

Hygrothermische Simulation von Steildächern mit Solaranlagen

Durch die vermehrte Nutzung regenerativer Energiequellen werden immer mehr Dachflächen mit Solaranlagen belegt. Aufgrund einer Großzahl bisher ungenutzter Dachflächen ist zu erwarten, dass diese Entwicklung weiter zunimmt. Eine Solaranlage beeinflusst jedoch deutlich das Temperaturverhalten der darunterliegenden Dachkonstruktion. Für das Feuchteverhalten von Steildachkonstruktionen ist die Oberflächentemperatur auf dem Unterdach aber eine maßgebende Einflussgröße. Diese wird durch eine Solaranlage tagsüber deutlich reduziert, während sie nachts durch die Dämpfung der langwelligen Strahlungsverluste etwas höher bleibt. Um diese geänderten Randbedingungen adäquat berücksichtigen zu können und eine sichere feuchtetechnische Planung zu ermöglichen, werden in dem vorliegenden Aufsatz hygrothermische Simulationsmodelle mit effektiven Übergangsparmeter vorgestellt, die aus Forschungsergebnissen an verschiedenen Dachkonstruktionen mit und ohne Solaranlagen resultieren.

Stichworte Luftschichten; Hygrothermische Simulation; WUFI; Steildächer; Solaranlagen; PV-Module; Effektive Wärmeübergangsparmeter; Wärmeübertragung; Feuchte

Hygrothermal simulation of pitched roofs with solar systems

In consequence of an increased usage of renewable energy sources, the number of roof surfaces are being covered with solar panels is steadily rising. Considering the extensive scale of previously unused roof surfaces, this trend is expected to continue. However, a solar panel significantly influences the temperature behavior of the roof structure underneath. But the surface temperature on the sub-roof is a decisive factor in the moisture behavior of pitched roof structures. This is significantly reduced by a solar panel during the day, while it remains slightly higher at night due to the attenuation of long-wave radiation losses. To adequately take these changed boundary conditions into account and enable reliable moisture planning, this article presents hygrothermal simulation models with effective transfer parameters based on research results from various roof structures with and without solar panels investigated at field trails.

Keywords air layers; hygrothermal simulation; WUFI; pitched roofs; solar systems; PV modules; effective heat transfer parameters; heat transfer; moisture

1 Problemstellung

Bei Bestandskonstruktionen könnte eine nachträgliche Belegung mit Solaranlagen unter ungünstigen Randbedingungen zur Folge haben, dass bisher funktionsfähige Dachkonstruktionen mittel- bis langfristig versagen. In Neubau und Sanierung kann eine Solaranlage dazu führen, dass erhöhte Einbaufeuchten langsamer austrocknen oder es im schlimmsten Fall auch hier zu Schäden kommt. Vor allem in kritischeren Situationen wie z. B. bei außen dampfbremsenden Unterdachbahnen sollte daher überprüft werden, ob die Dachkonstruktionen an diese geänderten Randbedingungen angepasst werden müssen. Während bei Flachdächern schon seit längerer Zeit bekannt ist, dass eine Belegung mit z. B. aufgeständerten PV-Modulen das hygrothermische Verhalten der Dachkonstruktion darunter beeinflusst und hierfür auch bereits Simulationsansätze erstellt wurden [1], welche in die einschlägigen Richtlinien [2] eingeflossen sind, fand die Belegung von Steildachkonstruktionen mit Solaranlagen dahingehend kaum Betrachtung, da bisher wenig Schadensfälle bekannt sind. Durch den verstärkten Ausbau von PV-Anlagen auf Steildachkonstruktionen und die gemäß DIN 4108-3 [3] einzuhaltenden Feuchteschutzanforderungen häufen sich die Fragen zur Nachweis- und Funktionsfähigkeit solcher Konstruktionen. Da in diesen

Fällen ein Nachweis des Feuchteschutzes mit dem vereinfachten Glaser-Verfahren [3] nicht möglich ist, muss auf den Anhang D, hygrothermische Simulationsverfahren mit z. B. WUFI® [4, 5] zurückgegriffen werden. Einen Modellansatz zur Berücksichtigung von Solaranlagen gibt es bisher jedoch nicht, weshalb gelegentlich auf das im WTA-Merkblatt 6–8 [2] enthaltene Modell zur Verschattung von Flachdächern zurückgegriffen wurde. Dies führt jedoch häufig dazu, dass Konstruktionen nicht positiv nachgewiesen werden können, obwohl sie real vielleicht doch funktionieren. Um diese Lücke zu schließen und auch Steildachkonstruktionen mit Solaranlagen zuverlässig bewerten zu können, wurden die hier vorgestellten Untersuchungen durchgeführt. Eine kurze Zusammenfassung dieser Ergebnisse ist bereits in der IBP-Mitteilung 585 [6] sowie etwas ausführlicher in [7] erschienen.

Untersucht wurde das hygrothermische Verhalten von Steildachkonstruktionen mit unterschiedlichen Dachneigungen an verschiedenen Standorten, die sowohl mit Aufdach-PV-Modulen als auch mit einer thermischen Solaranlage in Form von Vakuumröhrenkollektoren belegt waren. Bild 1 zeigt schematisch die Wärmeübertragungsvorgänge an einer Steildachkonstruktion. Für die Aufdach-Solaranlage (Bild 1b) ergibt sich eine zweite Belüftungsebene, wodurch die Anzahl der strahlungs- und

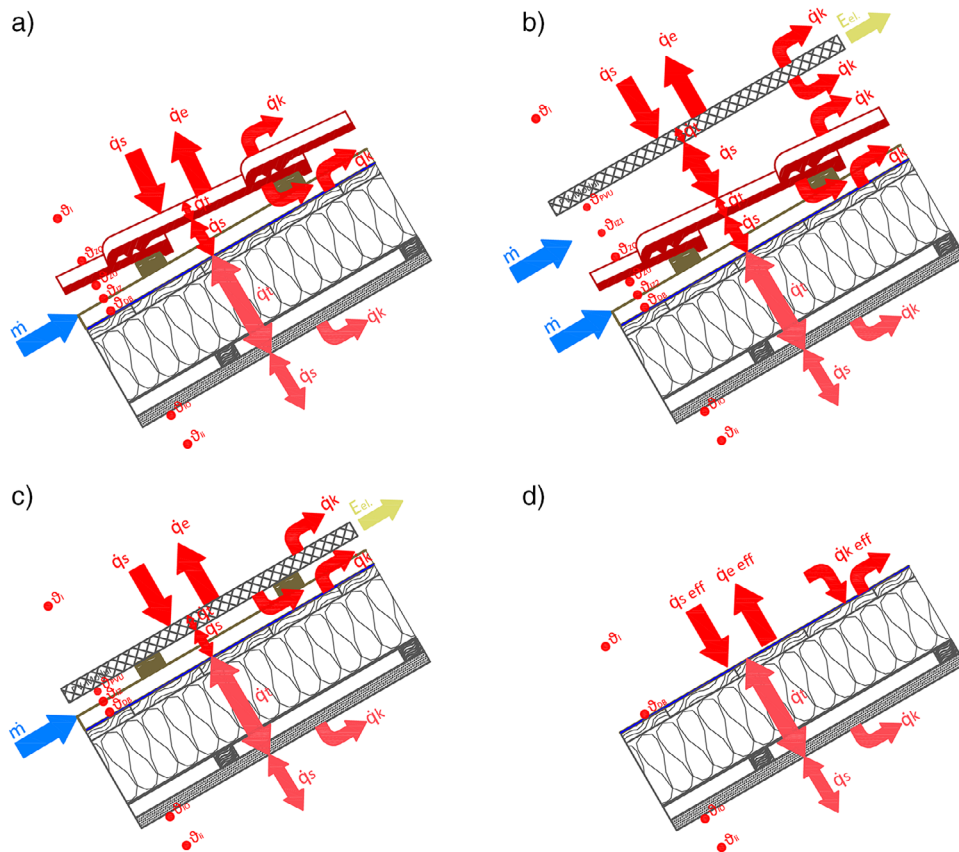


Bild 1 Darstellung der Wärmeübertragungsvorgänge einer Steildachkonstruktion, a) mit klassischer Eindeckung aus Dachsteinen oder Dachziegeln, b) mit Aufdach-Solaranlage (hier beispielhaft PV-Module), c) mit Indach-Solaranlage, die die Eindeckung ersetzt (hier beispielhaft PV-Module), d) ohne Eindeckung und PV, mit effektiven Strahlungs- und Konvektions-Parametern (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
 Illustration of heat transfer processes in a pitched roof construction, a) with classic roofing made of clay or concrete roofing tiles, b) with rooftop solar system (PV modules shown here as an example), c) with in-roof solar system replacing the roofing (PV modules shown here as an example), d) without roofing and PV, with effective radiation and convection parameters

konvektiv bedingten Wärmeübertragungsvorgänge deutlich zunimmt. Hinzu kommt, dass dem System thermische oder elektrische Energie entnommen wird, was die Energiebilanz und somit das Temperaturverhalten beeinflusst. Die Wärmeübertragungsvorgänge für eine Indach-Solaranlage (hier PV-Module, Bild 1c) unterscheiden sich im Wesentlichen durch die abgeführte Energie der Solaranlage von der klassischen Eindeckung. Einen Sonderfall (nicht dargestellt) stellen PVT-Anlagen o. Ä. dar, die neben elektrischer Energie gleichzeitig auch thermische Energie abführen. Diese waren nicht Teil der Untersuchungen. In Bild 1d ist die Dachkonstruktion mit effektiven Strahlungs- und Konvektions-Parametern gemäß [8] dargestellt, wobei die Eindeckung und die Solaranlage über diese Parameter abgebildet und daher nicht explizit berücksichtigt werden.

In einem ersten Ansatz wurde versucht, die Problematik rein theoretisch zu lösen, hierbei wurde jedoch deutlich, dass ein solches Bilanzierungssystem viele Parameter besitzt, die in der Praxis nicht zur Verfügung stehen. Auch ist aus Bild 1 ersichtlich, dass die Vielzahl an Wärmeübergangsvorgängen nur schwer zu erfassen sind. Dies gilt insbesondere für instationäre Simulationen mit sich stündlich ändernden Randbedingungen. Hinzu kommt der Umstand, dass Solaranlagen im Betrieb dem Bilanzierungssystem Energie entnehmen, hierbei ist die spezifisch abgeführte Energiemenge neben den aktuellen Solarstrahlungsbedingungen auch vom aktuellen

Wirkungsgrad der Solaranlage abhängig, der im Falle von PV-Modulen wiederum von der Modultemperatur beeinflusst wird. Eine exakte Messung von Strahlungsparametern, also Absorptions- und Emissionsgrad für die Oberfläche von im Betrieb befindlichen Solaranlagen, ist daher schwierig bis unmöglich. Ein empirischer Ansatz, der die baupraktischen Aspekte vereinfacht und anwenderfreundlich abbildet, erscheint sinnvoller. Aus diesem Grund wurden zwei verschiedene Steildachkonstruktionen mit Solaranlagen belegt und jeweils über den Zeitraum von ca. einem Jahr untersucht.

2 Untersuchungen

Das erste Dach wurde bereits im Jahr 2022 mit PV belegt (Konstruktion A) [9]. An dieser 40° geneigten, nach Süden orientierten Konstruktion, die mit braunen Biberschwanzziegeln eingedeckt ist, wurden der ungestörte Regelquerschnitt des Dachs, eine Aufdach-Belegung mit einer thermischen Solaranlage (Vakuumröhrenkollektor) sowie mit PV-Modulen untersucht. Die Untersuchungen an einer privaten Dachkonstruktion in Leutkirch im Allgäu, genauso wie Holzkirchen, einer der Orte mit den meisten Sonnenstunden in Deutschland, liefen von Juni 2022 bis Juni 2023. Zeitgleich zu diesen Untersuchungen wurden 2023 auf einer 16° geneigten, nach Süden orientierten und mit roten Frankfurter Pfannen eingedeckten



Bild 2 Fertiger Versuchsaufbau; linke Dachhälfte: Konstruktion B, rechte Dachhälfte: Konstruktion B2 (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
Completed test setup; left half of roof: design B, right half: design B2

Dachkonstruktion auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen vier Versuchsflächen zur Untersuchung des ungestörten Regelquerschnitts sowie mit Aufdach-PV-Module aufgebaut (Konstruktion B) [10]. Bild 2 zeigt die Südseite des Versuchsgebäudes (Konstruktion B) mit dem fertigen Versuchsaufbau. Die Untersuchungen liefen über den Zeitraum von Oktober 2023 bis Oktober 2024 und dienten der detaillierteren Analyse des hygrothermischen

Verhaltens der Dachkonstruktion und der Validierung und Verfeinerung des in diesem Bericht vorgestellten hygrothermischen Simulationsmodells mit effektiven Übergangsparametern. Die Kernaufbauten unterhalb der Konterlattenebene der beiden unterschiedlichen Dachkonstruktionen sind in Bild 3 dargestellt. An beiden Konstruktionen A und B wurde jeweils auch ein Referenzfeld auf der Nord- und Südseite ohne Solaranlage untersucht. Parallel zur Konstruktion B wurde ein Aufbau mit einer Aufsparrendämmung untersucht (Konstruktion B2). Soweit nicht anders angegeben, wird in diesem Bericht nur Bezug auf die in Bild 3 dargestellten Konstruktionen A und B genommen. Ein Vergleich der beiden Konstruktionen B und B2 kann [7] entnommen werden.

