

# Hygrothermische Simulation von hinterlüfteten Steildächern mit effektiven Übergangsparemtern

Philipp Kölsch  
Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen, Germany  
philipp.koelsch@ibp.fraunhofer.de

Schlagwörter: Luftschichten; Hygrothermische Simulation; WUFI; Steildächer; Belüftete Dächer; Effektive Wärmeübergangsparemter; Wärmeübertragung; Feuchte;

Ergänzte und editierte Fassung 01/2017

## 1 Kurzfassung

Für das Feuchteverhalten von Steildachkonstruktionen mit hinterlüfteter Eindeckung ist die Oberflächentemperatur des Unterdachs von maßgebender Bedeutung. Durch die Belüftungsschicht, die mit der Außenluft in Verbindung steht, werden die Temperaturen der Dachoberfläche mehr oder weniger gedämpft auf das Unterdach weitergegeben. Dieses Verhalten beeinflusst wiederum die Feuchteverhältnisse in der Dachkonstruktion. Der vorliegende Bericht stellt

die vorläufigen Forschungsergebnisse aus Freilandversuchen dar, bei denen das thermische Verhalten verschiedener belüfteter Konstruktionen untersucht wurde. Es werden strahlungstechnische Kennwerte verschiedener Eindeckungen angegeben und ein Verfahren vorgestellt mit dem das thermische Verhalten einer belüfteten Konstruktion in der hygrothermischen Simulation anhand effektiver Übergangsparemter genauer beschrieben werden kann.

## 2 Problemstellung

Steildachkonstruktionen mit einer Eindeckung aus Dachsteinen oder Dachziegeln werden seit jeher als be- bzw. hinterlüftete Konstruktionen ausgeführt. Schon alleine durch die Lattung, die für die Befestigung der Eindeckung benötigt wird, ergibt sich eine Luftschicht. Die Hinterlüftungsschicht bestehend aus Lattung und Konterlattung hat jedoch mehrere Funktionen. Als erstes ermöglicht die Konterlattung den freien Ablauf von Regenwasser auf dem Unterdach, der zweiten wasserführenden Schicht. Zweitens dient die Belüftungsebene dem sommerlichen Wärmeschutz, da warme Luft aus dem Zwischenraum abgeführt wird. Als dritter Punkt ist der Abtransport von Feuchtigkeit in Folge von Diffusion und Konvektion aus dem Innenraum bzw. Tauwasser aufgrund Unterkühlung der Eindeckung zu nennen.

Die Hinterlüftung einer Eindeckung hat sich durch die Vielzahl ihrer Funktionen und

unproblematischen Funktionsweise als bewährte Maßnahme etabliert. Nicht ganz einfach ist die Nachbildung der Hinterlüftungsschicht im Zuge der Bemessung z.B. mit Hilfe einer hygrothermischen Simulation. Prinzipiell gibt es bisher drei Möglichkeiten der Berechnung. Zum einen die Berechnungsvariante ohne die explizite Berücksichtigung der Luftschicht und ohne Strahlungseinflüsse. Bei dieser Variante wird die Außenlufttemperatur an der Dachoberfläche zum Ansatz gebracht, was zu sehr niedrigen Oberflächentemperaturen und hohen Feuchtegehalten in der Dachkonstruktion führt. Diese Art der Berechnung kann als kritischster Fall angesehen werden. Zum anderen kann die Berechnung mit einer Eindeckung und einer Luftschicht durchgeführt werden. Hierzu werden die Strahlungsparameter der Eindeckung verwendet und die Luftschicht zwischen Eindeckung und Unterdach mit berechnet. Um den Luftaustausch mit der Umgebung zu simulieren, wird bei dieser Variante eine

Luftwechselquelle in die Belüftungsschicht integriert und Außenluft „beigemischt“. Diese Berechnungsvariante liegt meistens näher an der Realität, hat aber den Nachteil, dass der Luftwechsel in der Belüftungsschicht bekannt sein muss. Falsche Angaben führen hier unter Umständen zu unrealistischen Ergebnissen. Eine weitere Methode stellt die Berechnung mit den Strahlungsparametern direkt auf dem Unterdach dar. Hierbei wird die Belüftungsschicht ebenfalls nicht explizit berücksichtigt. Diese Methode führt jedoch zu starker nächtlicher Unterkühlung und zu hohen Oberflächentemperaturen unter solarem Strahlungseinfluss.

Eine genaue thermische Berechnung einer hinterlüfteten Dachkonstruktion erfordert die Berücksichtigung sämtlicher beeinflussenden Wärmeübertragungsvorgänge wie sie in Bild 1 oben dargestellt sind. Da in diese Berechnung sehr viele Parameter einfließen, die nicht immer bekannt sind und bei der Simulation die Eindeckung und die Belüftungsschicht nicht explizit berücksichtigen zu müssen, werden im Folgenden die Temperaturen auf dem Unterdach vereinfacht über die Anpassung der empirisch ermittelten Strahlungs- und Konvektionsparameter so verändert, dass sie gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen (Bild 1 unten).

