

# Verschattung von Holzflachdächern

Holz-Flachdächer: Neue Forschungsergebnisse zu Dachterrassen und Verschattung durch PV-Module

Die zunehmende Besiedlungsdichte in Großstädten sowie der Ausbau der erneuerbaren Energien führen immer häufiger dazu, dass Freiflächen auf Flachdächern genutzt werden. Diese Nutzung führt unweigerlich zu einer Beeinflussung der Dachoberfläche und zu einer Veränderung der Randbedingungen auf dem Dach. Eine Bebauung der Dachflächen mit Dachterrassen oder die Errichtung von Solarmodulen zur Energiegewinnung führt zu einer Verschattung der Dachoberfläche, die wiederum eine Änderung der Oberflächentemperatur zur Folge hat. Handelt es sich bei dem Dach um eine Holz-Konstruktion, bei der das Trocknungspotential maßgeblich für die Funktionsfähigkeit verantwortlich ist, müssen derartige Einflüsse bei der feuchtesicheren Bemessung der Konstruktion berücksichtigt werden. Im Folgenden werden zwei vereinfachte Modelle für die Berechnung einer Verschattung durch PV-Module und Dachterrassen vorgestellt.

## Autoren:

Christian Bludau, Philipp Kölsch,  
Fraunhofer Institut für Bauphysik,  
Holzkirchen

tential einer Flachdachkonstruktion. Daher sind die Effekte bei der hygrothermischen Bemessung, wie sie in der DIN 68800-2:2012 für solche Bauteile gefordert werden, zu berücksichtigen. Um nicht in der Simulation ganze PV-Module oder Terrassenbeläge mit einer Unterlüftung abzubilden, können die Temperaturen an einer Dachoberfläche auch vereinfacht über die Strahlungsparameter der Oberfläche verändert werden. Dazu lagen aber bisher keine Erkenntnisse vor.

## Ursache einer niedrigeren Oberflächentemperatur

Die Oberflächentemperatur einer äußeren Bauteiloberfläche wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Sie ist von der Lufttemperatur der Umgebung, der solaren Einstrahlung, der atmosphärischen Gegenstrahlung sowie der Oberflächeneigenschaft abhängig. Letztere werden durch die Absorptions- und Emissionszahl beschrieben. Es ist bekannt, dass eine Konstruktion mit dunkler Dachoberfläche (hohe Absorptionszahl) eine deutlich höhere Temperatur aufweist als mit einer hellen Oberfläche (geringe Absorptionszahl). Die kurzwellige solare Einstrahlung ist maßgeblich für die Erwärmung der Oberfläche verantwortlich. Die Emissionszahl beschreibt die langwellige Ab-



strahlung der Oberfläche und liegt bei Baustoffen mit nicht-metallischen Oberflächen um die 0,9. Abhängig von der Emissionszahl und Temperatur gibt die Dachoberfläche Tag wie Nacht Energie ab. Dies kann vor allem nachts dazu führen, dass die Temperatur der Oberfläche unter die Außenlufttemperatur sinkt und sich auf der Oberfläche Tauwasser bildet.

## Vereinfachter Ansatz

Wie bereits oben erwähnt, können die Einstellungen der Übergangsbedingungen in der Simulation genutzt werden, um die Effekte einer Verschattung vereinfacht über die Strahlungsabsorptions- und -emissionszahlen abzubilden. Hierzu wurden am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen Untersuchungen an Versuchsaufbauten auf Flachdächern durchgeführt.

## Feldversuche zur Verschattung

Es wurden zwei Versuche zu typischen Verschattungssituationen aufgebaut. Hierzu wurden ein PV-Modul und ein Holz-Terrassenbelag auf einem Flachdach installiert (Abb. 2 und 3) und die Temperaturen über einen Zeitraum von drei Jahren gemessen.

Neben den Temperaturen wurden an der institutseige-

Abb. 1:  
Holz-Flachdach mit aufgeständerter PV-Anlage.

Foto: Bickenbach, 2013

nen Wetterstation u.a. Außentemperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung, Diffusstrahlung, atmosphärische Gegenstrahlung, Windrichtung und -geschwindigkeit erfasst. Damit konnten die Messungen mit dem hygrothermischen Simulationsprogramm WUFI® Pro 5.2 nachberechnet werden.