Während der Untersuchungszeiträume wurden an den beiden Konstruktionen verschiedene Messungen durchgeführt. In mehreren Achsen wurden in Traufnähe, Mitte und Firstnähe die Temperaturen in verschiedenen Ebenen gemessen: unterhalb der Solaranlage, unterhalb der Eindeckung, im Luftraum der Lattung- und Konterlattenebene sowie auf der Unterdachoberfläche. Bei der Konstruktion B wurde auch die Holzfeuchte in der Schalung gemessen. Für die Temperaturmessungen kamen kalibrierte Pt100-Temperatursensoren der Klasse AA zum

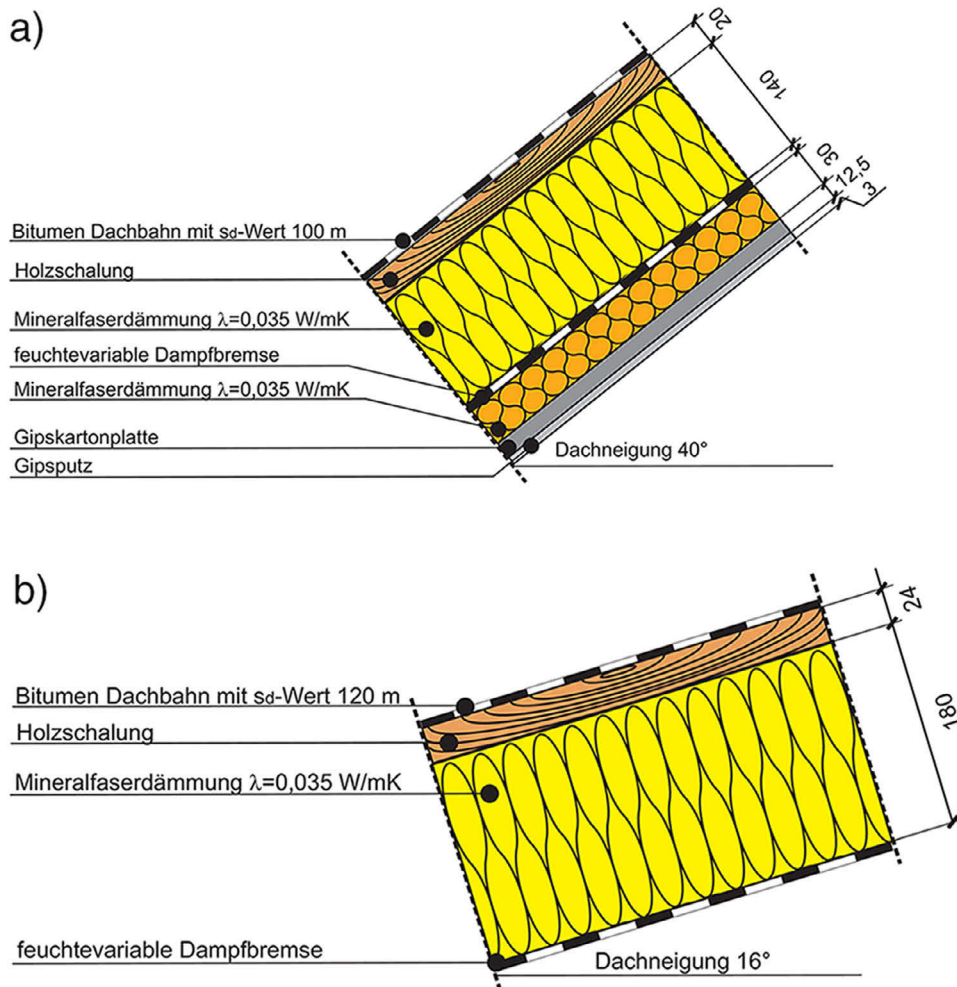


Bild 3 Kernaufbauten unterhalb der Konterlattenebene der beiden Dachkonstruktionen; a) Konstruktion A am Standort Leutkirch im Allgäu, Untersuchungszeitraum Juni 2022 bis Juni 2023, b) Konstruktion B am Standort IBP Freilandversuchsstelle Holzkirchen, Untersuchungszeitraum Oktober 2023 bis Oktober 2024 (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)

Roof structures below the counter batten level of the two roof constructions; a) construction A at the Leutkirch im Allgäu (Germany) site, investigation period June 2022 to June 2023, b) construction B at the Fraunhofer IBP Holzkirchen field test site (Germany), investigation period October 2023 to October 2024

Einsatz. Das Raumklima wurde in beiden Dachräumen mit kalibrierten Rotronic-Kombisensoren für Temperatur und relativer Feuchte erfasst.

Das Raumklima der beiden untersuchten Konstruktionen unterschied sich dahingehend, dass Konstruktion A einen normal bewohnten Dachraum aufwies, während bei Konstruktion B im Winter auf 20 °C als Untergrenze beheizt und auf 50 % r.F. befeuchtet wurde. Kühlung und Entfeuchtung im Sommer fand in beiden Fällen nicht statt, sodass sich in diesem Zeitraum höhere Temperaturen und relative Feuchten in den Dachräumen einstellten. Die Außenklimadaten für Konstruktion A wurden von der nahegelegenen DWD-Wetterstation Leutkirch-Herlazhofen [11] und die fehlenden Solarstrahlungsdaten vom Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) [12] bezogen. Das Außenklima sowie sämtliche Strahlungsgrößen der Konstruktion B wurden durch die institutseigene Wetterstation des Fraunhofer IBP direkt am Versuchsgebäude erfasst.

Für die Untersuchungen an der Konstruktion A kamen PV-Module mit monokristallinen Zellen des Herstellers Q-Cells (Q. Peak Duo BLK-G9 345 mono) zum Einsatz. Die Leistung pro Modul beträgt 345 Wp, der Wirkungsgrad wird mit 20,3 % angegeben. Die Maße der Module betragen 1673 mm × 1030 mm und der Abstand zwischen PV-Modulen und Ziegeloberfläche betrug ca. 100 mm. Bei der untersuchten Solarthermieanlage handelt es sich um Vakuumröhrenkollektoren der Firma Sonnenwärme Direkt GmbH (SWD). Die Wärmeübertragung von den Vakuumröhren an das Wärmeträgermedium erfolgt mittels Heat Pipes. Die Vakuumröhren haben einen Außendurchmesser von 58 mm und eine Länge von 1800 mm. Der Absorptionsgrad der selektiven Absorberbeschichtung wird mit 93 % angegeben. Da die Vakuumröhren mit einem gewissen Abstand zueinander im Sammler verbaut sind, ergibt sich im Gegensatz zu den PV-Modulen keine geschlossene, planparallele Fläche oberhalb der Eindeckung. Die darunterliegende Dachfläche wird daher auch nicht vollständig verschattet. Obwohl die Vakuumröhren eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit aufweisen und als zusätzliche Dämmschicht auf der Dachfläche angesehen werden können, kann durch die Zwischenräume dennoch ein Strahlungsaustausch mit der Umgebung stattfinden. Die Distanz zwischen Ziegeloberfläche und Vakuumröhren betrug ca. 70 mm.

Die auf der Konstruktion B verbauten PV-Module des Herstellers Heckert-Solar (NEMO 2.0 60M) haben eine Nennleistung von 330 Wp; der Wirkungsgrad ist mit 19,6 % angegeben. Die Module mit den Maßen 1006 mm × 1670 mm sind mit einem Abstand von ca. 170 mm zur Dachoberfläche installiert.

Bei beiden Dächern war die Anlagentechnik während der Untersuchungszeiträume im Regelbetrieb, sodass die abgeführte Energie für Wassererwärmung und Stromerzeugung nicht zur Erwärmung der Dachflächen zur Verfügung stand.

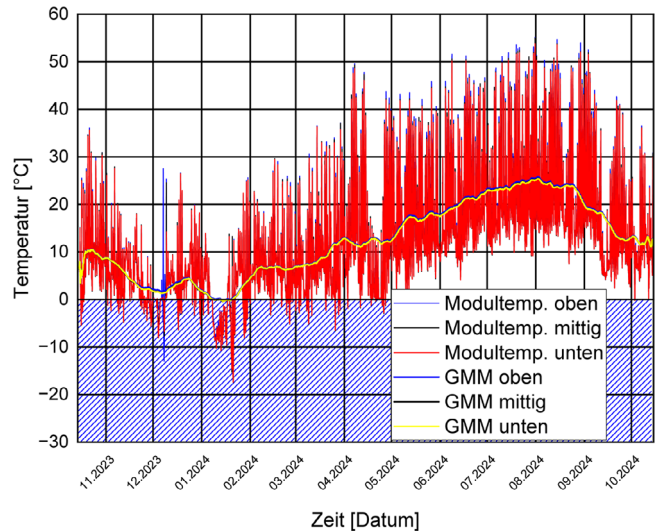


Bild 4 Gemessene Temperaturverläufe auf der Rückseite der PV-Module auf der Südseite der Konstruktion B von Oktober 2023 bis Oktober 2024; Verlauf der Temperaturen als Stundenmittelwerte und dazugehörigen gleitende Monatsmitteltemperaturen (GMM) (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
 Temperature curves measured on the rear side of the PV modules on the south side of structure B from October 2023 to October 2024; temperature curves as hourly averages at the bottom (red), center (black), and top (blue) and corresponding moving monthly average temperatures (GMM)

3 Ergebnisse

3.1 Temperaturverhalten

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich auf der Rückseite der PV-Module im Verlauf zwischen Traufe und First keine ausgeprägte Temperaturschichtung einstellt, wie es in Bild 4 für die Konstruktion B dargestellt ist. Die Stundenmittelwerte weisen nur sehr geringe Temperaturdifferenzen auf, die gleitenden Monatsmittelwerte sind nahezu deckungsgleich.

Auf der Oberfläche des Unterdachs (Bild 5) ist dagegen im Sommer eine deutliche Temperaturschichtung von Traufe zu First feststellbar. Das Verhalten lässt sich damit erklären, dass sich ein Temperaturprofil nur ausbilden kann, wenn die Wärme nicht gleichmäßig abgeführt wird. Im Luftraum zwischen Unterdach und Eindeckung steigt unter solarer Einstrahlung die warme Luft von der Traufe in Richtung First auf. Die dort befindlichen Belüftungsöffnungen sind im Verhältnis zur Querschnittsfläche des Luftraums klein. Bei der Verwendung von Latten und Konterlatten mit den Maßen 30 × 50 mm ergibt sich eine Querschnittsfläche des Luftraums von 600 cm²/m. Dahingegen betragen die Mindestbelüftungsquerschnitte an Firsten und Graten gem. [3] 0,5 % der zugehörigen geneigten Dachfläche, mindestens jedoch 50 cm²/m, also nur ca. 8 % der Querschnittsfläche des Luftraums. Diese Reduktion des Querschnitts bewirkt eine Erhöhung des Strömungswiderstandes, die Luft kann nicht frei entweichen, die Wärme nicht gleichmäßig abgeführt werden und es bildet sich ein logarithmisches Temperaturprofil aus [8].