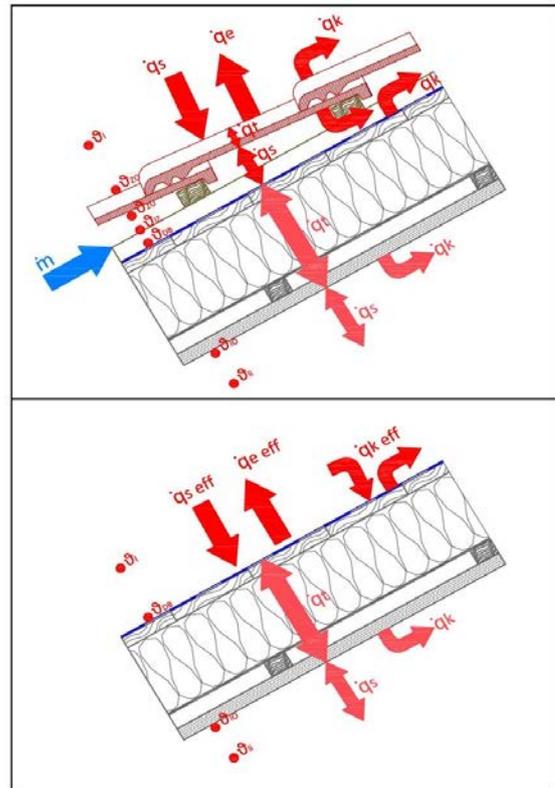


Bild 1: Darstellung der Wärmeübertragungsvorgänge an einer hinterlüfteten Steildachkonstruktion mit Eindeckung und allen Wärmeübertragungsvorgängen (oben) sowie mit effektiven Strahlungs- und Konvektions-Parametern (unten).

### 3 Versuche

Am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen wurden mehrere unterschiedliche Dachkonstruktionen untersucht, um die oben genannten Übergangparameter für die hygrothermische Simulation zu ermitteln. An Steildächern mit verschiedenen Eindeckungen und verschiedenen Belüftungsarten wurden Temperaturmessungen durchgeführt. Hierbei wurde jeweils die Oberflächentemperatur der Eindeckung, die Temperatur an der Unterseite der Eindeckung, die Temperatur im Luftzwischenraum sowie die Oberflächentemperatur auf dem Unterdach erfasst. Die

Messungen erfolgten an mehreren Positionen im Dachverlauf (von der Traufe zum First) über einen Zeitraum von ca. einem Jahr. An der nahegelegenen Instituts-Wetterstation wurden die Außenlufttemperatur, die relative Feuchte, Global- und Diffusstrahlung, atmosphärische Gegenstrahlung sowie Windrichtung und Windgeschwindigkeit erfasst. Weiterhin wurden im institutseigenen Labor die Strahlungsparameter verschiedener Eindeckungen ermittelt.

## 4 Ergebnisse

Die Untersuchungen an den Dachkonstruktionen zeigen, dass sich die höchsten Oberflächentemperaturen auf der Oberseite der Eindeckung einstellen. Bild 2 stellt den Temperaturverlauf auf der Eindeckungsobenseite, dem Unterdach und die Außenlufttemperatur an zwei Sommertagen im Jahr 2013 dar. Die Oberflächentemperaturen des Unterdachs liegen am Tag bei solarer Einstrahlung wesentlich über der Temperatur der Außenluft. Von der nächtlichen Unterkühlung aufgrund langwelliger Abstrahlung ist hauptsächlich die Eindeckung betroffen. Die Temperatur des Unterdachs bleibt in diesem Fall sehr nahe an der Außenlufttemperatur.

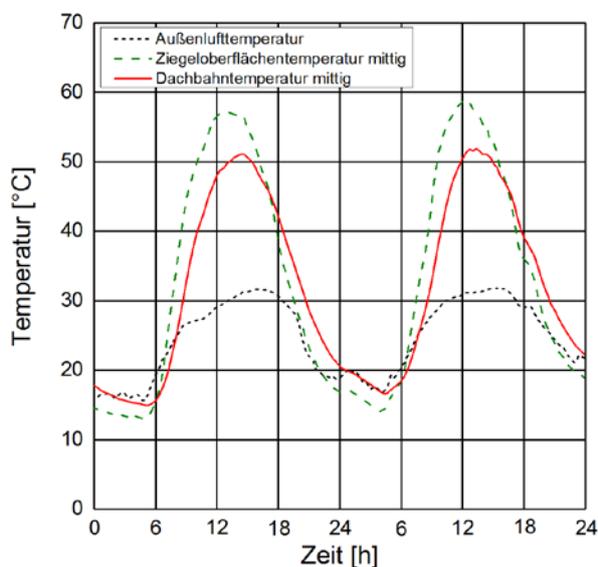


Bild 2: Darstellung der Oberflächentemperatur auf der Eindeckung und auf dem Unterdach mittig zwischen Traufe und First an einem „normal“ belüfteten nach Süden orientierten Dach sowie der Außenlufttemperatur an zwei Sommertagen im Jahr 2013.

Bild 3 zeigt die Temperatur auf dem Unterdach mittig zwischen Traufe und First und die dazugehörige Außenlufttemperatur einer nach Süden orientierten, normal belüfteten Dachhälfte für das Jahr 2013. Zusätzlich ist das gleitende Monatsmittel der beiden Temperaturverläufe dargestellt. In Bild 4 sind die gleichen Verläufe für ein nach Norden orientiertes stark belüftetes Dach dargestellt. Im Vergleich zu dem nach Süden orientierten Dach

(Bild 3) ist zu erkennen, dass die Temperaturspitzen im Tagesverlauf auf dem Unterdach geringer ausgeprägt sind.

Es ist jedoch auch ersichtlich, dass das gleitende Monatsmittel der Temperatur auf dem Unterdach in beiden Fällen über der Außenlufttemperatur liegt, lediglich während eines kurzen Zeitraums im Winter nähern sich die Temperaturen einander an. Dies lässt den Schluss zu, dass die eingangs erwähnte Berechnungsmethode, welche lediglich die Außenlufttemperatur zum Ansatz bringt, zu niedrige Temperaturen prognostiziert.

