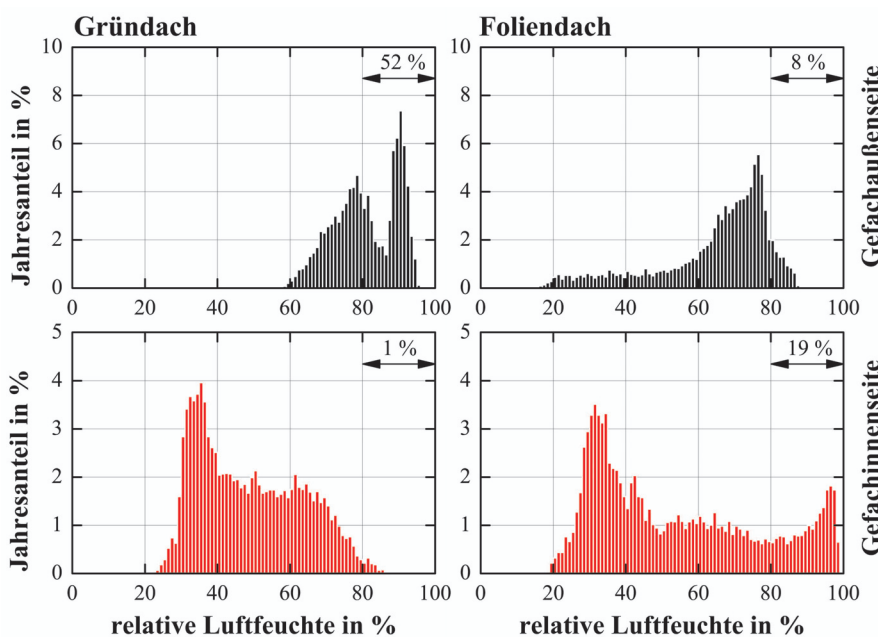


Bild 8. Häufigkeitsverteilung (Jahresanteil) der relativen Luftfeuchte an der Gefachaußen- und -innenseite im Gründach A5 und der Foliendächer aus [1] im Zeitraum 01.07.2008–30.06.2009. Dargestellt sind ebenfalls die aufsummierten Jahresanteile für relative Luftfeuchten $\geq 80\%$.

Fig. 8. Histogram (annual percentage) of the relative humidity at the outer and inner cavity side within the green roof element A5 and the roof membrane elements from [1] for the period 01.07.2008–30.06.2009. Displayed are also the summarized annual percentages for relative humidity $\geq 80\%$.

3.5 Biologischer Befall

Nachfolgend werden zur Diskussion des biologischen Befalls in den Gründachelementen exemplarisch die Klimabedingungen von Dachelement A5 herangezogen.

Werden die Dachelemente über den Zeitraum eines Jahres betrachtet – gewählt wurde 01.07.2008–30.06.2009 – so zeigt sich eine Häufigkeitsverteilung der r.Lf. entsprechend Bild 8. Auf der linken Seite sind die Häufigkeiten im Gründachelement A5 aufgetragen und auf der rechten Seite vergleichsweise die Häufigkeiten in den Foliendachelementen (gemittelt). Es zeigt sich, dass im hier untersuchten Gründach gefachaußenseitig während 52 % des Jahres r.Lf. ≥ 80 % herrschen, während sich diese Bedingungen im Foliendach nur während 8 % des Jahres einstellen. Auf der Gefachinnenseite herrschen im Gründach hingegen nur während 1 % des Jahres r.Lf. ≥ 80 %, während sich im Foliendach aufgrund der stärkeren Feuchteumverteilung während 19 % des Jahres r.Lf. ≥ 80 % einstellen.

Bild 9 zeigt die r.Lf. in Abhängigkeit von der vorhandenen Temperatur im Gründachelement A5 auf der Gefachinnen- und Gefachaußenseite. Dargestellt sind die Stundenwerte (klein) und die Tagesmittelwerte (fett) sowie die Schimmelwachstumsgrenze für freistehende Holzoberflächen nach [4]. Wie zu erkennen ist, sind auf der Gefachinnenseite nur wenige Stundenwerte während des Sommers oberhalb der Schimmelwachstumsgrenze. Auf der Gefachaußenseite herrschen jedoch während des nahezu gesamten Frühlings und an einigen Winter- und Herbsttagen positive Schimmelwachstumsbedingungen. Wird wiederum nur der Zeitraum eines Jahres betrachtet (01.07.08 bis 30.06.09), so herrschen gefachaußenseitig während 25,7 % des Jahres positive Schimmelwachstumsbedingungen.

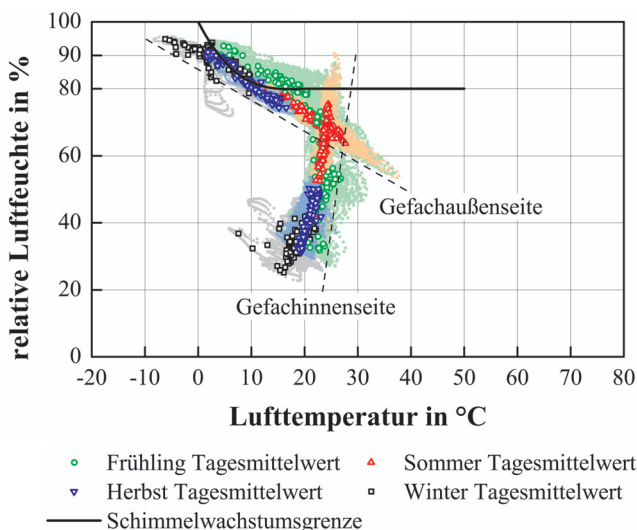


Bild 9. Klimabedingungen im Gründachelement A5. Dargestellt sind die Stundenwerte (klein) und die Tagesmittelwerte (fett) nach Jahreszeit farblich getrennt an der Gefachaußen- und -innenseite sowie die Schimmelwachstumsgrenze nach [4].

Fig. 9. Climate conditions within green roof element A5. Displayed are the hourly data (small) and the daily mean value (bold) separated by seasons with corresponding colours at the outer and inner cavity side as well as the limiting conditions for mould growth according to [4].

Nach Abschluss der Untersuchungen wurden alle Dachelemente an den Revisionsklappen geöffnet. Wie in den Foliendachelementen konnten auch in den beiden Gründachaufbauten makroskopisch und mikroskopisch keinerlei Schimmel- oder holzzeretzende Pilze entdeckt werden.

4 Zusammenfassung

Die durchgeführten Freilanduntersuchungen an luftdichten Gründächern haben gezeigt, dass die Dachhauttemperatur der Gründächer im Winter deutlich vom Niederschlag und der Dauer der vorhandenen Temperaturen abhängt. Während der Sommermonate hängt die Dachhauttemperatur neben den Witterungsbedingungen vom Bewuchsgrad des Daches ab. So wird die Dachhaut eines dicht bewachsenen Gründaches nur geringfügig durch die Sonneneinstrahlung erwärmt. Bei einem dünn-schichtigen Leichtsubstrat und positiven Lufttemperaturen orientiert sich die Dachhauttemperatur im Gründach deutlich an der Außenlufttemperatur. Aufgrund der dadurch nur gering vorhandenen Umkehrdiffusion kann es je nach Innenraumklima im Jahresverlauf zu einer Feuchteakkumulation im Dach kommen. Während der Wintermonate stellt sich an der Gefachaußenseite aufgrund dessen eine lang andauernde, hohe r.Lf. ein, welche dort zu erhöhten Materialfeuchten führen kann.

Im Vergleich zur Mineralwolle besitzt Zellulose stark sorptive Eigenschaften [5], wodurch sich geringere Materialfeuchten im Gefach einstellen können, was auch Untersuchungen in [6] gezeigt haben. Bei vorhandenen Leckagen in der innenseitigen Luftdichtheitsschicht kommt es jedoch ggf. zu einer Aufweitung der Zellulose und zu deutlich höheren Materialfeuchten als die hier gemessenen [7].

Durch die fehlenden Trocknungsbedingungen besitzen innenseitige Leckagen an zwischensparrengedämmten Gründächern generell ein hohes Gefährdungspotential.