Im Luftraum zwischen der Eindeckung und den Aufdach-PV-Modulen sind, abgesehen von der Tragkonstruktion der Module, die Querschnittsflächen an Traufe und First sowie auch an den Ortgängen in der Regel identisch mit

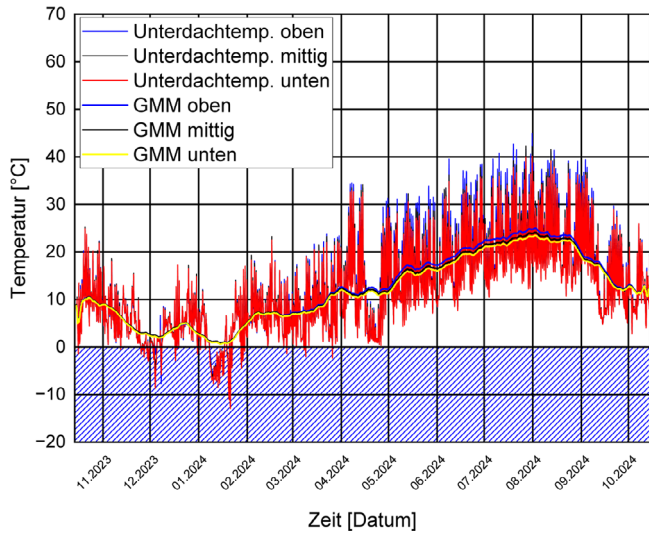


Bild 5 Gemessene Temperaturverläufe auf der Unterdachoberfläche auf der Südseite der Konstruktion B von Oktober 2023 bis Oktober 2024; Verlauf der Temperaturen als Stundenmittelwerte und dazugehörigen gleitende Monatsmitteltemperaturen (GMM) (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
Measured temperature profiles on the sub-roof surface on the south side of structure B from October 2023 to October 2024. Temperature curves as hourly averages at the bottom (red), center (black), and top (blue) and corresponding moving monthly average temperatures (GMM)

der des Luftraums darunter. Hier kann sich zum einen eine freie Konvektion einstellen, welche die Wärme auf den Modulrückseiten gleichmäßig abführt. Zum anderen spielt im Vergleich zum Luftraum zwischen Eindeckung und Unterdach die erzwungene Konvektion durch Windanströmung eine größere Rolle.

Im Weiteren wurde untersucht, wie sich die für das hygrothermische Verhalten von Dachkonstruktionen maßgeblichen Oberflächentemperaturen auf der Unterdachoberfläche unter den verschiedenen Bedingungen verhalten. Bild 6 zeigt die gleitenden Monatsmitteltemperaturen

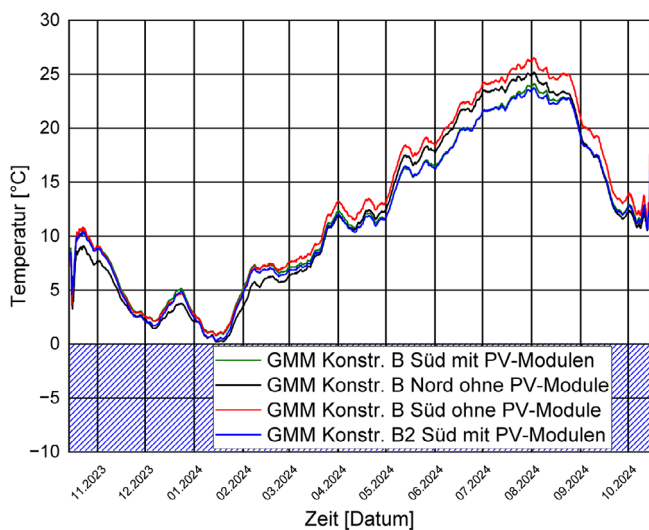


Bild 6 Gleitende Monatsmitteltemperaturen (GMM) auf dem Unterdach in der mittleren Messachse zwischen Traufe und First von Oktober 2023 bis Oktober 2024 (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
Moving monthly average temperatures (GMM) on the sub-roof surface in the middle measurement axis between the eaves and ridge from October 2023 to October 2024; construction B south with PV modules (green), north without PV (black), and south without PV (red), as well as construction B2 south with insulation on top of the rafters and PV modules (blue)

auf der Unterdachoberfläche über den Untersuchungszeitraum der Konstruktion B in der Mitte der jeweiligen Dachfläche. Die Temperaturen des ungestörten Regelquerschnitts auf der Südseite sind rot, die auf der Nordseite schwarz dargestellt. Im Vergleich ist der Temperaturverlauf auf der mit PV-Modulen belegten Südseite grün dargestellt. Zusätzlich ist die gleitende Monatsmitteltemperatur der nach Süden orientierten und mit PV-Modulen belegten Konstruktion B2 (rechte Dachfläche in Bild 2) mit einer Aufsparrendämmung als blauer Verlauf dargestellt. Im Vergleich zu der Konstruktion B mit einer reinen Zwischensparrendämmung fällt auf, dass sich die Temperaturen nur marginal unterscheiden. Es kann daraus geschlossen werden, dass die unter den PV-Modulen liegende Dachkonstruktion einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Temperaturen des Unterdachs hat. Die Temperaturen werden hauptsächlich durch die außenliegenden PV-Module bestimmt.

Bild 6 zeigt, dass die Temperaturen der Konstruktion mit PV-Modulen im Vergleich zum südlichen ungestörten Regelquerschnitt in den Herbst- bis Frühjahrsmonaten nur leicht niedriger liegen. Die Temperaturen auf der Nordseite weisen aufgrund des tiefen Sonnenstandes hingegen deutlich niedrigere Werte auf. Über die Sommermonate dreht sich das Verhalten um, hier werden im ungestörten Regelquerschnitt auf der Südseite die höchsten Temperaturen erreicht, die Temperaturen des ungestörten Regelquerschnitts der Nordseite liegen mit etwas Abstand darunter. Die niedrigsten Oberflächentemperaturen werden auf dem Unterdach der mit PV-Modulen belegten nach Süden orientierten Konstruktion gemessen. Da diese Temperaturen maßgeblich den Dampfdruck in den Konstruktionen und somit das Rücktrocknungspotenzial beeinflussen, wird bereits aus diesem Verhalten deutlich, dass eine mit PV-Modulen belegte, nach Süden orientierte Dachfläche kritischere Feuchtebedingungen aufweisen kann als eine nach Norden orientierte Dachfläche ohne PV-Module.

3.2 Feuchteverhalten

Das beschriebene Verhalten wird nochmals durch Bild 7 deutlich. Hier sind die Holzfeuchtemesswerte in M.-% in der Schalung der drei genannten Konstruktionen (B), Versuchsfeld Nord (schwarz) und Süd ohne PV-Module (rot) sowie Süd mit PV-Modulen belegt (grün), dargestellt. Das unbelegte Versuchsfeld auf der Südseite, welches die höchsten Oberflächentemperaturen erreicht, weist über den gesamten Untersuchungszeitraum auch die geringsten Holzfeuchtwerte auf. So steigt der Wassergehalt gegen Ende des ersten Winters auf knapp 11 M.-%, trocknet über die Frühjahrsmonate wieder aus und schwankt in den Sommermonaten um die 8 M.-%. Auf der Nordseite steigt die Holzfeuchte im ersten Winter bis maximal 14 M.-% an. Über die Frühjahrsmonate trocknet die Schalung wieder auf ca. 9 bis 10 M.-% zurück und steigt mit niedrigerem Sonnenstand und geringeren Oberflächentemperaturen im Herbst dann etwas früher an, als dies bei der Südseite zu beobachten ist. Die

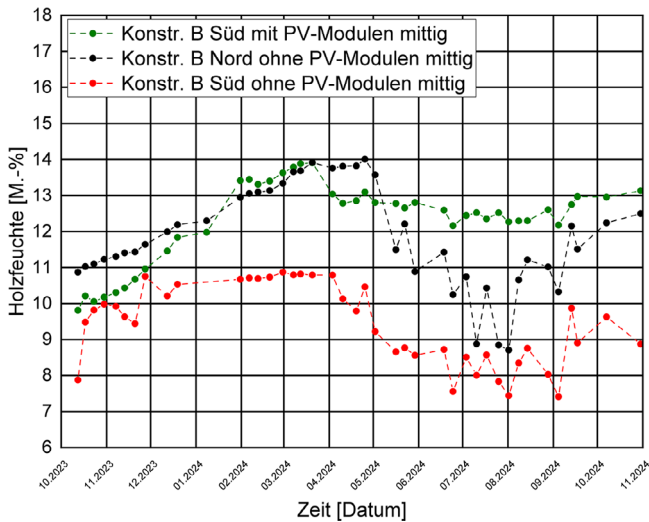


Bild 7 Holzfeuchtemesswerte in der Holzschalung der Konstruktion B (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
Wood moisture measurements in the wooden sheathing at the center of the roof structure B. South side with (red), north side (black), and south side with rooftop PV modules (green)

mit PV-Modulen belegte Südseite zeigt ein abweichendes Verhalten. Hier steigt die Holzfeuchte im ersten Winter ebenfalls bis auf etwa 14 M.-%. Danach erfolgt durch die niedrigen Oberflächentemperaturen jedoch keine nennenswerte Rücktrocknung der Holzschalung, wie dies bei den unbelegten Versuchsfeldern auf der Nord- und Südseite zu beobachten ist. Die Wassergehalte bewegen sich vom Frühjahr bis in den Herbst in einem Bereich zwischen 12 und 13 M.-% und beginnen im Spätherbst wieder anzusteigen.

Hierzu muss jedoch angemerkt werden, dass die Holzschalung im Juli 2023 neu eingebaut wurde und an allen untersuchten Positionen nahezu identische Ausgangsfeuchten von ca. 9 M.-% vorlagen. Vom Einbau-Zeitpunkt bis zum Beginn der Messungen im Oktober 2023 haben sich bereits abweichende Feuchtegehalte eingestellt. Die Holzfeuchtemessung findet jeweils im inneren Kernzentimeter der Holzschalung statt. Im raumseitig inneren Zentimeter der Holzschalung sind erfahrungsgemäß die höchsten Messwerte zu erwarten. Es ist daher davon auszugehen, dass die maximalen Holzfeuchten in diesem Bereich etwas höher liegen als die hier dargestellten Werte. Die Messwerte beziehen sich nur auf das erste Jahr der Untersuchungen, in dem sich die Konstruktionen noch nicht in einem eingeschwungenen Zustand befinden.

3.3 Überprüfung und Validierung des Modells zur hygrothermischen Simulation von hinterlüfteten Steildächern

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden immer auch Referenzflächen ohne PV untersucht. Dies geschah zum einen, um den Einfluss der Solaranlage bewerten und zum anderen, um das Modell zur hygrothermischen Simulation von belüfteten Steildachkonstruktionen [8] nochmals validieren zu können. Dieser Punkt ist sehr relevant, da alle hier angestellten Betrachtungen

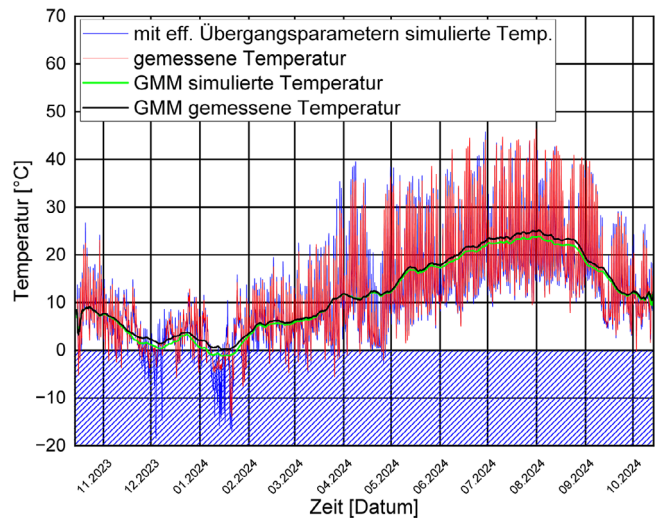


Bild 8 Temperaturen auf der nördlichen Unterdachoberfläche der Konstruktion B; gemessene und simulierte Stundemittelwerte sowie zugehörige gleitende Monatsmitteltemperaturen (GMM) (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
Temperatures on the northern sub-roof surface of structure B; measured hourly average (red) and corresponding moving monthly average temperature (GMM) (black), as well as simulated hourly averages (blue) and corresponding moving monthly average temperature (green)

und Simulationsparameter auf diesem Modell basieren. Die in dem Modell angegebenen Simulationsparameter sollen auf Basis von effektiven Übergangsparametern die Temperaturen auf dem Unterdach unterhalb einer Ziegel- oder Dachsteineindeckung berechnen können, sodass eine hygrothermische Bewertung der Konstruktion möglich wird. Dabei soll der Ansatz im Zweifel leicht niedrigere Temperaturen prognostizieren, sodass eine gewisse Sicherheitsreserve enthalten ist. Auch soll das Modell für jede Dachneigung und Orientierung sowie für jeden Standort sichere Werte liefern. Beispielhaft wird hier eine Position eines Referenzfeldes ohne Solaranlage dargestellt und die Messwerte mit den auf Basis des Modells simulierten Werten verglichen.