## Nachrechnung der Verschattung durch PV-Module

Um die Verschattung nachzubilden, werden für das vereinfachte Modell die kurzwellige Absorptionszahl ( $a$ ) und die langwellige Emissionszahl ( $\epsilon$ ) der Dachbahn so angepasst, dass die Nachrechnung ohne Berücksichtigung des PV-Moduls mit den gemessenen Werten weitestgehend übereinstimmt. So ergibt sich bei PV-Modulen auf Flachdachbahnen eine Reduktion der Absorptionszahl  $a$  der vorhandenen Dachabdichtung (hier 0,91) auf 30 % ( $a_v = 0,3 \cdot a = 0,3 \cdot 0,91 = 0,27$ ) und der Emissionszahl  $\epsilon$  (hier 0,9) auf 50 % ( $\epsilon_v = 0,5 \cdot \epsilon = 0,5 \cdot 0,9 = 0,45$ ). Die reduzierte Absorptionszahl ist auf die Verschattung der Dachoberfläche durch das PV-Modul zurück-

## Problematik

Für das Trocknungsverhalten von unbelüfteten Flachdächern in Holzbauweise ist die Oberflächentemperatur von entscheidender Bedeutung. Die Feuchte, die im Winter durch Diffusion und nicht vermeidbare Konvektion [Zirkelbach et al. 2009] in die außen dampfdichte Konstruktion eindringt, muss im Sommer durch die Umkehrdiffusion wieder zum Raum hin austrocknen. Die Verschattung der Dachoberfläche durch Photovoltaik-Module oder Holzterrassen reduziert die Oberflächentemperatur und damit das Rücktrocknungspo-

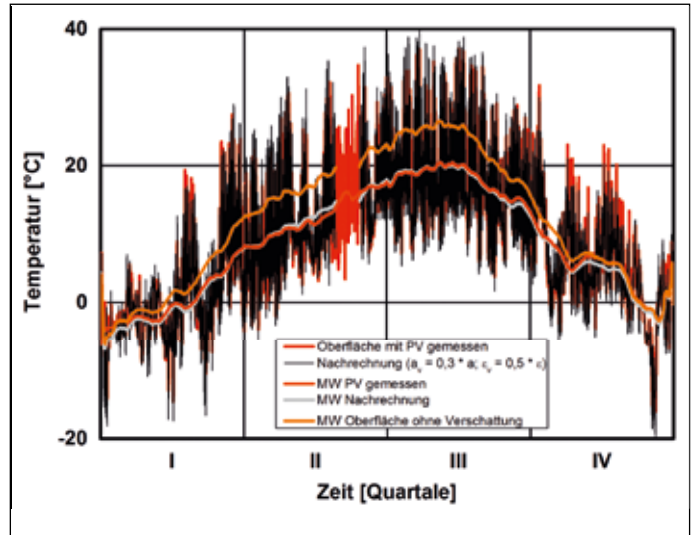


Abb. 2:  
oben:  
Versuchsaufbau zur Temperaturmessung unter einem nach Süden orientierten Solarpanel; 30° zur Horizontalen geneigt.  
unten:  
Blick unter das PV-Modul, für die Auswertungen wurde nur die kritische Position an Punkt 2 mittig unter dem Modul verwendet.

Abb. 3:  
Versuchsaufbau zur Messung der Dachtemperaturen unter einem Dachterrassenaufbau (Holzarten: Bankirai und Esche dunkelbraun keseldruckimprägniert. Messungen an der Holzunterseite und der Dachoberfläche sowie im darunter liegenden Innenraum.



zuführen, die verringerte Emissionszahl repräsentiert den durch das PV-Modul veränderten langwelligen Strahlungsaustausch mit der Atmosphäre. Wie die Berechnung zeigt, ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung im Mittel gut (Abb. 4). Das gleitende Monatsmittel der Nachrechnung (graue Linie) ist im Schnitt geringfügig niedriger als der Mittelwert der Messwerte, wodurch die Verwendung dieses Modells für die hygrothermische Betrachtung auf der sicheren Seite liegt. Zum Vergleich ist das gleitende Monatsmittel der Dachoberflächentemperaturen des unverschatteten Daches dargestellt



(orange Linie), hier liegen die Werte fast ganzjährig deutlich höher. Die Lücke in den Verläufen im Juni ist auf einen Ausfall der Klimamessung zurückzuführen. Die Temperatur ohne Verschattung verdeutlicht zudem, wie stark sich das PV-Modul auf die Temperatur der Oberfläche auswirkt.

Abb. 4:  
Vergleich der gemessenen Temperaturen auf der Dachbahn unter dem PV-Modul (Punkt 2) mit den Ergebnissen der Nachrechnung nach vereinfachtem Modell ( $a_v = 0,3 * 0,91 = 0,27$ ;  $\epsilon_v = 0,5 * 0,90 = 0,45$ )

### Wassergehalt einer Konstruktion unter dem PV-Modul

Um das Verhalten der reduzierten Oberflächentemperatur auf ein Flachdach in Holzbauweise zu erfassen, wurden nun die Messwerte unter dem PV-Modul als Randbedingung exemplarisch auf ein Holz-Flachdach mit Folienabdichtung, Holzschalung, 30 cm Mineralfaserdämmung und innenseitig einer Dampfbremse mit einem konstanten  $s_d$ -Wert von 5 m angesetzt und das resultierende Feuchteverhalten der Holzschalung berechnet.

Tabelle 1: Messwerte für Absorption und Emission der Dachterrasse (Mittelwerte aus mehreren Messungen)

Holz	Kurzwellige Absorptionszahl $a$ [-]	Kurzwellige Absorptionszahl nach 2 Jahren (grau verwittert) $a_{2a}$ [-]	Langwellige Emissionszahl $\epsilon$ [-]
Bankirai (hell)	0,47	0,74	0,92
Esche (dunkel)	0,85	0,82	0,91

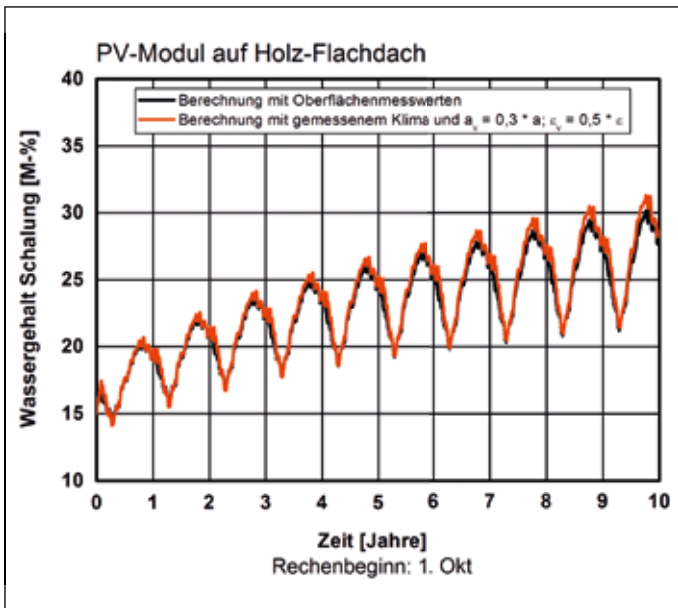
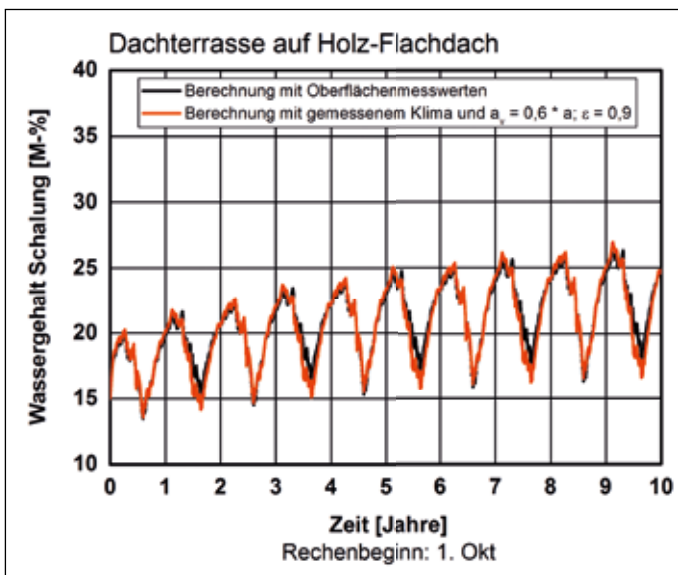


Abb. 5:  
Vergleich des Wassergehalts in der Holzschalung eines Flachdaches in Holzbauweise mit PV-Modulen unter Verwendung der gemessenen Temperaturen und der Nachrechnung nach vereinfachtem Modell ( $a_v = 0,3 * 0,91 = 0,27$ ;  $\epsilon_v = 0,5 * 0,90 = 0,45$ )

Ziel dieser Betrachtung ist, dass die Nachrechnung mit dem vereinfachten Modell dieselben (oder leicht kritischere) Wassergehalte ergibt, wie die Berechnung mit den Messwerten als Randbedingung. Abb. 5 zeigt den Vergleich der Holzfeuchte in der Schalung für die Berechnung mit gemessenen Oberflächentemperaturen und mit dem vereinfachten Modell. Hier ist eine gute Übereinstimmung der Wassergehaltsverläufe zu erkennen. Die Berechnung mit dem vereinfachten Modell weist geringfügig höhere Werte auf und liegt somit auf der sicheren Seite. Für die betrachtete Konstruktion ist ein stetiger Anstieg des Wassergehalts zu erkennen. Hier wird allerdings gezielt eine Konstruktion betrachtet, die eine

Abb. 6:  
Vergleich des Wassergehalts in der Holzschalung eines Flachdaches in Holzbauweise unter einem Holzterrasenbelag (Bankirai vergraut  $a = 0,74$ ) unter Verwendung der gemessenen Temperaturen und der Nachrechnung nach dem vereinfachten Modell für die Dachterrasse ( $a_v = 0,6 * 0,74 = 0,44$ ,  $\epsilon = 0,9$ ).



Akkumulation von Wasser aufweist, um das längerfristige Verhalten besser einschätzen zu können.

### Übertragung des Modells auf Modulreihen

Da die hier untersuchten einzelnen PV-Elemente in der Praxis kaum vorkommen, wurden theoretisch Betrachtungen an Dachoberflächen mit mehreren, aufgeständerten Modulreihen durchgeführt. Dabei ergab sich, dass die Oberflächen bei aufgeständerten Modulreihen tendenziell wärmer werden als bei einem direkt auf der Dachoberfläche befindlichen Einzelmodul. Daher wird davon ausgegangen, dass das für die einzelnen PV-Module aufgestellte Modell auch für die Berechnung von aufgeständerten Modulreihen herangezogen werden kann und auf der sicheren Seite liegt.

### Überbauung durch Dachterrassen

Zur Nachberechnung der Messungen am Terrassenaufbau (siehe Abb. 3) wurden im ersten Schritt die Absorption und Emission der Oberfläche bei Einbau und nach zwei Jahren Bewitterung bestimmt. Die Werte sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die helle Fläche aus Bankirai wird durch die Bewitterung grau – hierbei erhöht sich die Absorptionszahl deutlich. Dies hat zur Folge, dass die Oberflächentemperatur im Schnitt höher als im Einbauzustand ist. Die dunkle Oberfläche der Esche bleicht etwas aus, was aber keinen großen Einfluss auf die kurzweilige Absorption hat. Für die Berechnungen wird jeweils der Wert nach zwei Jahren angesetzt.

### Nachrechnung der Verschattung durch Dachterrassen

Im nächsten Schritt wurde zur Berechnung des Terrassenaufbaus entsprechend den PV-Modulen verfahren. Beim Terrassenbelag wird eine gute

Übereinstimmung mit einer Reduktion des Absorptionsgrads auf 60 % der Holzoberfläche ( $a = 0,6 * 0,74 = 0,44$ ) und unveränderter Emissionszahl ( $\epsilon = 0,9$ ) erzielt. Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen zwei parallelen Flächen mit geringem Abstand ist in der Regel so groß, dass nur geringe Temperaturunterschiede auftreten. Während vermutlich bei Erwärmung des Terrassenaufbaus ein Teil der Wärme über Konvektion aus dem Luftraum durch die Luftspalte zwischen den Dielen abgeführt wird (was über die Reduktion der Absorptionszahl berücksichtigt wird), spielt der Konvektionseinfluss bei Unterkühlung aufgrund des Absinkens der kalten Luft kaum eine Rolle und die Emissionszahl muss demzufolge hier nicht angepasst werden.

Für die folgenden Untersuchungen wird wieder die oben verwendete Flachdachkonstruktion herangezogen und ebenfalls die Holzfeuchte der Schalung beurteilt. Die Wassergehalte, die sich bei einer Berechnung mit den gemessenen Oberflächentemperaturen einstellen, werden mit den Ergebnissen des vereinfachten Modells verglichen (siehe Abb. 6). Die Verläufe der Wassergehalte sind in beiden Fällen sehr ähnlich, das Modell kann die Messungen gut abbilden.

### Vergleich der Modelle anhand einer ausgewählten Konstruktion

Der Einfluss der verschiedenen Verschattungsszenarien wird mit Hilfe der ermittelten Modelle anhand der Konstruktion in Abb. 7 verglichen. Wie der Wassergehalt der OSB-Platte in Abb. 8 (linkes Diagramm) zeigt, bleibt die unverschattete Konstruktion bei dunkler Dachbahn dauerhaft unter dem zulässigen Wassergehalt der OSB-Platte von 18 M.-% (DIN 68800-2:2012).

Das Niveau der Holzwerkstofffeuchte unter dem Terrassenbelag liegt etwas höher, bleibt aber ebenfalls unter dem Grenzwert von 18 M.-%.



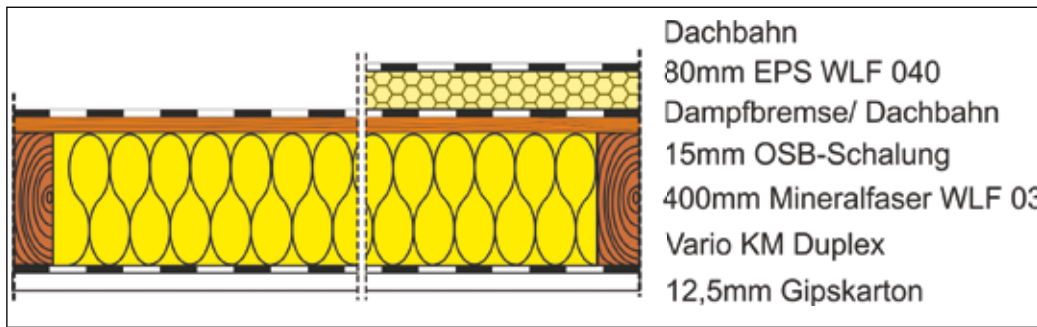


Abb. 7: Beispielhafter Flachdachaufbau links: Ursprünglicher Querschnitt, rechts: mit Überdämmung. Die 40 cm Gefachdämmung wurden gewählt, um eine ungünstige Situation für die Beplankungsfeuchte zu erhalten.

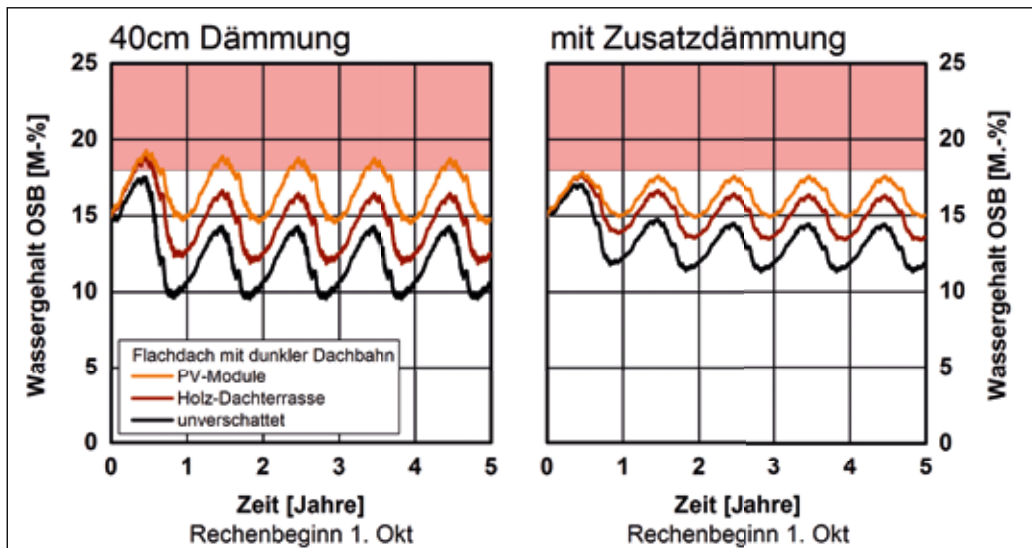


Abb. 8: Verläufe des Holzwerkstoff-Feuchten der OSB-Platte für ein Flachdach (Abb. 7) mit 40 cm Mineralfaser-Dämmung, dunkler Dachbahn und Verschattungsfaktoren für Dachterrasse und PV-Modulen; ohne (links) und mit Zusatzdämmung (rechts)

Bei der Verschattung durch das PV-Modul erreicht hingegen die Holzwerkstoff-Feuchte jedes Jahr Werte von max. 19 M.-% und überschreitet den zulässigen Grenzwert für mehr als 3 Monate. Laut DIN 68800-2: 2012 ist die Überschreitung von 18 M.-% bis auf 20 M.-% nur für maximal drei Monate zulässig. Zudem ist bei so hohen Feuchten mit Verformungen zu rechnen. Die Konstruktion sollte daher so nicht ausgeführt werden.

### Überdämmung hilft

Um die Überschreitung der Grenzfeuchte zu vermeiden, wird die Konstruktion mit einer zusätzlichen Dämmung oberhalb der OSB-Beplankung betrachtet. Abb. 8 zeigt im rechten Diagramm den Wassergehalt der OSB-Platte mit der Zusatzdämmung von 8 cm. Die maximale Feuchte der Konstruktion mit PV-Modulen überschreitet nun nicht mehr den Grenzwert von 18 M.-%. Generell ist das Niveau des Wassergehalts bei den Varianten

mit Überdämmung etwas höher, da durch die Überdämmung die OSB-Platte zwar im Winter etwas wärmer und trockener, im Sommer aber die Konstruktion kühler bleibt und sich die Rücktrocknung etwas reduziert.

### Es bleibt noch Forschungsbedarf

Die gezeigten vereinfachten Modelle, die aus den Versuchen ohne Auflast (Kies / Begrünung) abgeleitet wurden, dürfen nur für diese Konstruktionen angewendet werden. Sie sind die Ergebnisse erster Untersuchungen und sollten in einem angestrebten Forschungsvorhaben noch genauer untersucht werden.

### Fazit

Vereinfachend werden die Aufbauten (PV-Module, Dachterrasse) in der Berechnung nicht direkt mitbetrachtet, sondern über die Strahlungseigenschaften der Dachoberfläche berücksichtigt. Tabelle

Tabelle 2: Berücksichtigung der Verschattung in hygrothermischen Simulationen durch reduzierte Strahlungskoeffizienten von Flachdächern in Holzbauweise.

Verschattung durch	Kurzwellige Absorption	Langwellige Emission
PV-Modul <sup>1)</sup>	$a_v = 0,3 * a$	$\epsilon_v = 0,5 * \epsilon$
Dachterrasse <sup>2)</sup>	$a_v = 0,6 * a$	$\epsilon_v = \epsilon$

<sup>1)</sup> mit  $a, \epsilon$  der Dachbahn      <sup>2)</sup> mit  $a, \epsilon$  der Holz-Dachterrasse

2 fasst die zwei Modelle zusammen und zeigt die erforderlichen Randbedingungen für die hygrothermische Simulation.

Da die sommerliche Rücktrocknung bei verschatteten Konstruktionen reduziert ist, muss i.d.R. eine Bemessung im Einzelfall erfolgen. Können die geforderten Holzfeuchten aufgrund einer Verschattung nicht eingehalten werden, kann die Situation durch eine variable Dampfbremse und eine zusätzliche Überdämmung in geeigneter Dicke verbessert werden. Die Dicke der Überdämmung hängt vom Standort und den dortigen

Klimaverhältnissen sowie der Nutzung des Gebäudes (Raumklima) ab und sollte daher durch einen Fachplaner bemessen werden. ■

### Literaturverweis

[Zirkelbach et al. 2009] Zirkelbach, D.; Künzel, H.M.; Schafaczek B.; Borsch-Laaks, R.: Dampfkongvektion wird berechenbar - Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen. Proceedings 30. AIVC Conference, Berlin 2009