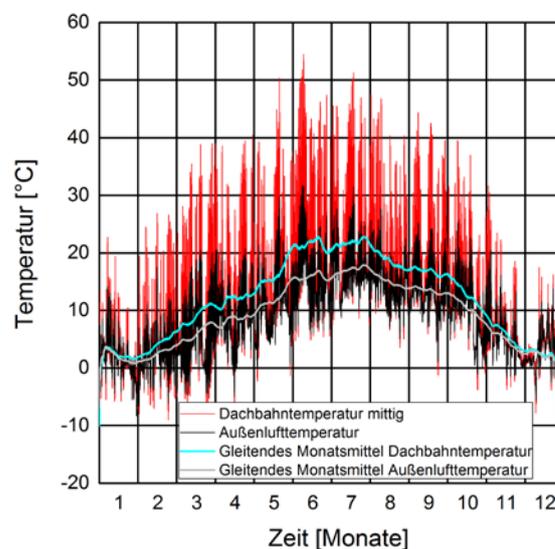


Bild 3: Oberflächentemperatur mittig auf dem Unterdach (rot) und Außenlufttemperatur (schwarz) sowie die dazugehörigen gleitenden Monatsmittel einer normal belüfteten und nach Süden orientierten Dachhälfte im Jahr 2013.

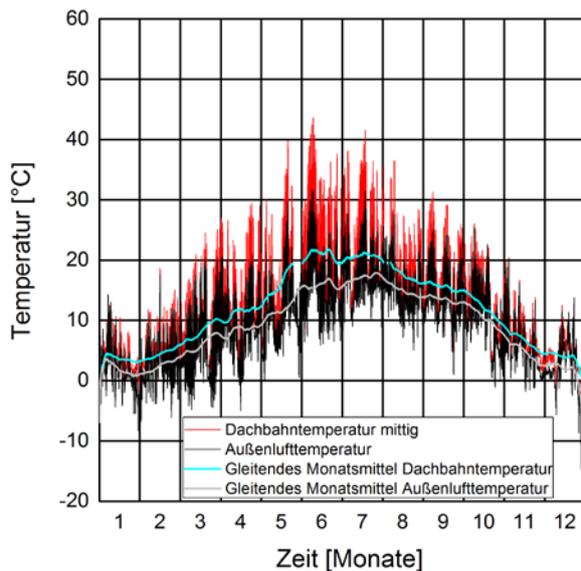


Bild 4: Oberflächentemperatur mittig auf dem Unterdach (rot) und Außenlufttemperatur (schwarz) sowie die dazugehörigen gleitenden Monatsmittel einer stark belüfteten und nach Norden orientierten Dachhälfte im Jahr 2013.

Die Untersuchungen haben weiterhin ergeben, dass die Lufttemperatur im Belüftungsraum sowie die Oberflächentemperatur des Unterdachs bei solarer Einstrahlung von der Traufe zum First zunimmt.

Bild 5 zeigt die Temperaturverläufe auf dem Unterdach, in Nähe der Traufe, mittig zwischen Traufe und First sowie in Firstnähe im Vergleich zur Außenlufttemperatur. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Temperatur des Unterdachs bereits in Nähe der Traufe (Abstand ca. 30 cm) bei solarer Einstrahlung deutlich über der Außenlufttemperatur liegt. Die Temperatur des Unterdachs steigt bis zur Dachmitte weiterhin signifikant an erhöht sich dann aber nur noch moderat bis zur Messposition unterhalb des Firstes (Abstand ebenfalls ca. 30 cm). Anhand der unterschiedlichen Oberflächentemperaturen ist erkennbar, dass für verschiedene Positionen unterschiedliche Berechnungsansätze angewandt werden müssen. Weiterhin nähern sich die Temperaturen an den drei Positionen während des Abkühlvorgangs und in Zeiten ohne solare Einstrahlung stark an. Diese Beobachtung rechtfertigt die Verwendung von strahlungsabhängigen effektiven Übergangsparametern.

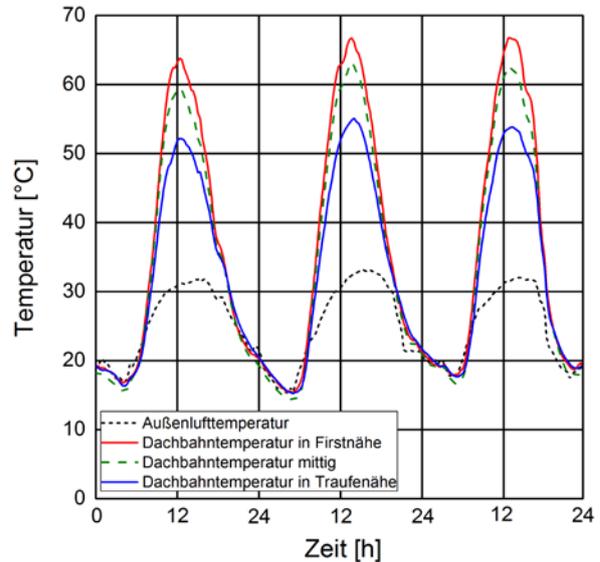


Bild 5: Oberflächentemperaturen auf dem Unterdach in der Nähe der Traufe (blau), mittig zwischen Traufe und First (grün) und in Nähe des Firstes (rot) sowie die Außenlufttemperatur (schwarz) einer nach Süden orientierten schwach belüfteten Dachhälfte an drei Sommertagen im Jahr 2013.

Die Temperatur erhöht sich nicht linear von der Traufe zum First, sondern steigt im unteren Bereich des Daches stärker an. Da sich mit der Dachbreite die Temperaturdifferenz zwischen der Luft im Luftzwischenraum bzw. dem Unterdach und der Eindeckung verringert, ergibt sich für beide Fälle ein logarithmischer Temperaturverlauf von der Traufe zum First. Das sich einstellende Temperaturprofil ist von der Art der Belüftung des Daches abhängig. Hier ist festzustellen, dass die Art der Belüftung im Wesentlichen von den Öffnungen an Traufe und First abhängig ist. Diese Öffnungen sind der Lufteinlass und Luftauslass der Belüftungsschicht und stellen für den Luftstrom einen Strömungswiderstand dar. Je größer dieser Strömungswiderstand ist, desto geringer ist der Luftwechsel zwischen Unterdach und Eindeckung.