Bild 8 zeigt die Temperaturen am Beispiel der mittleren Position des Referenzfeldes der Konstruktion B auf der Nordseite. Die Stundemittelwerte sind als roter, die gleitenden Monatsmittel als schwarzer Verlauf dargestellt. Im Vergleich dazu sind die mit dem Modell simulierten stündlichen Werte als blauer und das gleitende Monatsmittel als grüner Verlauf aufgetragen. Die Simulation liefert im Vergleich zu den Messwerten bei den Stundemittelwerten jeweils leicht höhere Temperaturspitzen und leicht niedrigere Minimalwerte. Das gleitende Monatsmittel liegt nahezu über den gesamten Jahresverlauf leicht unterhalb dem der Messwerte. Generell ist die Übereinstimmung sowohl auf der Nord- als auch auf der Südseite sehr gut mit der gewünschten Tendenz zu leicht niedrigeren Temperaturen, wie es im Modell auch vorgesehen ist.

Bild 9 zeigt den Verlauf der Wassergehalte in der Schalung der Konstruktion B auf der Nordseite – einmal simuliert mit gemessenen Oberflächentemperaturen auf der Unterdachoberfläche als roter Verlauf und im Vergleich dazu simuliert mit den gemessenen Klimarandbedingungen und dem Modellansatz nach [8] in blau. Auch hier

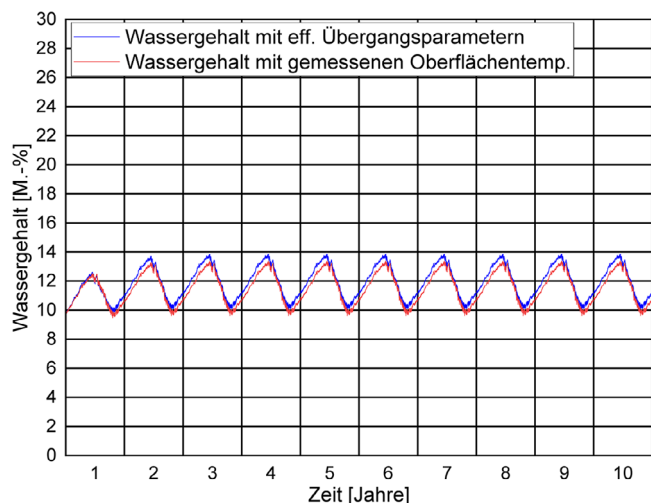


Bild 9 Simulierte Feuchteverläufe in der Holzschalung in M.-% der nach Norden orientierten Konstruktion B über 10 Jahre (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
Simulated moisture profiles in the wooden sheathing in M.-% of the north-facing construction B with measured surface temperatures (red) and effective transfer parameters (blue) over 10 years

zeigt sich, dass der Modellansatz leicht kritischere Wassergehalte prognostiziert und das Modell daher leicht auf der sicheren Seite liegt. Die Übereinstimmung der Temperatur- und Feuchteverläufe sind hinreichend genau, sodass das Modell daher als validiert angesehen werden kann und für alle weiteren Betrachtungen herangezogen wird.

3.4 Abgeführte Leistung der PV-Module in Abhängigkeit der Diffus- und Direktstrahlung

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen ist, dass unter Diffusstrahlungsbedingungen prozentual mehr Leistung durch die PV-Module abgeführt wird und dadurch eine geringere Energiemenge für die Erwärmung der Dachfläche zur Verfügung steht als unter Direktstrahlungsbedingungen. Bild 10 zeigt die Direkt- und Diffusstrahlung, die auf die Dachfläche auftrifft, in Kombination mit der von den PV-Modulen abgegebenen spezifischen Leistung an fünf Tagen im Februar 2024 als Stundenmittelwerte. Ebenfalls sind der aus zu- und abgeführter Leistung berechnete Wirkungsgrad sowie die Temperaturen auf dem Unterdach aufgetragen. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Wirkungsgradspitzen über ca. 25 % als unrealistisch betrachtet werden, sie sind auf die Ungenauigkeiten der Energie-Messeinrichtung in Kombination mit den verwendeten Solarstrahlungsdaten zurückzuführen. Unter Diffusstrahlungsbedingungen steigt der Wirkungsgrad der PV-Module jedoch an, es wird anteilig also mehr auftreffende Strahlungsenergie in elektrischen Strom umgewandelt, als dies unter Direktstrahlungsbedingungen der Fall ist. Das Verhalten liegt darin begründet, dass sich PV-Module in Abhängigkeit der solaren Strahlungsstärke erwärmen. PV-Module weisen bzgl. der Leistung jedoch generell einen negativen Temperaturkoeffizienten auf, der die Leistungsabnahme der Module mit steigender Modultemperatur beschreibt. Bei den verwendeten Modulen der Konstruktion A beträgt der Temperaturkoeffizient $-0,35\%/K$. Da unter Direktstrahlungsbedin-

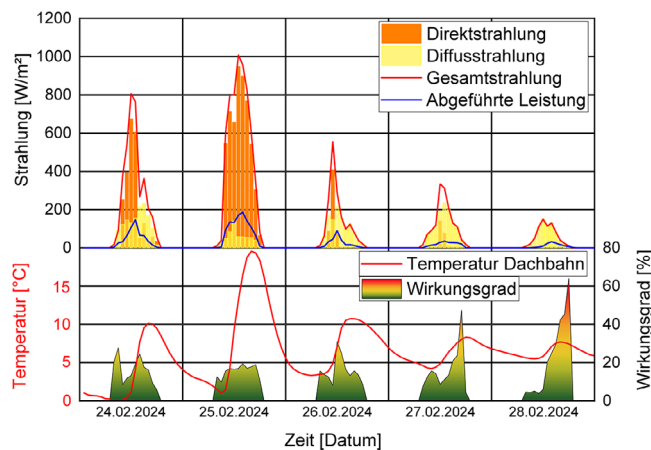


Bild 10 Oben: Auf die Dachfläche der Konstruktion A auftreffende Diffus- und Direktstrahlung (nach [12]), sowie Gesamtstrahlung und gemessene von den PV-Modulen abgegebene Leistung in W/m^2 ; Unten: berechneter Wirkungsgrad und gemessene Temperatur auf der Unterdachoberfläche (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
Top: Diffuse and direct radiation hitting the roof surface of structure A (acc. [12]), as well as total radiation and measured power emitted by the PV modules in W/m^2 . Bottom: Calculated efficiency and measured temperature on the sub-roof surface

gungen meist eine größere Strahlungsenergiemenge zur Verfügung steht, erwärmen sich die PV-Module stärker, der Wirkungsgrad sinkt, wodurch auch mehr Energie zur Erwärmung der Dachfläche verfügbar ist. Für eine exakte Berechnung der Energiemenge, die zur Erwärmung der Dachfläche führt, müssten jedoch noch weitere Faktoren berücksichtigt werden. So ist die von den PV-Modulen reflektierte Strahlung vom Einfallswinkel und somit vom zeitlich variablen Sonnenstand abhängig. Der Reflexionsgrad ist wiederum vom verwendeten Solarglas der PV-Module abhängig und wird in der Regel durch einen Winkelkorrekturfaktor beschrieben. Unabhängig davon gilt jedoch: je flacher die Sonne auf die PV-Module einstrahlt, desto höher ist der reflektierte Strahlungsanteil. In Kombination mit einer Anisotropie der Diffusstrahlung wird in den Morgen- und Abendstunden, wenn die Einstrahlung auf die Solarmodule in einem sehr flachen Winkel erfolgt, von den PV-Modulen keine Leistung abgegeben, obwohl die auf die Module auftreffende Strahlungsenergie theoretisch über der Einschaltchwelle des Wechselrichters liegen sollte. Auch dieses Verhalten ist in Bild 10 ersichtlich.

Eine detaillierte Berechnung der Temperaturen der PV-Module und der Unterdachoberfläche ist unter Kenntnis der vielfältigen Einflussfaktoren möglich, wird aufgrund der notwendigen Parameter und des Aufwands jedoch für die Planung und feuchtetechnische Bemessung von Steildachkonstruktionen als nicht zweckmäßig erachtet. Es wird daher auf einen empirischen Ansatz zurückgegriffen, der die beschriebenen Einflussfaktoren abbildet.

4 Effektive Übergangsparameter für die hygrothermische Simulation

Ziel der Untersuchungen war es, auf Basis der Messwerte ein empirisches Modell aufzustellen, welches Solaranlagen auf Steildachkonstruktionen in der hygrothermischen

Simulation auf einfache Weise berücksichtigen kann und dabei sichere, aber realitätsnahe Werte liefert. Das vorgestellte Modell orientiert sich daher an der Vorgehensweise, wie sie in [8] dargestellt ist. Die dort beschriebenen Merkmale zur Belüftungsstärke von Dachkonstruktionen werden unverändert beibehalten. Auch die Tatsache, dass sich unter der Eindeckung ein logarithmisches Temperaturprofil ausbildet, sodass die Temperatur im Verlauf von Traufe zum First zunimmt, konnte in den hier durchgeführten Untersuchungen nochmals bestätigt werden.

4.1 Modultemperaturen PV-Module

Auf Basis der vergleichenden Messungen hat sich gezeigt, dass sich an den PV-Modul-Rückseiten weder ein ausgeprägtes Temperaturprofil zwischen Traufe und First einstellt, noch die darunterliegende Dachkonstruktion einen signifikanten Einfluss auf die Modultemperatur hat. Daher können im Folgenden die Strahlungsparameter zur Berechnung der Modultemperaturen ermittelt werden.

Anhand der Messungen der Oberflächentemperaturen an mehreren Positionen der Rückseiten der PV-Module konnten empirisch die Strahlungsparameter für die PV-Module während des Betriebs der Anlage abgeleitet werden. Es wurde ein Aufbau bestehend aus einem Glas-PV-Modul, einer Luftschicht und einem Dachziegel in der Form simuliert, dass die gemessene Oberflächentemperatur des Dachziegels als Randbedingung herangezogen wurde. Auf der Außenseite wurden die gemessenen Klimarandbedingungen angesetzt. Die notwendigen Strahlungsparameter der PV-Module wurden iterativ angepasst, bis sich die kleinste Differenz zu dem gemessenen Temperaturverlauf auf der Rückseite der PV-Module eingestellt hat. Mit dieser Vorgehensweise konnte sichergestellt werden, dass sowohl der zwischen PV-Modulen und Ziegeleindeckung stattfindende Luftwechsel als auch der langwellige Strahlungsaustausch berücksichtigt sind.

Die Stundenwerte über den Jahresverlauf wiesen dabei mit einem kurzwelligen Absorptionsgrad von $\alpha_{PV} = 0,55$ und einem langwelligen Emissionsgrad von $\epsilon_{PV} = 0,8$ die beste Übereinstimmung auf. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient beträgt dabei für Dachoberflächen typische $12,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($19 \text{ W/m}^2\text{K}$ inklusive $6,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ langwelliger Strahlungsanteile). Bild 11 zeigt die gemessenen Oberflächentemperaturen auf der PV-Modul-Rückseite als Stundenmittelwerte (schwarz) sowie als gleitendes Monatsmittel (schwarz fett) sowie die simulierten Stundenwerte (rot) und das dazugehörige gleitende Monatsmittel (blau fett). Obwohl die Stundenmittelwerte leichten Schwankungen unterliegen, ergibt sich für das gleitende Monatsmittel ein über nahezu das gesamte Jahr deckungsgleicher Verlauf. Lediglich in den Sommermonaten liegen die simulierten Temperaturen leicht unter den Messwerten, da sich die Leistungsabgabe der PV-Module mit steigender Temperatur verringert, was dazu führt, dass mehr Energie zur Erwärmung der Module zur Verfügung steht. Da dieser Effekt

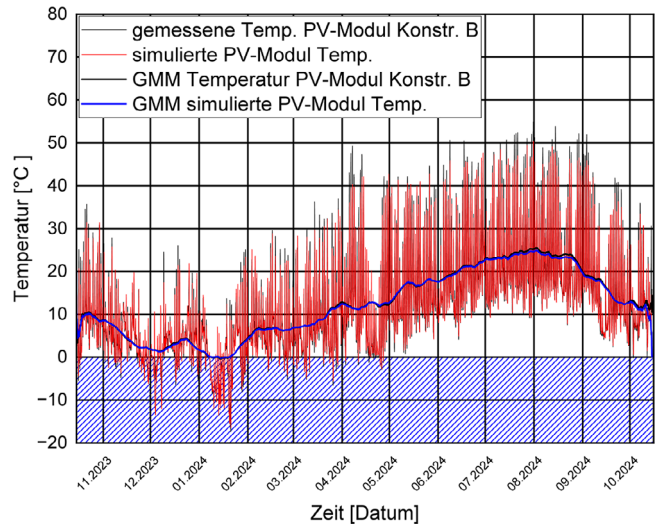


Bild 11 Vergleich der gemessenen und simulierten PV-Modultemperaturen in der Mitte zwischen Traufe und First der Konstruktion B als gemessene Stunden- und gleitende Monatsmitteltemperaturen (GMM) (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)

Comparison of measured and simulated PV module temperatures in the middle between the eaves and ridge of structure B; measured hourly (black), moving monthly average temperatures (GMM) (black bold) and simulated hourly (red) and moving monthly average temperatures (GMM) (blue bold) of the PV modules

bei der hygrothermischen Simulation nicht berücksichtigt wird, liegen die Temperaturmesswerte vor allem in den Sommermonaten bei hoher solarer Einstrahlung in Kombination mit hohen Außenlufttemperaturen über den simulierten Temperaturwerten. Die stellt jedoch in Bezug auf die hygrothermische Bauteilsimulation eine gewisse Sicherheitsreserve dar.