Trotz der gemäß [4] sehr häufig vorkommenden positiven Schimmelwachstumsbedingungen konnte weder in dem Gründach mit Zellosedämmung noch in jenem mit Mineralwolle Schimmel entdeckt werden. Dies deutet auf ein deutlich robusteres Verhalten der Flachdachelemente in Bezug auf Schimmelpilzwachstum hin als es für freistehende Holzoberflächen gilt.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) für die Förderung des Forschungsvorhabens sowie bei den Industriepartnern (Fa. Dachtec, Glöckel, Harrer, Kaufmann Bausysteme, Maier, Roth, Schertler und WieHag) und der Fa. Isocell für die materielle und finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] Nusser, B., Teibinger, M., Bednar, T.: Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung – Teil1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung. Bauphysik 32 (2010), H. 3, S. 132–143.
- [2] Fitz, C., Krus, M., Zillig, W.: Untersuchungen zum Feuchteschutz von Leichtbaukonstruktionen mit Bauplatten aus

Holzwerkstoffen. Fraunhofer-Institut für Bauphysik, IBP-Bericht HTB-10/2004. Holzkirchen, 2004.

- [3] *Krus, M.*: Bestimmung feuchtetechnischer Kennwerte und Berechnung des Feuchtehaushalts von Holz-Prüfkörpern bei natürlicher Bewitterung. Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen. Tagungsband S. 283–292. Freiburg, 1999.
- [4] *Hukka, A., Viitanen, H.*: A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology* 33 (1999), No. 6, pp. 475–485.
- [5] *Montensen-Hedegaard, L., Rode, C., Peuhkuri, R. H.*: Full scale tests of moisture buffer capacity of wall materials. The 7th Nordic Building Physics Symposium. Reykjavík, Iceland. Proceedings, 2005.
- [6] *Winter, St., Fülle, C., Werther, N.*: Experimentelle und numerische Untersuchung des hygrothermischen Verhaltens von flachgeneigten Dächern in Holzbauweise mit oberer

dampfdichter Abdichtung unter Einsatz ökologischer Bauprodukte zum Erreichen schadensfreier, markt- und zukunfts-gerechter Konstruktionen. Forschungsbericht, DGFH-Nr: Z 6-10.08.18.7-07.18. Leipzig, 2009.

- [7] *Derome, D.*: Moisture accumulation in cellulose insulation caused by air leakage in flat wood frame roofs. *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 28 (2005), No. 3, pp. 269–287.

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. (FH) Bernd Nusser, M.Eng. und Dipl.-Ing. Dr. Martin Teibinger,
Beide:

Holzforschung Austria, Franz-Grill Straße 7, 1030 Wien

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, TU Wien, Adolf Blamauergasse 1–3, 1030 Wien

Vakatseite

A.3.3 Aufsatz III

Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung

Teil 3: Hinterlüftete und nicht hinterlüftete Metalldächer

Bernd Nusser, Martin Teibinger, Thomas Bednar

In: Bauphysik, Jg. 32 (2010), H. 5, S. 288–295

Vakatseite

Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung¹ – Teil 3: Hinterlüftete und nicht hinterlüftete Metalldächer

Im dritten und abschließenden Teil dieser Aufsatzreihe werden die Messdaten aus hinterlüfteten und nicht hinterlüfteten flachgeneigten Metalldächern diskutiert. Diese wurden im Freilandversuch über 17 Monate unter besonnten und Vollzeit beschatteten Randbedingungen untersucht. Hierbei zeigt sich, dass bei besonnten Bedingungen in beiden Dachaufbauten die innen-seitige Dampfbremsbahn durch eine OSB ersetzt werden kann, ohne dass sich kritische Klimabedingungen oder erhöhte Materialfeuchten im Gefach einstellen. Die verwendete Gleitbügelblecheindeckung beim nicht hinterlüfteten Dach ermöglicht einen diffusionsoffenen Aufbau. Das hinterlüftete Metalldach zeigt trotz geringen Luftvolumenstroms in der Hinterlüftungsebene das günstigste hygrische Verhalten aller untersuchten Dachaufbauten.

Measuring investigations of the hygrothermal behaviour of timber flat roofs – Part 3: Ventilated and non-ventilated metal roofs.
In the third and last part of this article serial the measuring values of ventilated and non-ventilated metal roofs are discussed. The roofs were investigated at a full scale test under sun-exposed and full-time shaded conditions. It was shown that at sun-exposed conditions the vapour retarder membrane in both metal sheeted roofs can be replaced by an OSB without critical climate or increased moisture content in the cavity. The used metal sheeting at the non-ventilated roofs enables a water vapour permeable construction. The ventilated metal roof showed in spite of the little airflow in the ventilation layer the best hygrical behavior of all investigated roofs.

1 Einleitung

Während im ersten Teil [1] dieser dreiteiligen Aufsatzreihe Foliendächer ohne Auflast und im zweiten Teil [2] Gründächer diskutiert wurden, widmet sich dieser abschließende dritte Teil den flachgeneigten, hinterlüfteten und nicht hinterlüfteten, metallgedeckten Dächern.

Bei flachgeneigten Dachkonstruktionen stellt sich häufig die Frage, ob eine Hinterlüftung wirkungsvoll aus-

geführt oder ob gänzlich auf sie verzichtet werden kann [3, 4, 5, 6, 7]. Der infolge des thermischen Auftriebs hervorgerufene Volumenstrom in der Hinterlüftungsebene wird neben dem Reibungsbeiwert des Belüftungskanals, vom Belüftungsquerschnitt, der Temperaturdifferenz zwischen dem Belüftungsraum und der Außenluft und von der Höhendifferenz zwischen der first- und traufenseitigen Belüftungsöffnung beeinflusst [8]. Bei flachgeneigten und ggf. beschatteten Dächern sind zwei dieser Faktoren klein (Temperatur- und Höhendifferenz), was zu geringen Volumenströmen in der Hinterlüftungsebene führt. Hierdurch kann es zu einer Feuchteakkumulation in der Hinterlüftungsebene kommen, wodurch der diffusive Feuchteabtransport aus dem Gefachinnern reduziert und der zu meist hölzerne Belüftungskanal ggf. geschädigt wird.

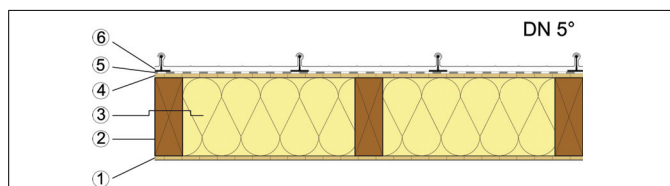
Im Hausbau werden Metalldächer häufig mit einer Hinterlüftung ausgeführt, während im Industriebau aufgrund der großen Belüftungslängen im Allgemeinen auf sie verzichtet wird. Wie sich flachgeneigte hinterlüftete und nicht hinterlüftete Metalldächer ohne innenseitige Dampfbremsbahn bei besonnten und Vollzeit beschatteten Randbedingungen verhalten, wird nachfolgend anhand von Messergebnissen diskutiert.

2 Dachaufbauten und Messpositionen

Wie in [1] beschrieben wurden die Metalldächer auf Haus A unter besonnten und auf Haus B unter Vollzeit beschatteten Randbedingungen untersucht. Die Aufbauten der Metalldächer können den Tabellen 1 und 2 und die Abmessungen der Dachelemente sowie die Messpositionen in den Gefachen Bild 1 entnommen werden. Für das nicht hinterlüftete Metalldach wurden profilierte Aluminiumbahnen verwendet, welche maschinell gebördelt und dadurch auf einem Clip entsprechend Bild 2 beweglich befestigt werden (Gleitbügelblechdach). Das hinterlüftete Metalldach wurde mit einer dunklen Doppelstehfalzeindeckung und einem 10 cm hohen Belüftungskanal (Breite 75 cm) realisiert. Die Belüftungsöffnungen sind Nord-Süd-orientiert und direkt vom Wind anströmbar, wobei die Dachflächen insgesamt wenig windexponiert sind. Bild 3 zeigt schematisch die Ausbildung der Belüftungsöffnungen. Abzüglich des Insektenschutzgitters beträgt der Netto-Belüftungsquerschnitt 517,5 cm² (69 % des Bruttoquerschnitts, 690 cm²/m Traufe).

¹ Dieses Thema wird in drei Aufsätzen abgehandelt. Während in Teil 1 Nacktdächer mit Folienabdichtung diskutiert werden, behandelt Teil 2 Gründachaufbauten und Teil 3 abschließend flachgeneigte Dachelemente mit Metalleindeckungen.

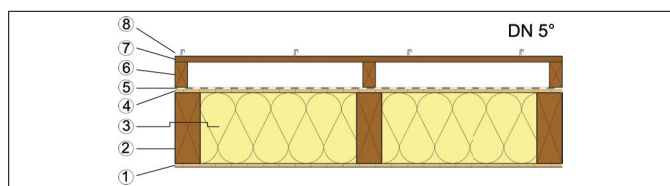
Tabelle 1. Aufbau der untersuchten nicht hinterlüfteten Metalldachelemente A8 und B8, die Dachneigung beträgt 5°
 Table 1. Assembly of the investigated non-ventilated metal roof elements A8 and B8, the roof pitch is 5°



Schicht-Nr.	Dicke	Bezeichnung
1	15 mm	OSB/3
2	280 mm	KVH-Fichte
3	280 mm	Glaswolle
4	15 mm	MDF $s_d = 0,17 \text{ m}^1$
5	0,8 mm	Unterspannbahn $s_d = 0,05 \text{ m}^1$
6	k. A.	Aluminiumblech auf Clips

¹⁾ Herstellerangaben

Tabelle 2. Aufbau der untersuchten hinterlüfteten Metall-dachelemente A9 und B9, die Dachneigung beträgt 5°
 Table 2. Assembly of the investigated ventilated metal roof elements A9 and B9, the roof pitch is 5°



Schicht-Nr.	Dicke	Bezeichnung
1	15 mm	OSB/3
2	280 mm	KVH-Fichte
3	280 mm	Glaswolle
4	15 mm	MDF $s_d = 0,17 \text{ m}^1$
5	0,8 mm	Unterspannbahn $s_d = 0,05 \text{ m}^1$
6	100 mm	Unterkonstruktion
7	22 mm	Vollholzschalung
8	k. A.	Stehfalzblech

¹⁾ Herstellerangaben

3 Untersuchungsergebnisse
3.1 Luftdichtheit der Dachelemente

Alle Dachelemente wurden mit Hilfe von Tracergas-Sensoren in den Gefachen auf ihre Luftdichtheit hin untersucht. Hierfür wurde Ethanol in den Forschungsgebäuden zerstäubt und mit Hilfe einer Blower-Door-Anlage ein Überdruck von 50 Pa im Gebäude erzeugt. Das Verhalten der Sensoren lässt lediglich eine qualitative Aussage zur Dichtigkeit der Dachelemente zu, eine quantitative Aussage ist mit dieser Methode nicht möglich.

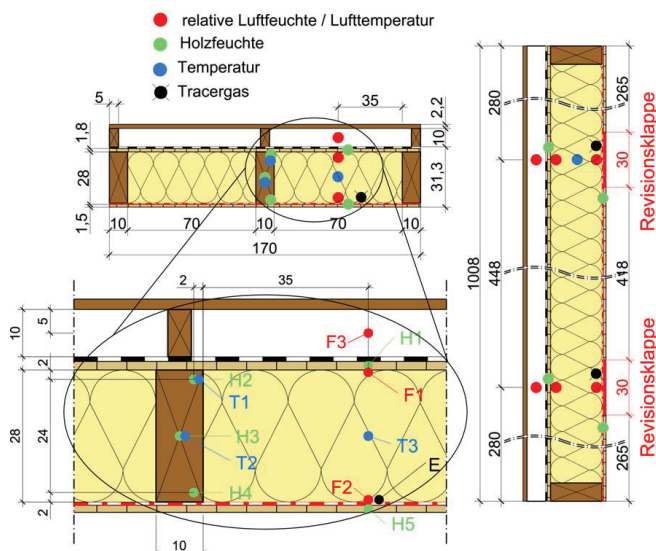


Bild 1. Schematische Darstellung der untersuchten Dachelemente 8 und 9 mit Abmessungen der Dachelemente und Positionen der Messstellen
 Fig. 1. Schematic illustration of the investigated roof elements 8 and 9 with dimensions of the roof elements and the measuring points; red – air humidity and temperature, green – wood moisture, blue – temperature, black – tracer gas



Bild 2. Schematische Darstellung der Befestigung der Metallbahnen des nicht hinterlüfteten Metalldaches auf den verschraubten Clips durch Umbördelung
 Fig. 2. Schematic illustration of the metal roof fixing on the non-ventilated roofs

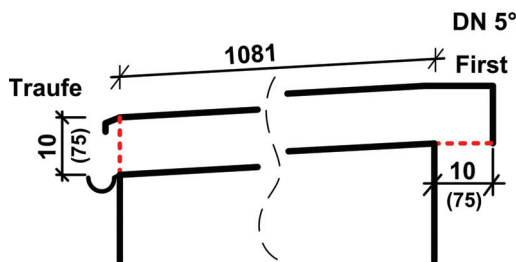


Bild 3. Schematische Darstellung der first- und traufenseitigen Belüftungsöffnungen (10 cm x 75 cm) mit Insekten-schutzgitter (rot)
 Fig. 3. Schematic illustration of the ridge and eave side ventilation openings (10 cm x 75 cm) with the vermin fence (red)

Bild 4 zeigt das Ansprechverhalten der Ethanolensoren aller untersuchten Flachdachaufbauten auf das im Raum versprühte Ethanol. Wie zu erkennen ist, zeigen die Sensoren in den Dachelementen mit Dampfbremsbahn keine Reaktion auf das Ethanol. Bei den Metall-dachelementen A8/9 und B8/9, welche keine Dampfbremsbahn besitzen, ist im Gegensatz dazu eine deutliche Reaktion zu erkennen.

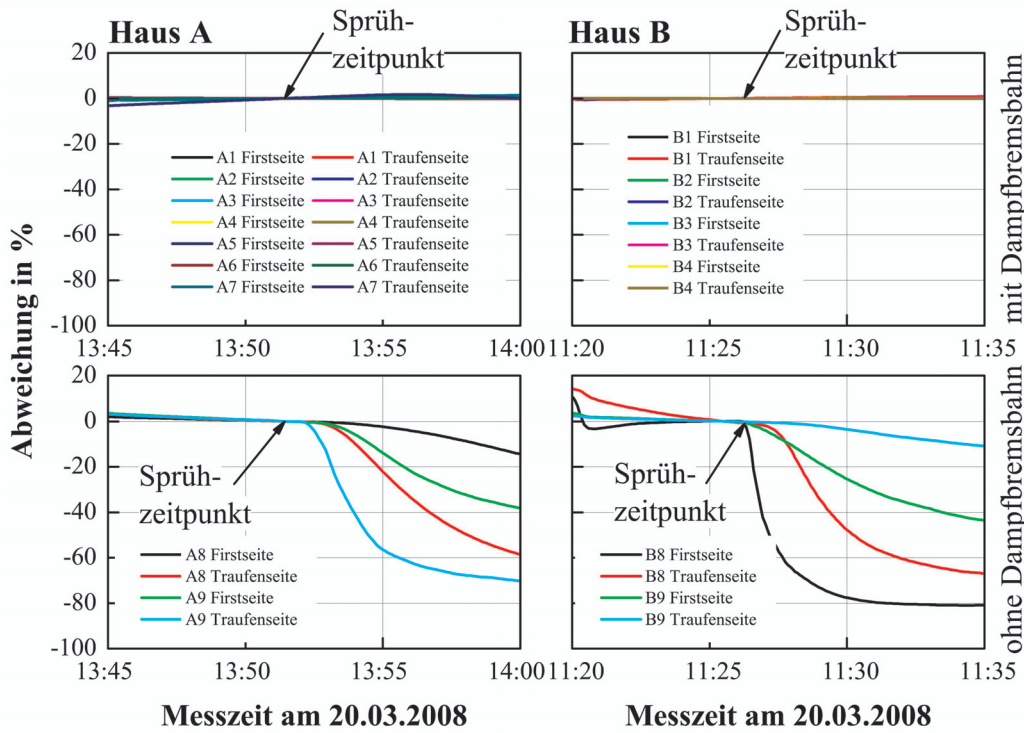


Bild 4. Ansprechverhalten der Tracergassensoren auf das im Raum versprühte Ethanol (Abweichung zum Sprühzeitpunkt). Die Sensoren in den Metalldachelementen A8, A9 und B8, B9 (ohne Dampfbremse) sprechen deutlich auf das Ethanol an
 Fig. 4. Reaction of the traces gas sensors in the roof construction to sprayed ethanol. The sensors in the metal roofs A8, A9 and B8, B9 (without vapour retarder foils) showing a clear response to the ethanol

Dies deutet auf eine im Vergleich zu Dampfbremsbahnen geringere Luftdichtheit der eingesetzten OSB bei erhöhten Druckdifferenzen (50 Pa) hin.

3.2 Klimabedingungen im Gefach
3.2.1 Nicht hinterlüftete Metalldächer

Bild 5 zeigt die Klimate in dem nicht hinterlüfteten besonnten Metalldach A8 (Firstseite und Traufenseite) und den Mittelwert der besonnten EPDM-Foliendachelemente. Die gefachaußenseitige Spitzentemperatur im nicht hinterlüfteten Metalldach liegt im Sommer um bis zu 18 K unterhalb derer in den besonnten EPDM-Dachelementen. Die relative Luftfeuchte (r.LF.) ist sowohl außenseitig wie auch innen-

seitig deutlich geringer im Vergleich zu den EPDM-Dachelementen. Gefachaußenseitig werden nur vereinzelt r.LF. von > 80 % erreicht und gefachinnenseitig nur selten Werte von > 90 %. Zwischen First- und Traufenseite zeigen sich vor allem während der Sommermonate Differenzen auf der Gefachaußenseite, sowohl in der Temperatur als auch in der r.LF.