Es muss hierzu angemerkt werden, dass bei unveränderter Luftgeschwindigkeit der Luftwechsel in der Belüftungsschicht nicht von der Höhe des Belüftungsquerschnitts sondern lediglich von der Dachbreite, also vom Abstand von der Traufe zum First und dem Strömungswiderstand der Belüftungsöffnungen abhängig ist. Es gilt der einfache theoretische Ansatz:

$$LW = \frac{\dot{V}}{V} = \frac{\omega_{ls} \cdot A \cdot 3600 \left[ \frac{[s]}{[h]} \right]}{A \cdot b} = \frac{\omega_{ls} \cdot 3600 \left[ \frac{[s]}{[h]} \right]}{b} \left[ \frac{1}{[h]} \right] \quad (1)$$

$LW$  = Luftwechselzahl  $[1/h]$

$\dot{V}$  = Volumenstrom  $[m^3/s]$

$V$  = Volumen  $[m^3]$

$\omega_{ls}$  = Luftgeschwindigkeit  $[m/s]$

$A$  = durchströmte Querschnittsfläche  $[m^2]$

$b$  = Dachbreite (Abstand Traufe First)  $[m]$

Eine Vergrößerung des Belüftungsquerschnitts durch Erhöhung der Lattenstärke hat somit bei gleichbleibender Luftgeschwindigkeit keinen größeren Luftwechsel zur Folge, da das Volumen der Hinterlüftungsschicht und das ausgetauschte Luftvolumen in gleichem Maße zunehmen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Strömungswiderstand dadurch gemindert wird und sich deshalb die Strömungsgeschwindigkeit erhöht, was wiederum einen größeren Luftwechsel zur Folge hat.

Bild 6 zeigt exemplarisch für verschiedene Belüftungsvarianten den Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen der Luft im Zwischenraum bzw. dem Unterdach zur Außenlufttemperatur. Es ist ersichtlich, dass sich bei einer starken Belüftung, also bei großen Lüftungsöffnungen an Traufe und First, ohne zusätzliche Strömungswiderstände ein wesentlich flacheres Temperaturprofil und eine geringere Temperaturdifferenz zur Außenluft einstellt, als dies im Vergleich zu einer schwach belüfteten Konstruktion der Fall ist. Die Messungen haben ergeben, dass neben der Position im Verlauf von Traufe zu First ebenfalls die Art der Belüftung bei der vereinfachten Berechnung Berücksichtigung finden muss. Die Auswertung der Messergebnisse hat im Wesentlichen drei verschiedene Belüftungsvarianten erkennen lassen: stark, normal und schwach belüftet. Die Belüftungsvarianten sind, wie beschrieben, vor allem von den Öffnungen an Traufe und First abhängig. Ist nur eine der beiden Öffnung verschlossen stellt dies bereits eine starke Behinderung der Belüftung dar. Eine

grobe Einteilung der verschiedenen Traufe und Firstausbildungen ist in Tabelle 1 gegeben.

Die verschiedenen Belüftungsvarianten werden durch die Anpassung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bei der Simulation berücksichtigt

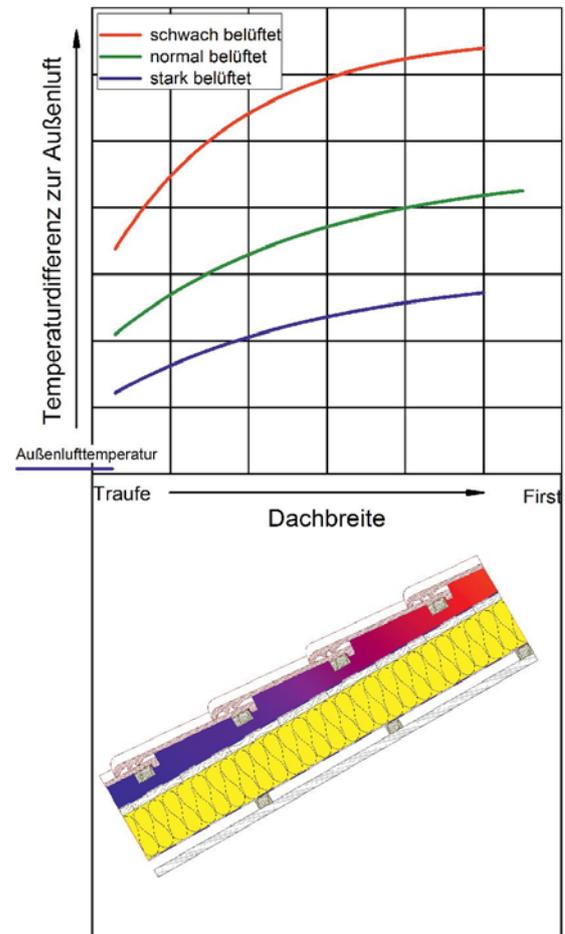


Bild 6: Temperaturdifferenz zwischen der Luft in der Belüftungsschicht bzw. der auf dem Unterdach zur Außenlufttemperatur bei verschiedenen Belüftungsvarianten.

Tabelle 1: Merkmale verschiedener Belüftungsvarianten.<sup>1)</sup>

<b>Stark belüftet</b> <sup>4)</sup>	Traufe völlig geöffnet ohne Gitter o.Ä.	First offen mit geringem Strömungswiderstand z.B. vollkeramische Firstausbildung ohne Gratrolle.	
<b>Normal belüftet</b> <sup>4)</sup>	Trauföffnung mit Insektenschutzgitter oder Traufkamm, Öffnungsquerschnitte im Allgemeinen nach ZVDH [4] bzw. DIN 4108-3 [5]. <sup>2)</sup>	First mit Gratrolle verschlossen, Öffnungsquerschnitte im Allgemeinen nach ZVDH [4] bzw. DIN 4108-3 [5]. <sup>3)</sup>	
<b>Schwach belüftet</b> <sup>4)</sup>	Geringer Öffnungsquerschnitt an der Traufe z.B. durch sehr feines Vogel- bzw. Insektenschutzgitter.	Geringer Öffnungsquerschnitt am First z.B. Vermörtelte Firststeine oder Ziegel (Mörtelfirst).	Keine Konterlattung vorhanden.