4.2 Aufdach-PV-Anlagen

Die Untersuchungen zu Aufdach-PV-Modulen wurden an beiden Konstruktionen durchgeführt. Mit den Messungen an Konstruktion A wurde ein empirisches Simulationsmodell erstellt, welches mit den Messungen an Konstruktion B validiert wurde. Beispielhaft wird in Bild 12 für die mittlere Position der nach Süden orientierten Dachfläche mit PV der Konstruktion B der gemessene Temperaturverlauf in Stundenwerten (rot) sowie als gleitende Monatsmittelwerte (schwarz) dargestellt. Im Vergleich dazu werden die mit den ermittelten effektiven Übergangsparemtern (vgl. Tabelle 1) simulierten Oberflächentemperaturen auf der Unterdachoberfläche als Stunden- (blau) und gleitende Monatsmittelwerte (grün) dargestellt. Die simulierten Stundenmittelwerte weisen keine exakte Übereinstimmung mit den Messwerten auf, liegen jedoch in einer ähnlichen Größenordnung. Dies ist neben den oben erwähnten Zusammenhängen bzgl. der Leistungsabgabe von PV-Modulen vor allem darauf zurückzuführen, dass bei der Simulation mit effektiven Übergangsparemtern sowohl die PV-Module als auch die darunterliegende Eindeckung nicht explizit abgebildet werden und das System dadurch eine geringere thermische Speichermasse aufweist, die in der Realität den Aufheiz- und Abkühlvorgang der Unterdachoberfläche leicht verzögert. Die gleitenden Monatsmitteltemperaturen weisen

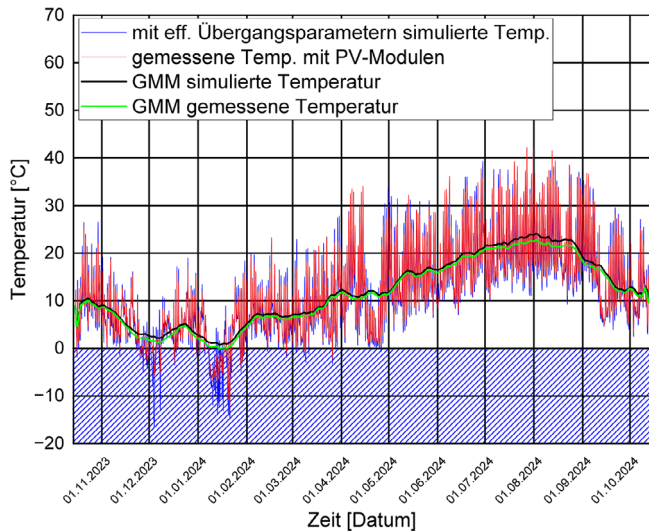


Bild 12 Gemessene sowie mit effektiven Übergangsparametern simulierte Temperaturen mittig auf der Unterdachoberfläche der Konstruktion B mit Aufdach-PV-Modulen als Stunden- und gleitende Monatsmittelwerte (GMM) (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
 Temperatures measured and simulated with effective transfer parameters at the center of the roof surface of structure B with rooftop PV modules; measured hourly averages (red) and moving monthly averages (GMM) (black), as well as hourly averages simulated with effective transition parameters (blue) and moving monthly averages (GMM) (green)

jedoch eine gute Übereinstimmung auf, wobei die Simulation leicht geringere, also kritischere Oberflächentemperaturen prognostiziert. Die Parameter wurden so eingestellt, dass sie zum einen dem Verhalten des Modells zur hygrothermischen Simulation von hinterlüfteten Steildächern [8] folgen und zum anderen auch dieser Modellansatz Werte liefert, die leicht auf der sicheren Seite liegen.

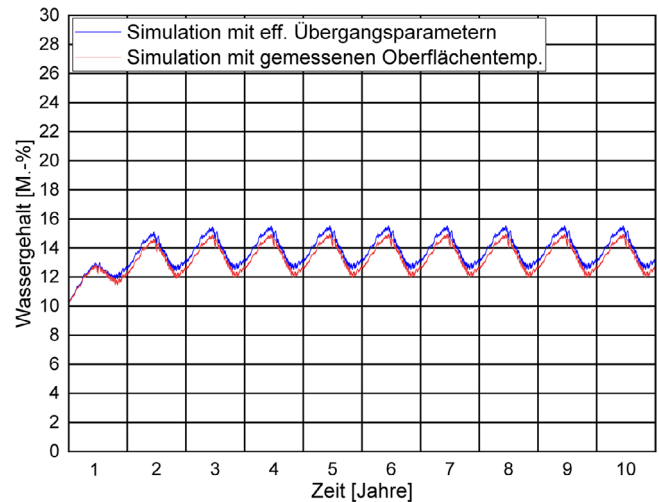


Bild 13 Holzfeuchte in der Schalung der Konstruktion B mit Aufdach-PV-Modulen, mittige Position; simulierte Feuchteverläufe in der Holzschalung über 10 Jahre in M.-% mit gemessenen Oberflächentemperaturen (rot) und mit effektiven Übergangsparametern (blau) (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
 Moisture profiles in the wooden sheathing in M.-% of the south-facing construction B with PV modules; simulated with measured sub-roof surface temperatures (red) and effective transfer parameters (blue)

Bild 13 zeigt den Feuchteverlauf in der Holzschalung an derselben Position der Konstruktion einmal simuliert mit den gemessenen Oberflächentemperaturen (rot) und einmal mit den effektiven Übergangsparametern für Aufdach-PV-Anlagen (blau). Es ist deutlich ersichtlich, dass die Temperaturunterschiede (vgl. Bild 12) zu einem leicht kritischeren Feuchteverhalten führen. So prognostizieren die effektiven Übergangsparameter Holzfeuchtwerte, die ca. 0,2 M.-% über denen der Simulation mit gemessenen Oberflächentemperaturen liegen.

Tab. 1 Effektive Wärmeübergangsparameter für die hygrothermische Simulation von Steildachkonstruktionen mit Aufdach-PV-Modulen in Abhängigkeit der Belüftungsart und der Position im Dachverlauf
 Effective heat transfer parameters for the hygrothermal simulation of pitched roof structures with rooftop PV modules depending on the type of ventilation and the position in the roof structure

	Kälteste Stelle (Traufe)	Mittlere Stelle ¹⁾	Wärmste Stelle (First) ¹⁾
stark belüftet ²⁾	$\alpha_{k,PV} = 30 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
kurzwelliger Absorptionsgrad*	$a_{e,PV} = a_{PV} \cdot 0,33$ $a_{e,PV} = 0,18$	$a_{e,PV} = a_{PV} \cdot 0,4$ $a_{e,PV} = 0,22$	$a_{e,PV} = a_{PV} \cdot 0,53$ $a_{e,PV} = 0,29$
langwelliger Emissionsgrad*	$\epsilon_{e,PV} = \epsilon_{PV} \cdot 0,1125$ $\epsilon_{e,PV} = 0,09$	$\epsilon_{e,PV} = \epsilon_{PV} \cdot 0,1125$ $\epsilon_{e,PV} = 0,09$	$\epsilon_{e,PV} = \epsilon_{PV} \cdot 0,1125$ $\epsilon_{e,PV} = 0,09$
normal belüftet ²⁾	$\alpha_{k,PV} = 19 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
kurzwelliger Absorptionsgrad*	$a_{e,PV} = a_{PV} \cdot 0,33$ $a_{e,PV} = 0,18$	$a_{e,PV} = a_{PV} \cdot 0,4$ $a_{e,PV} = 0,22$	$a_{e,PV} = a_{PV} \cdot 0,53$ $a_{e,PV} = 0,29$
langwelliger Emissionsgrad*	$\epsilon_{e,PV} = \epsilon_{PV} \cdot 0,1125$ $\epsilon_{e,PV} = 0,09$	$\epsilon_{e,PV} = \epsilon_{PV} \cdot 0,1125$ $\epsilon_{e,PV} = 0,09$	$\epsilon_{e,PV} = \epsilon_{PV} \cdot 0,1125$ $\epsilon_{e,PV} = 0,09$
schwach belüftet ²⁾	$\alpha_{k,PV} = 13,5 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
kurzwelliger Absorptionsgrad*	$a_{e,PV} = a_{PV} \cdot 0,33$ $a_{e,PV} = 0,18$	$a_{e,PV} = a_{PV} \cdot 0,4$ $a_{e,PV} = 0,22$	$a_{e,PV} = a_{PV} \cdot 0,53$ $a_{e,PV} = 0,29$
langwelliger Emissionsgrad*	$\epsilon_{e,PV} = \epsilon_{PV} \cdot 0,1125$ $\epsilon_{e,PV} = 0,09$	$\epsilon_{e,PV} = \epsilon_{PV} \cdot 0,1125$ $\epsilon_{e,PV} = 0,09$	$\epsilon_{e,PV} = \epsilon_{PV} \cdot 0,1125$ $\epsilon_{e,PV} = 0,09$

*Für PV-Module sollte als kurzwelliger Absorptionsgrad a_{PV} 0,55 und als langwelliger Emissionsgrad ϵ_{PV} 0,8 verwendet werden.
¹⁾Die angegebenen Faktoren zur Berechnung der effektiven Übergangsparameter gelten für Dachbreiten (Abstand Traufe – First) von normalen Einfamilienhäusern. Bei größeren Dachlängen können sich an der mittleren und der wärmsten Stelle ggf. höhere Temperaturen auf dem Unterdach einstellen.
²⁾Die genannten Belüftungsstärken wurden entsprechend den in [8] untersuchten Dächern definiert und entsprechen u. U. nicht den Begrifflichkeiten wie sie in verschiedenen Normen (z. B. DIN 4108 und DIN ISO 6946) angegeben werden.

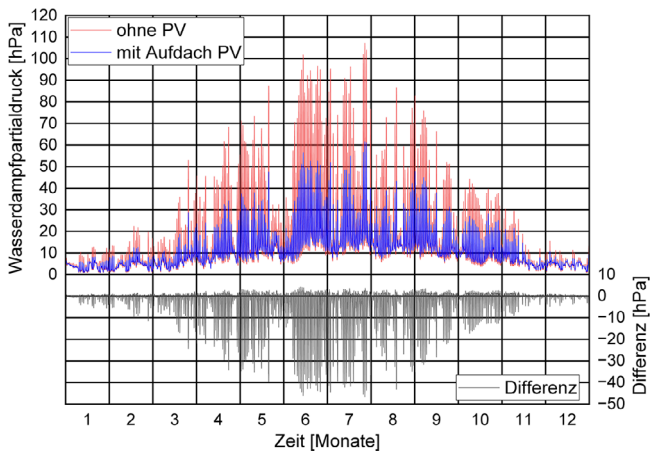


Bild 14 Wasserdampfpartialdruck in hPa hinter der äußeren Bitumendachbahn der Konstruktion B. Stundenmittelwerte ohne PV-Module (rot) und mit PV-Modulen (blau) sowie die absolute Abweichung in hPa (grau) (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
Water vapor partial pressure in hPa behind the outer bituminous roofing membrane of construction B; hourly average values without PV modules (red) and with PV modules (blue), as well as the absolute deviation in hPa (gray)

Bild 14 zeigt den Wasserdampfpartialdruck in hPa hinter der äußeren Bitumenabdichtung der nach Süden orientierten Konstruktion B ohne (rot) und mit PV-Modulen (blau). Die absolute Abweichung ist als grauer Verlauf dargestellt und entspricht der Temperaturreduktion durch die PV-Module. Es wird deutlich, dass der Wasserdampfpartialdruck in den Wintermonaten November bis März bei beiden Konstruktionen auf einem ähnlichen Niveau liegt. Je größer jedoch die solare Einstrahlung im Sommer wird, desto größer werden auch die Abweichungen des Wasserdampfpartialdrucks, da dieser exponentiell von der Temperatur abhängig ist. Die Konstruktion mit PV-Modulen bleibt jedoch deutlich kühler, sodass hier in den Spitzen ein wesentlich reduzierter Dampfdruck vorliegt. Zwar unterkühlt die Konstruktion mit PV-Modulen im Vergleich zu der Konstruktion ohne PV-Module nachts etwas weniger, weshalb zu diesen Zeiten der Wasserdampfpartialdruck in der Konstruktion mit PV-Modulen leicht höher liegt, jedoch sind es die Temperaturmaxima in den Sommermonaten, die die Rücktrocknung der Konstruktion zur Raumseite hin maßgeblich beeinflussen. So liegt der Wasserdampfpartialdruck der Konstruktion mit PV in den Spitzen über 40 hPa bzw. max. 60 % niedriger als ohne PV-Module. Das Rücktrocknungspotenzial wird also durch die PV-Module deutlich reduziert.

Für Aufdach-PV-Module wurden die Messungen an allen drei Positionen bei einer normal (B) und einer eher schwach belüfteten Dachkonstruktion (A) untersucht. Da sich bei den Untersuchungen gezeigt hat, dass das Modell [8] sowohl für die Belüftungsstärke als auch für die drei angegebenen Positionen im Verlauf zwischen Traufe und First sehr gute Übereinstimmungen zeigt, wird davon ausgegangen, dass die Faktoren auch auf eine schwache und eine starke Belüftung übertragbar sind. Tabelle 1 gibt die effektiven Übergangparameter für die hygrothermische Simulation von Steildachkonstruktionen an, die mit Aufdach-PV-Modulen belegt sind. In der oberen Zeile sind jeweils die Abminderungs-

faktoren auf die Strahlungsparameter der PV-Module angegeben. Für den kurzwelligen Absorptionsgrad a_{PV} und den langwelligen Emissionsgrad ε_{PV} der PV-Module sind die ermittelten und oben genannten Parameter einzusetzen. Darunter wird jeweils der daraus berechnete Wert angegeben, welcher direkt als konstanter Faktor in ein Simulationsprogramm übernommen werden kann.

4.3 Indach-PV-Anlagen

Für Indach-PV-Anlagen wurden keine Untersuchungen an realen Dachkonstruktionen durchgeführt. Da Indach-PV-Module bzw. PV-Ziegel auf Steildachkonstruktionen jedoch die Eindeckung ersetzen oder in diese integriert sind, stehen die Modulrückseiten im direkten langwelligen Strahlungsaustausch mit dem Unterdach, wie dies auch bei einer gewöhnlichen Eindeckung der Fall ist. Mit den ermittelten, oben genannten, Strahlungsparametern für PV-Module ist es nun möglich, die rückseitige Temperatur von auf Steildächern installierten PV-Modulen mit Hinterlüftung zu simulieren. Werden die Strahlungsparameter der PV-Module mit dem Modell zur hygrothermischen Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangparametern [8] kombiniert, können auch näherungsweise die Temperaturen auf dem Unterdach ermittelt werden. Für die hygrothermische Simulation von Steildächern mit Indach-PV-Anlagen oder ggf. auch Solarziegeln ergeben sich daraus die effektiven Übergangparameter, wie sie in Tabelle 2 angegeben sind.

4.4 Thermische Solaranlage (Vakuurröhren)

Die Untersuchungen zum Verhalten der Dachkonstruktion mit thermischer Solaranlage (Vakuurröhren) wurden an der Konstruktion A durchgeführt. Dabei stellen sich andere Strahlungsbedingungen ein, als dies bei PV-Modulen oder einer solarthermischen Anlage mit Flachkollektoren der Fall ist. Auch hier wird aus dem System Energie abgeführt und in thermische Energie umgewandelt. Jedoch stellen sich bauartbedingt etwas andere Strahlungsbedingungen ein, da die Solaranlage einen anderen Aufbau besitzt und keine planparallele Fläche zur Dachoberfläche darstellt.

Die selektive Beschichtung auf der Innenseite der Vakuurröhren absorbiert größtenteils die Strahlung im sichtbaren und im Nahinfrarot-Bereich. Gleichzeitig weist sie geringe Emissionen im langwelligen Bereich auf. Die gläsernen Vakuurröhren wirken als Dämmschicht und verringern die Wärmeleitung aus dem Inneren der Röhre auf ein Minimum. Im Bereich einer einzelnen Vakuurröhre oberhalb der Dachfläche kann daher ebenfalls von einer Verschattung ausgegangen werden, welche keine oder nur wenig kurzwellige Strahlung auf die Dachoberfläche auftreffen lässt. Gleichzeitig stellt eine einzelne Vakuurröhre eine Dämmschicht oberhalb der Dachfläche dar und dient der Dachfläche im langwelligen Bereich als Strahlungspartner, wodurch auch hier das Abstrahlverhalten

Tab. 2 Effektive Wärmeübergangparameter für die hygrothermische Simulation von Steildachkonstruktionen mit Indach-PV-Modulen in Abhängigkeit von Belüftungsart und Position im Dach
 Effective heat transfer parameters for the hygrothermal simulation of pitched roof structures with in-roof PV modules depending on the type of ventilation and position in the roof

	Kälteste Stelle (Traufe)	Mittlere Stelle ¹⁾	Wärmste Stelle (First) ¹⁾
stark belüftet ²⁾	$\alpha_{k,PVi} = 30 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
kurzwelliger Absorptionsgrad	$a_{e,PVi} = a_{PV} \cdot 0,7$ $a_{e,PVi} = 0,385$	$a_{e,PVi} = a_{PV} \cdot 0,9$ $a_{e,PVi} = 0,495$	$a_{e,PVi} = a_{PV}$ $a_{e,PVi} = 0,55$
langwelliger Emissionsgrad	$\varepsilon_{e,PVi} = \varepsilon_{PV}$ $\varepsilon_{e,PVi} = 0,8$	$\varepsilon_{e,PVi} = \varepsilon_{PV}$ $\varepsilon_{e,PVi} = 0,8$	$\varepsilon_{e,PVi} = \varepsilon_{PV}$ $\varepsilon_{e,PVi} = 0,8$
normal belüftet ²⁾	$\alpha_{k,PVi} = 19 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
kurzwelliger Absorptionsgrad	$a_{e,PVi} = a_{PV} \cdot 0,7$ $a_{e,PVi} = 0,385$	$a_{e,PVi} = a_{PV} \cdot 0,9$ $a_{e,PVi} = 0,495$	$a_{e,PVi} = a_{PV}$ $a_{e,PVi} = 0,55$
langwelliger Emissionsgrad	$\varepsilon_{e,PVi} = \varepsilon_{PV}$ $\varepsilon_{e,PVi} = 0,8$	$\varepsilon_{e,PVi} = \varepsilon_{PV}$ $\varepsilon_{e,PVi} = 0,8$	$\varepsilon_{e,PVi} = \varepsilon_{PV}$ $\varepsilon_{e,PVi} = 0,8$
schwach belüftet ²⁾	$\alpha_{k,PVi} = 13,5 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
kurzwelliger Absorptionsgrad	$a_{e,PVi} = a_{PV} \cdot 0,75$ $a_{e,PVi} = 0,413$	$a_{e,PVi} = a_{PV} \cdot 0,9$ $a_{e,PVi} = 0,495$	$a_{e,PVi} = a_{PV}$ $a_{e,PVi} = 0,55$
langwelliger Emissionsgrad	$\varepsilon_{e,PVi} = \varepsilon_{PV}$ $\varepsilon_{e,PVi} = 0,8$	$\varepsilon_{e,PVi} = \varepsilon_{PV}$ $\varepsilon_{e,PVi} = 0,8$	$\varepsilon_{e,PVi} = \varepsilon_{PV}$ $\varepsilon_{e,PVi} = 0,8$

*Für PV-Module sollte als kurzwelliger Absorptionsgrad $\alpha = 0,55$ und als langwelliger Emissionsgrad $\varepsilon_{PV} = 0,8$ verwendet werden.

¹⁾Die angegebenen Faktoren zur Berechnung der effektiven Übergangparameter gelten für Dachbreiten (Abstand Traufe – First) von normalen Einfamilienhäusern. Bei größeren Dachlängen können sich an der mittleren und der wärmsten Stelle ggf. höhere Temperaturen auf dem Unterdach einstellen.

²⁾Die genannten Belüftungsstärken wurden entsprechend den in [8] untersuchten Dächern definiert und entsprechen u. U. nicht den Begrifflichkeiten wie sie in verschiedenen Normen (z.B. DIN 4108 und DIN ISO 6946) angegeben werden

im Vergleich zum ungestörten Regelquerschnitt gedämpft wird. Wird jedoch anstatt einer einzelnen Vakuumröhre der Gesamtkollektor betrachtet, bei dem die einzelnen Röhren mit Abstand zueinander montiert sind, so ergibt sich ein etwas anderes Bild. Durch die Zwischenräume der Röhren gelangt Solarstrahlung auf die Dachoberfläche und die Dachoberfläche kann, wenn auch mit einem eingeschränkten Sichtfeld, langwellig abstrahlen. Daher wurden für die Ermittlung geeigneter Übergangparameter die kurzwellige Absorption und die langwellige Emission auf Basis der Strahlungsparameter der darunterliegenden Eindeckung iterativ angepasst. Als Grundlage dienten die effektiven Übergangparameter gem. dem Modell nach [8] für den ungestörten Regelquerschnitt des Daches.

Bild 15 zeigt die gemessenen Oberflächentemperaturen auf der Unterdachoberfläche mit der solarthermischen Anlage als Stundenmittelwerte (roter Verlauf) sowie das gleitende Monatsmittel (schwarzer Verlauf). Im Vergleich dazu sind die mit den effektiven Übergangparametern nach Tabelle 3 simulierten Temperaturen an der gleichen Position als Stundenwerte (blauer Verlauf) und als gleitendes Monatsmittel (grüner Verlauf) dargestellt.

Aufgrund der verwendeten Klimadaten in Kombination mit der umliegenden Bebauung der Versuchsfläche ist in diesem Fall keine exakte Übereinstimmung der Verläufe im Stundenmittel zu erwarten. Es wird in der Simulation vor allem in den Sommermonaten im Vergleich zu den Messwerten eine stärkere nächtliche Unterkühlung prognostiziert. Dies ist jedoch auch im ungestörten Regelquerschnitt (nicht dargestellt) der hier untersuch-

ten Konstruktion A der Fall, was an den genannten Umständen liegt. Die Differenzen zwischen Simulation und Messung liegen jedoch in beiden Fällen in einer ähnlichen Größenordnung, sodass davon ausgegangen wird, dass unter ungestörten Bedingungen eine bessere Übereinstimmung erzielt wird. Das gleitende Monatsmittel der simulierten Temperaturen liegt im Mittel jedoch etwas unter dem der Messwerte, sodass auch dieser

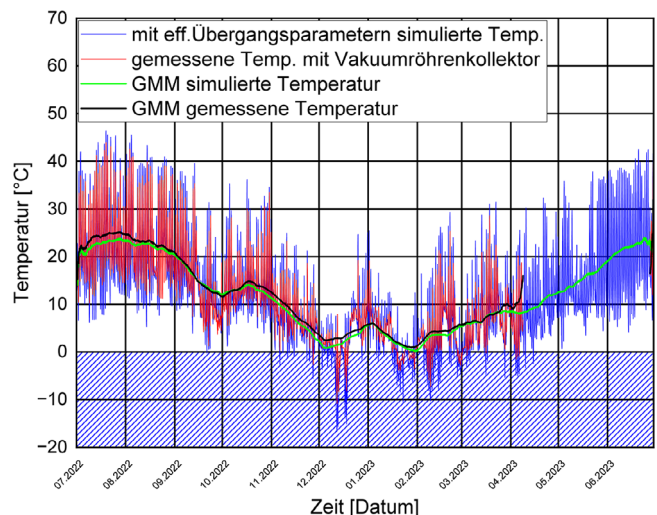


Bild 15 Gemessene sowie mit effektiven Übergangparametern simulierte Temperaturen mittig auf der Unterdachoberfläche der Konstruktion A mit Vakuumröhrenkollektor als Stunden- und gleitende Monatsmittelwerte (GMM) (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
 Temperatures measured and simulated with effective transfer parameters at the center of the roof surface of structure A with vacuum tube collector; measured hourly averages (red) and moving monthly averages (GMM) (black), as well as hourly averages simulated with effective transition parameters (blue) and moving monthly averages (GMM) (green)

Tab. 3 Effektive Wärmeübergangparameter für die hygrothermische Simulation von Steildachkonstruktionen mit thermischen Aufdach-Solar-Modulen (Vaku-
umröhren) in Abhängigkeit der Belüftungsart und der Position im Dachverlauf
Effective heat transfer parameters for the hygrothermal simulation of pitched roof structures with thermal rooftop solar modules (vacuum tubes)
depending on the type of ventilation and the position in the roof structure

	Kälteste Stelle (Traufe)	Mittlere Stelle ¹⁾	Wärmste Stelle (First) ¹⁾
stark belüftet ²⁾	$\alpha_{k,TH} = 30 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
kurzwelliger Absorptionsgrad	$a_{e,TH} = a \cdot 0,28$	$a_{e,TH} = a \cdot 0,36$	$a_{e,TH} = a \cdot 0,4$
langwelliger Emissionsgrad	$\varepsilon_{e,TH} = \varepsilon \cdot 0,2$	$\varepsilon_{e,TH} = \varepsilon \cdot 0,2$	$\varepsilon_{e,TH} = \varepsilon \cdot 0,2$
normal belüftet ²⁾	$\alpha_{k,TH} = 19 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
kurzwelliger Absorptionsgrad	$a_{e,TH} = a \cdot 0,28$	$a_{e,TH} = a \cdot 0,36$	$a_{e,TH} = a \cdot 0,4$
langwelliger Emissionsgrad	$\varepsilon_{e,TH} = \varepsilon \cdot 0,2$	$\varepsilon_{e,TH} = \varepsilon \cdot 0,2$	$\varepsilon_{e,TH} = \varepsilon \cdot 0,2$
schwach belüftet ²⁾	$\alpha_{k,TH} = 13,5 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
kurzwelliger Absorptionsgrad	$a_{e,TH} = a \cdot 0,3$	$a_{e,TH} = a \cdot 0,36$	$a_{e,TH} = a \cdot 0,4$
langwelliger Emissionsgrad	$\varepsilon_{e,TH} = \varepsilon \cdot 0,2$	$\varepsilon_{e,TH} = \varepsilon \cdot 0,2$	$\varepsilon_{e,TH} = \varepsilon \cdot 0,2$

*Als kurzwelliger Absorptionsgrad α und als langwelliger Emissionsgrad ε sollten die Werte der Eindeckung unterhalb angesetzt werden.

¹⁾Die angegebenen Faktoren zur Berechnung der effektiven Übergangparameter gelten für Dachbreiten (Abstand Traufe-First) von normalen Einfamilienhäusern. Bei größeren Dachlängen können sich an der mittleren und der wärmsten Stelle ggf. höhere Temperaturen auf dem Unterdach einstellen.

²⁾Die genannten Belüftungsstärken wurden entsprechend den in [8] untersuchten Dächern definiert und entsprechen u. U. nicht den Begrifflichkeiten wie sie in verschiedenen Normen (z. B. DIN 4108 und DIN ISO 6946) angegeben werden.

Modellansatz etwas kritischere Bedingungen prognostiziert und somit leicht auf der sicheren Seite liegt.

Bild 16 zeigt die Wassergehalte in M.-% (Holzfeuchte), die sich in der Holzschalung der Dachkonstruktion einstellen, simuliert mit den ermittelten effektiven Übergangparametern (blau) und mit ergänzten stündlichen Oberflächentemperaturmesswerten (rot). Im eingeschwungenen Zustand betragen die Abweichungen in den Feuchtespitzen max. 0,5 M.-%, wobei sich bei der Simulation mit den effektiven Übergangparametern leicht höhere Wassergehalte ergeben als bei Simulation mit gemessenen Oberflächentemperaturen. Das Feuchteverhalten deckt sich gut mit den ermittelten Temperaturverläufen auf dem Unterdach (vgl. Bild 15). Da das gleitende Monatsmittel der Simulation mit effektiven Übergangskoeffizienten im Vergleich zu den Messwerten etwas geringere Temperaturen ergibt, sind auch leicht erhöhte Wassergehalte zu erwarten. Auch in diesem Fall beinhalten die effektiven Übergangparameter eine leichte Sicherheitsreserve.

In Tabelle 3 sind die effektiven Wärmeübergangparameter für die hygrothermische Simulation von Steildachkonstruktionen mit thermischen Aufdach-Solar-Modulen (Vaku- umröhren) angegeben. Der kurzwellige effektive Absorptionsgrad a_e , wie er sich für die mittlere Position mit Eindeckung gem. dem Dachmodell [8] ergibt, muss für die Berücksichtigung einer thermischen Solaranlage mit Vaku- umröhren um weitere 54 % und die langwellige Emission ε gleichzeitig um 80 % reduziert werden, um eine Übereinstimmung mit den gemessenen Oberflächentemperaturen auf dem Unterdach bei Belegung mit einem Vaku- umröhrenkollektor zu ergeben.

4.5 Erläuterungen, Modelleinschränkungen und weitere Untersuchungen

Wie bereits erwähnt, ist zu berücksichtigen, dass sich die Strahlungsbedingungen unter planparallel verlegten PV-Modulen und unter den Vaku- umröhren einer thermischen Solaranlage unterscheiden. Abgesehen von bifazialen Modulen trifft unterhalb von PV-Modulen

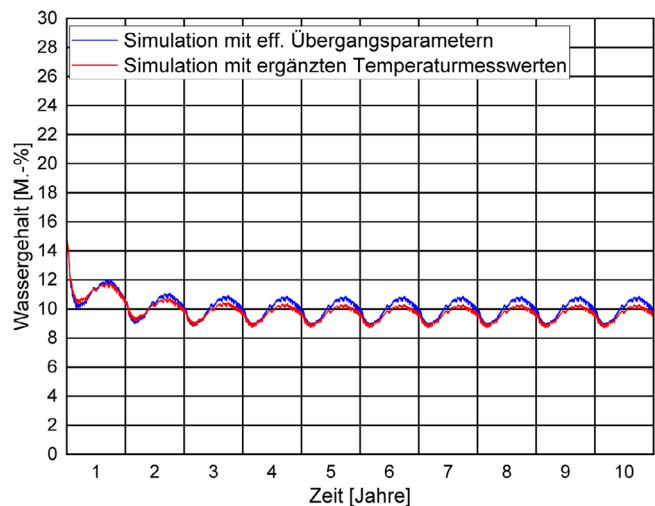


Bild 16 Holzfeuchte in der Schalung der Konstruktion A mittig, mit Vaku- umröhrenkollektor. Simulierte Feuchteverläufe in der Holzschalung über 10 Jahre in M.-% mit gemessenen Oberflächentemperaturen (rot) und mit effektiven Übergangparametern (blau) (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)
Moisture profiles in the wooden sheathing in M.-% of the south-facing construction A with vacuum tube collector; simulated with measured sub-roof surface temperatures (red) and effective transfer parameters (blue)

nahezu keine kurzweilige Solarstrahlung auf die Dachoberfläche auf, der Energieaustausch könnte hier rein physikalisch auf den langwelligen Strahlungsaustausch und die konvektive Wärmeübertragung reduziert werden. Da in den hier dargestellten, vereinfachten Modellen aber weder die energieabführenden Solarmodule noch die Eindeckung und die Belüftungsschichten explizit, sondern durch effektive Übergangparameter berücksichtigt werden, weisen die Abminderungsfaktoren andere Werte auf, als sie ggf. bei einer normalen Verschattungssituation zu erwarten wären. Da die Erwärmung des Unterdachs durch die Solarstrahlung im Simulationsmodell nur über den Absorptionsgrad abgebildet wird, kann dieser nicht den Wert null annehmen, obwohl in der Realität keine oder nur ein sehr geringer Anteil kurzweilige Strahlung auf die Ziegeloberfläche unter den PV-Modulen auftrifft.

Die angegebenen Parameter für die solarthermische Anlage beziehen sich auf Vakuumröhrenkollektoren. Flachkollektoren waren nicht Bestandteil der Untersuchungen. Da Flachkollektoren einen anderen Aufbau haben und dadurch keine Solarstrahlung zur Eindeckung gelangt, können die angegeben Parameter hierfür nicht verwendet werden. Im Zweifelsfall wird empfohlen, für Flachkollektoren eher die Parameter für Aufdach-PV-Module zur Simulation heranzuziehen, da diese ebenfalls eine komplette Verschattung der Dachoberfläche darstellen, allerdings entziehen sie dem Gesamtsystem noch deutlich größere Energiemengen, weshalb das Verhalten solcher Systeme noch genauer analysiert werden sollte.

Sogenannte Hybridkollektoren, PVT oder auch Kombimodule, die neben PV-Modulen zur Stromerzeugung auch eine in den Modulen integrierte Warmwasserbereitung oder Wärmetauscher für eine Wärmepumpe aufweisen, stellen einen Spezialfall dar, welcher ebenfalls nicht Teil der Untersuchungen war. Bei dieser Art von Modulen kann davon ausgegangen werden, dass sie insgesamt nochmals mehr Energie abführen als eine einzelne Solarthermie- oder PV-Anlage und daher noch geringere Oberflächentemperaturen auf dem Unterdach hervorrufen. Diese Module können mit den angegebenen Parametern nicht abgebildet werden, da hierzu noch keine Untersuchungsergebnisse vorliegen.

Die angegebenen Parameter für Indach-PV-Module basieren auf theoretischen Betrachtungen, wobei die in den Versuchen generierten Messdaten mit dem Modell zur hygrothermischen Simulation von hinterlüfteten Steildächern [8] kombiniert werden. Indach-PV-Anlagen waren ebenfalls nicht Teil der Untersuchungen, daher basieren die angegebenen Parameter nicht auf direkten Messwerten. Obwohl der Modellansatz Ergebnisse in einer zu erwartenden Größenordnung liefert, ist das Modell nicht validiert. Alle genannten Ausnahmefälle sollten in zukünftigen Freilandversuchen untersucht werden, sodass auch hierfür zuverlässige Übergangparameter zur hygrothermischen Simulation abgeleitet werden können.

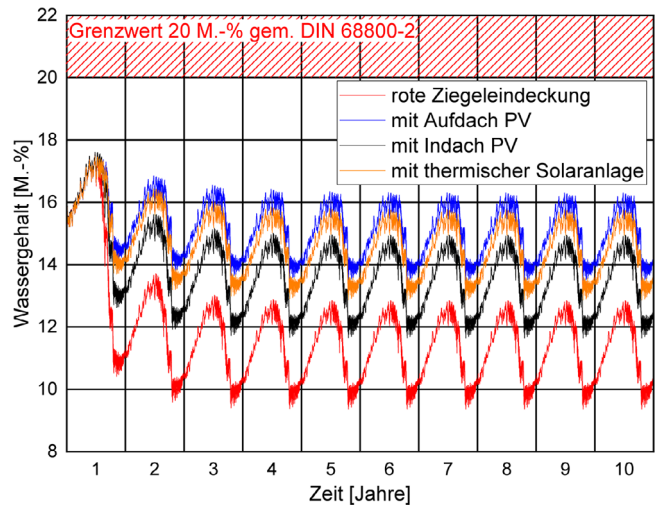


Bild 17 Über 10 Jahre simulierte Wassergehalte in M.-% in der Holzschalung der 40° geneigten und nach Osten orientierten Konstruktion B für das Hygrothermische Referenzjahr (HRY) 09 Standort Fürstzell mit roter Dachsteineindeckung und verschiedenen Solaranlagen (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)

Simulated water content in M.-% over 10 years in the wooden sheathing of the 40° inclined, east-facing construction B for the hygrothermal reference year (HRY) 09 location Fürstzell (Germany) with red roof tiles (red), with rooftop PV system (blue), with in-roof PV (black), and with a vacuum tube collector (orange)

5 Übertragung der Modellansätze

Im Folgenden wird gezeigt, wie sich der Aufbau der untersuchten Konstruktion B unter verschiedenen Klimabedingungen verhält. Hierfür wird die Konstruktion mit einer Dachneigung von 40° nach Osten orientiert angenommen und unter den Klimabedingungen des Hygrothermischen Referenzjahres (HRY) 09 Fürstzell bei Passau betrachtet [13]. Dieser Standort mit einer horizontalen Strahlungssumme von 1184 [kWh/m² a] ist Referenzort für große Teile Bayerns und Baden-Württembergs und repräsentiert somit einen Standort mit erhöhtem Solarstrahlungsangebot in Süddeutschland. Im Vergleich dazu wird die Konstruktion unter den Klimabedingungen des HRY 04 Braunlage im Harz betrachtet. Dieser Standort mit einer horizontalen Strahlungssumme von 1025 [kWh/m² a] repräsentiert viele Lagen in deutschen Mittelgebirgen, darunter Schwarzwald, Pfälzer Wald, Hunsrück, Eifel, Taunus und Westerwald. Es handelt sich um einen eher strahlungsärmeren Standort.

