© RM Rudolf Müller Medien GmbH & Co. KG, Köln 2025. Jede Vervielfältigung und Verbreitung ohne Zustimmung des Verlags ist unzulässig.

Abb. 1: So sah der fertige Versuchsaufbau aus: die linke Dachfläche Konstruktion A, die rechte Konstruktion B.

Freilanduntersuchungen an Steildächern mit PV

Photovoltaik: 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. Eine Belegung der Dachfläche mit einer PV-Anlage verändert maßgeblich die Temperaturen in der Dachkonstruktion und somit deren Feuchteverhalten.

Philipp Kölsch, Dr. Ing. Daniel Zirkelbach

Eine Aufdach-PV-Anlage verschattet die Dachfläche und führt gleichzeitig Energie ab, die sonst zur Erwärmung zur Verfügung steht. Das führt dazu, das die Dachkonstruktionen vor allem im Sommer deutlich kühler bleiben als vergleichbare Dächer ohne PV-Anlage [1]. Bisher war jedoch unklar, inwieweit sich die Temperaturen verändern und wie sich dies auf die Feuchteverhältnisse in der Konstruktion auswirkt. Um dies genauer zu untersuchen, wurden an Steildachkonstruktionen auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen Untersuchungen mit in Betrieb befindlichen PV-Anlagen durchgeführt.

Versuchsaufbau

An einer 16° nach Nord und Süd geneigten Dachkonstruktion wurden an verschiedenen Versuchsfeldern mit und ohne PV-Modulen zwei verschiedene Dachaufbauten untersucht. Hierzu wurden an drei Achsen zwischen Traufe und First an unterschiedlichen Positionen im Dachaufbau die Temperaturen gemessen. Aufbau A stellt eine typische, von innen sanierte Altbausituation mit einer 180 Millimeter dicken Zwischensparrendämmung und einer diffusionssperrenden Bitumen-Unterdachbahn auf einer Holzschalung dar. Auf der Raumseite wurde eine feuchtevariable Dampfbremse Isover Vario XtraSafe verlegt. Der Aufbau B stellt eine Sanierungslösung von außen dar. Bei dieser Konstruktion wurde ein feuchtevariable Dampfbremse auf der Schalung verlegt und eine 120 Millimeter Aufsparrendämmung mit aufkaschierter diffusionsoffener Unterdeckbahn Isover Ultimate AP SupraPlus-031 aufgebracht. Die genauen Aufbauten beider Konstruktionen sind in Tabelle 1 beschrieben.
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 [3]. Die beiden identischen Dachräume unterhalb der Konstruktionen wurden während des Versuchs auf 20 °C bei 50 Prozent r.F. klimatisiert, um Wohnraumbedingungen zu schaffen.

Ergebnisse

Von Oktober 2023 bis Oktober 2024 wurden die Temperaturen an verschiedenen Positionen in den Dachaufbauten gemessen. In Abbildung 6 sind die Temperaturen auf der Unterdachoberfläche in der Mitte zwischen Traufe und First dargestellt. Die gleitenden Monatsmitteltemperaturen der Konstruktion 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.

© RM Rudolf Müller Medien GmbH & Co. KG, Köln 2025. Jede Vervielfältigung und Verbreitung ohne Zustimmung des Verlags ist unzulässig.

Schicht	Konstruktion A (Altbau Sanierung von innen)	Konstruktion 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	--	
Dampfbremse	--	ISOVER Vario KM Supraplex – SKS
Holzschalung	24 mm	
Zwischensparrendämmung	180 mm ISOVER Integra ZFK-034	180 mm ISOVER Integra ZFK-031
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.		

Bildquelle: Fraunhofer-IBP

Tabelle 1

Bildquelle: Saint Gobain Isover G+H AG

Abb. 2: Konstruktion A: Von innen sanierte Altbausituation mit außen diffusionssperrender Bitumenabdichtung auf Holzschalung.