<sup>1)</sup> Die Tabelle stellt lediglich Orientierungswerte ohne Anspruch auf Vollständigkeit dar. Die Auswahl der Belüftungsart ist von den örtlichen Gegebenheiten abhängig und unterliegt der Einschätzung des Planers. **Ist an einer Öffnung ein Merkmal einer geringeren Belüftung gegeben so ist generell die geringere Belüftungsstufe zu wählen.**

<sup>2)</sup> Der freie Lüftungsquerschnitt an den Traufen bzw. an Traufe und Pultdachabschluss muss mindestens 2 ‰ der zugehörigen geneigten Dachfläche betragen, mindestens jedoch 200 cm<sup>2</sup>/m [5].

<sup>3)</sup> An Firsten und Graten sind Mindestlüftungsquerschnitte von 0,5 ‰ der zugehörigen geneigten Dachfläche erforderlich, mindestens jedoch 50 cm<sup>2</sup>/m [5].

<sup>4)</sup> Die genannten Belüftungsstärken wurden entsprechend den 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.

## 5 Absorptions- und Emissionsgrad von Dachziegeln und Steinen

Im Zuge der Untersuchungen wurden auch die Absorptions- und Emissionsgrade mehrerer Dachziegel und Dachsteine untersucht. Die Messung des Absorptionsgrades erfolgte mit einem Gitterspektrometer über den Gesamtsolarbereich von 280 - 2.500 nm in Anlehnung an DIN EN 410:2011-04 [1]. Der Emissionsgrad wurde nach DIN EN 16012:2012-04 [2] mit einem Emissiometer im Spektralbereich von 2,5 - 40 µm gemessen. Die Messungen zeigen, dass der Emissionsgrad der Dachziegel aus

gebranntem Ton vor allem von der Oberflächenbeschichtung abhängig ist. Bei den Betondachsteinen konnten keine nennenswerten Unterschiede festgestellt werden: Hier liegen die Werte zwischen 0,9 und 0,91. Die Ergebnisse der Emissionsmessung sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die Messung des Absorptionsgrades hat keine signifikanten Unterschiede zwischen Dachziegeln und -steinen gezeigt. Der Absorptionsgrad ist

hauptsächlich von der Farbgebung und der Oberflächenbeschaffenheit abhängig und liegt bei den untersuchten Proben in einem Bereich zwischen 0,72 und 0,94. Ausgewählte Ergebnisse der Absorptionsmessung sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 2: Emissionsgrad  $\epsilon$  von Dachziegel und Dachsteinen

Dachziegel Hochglanz-glasiert	0,82
Dachziegel matt	0,84
Dachsteine allgemein	0,90 – 0,91

Tabelle 3: Absorptionsgrad  $a$  von Dachziegel und Dachsteinen <sup>1)</sup>

Rot Hochglanz glasiert	0,72
Ziegelrot (engobiert)	0,74
Hellrot seidenmatt	0,75
Hellrot matt (stark verwittert)	0,76
Naturrot matt (auch verwittert)	0,77
Rot matt (stark verwittert)	0,78
Grau (Fabrikneu)	0,85
Schwarz (verwittert)	0,94

<sup>1)</sup> Mit Ausnahme des grauen Dachsteins wurde alle Messungen an bewitterten Eindeckungen durchgeführt. Fabrikneue Eindeckungen können einen abweichenden Absorptionsgrad besitzen. Wenn die Werte zur Berechnung nicht bekannt sind, wird zur Sicherheit empfohlen die Tabellenwerte um 5 – 10 % zu reduzieren.

## 6 Effektive Übergangparameter und hygrothermische Simulation

### Ermittlung der effektiven Übergangparameter

Die Ermittlung der effektiven Übergangparameter wurden mit Hilfe des hygrothermischen Simulationsprogramms WUFI® [3] durchgeführt.

Auf Grundlage der erfassten Klimadaten und der gemessenen Oberflächentemperaturen an den drei Positionen der verschiedenen belüfteten Konstruktionen werden Vergleichsrechnungen durchgeführt. Die Konstruktionen werden hierfür in der Simulation jeweils um eine Weichholzschalung mit einer Stärke von 2 cm ergänzt und auf der Außenseite wird ein  $s_a$ -Wert von 1500 m angesetzt, was die Austrocknung stark vermindert. Auf der Raumseite wird mit einem  $s_a$ -Wert von 5 m eine moderat dampfbremsende Variante gewählt. Zuerst werden die gemessenen Oberflächentemperaturen aus den Freilandversuchen für die Simulation verwendet um einen Referenzfeuchteverlauf in der Holzschalung zu erhalten. Im zweiten Schritt werden die aufgezeichneten Klimadaten verwendet und die effektiven

Übergangparameter für die drei Positionen in der Art angepasst, dass die Schalungsfeuchte dem Referenzfeuchteverlauf entspricht. Die Oberflächentemperaturen aus der Simulation werden mit den gemessenen Temperaturen verglichen. Beispielhaft sind die gemessenen und berechneten Oberflächentemperaturen sowie der Feuchteverlauf in der Holzschalung für einen Berechnungszeitraum von 5 Jahren für eine normal belüftete Konstruktion mittig zwischen Traufe und First in Bild 7 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Berechnung des Feuchteverlaufs mit effektiven Übergangparametern mit dem Feuchteverlauf, der anhand der gemessenen Temperaturen berechnet wurde, eine gute Übereinstimmung zeigt. (Auch die anderen Verläufe, die in dieser kurzen Zusammenfassung nicht dargestellt sind, ergeben eine ähnlich gute Übereinstimmung.) Die berechneten Oberflächentemperaturen erreichen im Sommer jedoch nicht ganz die Temperaturspitzen die gemessen wurden, was eine etwas geringere Rücktrocknung der Konstruktion zur Folge hat. Somit besitzt die

Simulation mit effektiven Übergangsparametern im Vergleich zur Realität eine kleine

Sicherheitsreserve bezüglich des Austrocknungsverhaltens.