In Bild 17 werden die Holzfeuchten in der Schalung für unbelegte Dachkonstruktion mit roten Dachsteinen (rot) sowie für die Situationen mit Aufdach-PV (blau), Indach-PV (schwarz) und thermischer Solaranlage (orange) für das HRY 09 dargestellt. Erwartungsgemäß führt die Konstruktion mit der reinen Eindeckung aus roten Dachsteinen zu den niedrigsten Wassergehalten in der Holzschalung, da hier die meiste Energie für die Erwärmung zur Verfügung steht und sich somit unter solarer Einstrahlung der Dampfdruck in der Konstruktion entsprechend erhöht, sodass eine Austrocknung zur Raumseite stattfinden kann. Die Wassergehalte in der Schalung aller dargestellten Varianten liegen oberhalb dieses Verlaufs, da die Temperaturen und somit auch die Dampfdrücke in der Konstruktion niedriger bleiben. Jedoch liegen alle

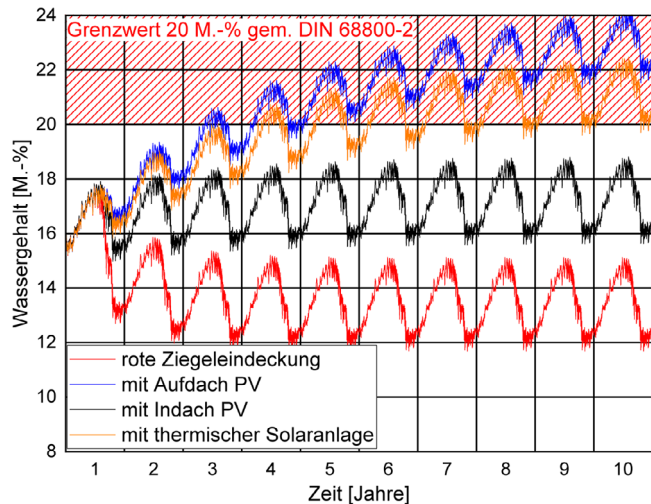


Bild 18 Über 10 Jahre simulierte Wassergehalte in M.-% in der Holzschalung der 40° geneigten und nach Osten orientierten Konstruktion B für das Hygrothermische Referenzjahr (HRY) 04 Standort Braunlage mit roter Dachsteineindeckung und verschiedene Solaranlagen (Quelle: Kölsch/Fraunhofer IBP)

Simulated water content in % by weight over 10 years in the wooden formwork of the 40° inclined, east-facing construction B for the hygrothermal reference year (HRY) 04 location Braunlage with red roof tiles (red), with rooftop PV system (blue), with in-roof PV (black), and with a vacuum tube collector (orange)

Varianten unterhalb des Grenzwertes von 20 M.-% aus der DIN 68800-2 [14], sodass diese Dachkonstruktion ohne Gefahr mit jeglicher Art von Solaranlage belegt werden könnte.

Bild 18 zeigt die identische Dachkonstruktion B unter den Klimabedingungen des Hygrothermischen Referenzjahres (HRY) 04 für den Standort Braunlage. Aufgrund des reduzierten Solarstrahlungsangebotes liegt der Wassergehaltsverlauf der Konstruktion mit roter Eindeckung bereits um ca. 2 M.-% über dem des Standorts Fürstentzell. Wird das Dach mit einer Aufdach-PV (blau) oder thermischen Solaranlage (orange) belegt, steigen die Wassergehalte in der Holzschalung in den ersten sieben Jahren deutlich an, sodass sie den Grenzwert von 20 M.-% gem. DIN 68800-2 [14] bereits im dritten Simulationsjahr übersteigen. Bei beiden Varianten wird die Konstruktion in einen unzulässigen Feuchtebereich verschoben. Mit einer Indach-PV-Anlage (schwarz) steigt der Wassergehalt in der Holzschalung zwar an, bleibt jedoch über den gesamten Zeitraum unterhalb des Grenzwertes von 20 M.-% [14]. Werden keine weiteren konstruktiven Änderungen an der Dachkonstruktion vorgenommen, wäre diese Technik daher für eine dauerhafte hygrothermische Funktionsfähigkeit zu bevorzugen.

Hinweis zu feuchtevariablen Dampfbremsen

Für die feuchtevariable Bemessung solcher Konstruktionen ist es essenziell, auch die verwendete feuchtevariable Dampfbremse zu betrachten, denn diese unterscheiden sich oft weniger durch die absolute Spreizung von Trocken- und Feuchtebereich, sondern vor allem durch Lage und Verlauf des Umschlagbereichs von diffusionsoffen zu diffusionshemmend. Parallele Untersuchungen [15] haben gezeigt, dass dieser Umschlagbereich in Kombina-

tion 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. Einem verlässlichen Datensatz sollten acht, über den gesamten Feuchtebereich verteilten, Einzelmessungen zugrunde liegen, sodass durch die Überlappung der Messbereiche die Auflösung weiter erhöht wird. Nur so kann sichergestellt werden, dass der Zusammenhang zwischen Diffusionswiderstand und relativer Feuchte der Dampfbremse zuverlässig und mit der angemessenen Genauigkeit abgeleitet wird.

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Aufsatz wurde auf Basis von Freilanduntersuchungen das Temperatur- und Feuchteverhalten von Steildachkonstruktion untersucht, die mit Solaranlagen belegt waren. Die Untersuchungen ergaben, dass sich zwischen den verschiedenen Varianten deutliche Temperatur- und dadurch auch Feuchteunterschiede in den Konstruktionen einstellen. Bei Sanierung, Neubau oder Belegung von Bestandskonstruktionen mit Solaranlagen muss die Planung der Dachkonstruktionen daher an diese geänderten Randbedingungen angepasst werden.

Mit den Messdaten der Untersuchungen konnte das Modell zur hygrothermischen Simulation von hinterlüfteten Steildächern [8] erneut validiert werden. Darauf aufbauend und derselben Logik folgend, wurden effektive Übergangsparameter für die hygrothermische Simulation von Steildächern mit verschiedenen Solaranlagen erstellt. Auch ohne die genaue Berücksichtigung aller Wärmeübertragungsvorgänge war es möglich, ein einfaches empirisches Modell zu erstellen, welches auf beliebige Dachneigungen und Orientierungen übertragbar ist. Durch die Anpassungen der Oberflächenübergangsparameter wird es ermöglicht, das hygrothermische Verhalten von Steildachkonstruktionen mit Solaranlagen hinreichend genau und mit einer geringen Sicherheitsreserve versehen zu simulieren. Die durch die Solaranlagen geänderten Bedingungen können nun adäquat berücksichtigt werden, wodurch eine zuverlässige feuchtevariable Planung bzw. Nachweisführung gem. DIN 4108-3 [3] sichergestellt werden kann.

Wie bereits in [7] vorgestellt, ergaben die Untersuchungen, dass bei hohem Sonnenstand im Sommer die Temperaturen auf dem Unterdach der Nordseite höhere Werte erreichen als unter einer Solaranlage auf der Südseite. Für die Berücksichtigung von Solaranlagen ist es somit nicht ausreichend, vereinfacht ein nach Norden orientiertes Dach ohne Solaranlage zu betrachten, da dies das reale Verhalten nicht sicher abbilden kann. Die Untersuchungen belegen weiterhin, dass das bereits existierende Modell zur Simulation von aufgeständerten PV-Modulen auf Flachdächern gem. WTA 6-8 [2] für die Simulation von Solaranlagen auf Steildachkonstruktionen zu weit

auf der sicheren Seite liegt und zu wesentlich niedrigeren Oberflächentemperaturen und daher zu kritischeren Feuchtebedingungen führt.

Im Unterschied zu früher werden heute immer mehr Dachflächen mit PV-Anlagen belegt, die nach Ost, West oder sogar nach Norden orientiert sind. Gerade bei solchen Flächen können durch eine nachträgliche Montage von PV-Modulen die Konstruktionen in einen hygrothermischen Bereich verschoben werden, in dem eine langfristige Funktionsfähigkeit nicht mehr sichergestellt ist. Äußerst kritisch stellt sich das Verhalten hierbei bei Altbaukonstruktionen mit außen diffusionshemmenden Schichten, wie zum Beispiel einem Unterdach aus Bitumenbahnen bzw. Dachpappe oder nicht hinterlüftete Blecheindeckungen dar. Ebenfalls zeigt sich, dass eine feuchtevariable Dampfbremse die Situation zwar entschärft, jedoch nicht in allen Fällen eine langfristige Funktionsfähigkeit sicherstellen kann.

Die Ergebnisse belegen weiterhin, dass sich unzulässig hohe Feuchtegehalte nicht unmittelbar nach dem Einbau,

sondern u.U. erst deutlich zeitverzögert nach mehreren Jahren bemerkbar machen. Um Schäden an der Tragkonstruktion zu vermeiden, ist daher in den genannten Fällen eine individuelle hygrothermische Beurteilung der Konstruktion mithilfe der vorgestellten Modelle in Abhängigkeit des genauen Aufbaus, der Orientierung, Neigung und des Standortes dringend zu empfehlen.

Ist die Eignung der Dachkonstruktion für eine Belegung mit einer Solaranlage nachgewiesen, kann z. B. eine vollflächige Belegung mit PV-Modulen auch positive Effekte auf den sommerlichen Wärmeschutz haben und neben der Möglichkeit zur Erschließung einer lokalen Energieerzeugung auch zur passiven Senkung der Raumtemperaturen beitragen und somit Kühlenergie einsparen.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden von SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG finanziert.

Literatur

- [1] Bludau, C.; Kölsch, P. (2014) *Verschattung von Holzflachdächern*. Tagungsband zum 5. Internationalen Holz[Bau]Physik-Kongress 2014, Leipzig.
- [2] WTA-Merkblatt 6–8 (2016) *Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – vereinfachte Nachweise und Simulation*. August 2016.
- [3] DIN 4108-3:2024-03 (2024) *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. Berlin: DIN Media.
- [4] Künzel, H. M. (1994) *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- [5] DIN EN 15026 (2007) *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*. Berlin: DIN Media.
- [6] Kölsch, P.; Zirkelbach, D.; Bludau, C. (2025) *Risikopotential von Steildachkonstruktionen mit Solaranlagen*. IBP-Mitteilung 585, 52. Fraunhofer IBP.
- [7] Kölsch, P.; Zirkelbach, D. (2025) *Die Schattenseite von Solarmodulen*. Gebäude Energieberater GEB 07.2025, S. 36–41.
- [8] Kölsch, P. (2017) *Hygrothermische Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangsparametern*. Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP).
- [9] IBP-Bericht HTB-004/2024 (2024) *Hygrothermische Simulation von Steildächern mit Solaranlagen Teil 1: Auswertung und Modellerstellung der Untersuchungen in Leutkirch im Allgäu*. Valley, März 2024 [nicht veröffentlicht].
- [10] IBP-Bericht HTB-013/2025 (2025) *Hygrothermische Simulation von Steildächern mit Solaranlagen Teil 2: Auswertung, Modellerstellung und Validierung der Freilanduntersuchungen in Holzkirchen* [nicht veröffentlicht].
- [11] Station 7403 - Leutkirch-Herlazhofen [online]. <https://cdc.dwd.de/rest/metadata/station/html/812300193447> [Zugriff am: 05.02.2024]
- [12] CAMS Radiation Service [online]. <https://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service> [Zugriff am: 05.02.2024]
- [13] Zirkelbach, D. et al. (2016) *Energieoptimiertes Bauen: Klima- und Oberflächenübergangsbedingungen für die hygrothermische Bauteilsimulation*. Fraunhofer-IBP, Holzkirchen.
- [14] DIN 68800-2:2022-02 (2022) *Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau*. Berlin: DIN Media.
- [15] Schmidt, T.; Lengsfeld, K.; Tanaka, E.; Zirkelbach, D. (2025) *Variable Dampfbremsen: Ermittlung feuchteabhängiger Diffusionswiderstände aus Cup-Messungen*. Bauphysik 47, Heft 5, S. 311–318. <https://doi.org/10.1002/bapi.70009>

Autor:innen

Philipp Kölsch, M.Eng. (Korrespondenzautor:in)
philipp.koelsch@ibp.fraunhofer.de
 Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
 Feuchteschutz und Bauen in anderen Klimazonen
 Abteilung Hygrothermik
 Fraunhoferstr. 10
 83626 Valley

Zitieren Sie diesen Beitrag

Kölsch, P. (2026) *Hygrothermische Simulation von Steildächern mit Solaranlagen*. Bauphysik 48, H. 2, S. 143–157.
<https://doi.org/10.1002/bapi.70041>