

Strom und Schatten

Freilanduntersuchungen zum hygrothermischen Verhalten von Steildächern mit PV-Anlagen

Im Zuge der Energiewende werden immer mehr Steildächer mit PV-Modulen belegt. Was gut für die Umwelt ist, muss jedoch nicht immer gut für die darunterliegende Dachkonstruktion sein. Denn eine Belegung der Dachfläche mit einer Solaranlage verändert maßgeblich die Temperaturen in der Dachkonstruktion und somit deren Feuchteverhalten [Kölsch et al. 2025]. Eine Aufdach-Solaranlage verschattet die Dachfläche und führt gleichzeitig Energie ab, die sonst zur Erwärmung zur Verfügung steht. Das führt dazu, dass die Dachkonstruktionen im Sommer deutlich kühler bleiben als vergleichbare Dächer ohne Solaranlage. Wie sich dies auf die Temperatur- und Feuchteverhältnisse in einer Konstruktion auswirkt, wurde am Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen untersucht.

Autoren:
Philipp Kölsch und Daniel Zirkelbach
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP,
Holzkirchen

Zwei Varianten im Versuchsaufbau

An einer 16° nach Nord und Süd geneigten Dachkonstruktion wurden an verschiedenen Versuchsfeldern mit und ohne PV-Modulen zwei verschiedenen Dachaufbauten untersucht. Hierzu wurde an drei Achsen zwischen Traufe und First an unterschiedlichen Positionen im Dachaufbau die Temperaturen gemessen. Variante A stellt eine typische, von innen sanierte Altbau-situation mit einer 180 mm dicken Zwischensparrendämmung und einer diffusions-sperrender Bitumen-Unter-dachbahn auf einer Holzschalung dar. Auf der Raumseite wurde eine feuchtevariable Dampfbremse ISOVER Vario XtraSafe verlegt. Die Variante B stellt eine Sanierungslösung von außen dar. Bei dieser Konstruktion wurde ein feuchtevariable Dampfbremse auf der Schalung verlegt und eine 120 mm Aufsparrendämmung mit aufkaschierter dif-fusionsoffener Unterdeckbahn ISOVER ULTIMATE AP Supra-Plus-031 aufgebracht. Die ge-nauen Aufbauten beider Vari-anten sind in Tabelle 1 be-schrieben. Abbildung 2 zeigt links den Schnitt durch die Variante A, und rechts durch die Variante B.



Abbildung 1: Testgebäude im Fraunhofer Instituts für Bauphysik in Holzkirchen zur Untersuchung des Einflusses von PV-Anlagen bei unterschiedlichen Dachkonstruktionen.



Abbildung 2: Links: Variante A: Von innen sanierte Altbausituation mit außen diffusions-sperrender Bitumenabdichtung auf Holzschalung. Rechts: Variante B: Sanierung von außen mit feuchtevariabler Dampfbremse auf Holzschalung und Aufsparrendämmung mit aufkaschierter Unterdachbahn.

Bildquelle: SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG

Tabelle 1: Aufbau und Materialien der beiden untersuchten Konstruktionen von außen nach innen

| Schicht | Variante A (Altbau Sanierung von innen) | Variante B (Sanierung von außen) |
|-------------------------|---|---|
| Solaranlage | PV-Module auf Unterkonstruktion bzw. nicht belegtes Versuchsfeld | |
| Eindeckung | Frankfurter Pfanne in Rot | |
| Trag- und Konterlattung | 80 mm Luftraum | |
| Unterdachbahn | Bitumen-Unterdachbahn (Bauder TEC KSA) s _d -Wert 120 m | 120 mm ISOVER ULTIMATE AP SupraPlus-031 – Aufsparrendämmung mit Unterdeckbahn s _d -Wert 0,05 m |
| Aufsparrendämmung | – | ISOVER Vario KM Supraplex – SKS |
| Dampfbremse | – | |
| Holzschalung | 24 mm | |
| Zwischensparrendämmung | 180 mm ISOVER Integra ZFK 035 | 180 mm ISOVER Integra ZFK 032 |
| Dampfbremse | ISOVER Vario XtraSafe | – |
| Lattung | – * | 30 mm |
| Gipskarton Beplankung | – * | 12,5 mm |

* Für die dargestellten Simulationen wird bei der Konstruktion A raumseitig Lattung und Gipskartonbeplankung hinzugefügt.