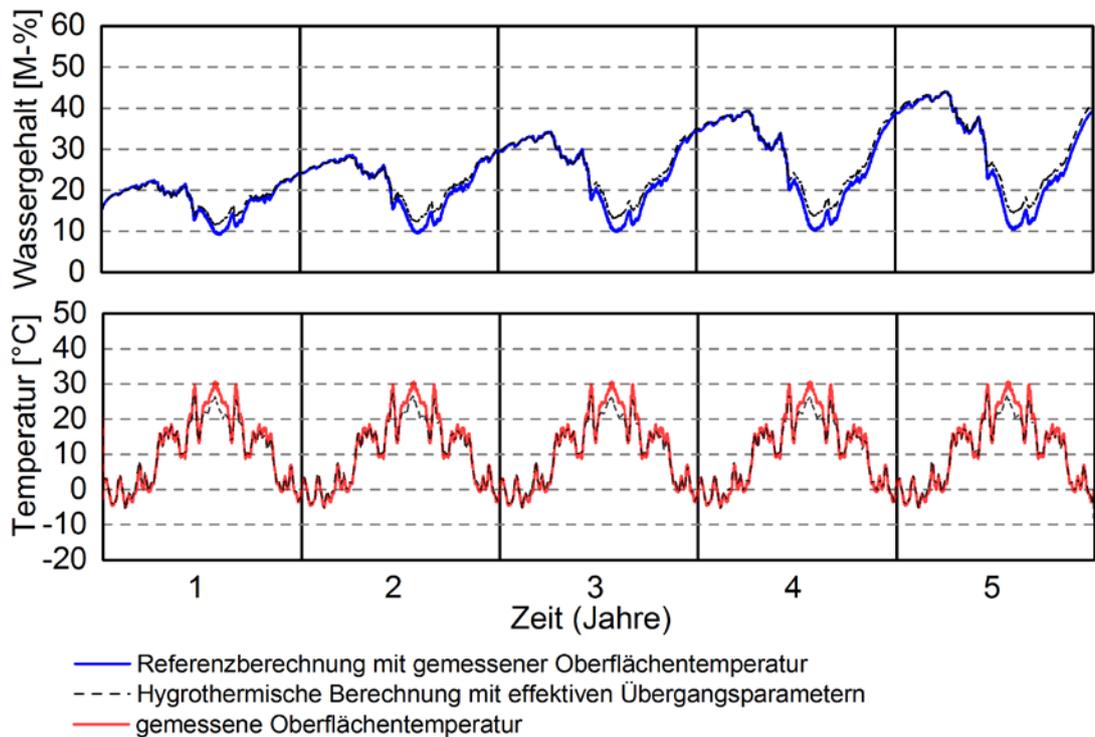


Bild 7: Gemessener und mit effektiven Übergangsparametern berechneter Temperaturverlauf sowie jeweils zugehöriger Wassergehalt in der Holzschalung an der mittleren Position einer normal belüfteten Eindeckung über den Zeitraum von 5 Jahren.

Um das Temperaturverhalten auf dem Unterdach für alle verschiedenen Belüftungsvarianten und Positionen vereinfacht abbilden zu können, wurden hierfür jeweils effektive Übergangsparameter in der beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Dadurch ist es möglich das Temperaturverhalten des Underdachs ohne direkte Berücksichtigung der Eindeckung und der Belüftungsschicht zu simulieren.

In den effektiven Übergangsparametern ist der Strahlungsaustausch zwischen der Eindeckung und dem Unterdach sowie der konvektive Wärmeübergang an allen beteiligten Bauteiloberflächen berücksichtigt. Die Parameter sind zum einen ein effektiver konvektiver Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{k,e}$  der in Abhängigkeit der Belüftungsstärke den konvektiven Wärmeübergang am Unterdach beschreibt und zum anderen ein effektiver

Absorptionsgrad  $a_e$  der an Hand der realen Eindeckung die Wärmeübertragung auf das Unterdach simuliert. Hierzu wird der reale Absorptionsgrad der Eindeckung mit einem Minderungsfaktor für die untere und mittlere Stelle multipliziert. Der Emissionsgrad der Eindeckung wird entsprechend der realen Eindeckung auf das Unterdach angesetzt. Die ermittelten effektiven Übergangsparameter sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Bei der Simulation mit den angegebenen effektiven Übergangsparametern ist zu beachten, dass diese nur in Verbindung mit der expliziten Strahlungsbilanz angewendet werden können und somit Strahlungsdaten des jeweiligen Standorts benötigt werden. Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass der angegebene effektive konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{k,e}$  keine langwellige Strahlungsanteile besitzt.

Tabelle 4: Effektive Übergangparameter zur hygrothermischen Simulation von hinterlüfteten Steildächern in Abhängigkeit der Belüftungsart und der Position im Dachverlauf

	Kälteste Stelle	Mittlere Stelle <sup>1)</sup>	Wärmste Stelle <sup>1)</sup>
<b>Stark belüftet</b> <sup>2)</sup>	$\alpha_{k,e} = 30 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
	$a_e = a \cdot 0,70$	$a_e = a \cdot 0,90$	$a_e = a$
<b>Normal belüftet</b> <sup>2)</sup>	$\alpha_{k,e} = 19 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
	$a_e = a \cdot 0,70$	<b><math>a_e = a \cdot 0,90</math></b>	$a_e = a$
<b>Schwach belüftet</b> <sup>2)</sup>	$\alpha_{k,e} = 13,5 \left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$		
	$a_e = a \cdot 0,75$	$a_e = a \cdot 0,90$	$a_e = a$

<sup>1)</sup> 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.