In dem beschatteten Metalldachelement B8 zeigt sich während des Beobachtungszeitraums ein Klima entsprechend Bild 6. Die Unterschiede zwischen dem Metalldachelement B8 und den EPDM-Dachelementen sind hier weniger stark ausgeprägt. Während der Winter- und Frühjahrsmonate ist auf der Gefachaußenseite jedoch ein sehr deutlicher Unterschied zwischen der firstseitigen und der traufenseitigen r.LF. zu erkennen.

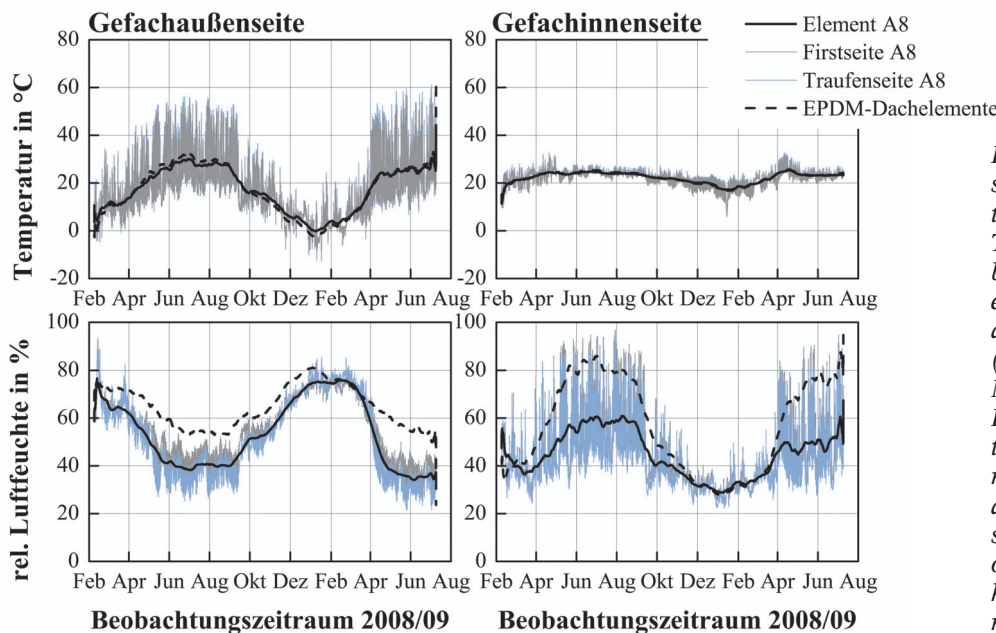


Bild 5. Klimabedingungen im besonnten, nicht hinterlüfteten Metalldachelement A8 (Firstseite und Traufenseite) und Mittelwert der besonnten EPDM-Foliendachelemente aus [1] an der Gefachaußen- und Gefachinnenseite (Halbstundenwerte dünn, gleitende Monatsmittelwerte fett)
 Fig. 5. Climate conditions within the sun exposed, non-ventilated metal roof A8 (ridge and eave side) and mean value of the sun exposed EPDM roof elements [1] at the outer and inner cavity side (half-hourly data thin, and monthly moving average bold)

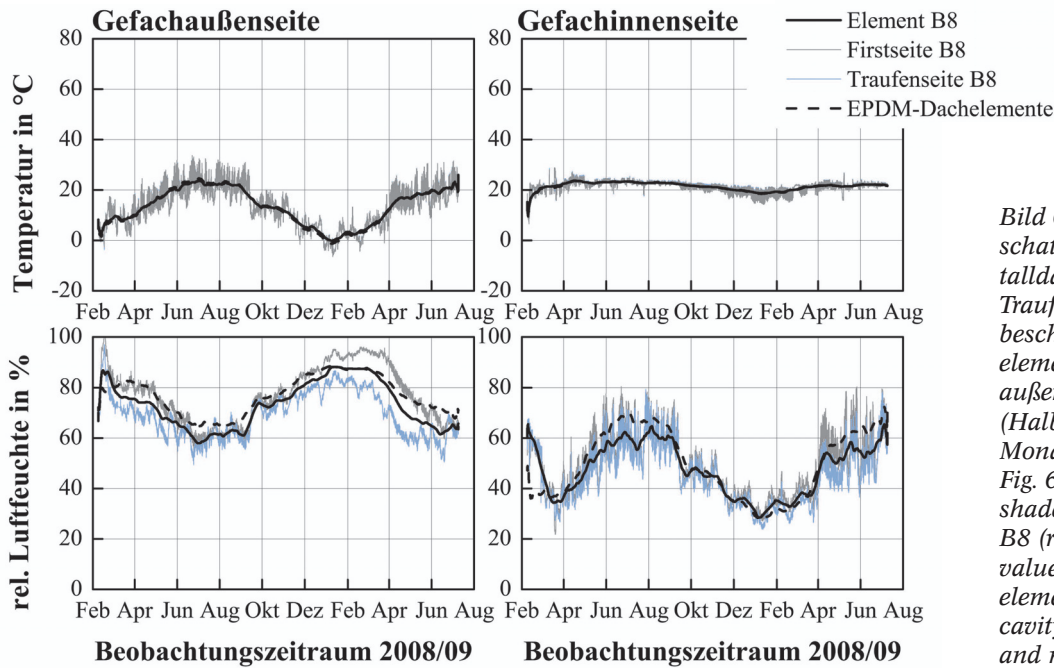


Bild 6. Klimabedingungen im beschatteten nicht hinterlüfteten Metalldachelement B8 (Firstseite und Traufenseite) und Mittelwert der beschatteten EPDM-Foliendachelemente aus [1] an der Gefachaußen- und Gefachinnenseite (Halbstundenwerte dünn, gleitende Monatsmittelwerte fett)
 Fig. 6. Climate conditions within shaded non-ventilated metal roof B8 (ridge and eave side) and mean value of the shaded EPDM roof elements [1] at the outer and inner cavity side (half-hourly data thin and monthly moving average bold)

3.2.2. Hinterlüftete Metalldächer

Bild 7 zeigt das Klima im besonnten hinterlüfteten Metalldach A9 (Firstseite und Traufenseite), im besonnten nicht hinterlüfteten Metalldach A8 und den Mittelwert der besonnten EPDM-Foliendachelemente. Die gefachaußenseitige Spitzentemperatur im hinterlüfteten Metalldach liegt im Sommer um bis zu 24 K unterhalb derer in den besonnten EPDM-Dachelementen.

Gefachaußenseitig wird im hinterlüfteten Metalldach nur vereinzelt eine r.LF. von > 80 % erreicht. Die EPDM-Dachelemente zeigen sowohl gefachaußen- wie auch gefachinnenseitig eine teilweise deutlich höhere r.LF. als das Metalldachelement. Zwischen First- und Traufenseite sind im besonnten hinterlüfteten Metalldach gefachinnen- und gefachaußenseitig geringe Differenzen in der Temperatur wie auch in der r.LF. zu erkennen.

Im Vergleich zu dem besonnten nicht hinterlüfteten Metalldach A8 weist das besonnte hinterlüftete Metalldach A9 im Winter auf der Gefachaußenseite eine etwas höhere r.LF. auf. Auf der Gefachinnenseite liegt die r.LF. aufgrund der geringeren Feuchteumverteilung im hinterlüfteten Metalldach wiederum unterhalb jener im nicht hinterlüfteten Metalldach.

Das Klima in dem beschatteten hinterlüfteten Metalldach B9 (Firstseite und Traufenseite), dem beschatteten nicht hinterlüfteten Metalldach B8 und den Mittelwert der beschatteten EPDM-Foliendachelemente zeigt Bild 8. Wie zu erkennen ist, herrschen im beschatteten hinterlüfteten Metalldach sowohl gefachinnen-, wie auch gefachaußenseitig nahezu durchgehend die geringsten rel. Luftfeuchten. Die Temperaturen sind hingegen nahezu identisch. Zwischen First- und Traufenseite sind im beschatteten hinterlüfteten Metalldach gefachinnen- und gefachaußenseitig geringe Differenzen in der r.LF. zu erkennen.

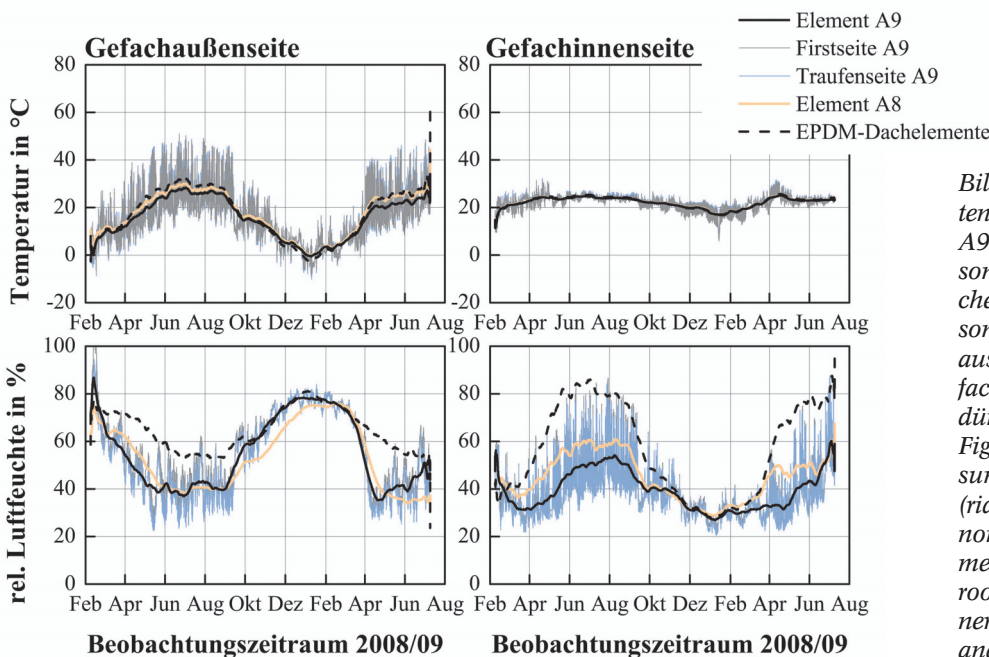


Bild 7. Klimabedingungen im besonnten hinterlüfteten Metalldachelement A9 (Firstseite und Traufenseite), im besonnten nicht hinterlüfteten Metalldachelement A8 und Mittelwert der besonnten EPDM-Foliendachelemente aus [1] an der Gefachaußen- und Gefachinnenseite (Halbstundenwerte dünn, gleitende Monatsmittelwerte fett)
 Fig. 7. Climate conditions within the sun exposed ventilated metal roof A9 (ridge and eave side), the sun exposed non-ventilated metal roof A8 and the mean value of the sun exposed EPDM roof elements [1] at the outer and inner cavity side (half-hourly data thin and monthly moving average bold)

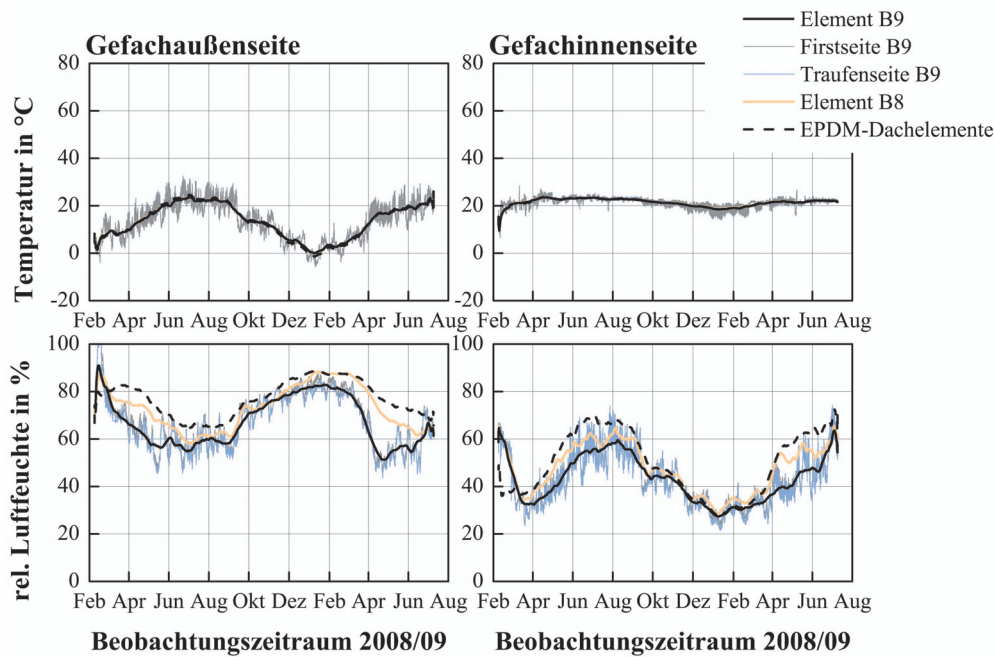


Bild 8. Klimabedingungen im beschatteten hinterlüfteten Metalldachelement B9 (Firstseite und Traufenseite), im beschatteten nicht hinterlüfteten Metalldachelement B8 und Mittelwert der besonnten EPDM-Foliendachelemente aus [1] an der Gefachaußen- und Gefachinnenseite (Halbstundenwerte dünn, gleitende Monatsmittelwerte fett) Fig. 8. Climate conditions within the shaded ventilated metal roof B9 (ridge and eave side), the shaded non-ventilated metal roof B8 and the mean value of the shaded EPDM roof elements [1] at the outer and inner cavity side (half-hourly data thin and monthly moving average bold)

3.2.3 Firstseite vs. Traufenseite

Bild 9 zeigt die Abweichungen zwischen firstseitiger und traufenseitiger absoluter Luftfeuchte (a.LF.) in den Metalldächern. Aufgetragen ist jeweils die prozentuelle Abweichung zwischen dem firstseitigen und dem traufenseitigen Messwert. Ist die Abweichung positiv, so liegt am firstseitigen Fühler eine höhere a.LF. an als am traufenseitigen Fühler. Wie zu erkennen ist, zeigt sich in allen untersuchten Metalldächern auf der Firstseite eine zumeist höhere a.LF. als auf der Traufenseite. Die größten Differenzen sind in den nicht hinterlüfteten Dächern zu verzeichnen. Diese weisen bei besonnten Bedingungen im Sommer und bei beschatteten Bedingungen im Frühjahr die größten Differenzen auf. Bei den hinterlüfteten Dächern ist diese Jahreszeitenabhängigkeit deutlich weniger ausgeprägt.

Im Vergleich zu den Differenzen zwischen First und Traufe in den Foliendachelementen (vgl. [1]) sind diese in den Metalldächern deutlich stärker ausgeprägt. Dies resultiert zum einen aus dem geringeren innenseitigen Diffusionswiderstand (keine Dampfbremshahn), wodurch Rotationsströmungen besser nachweisbar werden [9], und zum anderen aus der größeren Feldlänge (10 m zu 2,5 m) und der höheren Dachneigung (5° zu 2°).

3.3 Klimabedingungen in der Hinterlüftungsebene

In Bild 10 sind die Klimabedingungen in der Hinterlüftungsebene des besonnten und beschatteten hinterlüfteten Metalldaches dargestellt. Die unteren Grafiken zeigen die a.LF.-Differenzen zwischen First- und Traufenseite sowie zwischen der Gefachaußenseite im Dachelement und der Hinterlüftungsebene. Ein positiver Wert bedeutet eine

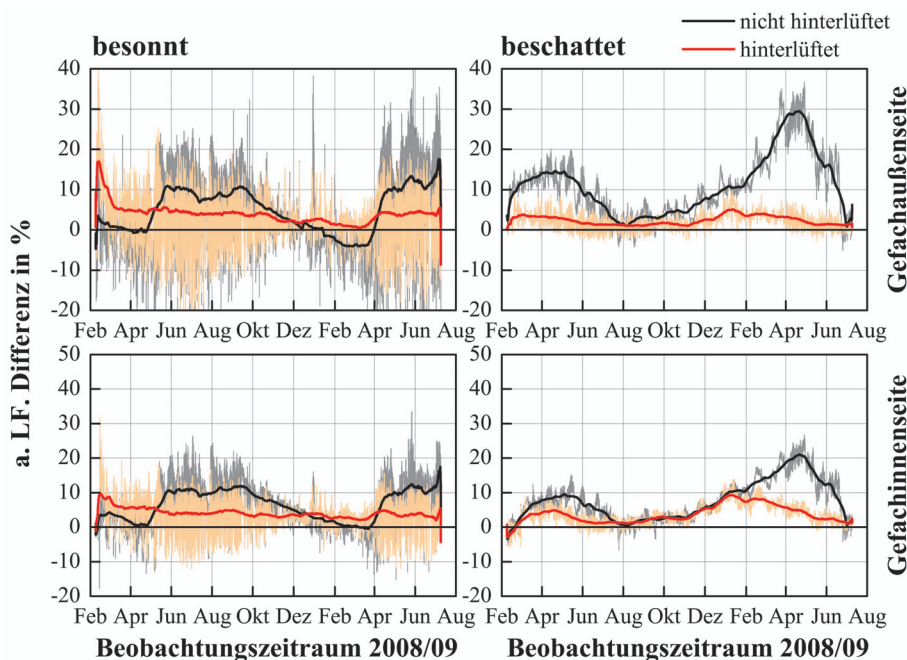


Bild 9. Prozentuelle Abweichung der firstseitig vorhandenen absoluten Luftfeuchte (a.LF.) zur traufenseitig vorhandenen a.LF. auf der Gefachinnen- und Gefachaußenseite in den besonnten und beschatteten Metalldachelementen (Halbstundenwerte dünn, gleitende Monatsmittelwerte fett). Ein positiver Wert bedeutet eine firstseitig höhere a.LF. Fig. 9. Differences in percentage between the absolute humidity (a.LF.) at the ridge and the eave inside the non-ventilated and ventilated metal roofs at sun exposed and shaded conditios (hourly data thin, monthly moving average bold). A positive value denotes a greater amount of absolute humidity at the ridge side.

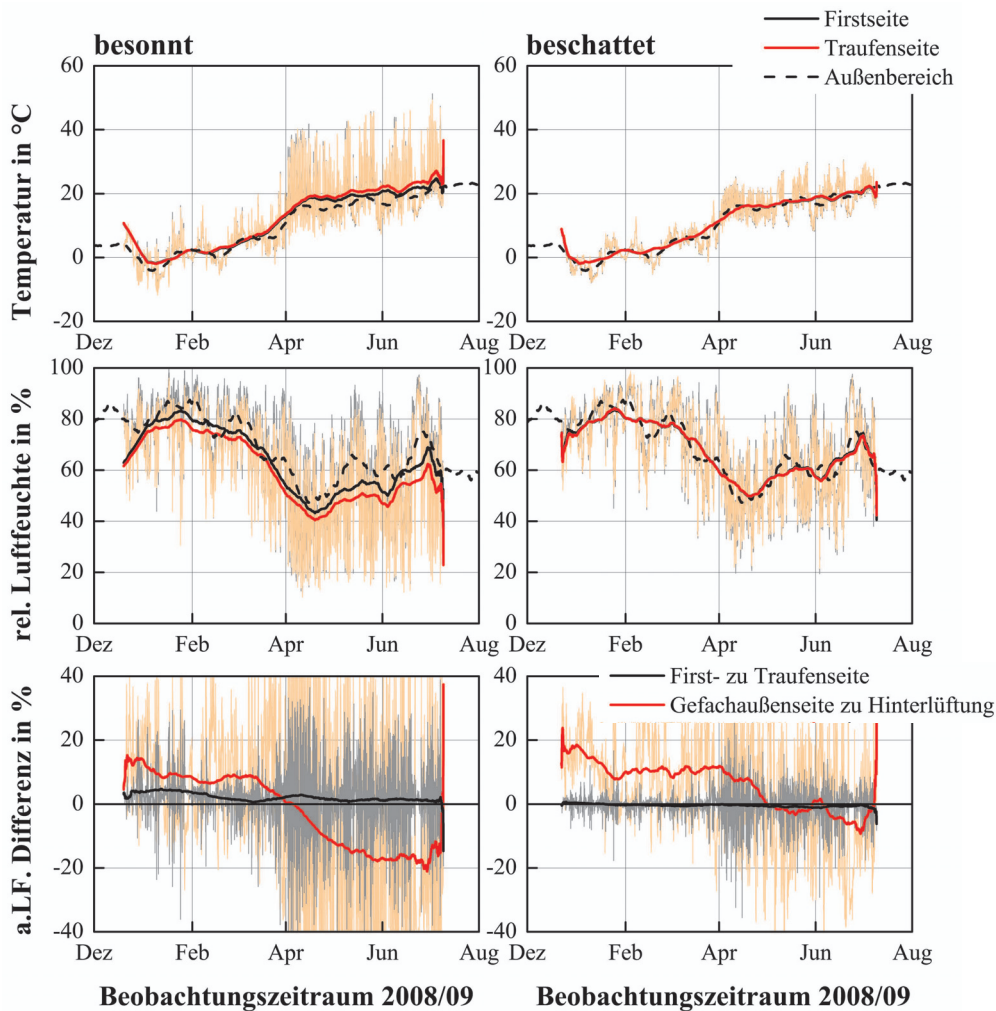


Bild 10. Klimabedingungen in der besonnten und beschatteten Hinterlüftungsebene (First- und Traufenseite), im Außenbereich und die a.LF.-Differenzen zwischen der First und Traufenseite sowie der Gefachaußenseite im hinterlüfteten Metall-dachelement und der Hinterlüftungsebene in %. Ein positiver Wert bedeutet eine höhere a.LF. auf der Firstseite (schwarz) bzw. der Gefachaußenseite (rot). Dargestellt sind jeweils die Halbstundenmesswerte (dünn) und die gleitenden Monatsmittelwerte (fett)

Fig. 10. Climate conditions inside the sun exposed and shaded ventilation layer (ridge and eave side), the outdoor climate and the differences between the absolute humidity (a.LF.) at the ridge and the eave side as well as between the outer cavity side and the ventilation layer in %. A positive value denotes a greater amount of absolute humidity at the ridge side (black) respectively at the outer cavity side (red)

höhere a.LF. auf der Firstseite (schwarz) bzw. der Gefachaußenseite (rot).

Während sich die Temperaturen in der besonnten Hinterlüftung hauptsächlich im Sommer vom Außenbereich unterscheiden, orientieren sich jene in der beschatteten Hinterlüftung ganzjährig an der Außenluft. Eine Differenz zwischen first- und traufenseitiger Temperatur ist lediglich in der besonnten Hinterlüftungsebene und nur im Sommer zu erkennen. Traufenseitig ist sie hier im Monatsmittel geringfügig höher. Bei der r.LF. zeigen sich hingegen wesentlich deutlicher Unterschiede zwischen First- und Traufenseite. Während des ganzen Beobachtungszeitraums liegt in der besonnten Hinterlüftung die firstseitige r.LF. oberhalb jener auf der Traufenseite. In der beschatteten Hinterlüftung ist eine Differenz der r.LF. zwischen First- und Traufenseite kaum zu erkennen.

Wie die Halbstundenmesswerte der unteren Grafiken in Bild 10 zeigen, herrscht in der besonnten Hinterlüftungsebene während des diffusionsbedingten Feuchteintrags (rot > 0) auf der Firstseite eine nahezu durchwegs höhere a.LF. als auf der Traufenseite. Dies deutet auf einen von der Traufe zum First gerichteten konvektionsbedingten Feuchtetransport in der Hinterlüftungsebene hin.

In der beschatteten Hinterlüftungsebene ist die a.LF. Dominanz einer Seite nicht zu erkennen und die Differenzen zwischen First- und Traufenseite sind nur wenig ausgeprägt. Dies lässt auf einen Feuchtetransport ohne vorherrschende Richtung schließen. Ein schädlicher „Feuch-

testau“ ist in der beschatteten Hinterlüftungsebene nicht zu erkennen.

3.4 Materialfeuchten

Anhand von Bild 11 wird ersichtlich, dass im besonnten hinterlüfteten Metalldach während des nahezu gesamten Beobachtungszeitraums die geringsten Materialfeuchten herrschen. Im besonnten nicht hinterlüfteten Metalldach stellen sich Materialfeuchten ein, welche in etwa jenen in den besonnten EPDM-Foliendachelementen entsprechen. Vereinzelt Messwerte liegen hier im Bereich von 18 M-%, zum allergrößten Teil jedoch darunter. Während der Aufwechungsphase im April 2008 (vgl. [1]) erhöht sich die Materialfeuchte im besonnten nicht hinterlüfteten Metalldach, trocknet jedoch während des Beobachtungszeitraums wieder deutlich ab. Die Materialfeuchteerhöhung während der Aufwechungsphase ist im besonnten hinterlüfteten Metalldach nur schwach ausgeprägt.