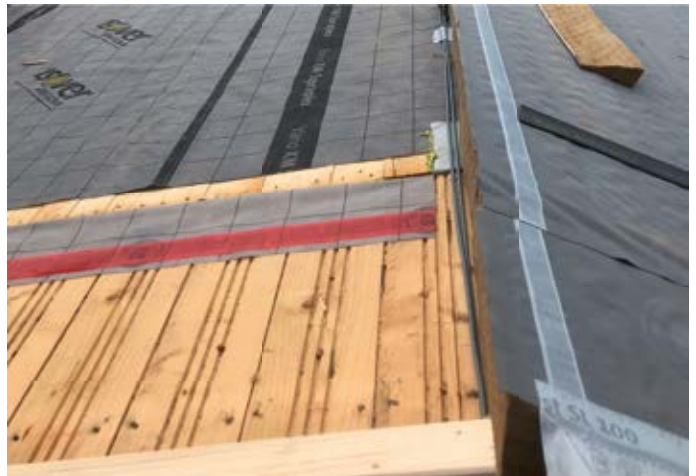


Abbildung 3: Varianten während des Versuchsaufbaus 2023. Links: Variante A mit fertig verlegter diffusions-sperrender Unterdachbahn, Konterlattung und Temperaturfühlern. Rechts: Variante B: Verlegung der Vario KM Supraplex – SKS auf der Holzschalung, rechte Dachhälfte: fertig verlegte Aufsparrendämmung mit aufkaschierter Unterdeckbahn ULTIMATE AP SupraPlus.

Abbildung 3 zeigt links die Variante A während des Versuchsaufbaus 2023. Bis auf den bestehenden Dachstuhl wurden alle Materialien und die Holzschalung erneuert. Zu sehen ist das fertig mit diffusions-sperrender Dachbahn und Konterlatten belegte Dach mit Temperaturfühlern. Die untersuchte Variante B ist während des Aufbaus in Abbildung 3 rechts dargestellt: Auf der linken Dachhälfte ist zu diesem Zeitpunkt die ISOVER Vario KM Supraplex – SKS auf der Holzschalung verlegt, auf der rechten Dachhälfte ist die Aufsparrendämmung mit aufkaschierter Unterdeckbahn ISOVER ULTIMATE AP SupraPlus fertig installiert.

Abbildung 4: Gemessene Temperaturen (gleitende Monatsmittel) der vier untersuchten Varianten von Oktober 2023 bis Oktober 2024. Konstruktion A Süd mit (schwarz) und ohne PV-Module (rot), Nordseite ohne PV (grün) und Konstruktion B Süd mit PV (blau).

Abbildung 1 zeigt das Versuchsgebäude mit den fertigen Dachaufbauten und PV-Modulen auf zwei Versuchsfeldern. Die linke Dachfläche zeigt die Variante A und die

rechte die Variante B mit der Aufsparrendämmung. Für aussagekräftige Messungen genügt es, je ein Versuchsfeld von der Traufe bis zum First mit PV-Modulen zu belegen, da sich in dieser Achse ein Temperaturprofil ausbildet [Kölsch 2017]. Die beiden identischen Dachräume unterhalb der Konstruktionen wurden während des Versuchs auf 20 °C bei 50 % r.F. klimatisiert, um Wohnraumbedingungen zu schaffen.

Erkenntnisse aus den Messungen

Von Oktober 2023 bis Oktober 2024 wurden die Temperaturen an verschiedenen Positionen in den Dachaufbauten gemessen. In Abbildung 4 sind die Temperaturen auf der Unterdachoberfläche in der Mitte zwischen Traufe und First dargestellt. Die gleitenden Monatsmitteltemperaturen der Variante A, Süd mit PV-Belegung sind schwarz und die ohne PV-Module rot dargestellt. Im Vergleich dazu sind die Temperaturen auf der Nordseite ohne PV grün dargestellt. Der blaue Verlauf zeigt die Temperaturen der Variante B mit PV-Modulen auf der Südseite.

Werden nun die Temperaturen der Varianten A mit und ohne PV verglichen, fällt auf, dass im Sommer die höchsten Temperaturen auf der Südseite ohne PV-Belegung (rot) auftreten und die niedrigsten auf der Südseite mit PV-Modulen (schwarz). Auf der Nordseite (grün) liegen die Temperatu-

ren von Frühjahr bis Herbst über denen der mit PV-Modulen belegten Südseite. Bereits hier zeigt sich, dass die geneigte Nordseite ohne PV feuchte-technisch nicht den kritischsten Fall darstellt.

In den Wintermonaten sind die Unterschiede mit und ohne PV aufgrund der geringen Solarstrahlung nur gering, wobei hier aufgrund des niedrigeren Sonnenstandes auf der Nordseite leicht niedrigere Temperaturen gemessen werden.

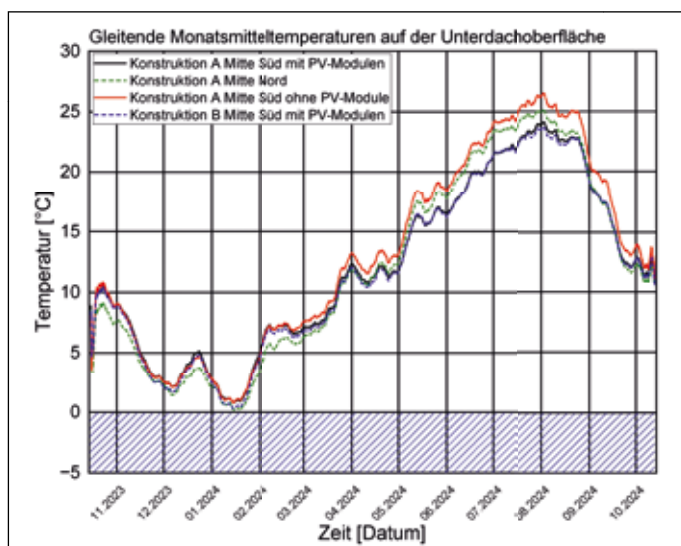
Ein Vergleich der Temperaturen der beiden Konstruktionen mit PV, Variante A, Sanierung von innen (schwarz) und B, Sanierung von außen (blau) ergibt im Jahresverlauf nur geringe Unterschiede.

Dies zeigt, dass die für das Feuchteverhalten maßgeblichen Temperaturen auf dem Unterdach hauptsächlich von der Verschattung durch die PV-Module und weniger durch die darunterliegende Dachkonstruktion beeinflusst werden.

Bewertung des Feuchteverhaltens durch hygrothermische Simulation

Nachfolgend werden durch hygrothermische Simulation mit WUFI® [Künzel 1994] die sich einstellenden Feuchtegehalte in der Holzschalung der beiden untersuchten Dächer (Sanierung von innen und außen) berechnet und bewertet. Dabei werden vier verschiedene Fälle betrachtet.

Auf Basis der gemessenen Temperaturen in den Dach-

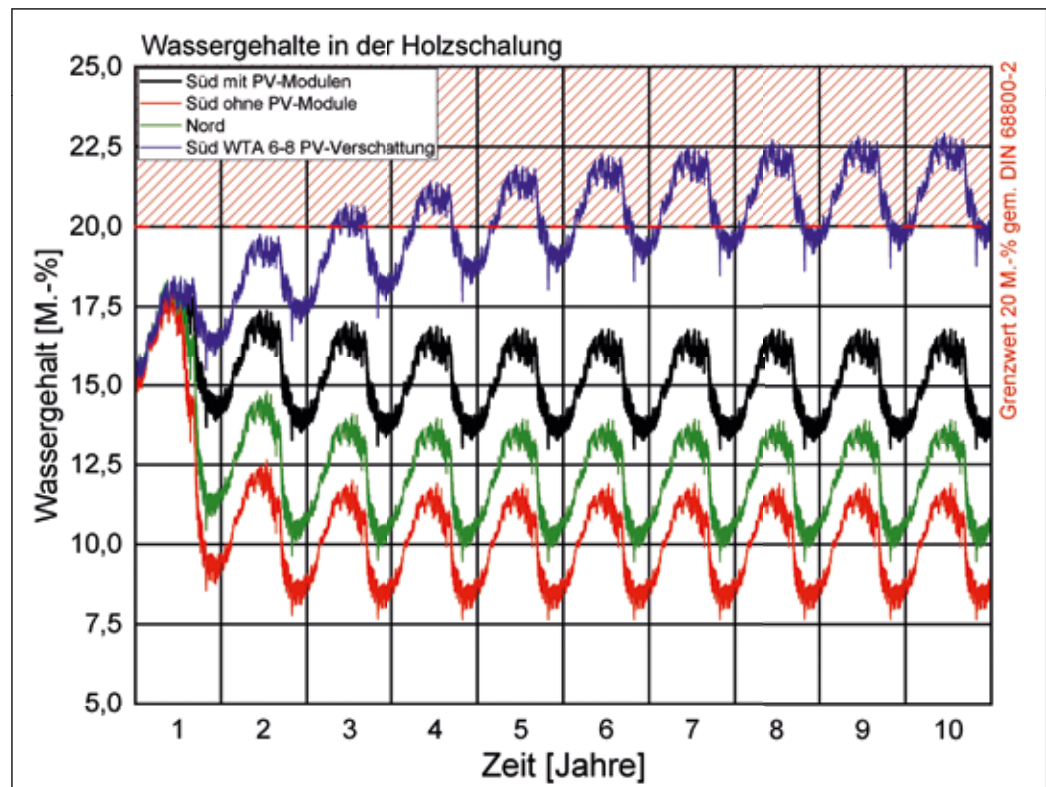


konstruktionen wurden die Klima- und Strahlungsparameter des Hygrothermischen Referenzjahres (HRY) für Holzkirchen so angepasst, dass sich in der Simulation die Bedingungen auf dem Unterdach mit PV-Modulen an der mittleren Position zwischen Traufe und First einstellen. Für die Konstruktion ohne PV-Module wurden die hygrothermischen Simulationsparameter für hinterlüftete Steildachkonstruktionen gem. [Kölsch 2017] verwendet. Im Vergleich dazu werden die beiden bisher bereits gelegentlich verwendeten Ansätze zur hygrothermischen Simulation von Steildächern mit PV-Belegung herangezogen: Zum einen eine im selben Winkel geneigte, nach Norden orientierte Dachfläche, bei der z.T. angenommen wurde, dass sie bereits die kritische Situation darstellt und somit auch die Situation Süd mit PV repräsentiert. Zum anderen der Ansatz nach WTA-Merkblatt 6-8 [WTA 2016] bzw. [Bludau, Kölsch 2014] für aufgeständerte PV-Module auf Flachdächern, der zwar nicht für Steildächer gedacht war, in Ermangelung anderer Untersuchungen jedoch teilweise vereinfacht auch für diese herangezogen wurde. Zur Berücksichtigung des konvektiven Feuchteintrags wird eine Infiltrationsquelle (IBP Klasse C) [Zirkelbach et al. 2009] in der Schalung platziert, die thermische Auftriebshöhe beträgt dabei 5 m. Das Innenklima wird als Bemessungsklima nach DIN 4108 [DIN 2024] vom HRY Holzkirchen abgeleitet.

Die Ergebnisse

Abbildung 5 zeigt die simulierten Wassergehaltsverläufe in der Holzschalung der Variante A unter verschiedenen Simulationsrandbedingungen.

Das Ergebnis des aus den Messergebnissen abgeleiteten Simulationsansatzes (schwarzer Wassergehaltsverlauf) zeigt, dass im Vergleich zur Südorientierung ohne PV-Module (roter Verlauf) durch die



PV-Modulen die Spitzen des Wassergehaltes um ca. 5 M.-% höher liegen. Der Wassergehalt bei Nordorientierung der Dachfläche (grüner Verlauf) liegt in den Spitzen ca. 3 M.-% unter dem schwarzen Verlauf. Er ist dementsprechend nicht als kritischer Ansatz für die Situation mit PV-Verschattung geeignet.

Der Wassergehalt bei Ansatz der Parameter des WTA-Merkblatts 6-8 [WTA 2016] für aufgeständerte Solarmodule auf einem Flachdach (blauer Verlauf) steigt über den gesamten Simulationszeitraum an und liegt ab dem dritten Simulationsjahr über dem Grenzwert von 20 M.-% der DIN 68800-2 [DIN 2022]. Ab dem sechsten Simulationsjahr liegt der Wassergehalt in den Spitzen mehr als 5 M.-% über dem schwarzen Verlauf. Daraus wird deutlich, dass dieser Ansatz zu kritisch und für Steildächer weniger geeignet ist bzw. für eine sinnvolle Bewertung zu weit auf der sicheren Seite liegt.

Einfluss der Eingabedaten auf die Simulationsergebnisse

Es ist wichtig zu erwähnen, dass Simulationsergebnisse

immer nur so gut sind, wie die zu Grunde gelegten Eingabedaten. Dies betrifft zum einen das Simulationsmodell zur Berücksichtigung von Solaranlagen auf Steildachkonstruktionen, welches aktuell noch für die einfache Anwendung in der Praxis finalisiert und validiert wird, zum anderen die Materialkennwerte.

Abbildung 5: Wassergehalte in der Holzschalung der Variante A über einen Simulationszeitraum von 10 Jahren unter verschiedenen Simulationsrandbedingungen. Schwarzer Verlauf: Südorientierung mit PV-Modulen (realistischer Ansatz aus Messergebnissen), Roter Verlauf: Süd ohne PV-Module, Grüner Verlauf: Nordorientierung, Blauer Verlauf: Simulationsansatz nach WTA 6-8 für aufgeständerte PV-Module auf Flachdächern.

INFOKASTEN

Einfluss der feuchtevariablen Dampfbremsen

Die verschiedenen variablen Dampfbremsen unterscheiden sich oft weniger durch die absolute Spreizung von Trocken- und Feuchtebereich, sondern vor allem durch Lage und Verlauf des Umschlagsbereichs von diffusionsoffen zu diffusionshemmend. Parallele Untersuchungen [Schmidt et al. 2025] haben gezeigt, dass dieser Umschlagbereich in Kombination mit den dann vorliegenden Diffusionswiderständen ausschlaggebend für die Funktionalität ist.

Werden bei der Messung zu wenige Stützpunkte verwendet oder bei der Auswertung das Feuchteprofil in der Dampfbremse selbst nicht berücksichtigt, kann dies, vor allem bei eher kritischen Konstruktionen zu einer deutlichen Abweichung vom realen Verhalten und damit zu einer Fehleinschätzung führen. Der hier verwendete Datensatz der ISOVER XtraSafe basiert auf acht über den gesamten Feuchtebereich verteilten Einzelmessungen. Durch die Überlappung der Messbereiche wird die Auflösung weiter erhöht und sichergestellt, dass der Zusammenhang zwischen Diffusionswiderstand und relativer Feuchte der Bahn zuverlässig und mit der angemessenen Genauigkeit abgeleitet werden kann.

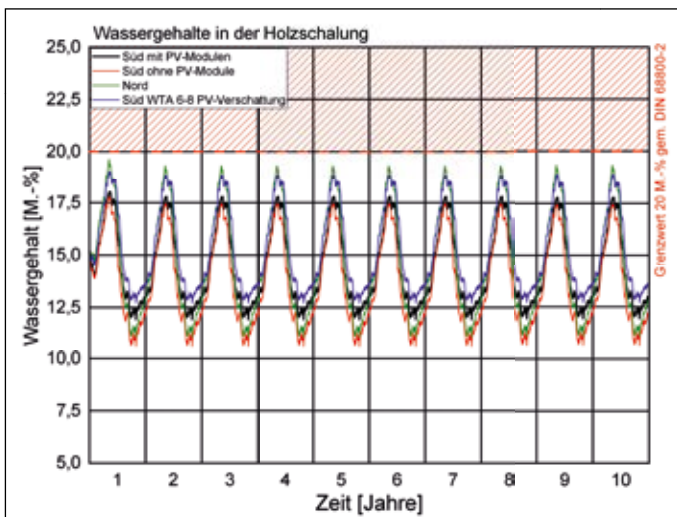


Abbildung 6: Wassergehalte in der Holzschalung der Variante B über einen Simulationszeitraum von 10 Jahren unter verschiedenen Simulationsrandbedingungen.

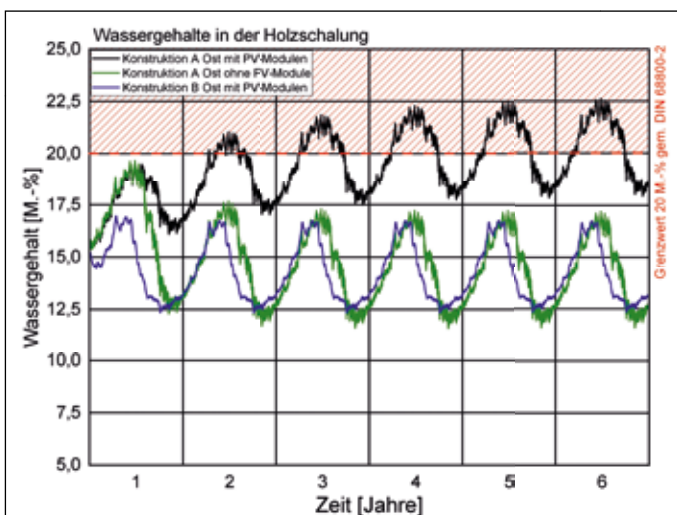
Schwarzer Verlauf: Südorientierung mit PV-Modulen (realistischer Ansatz aus Messergebnissen)
 Roter Verlauf: Süd ohne PV-Module
 Grüner Verlauf: Nordorientierung
 Blauer Verlauf: Simulationsansatz nach WTA 6-8 für aufgeständerte PV-Module auf Flachdächern.

Notwendigkeit der detaillierten Betrachtung

In Abbildung 6 sind die simulierten Wassergehaltsverläufe in der Holzschalung der Variante B dargestellt. Durch den Konstruktionsaufbau mit Aufsparrendämmung sind die Unterschiede zwischen den Simulationsansätzen weniger ausgeprägt als bei der Variante A. Die mit Hilfe des aus den Messergebnissen abgeleiteten Simulationsansatzes berechneten Wassergehalte sind auch hier als schwarzer Verlauf dargestellt. Aufgrund der raumseitig fehlenden Dampfbremse werden im Vergleich zu Variante A in den Spitzen leicht höhere Werte erreicht.

Die simulierten Wassergehalte bei Südorientierung (roter Verlauf) trocknen im Vergleich zum schwarzen Verlauf in den Sommermonaten etwas stärker aus. Im Winter werden ähnlich hohe Wassergehalte

Abbildung 7: Wassergehalte in der Holzschalung der Variante A, 45° in Hamburg nach Ost orientiert mit PV-Modulen als schwarzer Verlauf (realistischer Ansatz aus Messergebnissen), ohne PV-Module (grün) sowie Variante B mit PV-Modulen (blau).



um die 17,5 M.-% erreicht.

Die Simulation bei Nordorientierung führt, ebenso wie der Ansatz gem. WTA 6-8 [WTA 2016], in den winterlichen Spitzen zu Wassergehalten von ca. 19 M.-%. Beide Ergebnisse liegen damit knapp unterhalb des Grenzwertes von 20 M.-% gem. DIN 68800-2 [DIN 2022]. Bei der Sanierungsvariante führen somit beide alternativen Simulationsansätze (Nord und Verschattung nach WTA [WTA 2016]) zu höheren Wassergehalten in der Holzschalung als die Simulation mit dem neuen Verschattungsansatz.

Bei der von innen sanierten und außen diffusionssperrende Variante A ergaben sich für diese beiden Varianten unterschiedliche Ergebnisse. Dies macht deutlich, dass es bei Konstruktionen, die keine großen Sicherheiten aufweisen, sinnvoll ist, jede Steildachkonstruktion mit Solaranlage individuell zu bewerten.

Anderer Standort und andere Orientierung

Im Folgenden werden Dachflächen mit PV-Modulen untersucht, die eine Ost-West-Orientierung aufweisen, diese haben den Vorteil eines über den Tag gleichmäßigeren Energiegewinns. Dazu wird die von innen sanierte Altbaukonstruktion (Variante A) mit einer diffusionssperrenden Bitumen-Unterdachbahn betrachtet. Beispielhaft wird eine 45° nach Ost geneigte Dachfläche in Hamburg als zwar wärmerer, aber strahlungsärmerer Standort mit und ohne PV-Anlage simuliert.

Abbildung 7 zeigt die mit WUFI® simulierten Wassergehaltsverläufe ohne (grün) und mit PV-Belegung (schwarz). Es zeigt sich, dass die Variante ohne Solaranlage langfristig geringe Wassergehalte aufweist und somit dauerhaft funktionsfähig ist. Die nachträgliche Belegung mit PV-Modulen führt jedoch trotz feuchtevariabler Dampfbremse auf der Raumseite zu ansteigenden Wassergehalten in der Schalung. Bereits im zweiten

Jahr wird der Grenzwert von 20 M.-% [DIN 2022] überschritten. Die feuchtevariable Dampfbremse wirkt sich generell positiv auf das Feuchteverhalten der Dächer aus – es kann aber nicht pauschal angenommen werden, dass jede Konstruktion mit einer feuchtevariablen Dampfbremse in Kombination mit PV-Modulen funktioniert. Die Feuchtesicherheit einer Konstruktion nach DIN 4108-3 [DIN 2024] ist daher wie oben bereit erwähnt im Zweifel individuell zu prüfen.

Im Vergleich dazu wird die Sanierungsvariante von außen (Variante B) unter identischen Randbedingungen mit PV-Verschattung betrachtet. Die Ergebnisse für den Wassergehalt in der Holzschalung (blauer Verlauf) bleiben dabei auf einem ähnlichen Niveau wie bei Variante A ohne PV-Module (grüner Verlauf) und daher langfristig im unkritischen Bereich. In diesem Fall wäre also die Sanierung von außen feuchte technisch wesentlich günstiger als eine Sanierung von innen.

Fazit:

Aus den durchgeführten Freilanduntersuchungen geht hervor, dass die Temperaturen auf dem Unterdach durch PV-Module deutlich reduziert werden und sich dadurch kritischere Feuchtesituationen in der Dachkonstruktion einstellen. Weiterhin wurde festgestellt, dass eine vereinfachte Simulation der geneigten Nordorientierung ohne PV günstiger und der Ansatz nach WTA-Merkblatt 6-8 [WTA 2016] für verschatteten Flachdachkonstruktion eher zu kritischen Bedingungen aufweist. Beide sind dementsprechend nicht für die genaue Bewertung von Steildächern mit Solaranlagen geeignet.

Vor allem unsanierte oder von innen sanierte Altbaukonstruktionen, die außen eine diffusionssperrende Bahn aufweisen, sind diesbezüglich kritisch. Feuchtevariable Dampfbremsen auf der Raumseite entschärfen die Situati-

on, sind aber, wie die Simulationen gezeigt haben, keine pauschale Garantie für die feuchtetechnische Funktionalität. In allen Fällen muss auf eine sorgfältig ausgeführte Luftdichtigkeit geachtet werden, da die Konstruktionen durch die Belegung mit Solarmodulen häufig in einen sensiblen Bereich verschoben werden, wodurch sie besonders kritisch auf durch Luftströmungen eindringende Feuchte reagieren.

Die Funktionsfähigkeit von Steildachkonstruktionen mit PV-Modulen ist vom Konstruktionsaufbau, den verwendeten Materialien, der Neigung und Orientierung sowie dem Standort abhängig. Daraus wird deutlich, dass die o.g. Konstruktionstypen generell auf ihre feuchtetechnische Eignung zur Belegung mit Solaranlagen geprüft werden sollten. Hierfür sind neben geeigneten Simulationsparametern, die das Verhalten von

Steildächern mit Solarmodulen adäquat abbilden auch genaue Materialkennwerte, vor allem für feuchtevariable Dampfbremsen erforderlich [Schmidt et al. 2025].

Das Simulationsmodell wird aktuell noch validiert und ist voraussichtlich Anfang 2026 verfügbar. Es bietet künftig die Möglichkeit, Steildächer mit Solaranlagen individuell hygrothermisch zu bemessen und die Eignung für die Belegung zu überprüfen oder ggf. geeignete Zusatzmaßnahmen zu erarbeiten. ■

Das Projekt wurde von der SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG gefördert.

Literatur:

[Bludau, Kölsch 2014] Bludau, Ch.; Kölsch, Ph.: Verschattung von Holzflachdächern, In: Tagungsband zum 5. Internationalen Holz[Bau]Physik-Kongress 2014, Leipzig 2014.

[DIN 2022] DIN 68800-2:2022-02: Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende

bauliche Maßnahmen im Hochbau. Berlin: Beuth Verlag, 2022.

[DIN 2024] DIN 4108-3:2024-03 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Berlin: Beuth Verlag, 2024.

[Kölsch 2017] Kölsch, Ph.: Hygrothermische Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangsparametern. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP. 2017.

[Kölsch et al. 2025] Kölsch, Ph.; Zirkelbach, D.; Bludau, Ch.: IBP-Mitteilung 585, 52 (2025), Risikopotential von Steildachkonstruktionen mit Solaranlagen. Fraunhofer IBP 2025.

[Künzel 1994] H. M. Künzel, »Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten« Dissertation Universität Stuttgart, 1994.

[Schmidt et al. 2025] Schmidt, T.; Lengsfeld, K.; Tanaka, E.; Zirkelbach, D.: Variable Dampfbremsen: Ermittlung feuchteabhängiger Diffusionswiderstände aus Cup-Messungen. Bauphysik 47, Heft 5, S. 311-318. 2025.

[WTA 2016] WTA-Merkblatt 6–8, »Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – vereinfachte Nachweise und Simulation,« August 2016.

[Zirkelbach et al. 2009] Zirkelbach, D.; Künzel, H.M.; Schafaczek, B.; Borsch-Laaks, R.: Dampfkongression wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen. 4th Intern. Symposium on Building Ductwork Air Tightness. 30th AIVC Conference. October 1-2, Berlin Germany.

Anzeige



Geprüftes System, sichere Sache: Vario® – das Original.

- **Mehr als 25 Jahre Erfahrung:** Kompetenz, die überzeugt
- **Geprüftes Komplettsystem:** Membran, Klebe- und Dichtprodukt – perfekt abgestimmt
- **Wohngesund:** Hochwertige, schadstoffarme Materialien

isover.de/vario-und-pv

Vario® Xtra System

NEU

für Sicherheit bei PV-Anlagen