<sup>2)</sup> Die genannten Belüftungsstärken wurden entsprechend den 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.

Für die hygrothermische Simulation von Standardfällen wird generell empfohlen die Parameter eines normal belüfteten Daches zu verwenden. Hier entsprechen die Öffnungsquerschnitte den Vorgaben des ZVDH [4] und somit dem aktuellen Stand der Technik, wie sie in den meisten Fällen ausgeführt sind. Stark und schwach belüftete Dächer stellen Sonderfälle dar, weshalb diese Parameter nicht ohne eine Vor-Ort-Prüfung der realen Gegebenheit verwendet werden sollten. Zudem

wird für die Simulation auch die mittlere Stelle eines Daches empfohlen, diese bildet die mittleren Verhältnisse über die Dachbreite, leicht auf der sicheren Seite liegend, realistisch ab. Sollten die Parameter der kältesten Stelle Verwendung finden und die Simulation unter Berücksichtigung von Infiltration durchgeführt werden, so ist die Höhe der Luftsäule um die Giebelhöhe des Dachgeschosses auf das Niveau der Traufe zu reduzieren.

### Praktische Anwendung der effektiven Übergangparameter in WUFI

Im Folgenden soll die Eingabe der effektiven Übergangparameter in WUFI® Pro beispielhaft dargestellt werden. Für die exakte Berechnung müssen Dachneigung und Orientierung bekannt sein. Diese Parameter werde zur Berechnung mit der explizite Strahlungsbilanz benötigt. Die Eingabe der Parameter erfolgt wie in Bild 8 dargestellt in der Eingabemaske: „Orientierung /Neigung/Höhe“.

Für die weitere Eingabe der effektiven Übergangparameter wird zuerst die Stärke der Belüftung festgelegt. Wie in Tabelle 1 angegeben, kann zwischen stark, normal und schwach belüftet unterschieden werden. Der dazugehörige effektive konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{k,e}$  wird, wie in Bild 9 für einen normal belüftete Konstruktion dargestellt, in der Eingabemaske „Oberflächenübergangskoeff.“ als Wärmeübergangskoeffizient an der Außenoberflächen eingetragen. Der Wert unter

dem Punkt „beinhaltet langwellige Strahlungsanteile“ muss hierbei zu null gesetzt werden.

Für die Eingabe der Strahlungsparameter muss die Art der Eindeckung und die gewünschte Berechnungsposition im Verlauf von Traufe zu First bekannt sein. Für Standardsituationen sollte die mittlere Position Verwendung finden. Die Berechnung mit den Parametern der kältesten Stelle ist hierbei die kritischste Situation bei der sich die höchsten Feuchtegehalte einstellen. Die Werte in Bild 9 wurde beispielhaft für einen Dachziegel mit naturroter matter Oberfläche und die untere Position (kälteste Stelle) einer normal belüfteten Eindeckung eingetragen. Der kurzwellige Absorptionsgrad des Dachziegels beträgt nach Tabelle 3  $a = 0,77$ . Nach Tabelle 4

beträgt der effektive kurzwellige Absorptionsgrad für die kälteste Stelle  $a_e = a \cdot 0,70$  daraus ergibt sich der einzutragende effektive kurzwellige Absorptionsgrad  $a_e = 0,77 \cdot 0,70 = 0,539$ .

Der langwellige Emissionsgrad  $\epsilon$  der Ziegeleindeckung wurde aus Tabelle 2 entnommen und beträgt in diesem Fall  $\epsilon = 0,84$ . Dieser Wert wird unverändert in die Eingabemaske übernommen. Weiterhin ist darauf zu achten, dass die explizite Strahlungsbilanz angeschaltet wird (Haken) und das ein Wert für den Wärmeübergangskoeffizienten an der Innenoberfläche eingetragen wird.

Variante: #1

Aufbau/Monitorpositionen: **Orientierung/Neigung/Höhe** Oberflächenübergangskoeff. Anfangsbedingungen

Orientierung: Neigung:

Nord-Ost Neigung [°] 35

Höhe/Schlagregenkoeffizienten

Regenbelastung nach ASHRAE Standard 160

R1 [-] 1

R2 [s/m] 0

Hinweis:  
Regenbelastung =  
Regen\*(R1 + R2\*Vwind)

Bild 8: Eingabe von Orientierung und Dachneigung in das hygrothermische Simulationsprogramm WUFI® Pro

Variante: #1

Aufbau/Monitorpositionen | Orientierung/Neigung/Höhe | **Oberflächenübergangskoeff.** | Anfangsbedingungen

**Außenoberfläche (linke Seite)**

Wärmeübergangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>K]  Benutzerdefiniert

beinhaltet langwellige Strahlungsanteile [W/m<sup>2</sup>K]

Windabhängig  ...

Sd-Wert [m] ---- Keine Beschichtung

Hinweis: Dieser Wert hat keinen Einfluss auf die Regenaufnahme

Kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl [-]  Benutzerdefiniert

Langwellige Strahlungsemissionszahl [-]

Explizite Strahlungsbilanz  ...

Hinweis: diese Option dient u.a. zur Berücksichtigung der Unterkühlung infolge langwelliger Abstrahlung. In sensitiven Fällen sind hinreichend genaue Gegenstrahlungsdaten erforderlich.