Bildquelle: Fraunhofer-IBP

Abb. 4: Konstruktion A während des Versuchsaufbaus 2023: Fertig verlegte diffusionssperrende Unterdachbahn mit Konterlattung und Temperaturfühlern.

Bildquelle: Saint Gobain Isover G+H AG

Abb. 3: Konstruktion B: Sanierung von außen mit feuchtevariabler Dampfbremse auf Holzschalung und Aufsparrendämmung mit aufkaschierter Unterdachbahn.

Bildquelle: Fraunhofer-IBP

Abb. 5: Konstruktion B während des Versuchsaufbaus 2023. Linke Dachhälfte: Verlegung der feuchtevariablen Klimamembran auf der Holzschalung, rechte Dachhälfte: fertig verlegte Aufsparrendämmung mit aufkaschierter Unterdeckbahn.

© RM Rudolf Müller Medien GmbH & Co. KG, Köln 2025. Jede Vervielfältigung und Verbreitung ohne Zustimmung des Verlags ist unzulässig.

Der blaue Verlauf zeigt die Temperaturen der Konstruktion B mit PV-Modulen auf der Südseite.
Werden nun die Temperaturen der Konstruktion 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 Temperaturen von Frühjahr bis Herbst über denen der mit PV-Modulen belegten Südseite. Bereits hier zeigt sich, dass die geneigte Nordseite ohne PV feuchtetechnisch 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 Konstruktion A, Sanierung von innen (schwarz), und B, Sanierung von außen (blau) zeigt im Jahresverlauf nur geringe Unterschiede. Dies zeigt, dass die für das Feuchteverhalten maßgeblichen Temperaturen auf dem Unterdach hauptsächlich von der Belegung mit PV-Modulen und weniger durch die darunterliegende Dachkonstruktion beeinflusst werden.

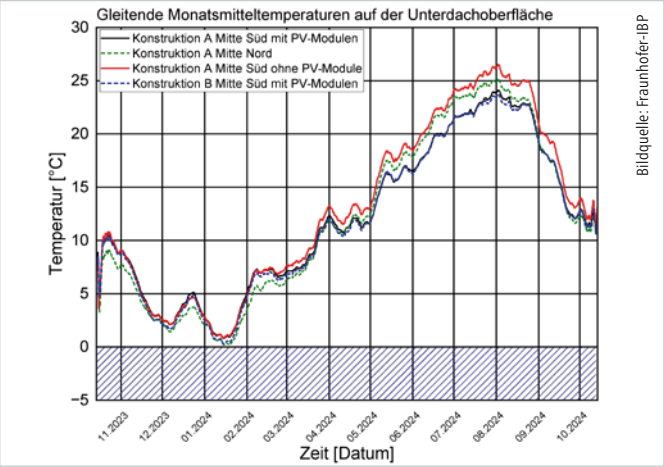

Abb. 6: Gemessene Temperaturen (gleitende Monatsmittel) der vier untersuchten Varianten von Oktober 2023 bis Oktober 2024. Konstruktion A Süd mit (schwarz) und ohne PV-Module (rot), Nordseite ohne PV (grün) und Konstruktion B Süd mit PV (blau).

Bewertung des Feuchteverhaltens durch hygrothermische Simulation

Nachfolgend werden durch hygrothermische Simulation mit WUFI® [2] die sich einstellenden Feuchtegehalte in der Holzschalung der beiden untersuchten Dächer (Sanierung von innen und außen) berechnet und bewertet. Dabei werden vier verschiedene Varianten betrachtet.
Auf Basis der gemessenen Temperaturen in den Dachkonstruktionen wurden die Klima- und Strahlungsparameter des Hygrothermischen Referenzjahres (HRY) [8] 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. [3] 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 zum Teil 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 [4] bzw. [5] für aufgeständerte PV-Module auf Flachdächern, der zwar nicht für Steildächer gedacht war, in Ermangelung anderer Untersuchungen jedoch ebenfalls vereinfacht auch für diese herangezogen wurde.
Abbildung 7 zeigt die simulierten Wassergehaltsverläufe in der Holzschalung der Konstruktion A unter verschiedenen Simulationsrandbedingungen.
Das Ergebnis des aus den Messergebnissen abgeleiteten Simulationsansatzes wird als schwarzer Wassergehaltsverlauf gezeigt. Im Vergleich dazu ist der Wassergehalt bei Südorientierung ohne PV-Module als roter Verlauf dargestellt. Es zeigt sich, dass mit PV-Modulen bei dieser Konstruktion die Spitzen des Wassergehaltes um circa 5 M.-% höher liegen als ohne PV-Module. Als grüner Verlauf ist der Wassergehalt bei Nordorientierung der Dachfläche dargestellt. Dieser liegt in den Spitzen circa 3 M.-% unter dem schwarzen Verlauf und ist dementsprechend nicht als kritischer Ansatz für die Situation mit PV-Verschattung geeignet. Der Wassergehalt bei Ansatz der Parameter des WTA-Merkblatts 6-8 [4] für aufgeständerte Solarmodule auf einem Flachdach ist als blauer Verlauf dargestellt. Hier steigt der Wassergehalt über den gesamten Simulationszeitraum an und liegt ab dem dritten Simulationsjahr über dem Grenzwert von 20 M.-% der DIN 68800-2 [6]. 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.
An dieser Stelle soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass Simulationsergebnisse immer nur so gut sein können, wie die zugrunde gelegten Eingabedaten. Dies betrifft zum einen das Simulationsmodell zur Berücksichtigung von Solaranlagen auf Steildachkonstruktionen, welches aktuell noch für die Praxisanwendung finalisiert und validiert wird. Zum anderen gilt dies natürlich auch für die verwendeten Materialdaten – hier im aktuellen Fall besonders die Feuchtevariabilität der verwendeten Dampfbremsen. Die verschiedenen variablen Dampfbremsen unterscheiden sich oft weniger durch die absolute Spreizung, sondern vor allem durch Lage und Verlauf des Umschlagsbereichs von diffusionsoffen zu diffusionshemmend. Parallele Untersuchungen haben gezeigt, dass jedoch vor allem dieser Umschlagbereich von feuchtevariablen Dampfbremsen 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, bei denen die genauen Eigenschaften der variablen Dampfbremse entscheidend sind, 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 Zu-

© RM Rudolf Müller Medien GmbH & Co. KG, Köln 2025. Jede Vervielfältigung und Verbreitung ohne Zustimmung des Verlags ist unzulässig.

sammenhang zwischen Diffusionswiderstand und relativer Feuchte der Bahn zuverlässig und mit der angemessenen Genauigkeit abgeleitet werden kann.

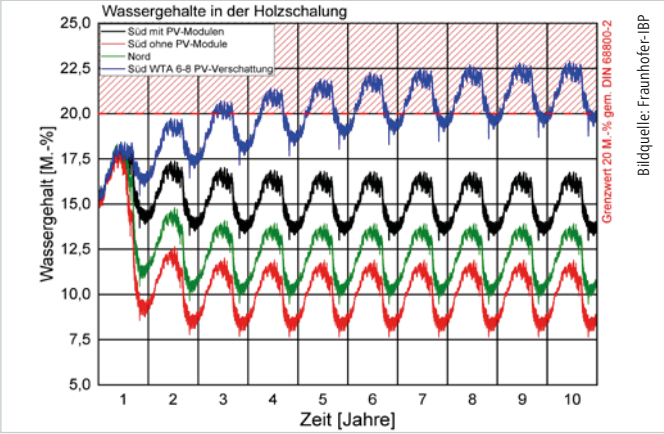

Abb. 7: Wassergehalte in der Holzschalung der Konstruktion A über einen Simulationszeitraum von 10 Jahren unter verschiedenen Simulationsrandbedingungen. Südorientierung mit PV-Modulen als schwarzer Verlauf (realistischer Ansatz aus Messergebnissen), Süd ohne PV-Module als roter Verlauf, Nordorientierung als grüner Verlauf und Simulationsansatz nach WTA 6-8 für aufgeständerte PV-Module auf Flachdächern als blauer Verlauf.

In Abbildung 8 sind die simulierten Wassergehaltsverläufe in der Holzschalung der Konstruktion B dargestellt. Durch den Konstruktionsaufbau mit Aufsparrendämmung sind die Unterschiede zwischen den Varianten weniger ausgeprägt als bei der Konstruktion A. Die mithilfe des aus den Messergebnissen abgeleiteten Simulationsansatzes berechneten Wassergehalte sind auch hier als schwarzer Verlauf dargestellt. Aufgrund der raumseitig fehlenden Dampfbremse werden im Vergleich zu Konstruktion A in den Spitzen leicht höhere Werte erreicht. Die simulierten Wassergehalte bei Südorientierung ohne PV sind als roter Verlauf dargestellt. Im Vergleich zum schwarzen Verlauf trocknet diese Variante in den Sommermonaten etwas stärker aus, im Winter werden ähnlich hohe Wassergehalte um die 17,5 M.-% erreicht. Die Simulation bei Nordorientierung führt, ebenso wie der Ansatz gem. WTA 6-8 [4], in den winterlichen Spitzen zu Wassergehalten von circa 19 M.-%. Beide Ergebnisse liegen damit knapp unterhalb des Grenzwertes von 20 M.-% gem. DIN 68800-2 [6]. Bei der Sanierungsvariante führen somit beide alternativen Simulationsansätze (Nord und Verschattung nach WTA [4]) zu höheren Wassergehalten in der Holzschalung als die Simulation mit dem neuen Verschattungsansatz. Bei der von innen sanierten (Konstruktion A) ergaben sich für diese beiden Varianten deutlich unterschiedliche Ergebnisse. Dies macht deutlich, dass es bei Konstruktionen, die keine großen Sicherheiten aufweisen, sinnvoll ist, jede Steildachkonstruktion mit Solaranlage individuell zu bewerten.

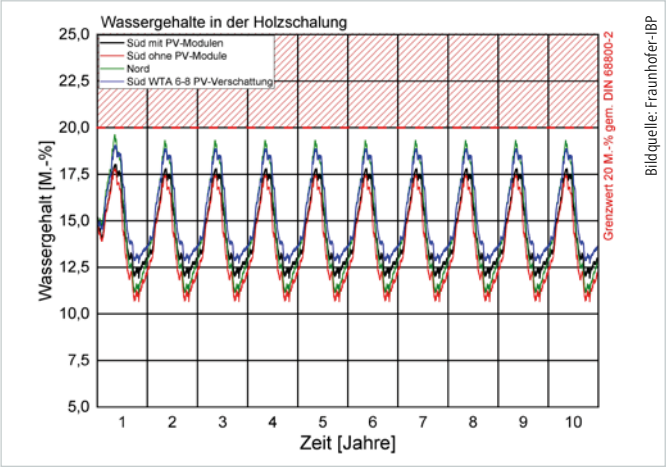

Abb. 8: Wassergehalte in der Holzschalung der Konstruktion B über einen Simulationszeitraum von 10 Jahren unter verschiedenen Simulationsrandbedingungen. Südorientierung mit PV-Modulen als schwarzer Verlauf (realistischer Ansatz aus Messergebnissen), Süd ohne PV-Module als roter Verlauf, Nordorientierung als grüner Verlauf und Simulationsansatz nach WTA 6-8 für aufgeständerte PV-Module auf Flachdächern als blauer Verlauf.

Anzeige

© RM Rudolf Müller Medien GmbH & Co. KG, Köln 2025. Jede Vervielfältigung und Verbreitung ohne Zustimmung des Verlags ist unzulässig.

Feuchteverhalten in Hamburg

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 (Konstruktion A) mit einer diffusionssperrenden Bitumen-Unterdachbahn betrachtet. Beispielhaft wird eine 45° nach Ost geneigte Dachfläche in Hamburg als eher strahlungsärmerer Standort mit und ohne Solaranlage simuliert.

Abbildung 9 zeigt die mit WUFI® simulierten Wassergehaltsverläufe ohne (grün) und mit PV-Belegung (schwarz). Es zeigt sich, dass die Konstruktion 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.-% [6] 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 [7] ist daher, wie oben bereits erwähnt, im Zweifel individuell zu prüfen.

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

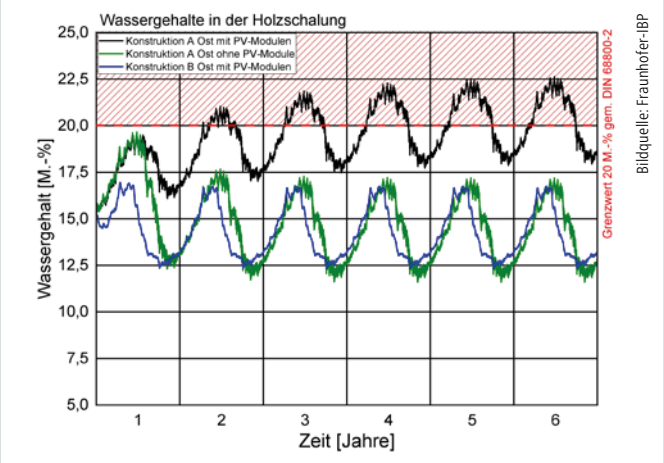

Abb. 9: Wassergehalte in der Holzschalung der Konstruktion A, 45° in Hamburg nach Ost orientiert mit PV-Modulen als schwarzer Verlauf (realistischer Ansatz aus Messergebnissen), ohne PV-Module (grün) sowie Konstruktion B mit PV-Modulen (blau).

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 können. Weiterhin wurde festgestellt, dass eine vereinfachte Simulation der geneigten Nordorientierung günstigere und der Ansatz nach WTA-Merkblatt 6-8 [4] für verschattete Flachdachkonstruktion eher kritische 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 Situation, sind aber, wie die Simulationen gezeigt haben, keine pauschale Garantie für die feuchtetechnische Funktionalität. In allen Fällen muss auf eine sorgfältig ausgeführte Luftdichtig-

[1]	Kölsch, Ph.; Zirkelbach, D.; Bludau, Ch.: IBP-Mitteilung 585, 52 (2025), Risikopotenzial von Steildachkonstruktionen mit Solaranlagen. Fraunhofer IBP, 2025.
[2]	H. M. Künzel, „Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten“, Dissertation Universität Stuttgart, 1994.
[3]	Kölsch, Ph.: Hygrothermische Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangsparametern. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, 2017.
[4]	WTA-Merkblatt 6–8, „Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – vereinfachte Nachweise und Simulation“, August 2016.

© RM Rudolf Müller Medien GmbH & Co. KG, Köln 2025. Jede Vervielfältigung und Verbreitung ohne Zustimmung des Verlags ist unzulässig.

keit 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 oben genannten 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. Denn, wie sich gezeigt hat, sind hier vor allem die Lage des Umschlagbereichs von diffusionsoffen zu diffusionshemmend, und nicht nur die sich im Trocken- und Feuchtbereich einstellenden Diffusionswiderstände, ausschlaggebend für die Funktionalität.
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 gegebenenfalls geeignete Zusatzmaßnahmen zu erarbeiten.
Das Projekt wurde von der Saint Gobain Isover G+H AG gefördert. //

Über den Autor

M.Eng. Philipp Kölsch
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Hygrothermik am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen.

Über den Autor

Dr. Ing. Daniel Zirkelbach
ist stellvertretender Leiter der Abteilung Hygrothermik und Technischer Leiter des Feuchtelabors am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen.

Anzeige