In den beschatteten Dächern zeigt sich der Unterschied zwischen hinterlüftetem und nicht hinterlüftetem Metalldach bzw. Foliendach sehr deutlich. Während die Materialfeuchten der außenseitigen Beplankung in den nicht hinterlüfteten Dachaufbauten während des Winters 2008/09 auf teilweise > 20 M-% ansteigen, bleibt sie im hinterlüfteten Metalldach auf niedrigem Niveau. An den Messstellen „Sparrenmitte“ und „Sparrenrand innen“ hebt sich das beschattete nicht hinterlüftete Metalldach im

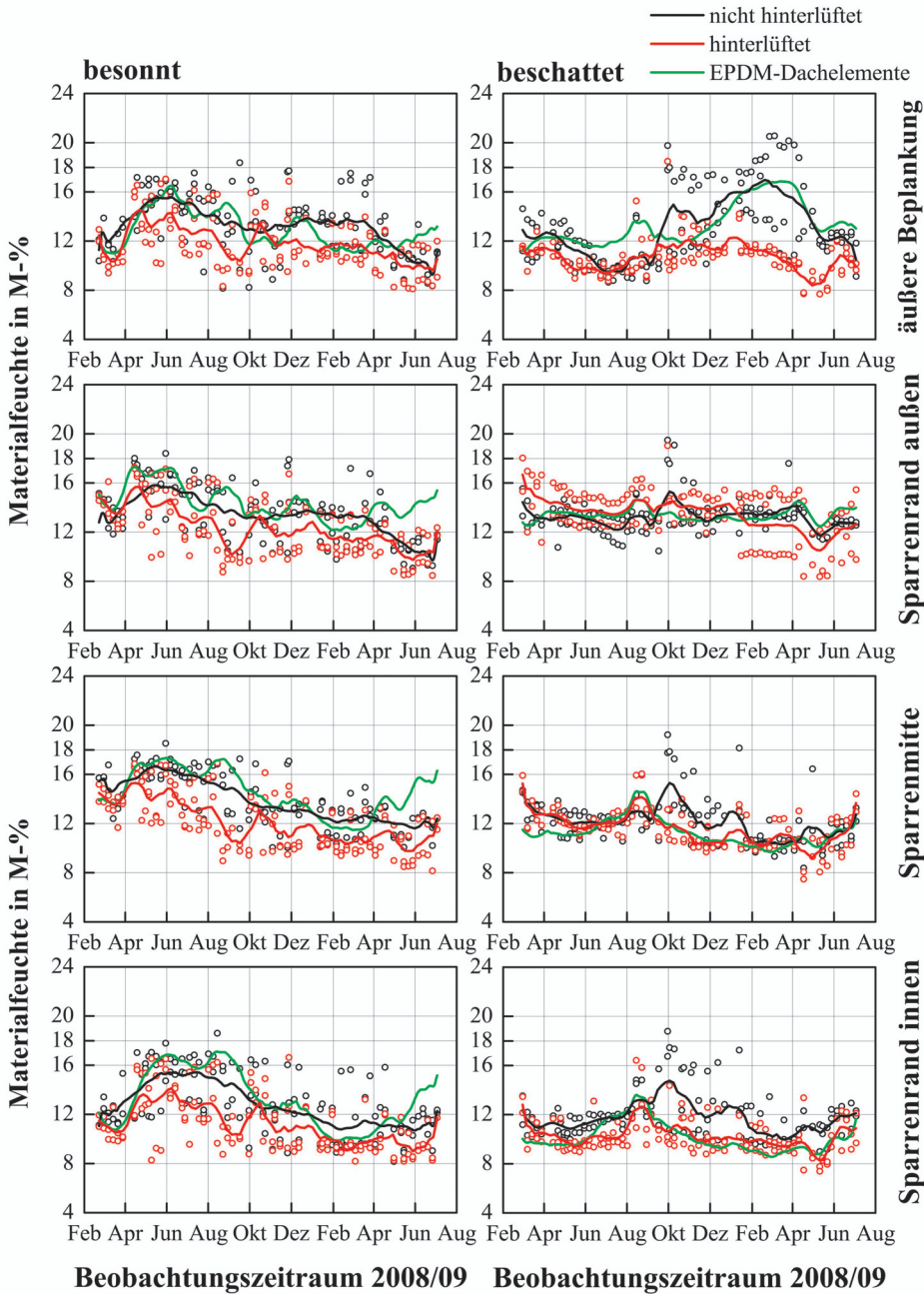


Bild 11. Temperaturkorrigierte Materialfeuchten (Wochenmesswerte und gleitende Monatsmittelwerte) in den besonnten bzw. beschatteten nicht hinterlüfteten und hinterlüfteten Metalldächern A8, B8 bzw. A9, B9 sowie den EPDM-Foliendächern aus [1]
 Fig. 11. Temperature corrected moisture content (weekly measuring data and monthly moving average) within the sun exposed or shaded ventilated and non-ventilated metal roofs A8, B8 respectively A9, B9 as well as within the EPDM roof elements from [1]

Herbst/Winter 2008/09 durch höhere Materialfeuchten ab, bleibt jedoch < 20 M-%.

3.5 Biologischer Befall

Nach Abschluss der Untersuchungen wurden alle Metall-dachelemente an den Revisionsklappen von unten geöffnet und begutachtet. Weder makroskopisch noch mikroskopisch konnten Schimmel- oder holzerstörende Pilze in den Metall-dachelementen entdeckt werden. Bild 12 zeigt die Jahresanteile für positive Schimmelwachstumsbedingungen nach [10] aller untersuchten Dachaufbauten für den Zeitraum 01.07.2008 bis 30.06.2009. Wie sich zeigt, herrschen im Gründach an der Gefachaußen- und in den EPDM-Dächern an der Gefachinnenseite am häufigsten positive Schimmelwachstumsbedingungen. Im hinterlüfteten Metalldach zeigen sich während des betrachteten Jahres sowohl unter besonnten wie auch vollzeitbeschatteten Randbedingungen nahezu keine positiven Schimmelwachstumsbedingungen.

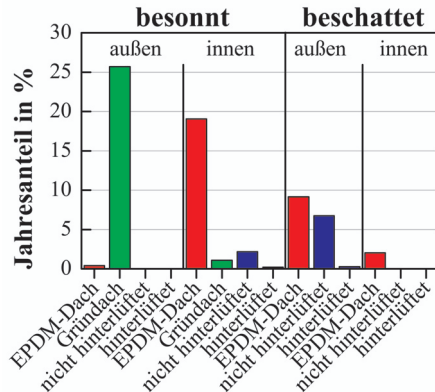


Bild 12. Darstellung der Jahresanteile der aufsummierten positiven Schimmelwachstumsbedingungen nach [10] aller untersuchten Dachaufbauten [1, 2] im Zeitraum 01.07.2008 bis 30.06.2009 an der Gefachinnen- und Gefachaußenseite
 Fig. 12. Illustration of the summarized annual percentages of favourable mould growing conditions according to [10] within all investigated roofs [1, 2] during the period 01.07.2008 to 30.06.2009 at the inner and outer cavity side

4 Zusammenfassung

Wie die getätigten Untersuchungen an 16 unterschiedlichen Flachdachaufbauten gezeigt haben, unterscheidet sich das hygrothermische Verhalten von Foliendächern ohne Auflast, Gründächern und hinterlüfteten und nicht hinterlüfteten Metaldächern deutlich (vgl. [1, 2]).

Generell verhalten sich die hier untersuchten Metaldächer am günstigsten. Es zeigt sich, dass eine Dampfbremshahn bei diesen Dächern nicht zwingend erforderlich ist. Bei einem beschattungsfreien Dach, einer geeigneten Blecheindeckung bzw. Hinterlüftung kann eine innenseitige OSB bei den hier untersuchten Dachtypen ausreichen.

Eine Eindeckung mit Gleitbügelblechen und Umbördelung der Metallbahnen an verschraubten Clips ermöglicht einen quasi diffusionsoffenen Aufbau. Aus dem Gefach nach außen diffundierende Feuchtigkeit kann bei der hier untersuchten Metaldachkonstruktion entweichen. Dass sich eine Reduktion des Abstandes zwischen Metallbahn und außenseitiger Beplankung, z. B. durch hohe Schneelast oder Verformungen, negativ auf das hygrische Verhalten des Dachelements auswirkt, kann nicht ausgeschlossen werden.

Das hinterlüftete Metaldach zeigt bei den gegebenen Versuchsbedingungen sowohl im Bezug auf das Klima im Gefach wie auch im Hinblick auf die Materialfeuchten das günstigste Verhalten. Trotz einer dauerhaften Beschattung und des dadurch geringen Luftvolumenstroms in der Hinterlüftungsebene konnten in dem beschatteten hinterlüfteten Metaldach keine erhöhten Materialfeuchten und nur äußerst selten positive Schimmelwachstumsbedingungen verzeichnet werden. Auch in der Hinterlüftungsebene konnte kein Feuchtestau festgestellt werden.

Trotz des günstigen Verhaltens der untersuchten Metaldächer kann die zusätzliche Verwendung einer Dampfbremshahn das hygrische Verhalten dieser Dächer noch weiter verbessern.

Wie auch in den EPDM-Foliendächern, so zeigen sich in den Metaldächern erhöhte Luftfeuchten auf der Firstseite, was auf Rotationsströmungen im vollgedämmten Gefach hindeutet.

Schimmel- oder holzersetzen Pilze konnten an keiner Stelle der Metaldächer entdeckt werden.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) für die Förderung des Forschungsvorhabens sowie bei den Industriepart-

nern (Firmen Dachtec, Glöckel, Harrer, Kaufmann Bausysteme, Maier, Roth, Schertler und WieHag) für die materielle und finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] Nusser, B., Teibinger, M., Bednar, T.: Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung – Teil 1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung. *Bauphysik 32* (2010), H. 3, S. 132–143.
- [2] Nusser, B., Teibinger, M., Bednar, T.: Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung – Teil 2: Nicht belüftete, extensiv begrünte Dächer mit Zellulose- und Mineralwollämmung. *Bauphysik 32* (2010), H. 4, S. 219–225.
- [3] Borsch-Laaks, R.: Belüftet oder lieber doch nicht. Tauwasserschutz bei flach geneigten Dächern in Holzbauweise. *Holzbau – die neue quadriga* (2004), H. 5, S. 17–22.
- [4] Gertis, K.: Belüftete Baukonstruktionen. Probleme der Wärme- und Feuchteabfuhr in Luftspalten. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. IBP-Mitteilung 7, 1973.
- [5] Klose, G.-R.: Wärmegeämmte Dachkonstruktionen mit Metalldeckungen. In: *Cziesielski, E.* (Hrsg.): *Bauphysik-Kalender 2002*. Berlin: Ernst & Sohn, 2002, S. 739–772.
- [6] Schmidt, D.: Flachdachkonstruktionen in Holzbauweise. Teil 1: Belüftet oder nicht belüftet? Diffusionsoffen oder diffusionsdicht. *Holzbau – die neue quadriga* (2007), H. 3, S. 18–23.
- [7] Sedlbauer, K., Möller, E.: Tauwasser an belüfteten Flachdächern – Freilanduntersuchungen und Berechnungen. In: *Künzel, H. M.* (Hrsg.): *Feuchteentwicklung im Dach – Sanierung und ihre Folgen*. WTA-Schriftenreihe 22, 2003, S. 35–49.
- [8] Liersch, K. W.: Dächer. Bauphysikalische Grundlagen des Wärme- und Feuchteschutzes. Teil 3: Belüftete Dach- und Wandkonstruktionen. Wiesbaden: Bauverlag, 1986.
- [9] Riesner, K.: Natürliche Konvektion in losen Außenwandämmungen. Untersuchungen zum gekoppelten Wärme-, Luft- und Feuchtetransport. Dissertation. Universität Rostock, Fachgebiet Baukonstruktion und Bauphysik, 2003.
- [10] Hukka, A., Viitanen, H.: A mathematical model of mould growth on wooden material. *Wood Science and Technology 33* (1999), No. 6, pp. 475–485.

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. (FH) Bernd Nusser, M.Eng und Dipl.-Ing. Dr. Martin Teibinger

Beide:

Holzforschung Austria, Franz-Grill-Straße 7, 1030 Wien

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas Bednar, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz, TU Wien, Adolf-Blamauer-Gasse 1–3, 1030 Wien

A.3.4 Publikationsliste

Nachfolgende Auflistung beinhaltet alle Publikationen welche im Zuge der durchgeführten Forschungsarbeit entstanden sind. Die Auflistung erfolgt abnehmend chronologisch.

Nusser, B.; Teibinger, M. (2011): *Gründach versus Foliendach. Leistungsvergleich und Maßnahmen zur Verbesserung der hygrischen Sicherheit*. Holzbau - die neue quadriga, H. 5, S. 13–17.

Teibinger, M.; Nusser, B. (2011): *Flachgeneigte Dächer aus Holz*. mikado plus, mikado Sonderheft Nr. 3.

Nagl, S.; Nusser, B. (2011): *Viel Licht und wenig Schatten*. HFA-Magazin, H. 2, S. 8–9.

Teibinger, M.; Nusser, B. (2011): *Das hygrische Verhalten von flachgeneigten Foliendächern*. Ernst & Sohn Spezial: Flachdächer, H. A 61029, S. 50–51.

Nusser, B.; Bednar, T.; Teibinger, M. (2011): *Proposal for a modified Glaser-Method for the risk assessment of flat timber roofs*. 9th Nordic Symposium on Building Physics – NSB, Tampere, Finland, 29 May – 2 June, Proceedings, Bd. 1, S. 181–188.

Nusser, B. (2011): *Tatort Dampfbremse. Einfluss von konvektiven Feuchteinträgen und temporären Beschattungen auf Foliendächer*. Bauphysikforum, 7.-8. April, Mondsee, Tagungsband, S. 35–44, (HFA-Schriftenreihe, 32).

Teibinger, M.; Nusser, B. (2010): *Planungsbroschüre. Flachgeneigte Dächer aus Holz* Wien, Eigenverlag, (HFA-Schriftenreihe, 29).

Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung - Teil3: Hinterlüftete und nicht hinterlüftete Metaldächer*. Bauphysik, Jg. 32, H. 5, S. 288–295.

Nusser, B.; Bednar, T.; Teibinger, M. (2010): *Euro-Glaser unter Beachtung solarer Strahlungs-/ Absportionsbedingungen sowie druckinduzierter Feuchteinträge im Vergleich zu dynamischen Simulationen*. Building Performance Simulation in a Changing Environment, Proceedings of the third German-Austrian IBPSA Conference, September 22-24, Wien, S. 535–541.

Bednar, T.; Deseyve, C.; Jung, M.; Nusser, B.; Teibinger, M. (2010): *Impact of Airflow on the Risk Assessment of Flat Roofs*. The 7th International Conference in Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings – IAQVEC, August 15-18, Syracuse, New York, USA, Proceedings.

Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung - Teil 2: Nicht belüftete, extensiv begrünte Dächer mit Zellulose- und Mineralwollämmung*. Bauphysik, Jg. 32, H. 4, S. 219–226.

Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Low-Pitched Timber Roofs*. World Conference on Timber Engineering - WCTE. June 20-24, Riva del Garda, Italy, Proceedings.

Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Messtechnische Analyse flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen mit Sparrenvollämmung - Teil 1: Nicht belüftete Nacktdächer mit Folienabdichtung*. Bauphysik, Jg. 32, H. 3, S. 132–143.

Teibinger, M.; Nusser, B. (2010): *Flachgeneigte Dächer in Holzbauweise richtig ausgeführt. Do's and Dont's aus bauphysikalischer Sicht*. 6. IFB Symposium - Flachdachbau und Bauwerksabdichtung, Wien, Tagungsband.

- Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Feuchtetechnische Untersuchungen flachgeneigter hölzerner Dachkonstruktionen*. OIB aktuell, Jg. 11, H. 3, S. 20–25.
- Teibinger, M.; Nusser, B. (2010): *Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen*. Holzforschung Austria, Wien, (Forschungsbericht. HFA-Nr.: P412).
- Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2010): *Do's and Dont's im Flachdachbau. Aus der Forschung in die Praxis - neue Forschungsergebnisse münden in Planungsbroschüre*. Holzbau - die neue quadriga, H. 1, S. 33–37.
- Nusser, B.; Teibinger, M.; Bednar, T. (2009): *Flachdächer richtig ausgeführt. Do's and Dont's aus bauphysikalischer Sicht*. Holz_Haus_Tage, Fachtagung für innovative Holzhausbauer, 8.-9. Oktober, Mondsee, Tagungsband, S. 124–136.
- Teibinger, M.; Nusser, B. (2008): *Aktuelle Untersuchungen zum Feuchteschutz im Holzhausbau*. Wärme-, Sonnen- und Feuchteschutz im Holzbau, 40. SAH-Fortbildungskurs, Weinfeldern, Tagungsband, S. 147–158.
- Nusser, B.; Neubauer, G.; Polleres, S. (2008): *Angewandte Bauforschung. Forschungsgebäude zu hygrothermischen Bauteiluntersuchungen unter Realbedingungen errichtet*. HFA-Magazin, Jg. 6, H. 1, S. 3–5.

„Wenn man einen hohen Berg bestiegen hat, stellt man fest, dass es noch viele andere Berge zu besteigen gibt.“ (Nelson Mandela)