Terrestr. kurzw. Reflexionsgrad [-]  Standardwert

Anhaftender Anteil des Regens [-] ---- Keine Regenwasserabsorption

**Innenoberfläche (rechte Seite)**

Wärmeübergangskoeffizient [W/m<sup>2</sup>K]  Benutzerdefiniert

Sd-Wert [m] ---- Keine Beschichtung

Bild 9: Beispielhafte Eingabe der effektiven Übergangparameter in das hygrothermische Simulationsprogramm WUFI® Pro

## 7 Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es möglich ist belüftete Steildachkonstruktionen ohne die explizite Berücksichtigung der Belüftungsschicht in der hygrothermischen Simulation nachzubilden. Hierzu würden effektive Übergangparameter eingeführt die direkt auf der Oberfläche des Unterdachs angesetzt werden. Auf dem Unterdach bildet sich im Verlauf von der Traufe zum First ein logarithmisches Temperaturprofil aus, welches hauptsächlich von der Stärke der Belüftung abhängig ist. Die ermittelten effektiven Übergangparameter werden für verschiedene Dachpositionen und für unterschiedliche Belüftungsvarianten angegeben und die

praktische Eingabe in das hygrothermische Simulationsprogramm vorgestellt. Es wurde bei der Ermittlung der Parameter hoher Wert darauf gelegt, dass die Feuchtegehalte der parameterbasierten Simulation möglichst gut mit denen übereinstimmen, die anhand der Messwerte berechnet wurden. Jede Situation bedarf jedoch einer individuellen Einschätzung um realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Die vorgestellten effektiven Übergangparameter stellen eine praktikable und einfach anzuwendende Möglichkeit dar, die Temperaturen auf dem Unterdach einer hinterlüfteten Steildachkonstruktion genauer als bisher abbilden zu können.

## 8 Ergänzung: Besonderheiten bei Konstruktionen mit saugfähiger Unterdeckung

Wird das vorgestellte Modell auf Konstruktion ohne zusätzliche Unterspann- bzw. Unterdeckbahn, d. h. mit einer Holzwerkstoffplatte oder einer Holzschalung als Unterdeckung, angewandt, kann dies zu sehr hohen Feuchtegehalten in diesen Schichten führen.

Mit dem vorgestellten Modell lassen sich die Oberflächentemperaturen an den verschiedenen Positionen der unterschiedlich stark belüfteten Dächer berechnen. Die berechneten Oberflächentemperaturen weisen eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Oberflächentemperaturen auf. Da das Modell die Temperaturen auf dem Unterdach auf Basis des verwendeten Außenklimadatensatzes mit effektiven Übergangsparemtern berechnet, liegt direkt auf der Oberfläche des Unterdach auch die Außenluftfeuchte des Außenklimas an. Wie die Messungen zeigen stellt sich im Luftzwischenraum jedoch eine vom Außenklima abweichende Luftfeuchtigkeit ein. Dies lässt sich auf zwei Vorgänge zurückführen:

Im Falle einer Unterkühlung durch langwellige Abstrahlung unterkühlt in der Simulation das Unterdach unter die Taupunkttemperatur der Außenluft. Hierdurch bildet sich in der Simulation auf dem Unterdach Tauwasser, welches zur Aufweitung einer außenliegenden Holzwerkstoffschicht führt. In der Realität unterkühlt die Eindeckung jedoch etwas stärker als das Unterdach und liegt somit noch etwas weiter unter dem Taupunkt der Außenlufttemperatur. Dies hat zur Folge, dass sich Kondensat auf der Ziegeloberfläche und Unterseite bildet. Durch den Kondensationsvorgang an der Ziegelunterseite wird die relative Luftfeuchte im Luftraum zwischen Eindeckung und Unterdach verringert. Der Taupunkt dieser Luft liegt somit in der Realität meist wieder unter der

Oberflächentemperatur des Unterdachs. Kondensation tritt auf dem Unterdach, wie die Messungen bestätigt haben, also nur in seltenen Fällen auf.

Im Falle von solarer Einstrahlung erwärmen sich die Ziegeloberfläche und die Oberfläche des Unterdachs und dadurch auch die Luft im Zwischenraum. Diese Temperaturerhöhung hat wiederum eine Absenkung der relativen Luftfeuchte im Luftzwischenraum zur Folge. Wie die Messungen gezeigt haben, liegt die relative Luftfeuchte im Luftzwischenraum im gesamten Tagesverlauf in einem Bereich zwischen 10% und 20% r.F. unter der Luftfeuchte der Außenluft.

Da der Feuchteübergang zwischen der Luft und der Oberfläche direkt von der wasserdampfdiffusionsäquivalenten Luftschichtdicke ( $s_d$ -Wert) und dem konvektiven Wärmeübergangskoeffizient abhängig ist, kann die im Vergleich zur Außenluft reduzierte Luftfeuchtigkeit im Luftzwischenraum, durch den Ansatz eines zusätzlichen Oberflächen  $s_d$ -Wertes in der Simulation berücksichtigt werden.

Die Auswertung der Freilandmessungen und vergleichende Simulation haben ergeben, dass im Mittel ein Oberflächen- $s_d$ -Wert von 0,01 m die Reduktion der Luftfeuchtigkeit im Luftzwischenraum realitätsnah abbildet. Der Ansatz eines äußeren Oberflächen- $s_d$ -Wertes ist jedoch nur notwendig, wenn die äußere Schicht des zu simulierenden Aufbaus Flüssigtransport aufweist, wie es bei den meisten Hölzern und Holzwerkstoffen der Fall ist. Befindet sich eine Folie, wie z. B. eine Unterspannbahn, ohne Flüssigtransport als äußere Schicht auf der Konstruktion, kann auf den Ansatz eines zusätzlichen Oberflächen- $s_d$ -Wertes verzichtet werden.

## 9 Literatur

- [1] DIN EN 410:2011-04: Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen. Beuth Verlag, Berlin.
- [2] DIN EN 16012:2012-04: Wärmedämmstoffe für Gebäude - reflektierende Wärmedämmprodukte - Bestimmung der Nennwerte der wärmetechnischen Eigenschaften. Beuth Verlag, Berlin.
- [3] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.
- [4] Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks e.V.: Deutsches Dachdeckerhandwerk: Regeln für Dachdeckungen.. Fachregeln für Dachdeckungen mit Dachziegeln und Dachsteinen. Müller, Köln. Dezember 2012.
- [5] DIN 4108-3:2014-11, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung.