

Berücksichtigung der Wasserdampfkonvektion bei der Feuchteschutzbeurteilung von Holzkonstruktionen

Dr.-Ing. Hartwig M. Künzel, Daniel Zirkelbach und Beate Schafaczek*

Wenn sich Feuchte aus dem Raum als Tauwasser in der Gebäudehülle wieder findet, kann das nur zwei Ursachen haben: Dampfdiffusion oder Dampfkonvektion. Während dem Praktiker zur Berechnung von Dampfdiffusionsvorgängen etablierte Verfahren zur Verfügung stehen, entzog sich der konvektive Dampftransport bisher einer genaueren Beurteilung. Durch das vorgestellte Modell zur Quantifizierung des Dampfkonvektionseinflusses wird jetzt versucht diese Lücke zu schließen.

1. Einleitung

Die Dampfkonvektion, d. h. das Einströmen feuchter Raumluft in ein Bauteil ist das Pendant zur schon lange bekannten Dampfdiffusion. Im Gegensatz zur Dampfdiffusion wurde ihre Wirkung jedoch lange Zeit unterschätzt. Die Folge waren zahlreiche Feuchteschäden an Holzkonstruktionen, die eigentlich die diffusionstechnischen Anforderungen nach DIN 4108-3 erfüllt hatten. Da sich die Dampfkonvektion jedoch im Gegensatz zur Dampfdiffusion nicht durch einfache rechnerische Ansätze abbilden lässt, wird heute so getan als wären die Bauteile absolut luftdicht - wohl wissend, dass dies so gut wie nie der Fall ist. Als Ausweg aus diesem Dilemma haben sich in letzter Zeit Begriffe wie Feuchtemanagement und Trocknungspotenzial in der Fachwelt etabliert, die ausdrücken sollen, dass eine Konstruktion in Bezug auf die Dampfdiffusion nur so dicht wie nötig, gleichzeitig aber so offen wie möglich ausgeführt werden sollte. Allerdings ist damit nur eine qualitative Beschreibung des Feuchteverhaltens möglich, d. h. es können keine Angaben darüber gemacht werden, bis zu welchen Randbedingungen die Konstruktion tatsächlich funktioniert.

Eine quantitative Erfassung der Auswirkung von Dampfkonvektionsvorgängen ist daher dringend erforderlich. Die Berechnung des Feuchteverhaltens von Baukonstruktionen mit Hilfe von hygrothermischen Simulationsverfahren ist zwar inzwischen europäisch genormt [1], allerdings werden dabei ausschließlich diffusive und konduktive (Kapillarleitung) Transportmechanismen berücksichtigt. Basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche wurde deshalb in [2] ein vereinfachtes Modell zur Quantifizierung der Auswirkungen von Dampfkonvektionsvorgängen bei hygrothermischen Simulationsrechnungen vorgestellt. Die Hintergründe, An-

nahmen und Voraussetzungen für dieses Modell werden im Folgenden zusammengefasst und seine praktische Relevanz mit einem Anwendungsbeispiel untermauert.

2. Quantifizierung von Feuchteinträgen durch Dampfkonvektion

Der konvektive Eintrag von Feuchte über Fehlstellen der Dampfbremse bzw. Luftdichtheitsebene ist ein mehrdimensionaler Effekt, der mit einer eindimensionalen Berechnung nicht unmittelbar erfasst werden kann. Auch eine mehrdimensionale Berechnung hilft hier nicht weiter, da zum einen der Aufwand unverhältnismäßig groß ist und zum anderen die für das Befeuchtungsrisiko maßgebliche genaue geometrische Ausbildung von Leckagen und Durchströmungswegen im Normalfall nicht bekannt ist. Sinnvoller erscheint daher ein Modell, bei dem in einer eindimensionalen Simulation nicht die Durchströmung selbst, sondern nur das ausfallende Tauwasser als Feuchtequelle innerhalb der Konstruktion abgebildet wird.

Einen ersten Versuch der Quantifizierung von Feuchteinträgen durch Dampfkonvektion stellt die vom IBP schon 1999 für die Feuchteschutzbeurteilung von Holzkonstruktionen vorgeschlagene Einbeziehung einer Konvektionstauwassermenge von 250 g/m^2 bei der Diffusionsberechnung nach Glaser dar [3]. Der Wert für diese konvektionsbedingte Feuchtequelle wurde damals aus den Ergebnissen amerikanischer Untersuchungen von Leichtbaukonstruktionen mit vorschriftsmäßiger Konvektionssperre [4] abgeleitet. Inzwischen scheint die Berücksichtigung der Dampfkonvektion durch das Vorhalten einer Trocknungsreserve in Form einer Feuchtequelle von 250 g/m^2 in der Praxis auf eine breite Akzeptanz zu stoßen. Beispiele dafür sind entsprechende Hinweise bzw. Berechnungsvorschriften im Spezialheft Flachdach des Informationsdienstes Holz [5], in einem Beitrag zu den Aachener Bausachverständigentagen [6] oder im Entwurf

* Dr.-Ing. Hartwig M. Künzel, Dipl.-Ing. Daniel Zirkelbach, Dipl.-Ing. Beate Schafaczek, Fraunhofer Institut für Bauphysik Abteilung Hygrothermik

zur Holzschutznorm DIN 68 800-2 [7]. Im Vergleich zu den zulässigen Tauwassermengen aufgrund von Dampfdiffusion nach DIN 4108-3 [8] von 500 bzw. 1000 g/m² erscheint die Größenordnung der konvektionsbedingten Feuchtequelle, mit 250 g/m² zur Berücksichtigung kleiner Leckagen und Fehlstellen, als angemessen. Wie bereits in [2] erläutert, gibt es darüber hinaus bislang kaum belastbare Untersuchungen aus denen zuverlässigere Werte für die Bauteilbefeuchtung durch Dampfkonvektion entnommen werden könnten. Daher dient die damals für eine nordorientierte Außenwandkonstruktion ermittelte konvektive Feuchtequelle zur Berücksichtigung von befeuchtungsrelevanten Leckagen bis auf weiteres auch als Referenzfall zur Entwicklung eines instationären Dampfkonvektionsmodells für hygrothermische Simulationsberechnungen.

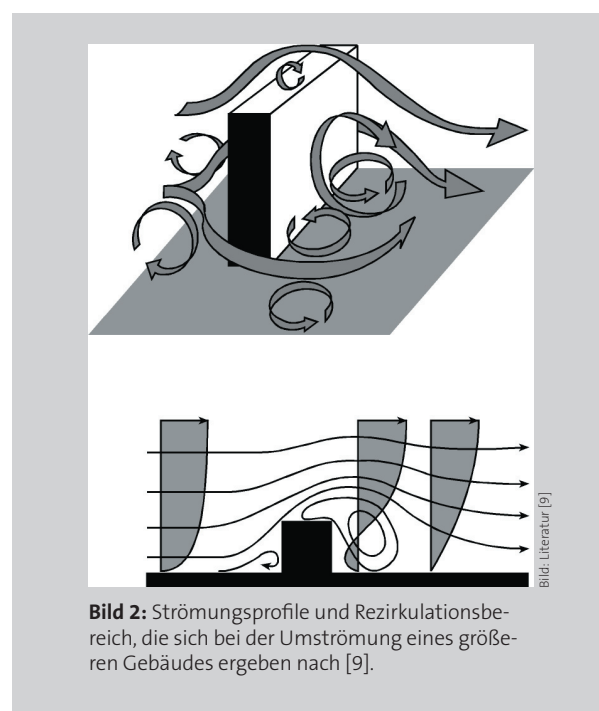
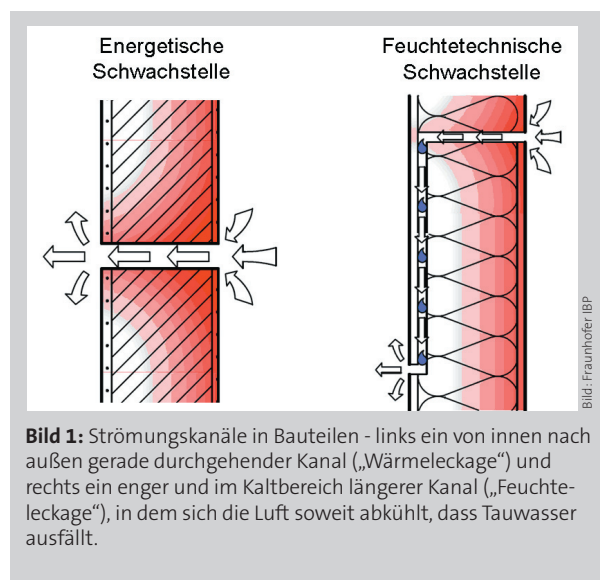
2.1 Luftströmungswege durch Bauteile

Mit Hilfe einer Gebäudedichtheitsprüfung (Blowerdoor-Messung) können die Undichtheiten der Gebäudehülle quantifiziert werden. Allerdings stellt nicht jede Fuge oder durchströmbare Fehlstelle im Bauteil ein feuchtetechnisches Problem dar. Bild 1 zeigt beispielhaft zwei Strömungskanäle durch die Gebäudehülle, deren Auswirkungen auf den Feuchtehaushalt im Bauteil sehr unterschiedlich sind. Der linke Kanal stellt eine typische Situation für Anschlussbereiche dar, wo die Raumluft auf relativ geradem Weg von innen nach außen strömt. Dabei nimmt sie im Normalfall so viel Wärme mit, dass es nicht zur Tauwasserbildung kommt.

D. h. die Temperatur im Strömungskanal bleibt überall über der Taupunkttemperatur der Raumluft, so dass es zu keiner konvektionsbedingten Befeuchtung kommt. Solche Leckagen sind die energetischen Schwachstellen („Wärmeleckagen“) der Gebäudehülle. Sie machen den Hauptanteil aller Leckagen aus, spielen jedoch für die Befeuchtung der Konstruktion infolge Dampfkonvektion eine untergeordnete Rolle. Anders sieht es bei engen und verwundenen Strömungskanälen im Bauteilinneren aus, wie in der rech-

ten Grafik von Bild 1 angedeutet. Dort strömt die Raumluft langsam auf Umwegen nach außen und kühlt sich dabei soweit ab, dass ein Teil des mitgenommenen Wasserdampfes in der kälteren Zone des Bauteils als Tauwasser ausfällt. Nur solche Leckagen sind feuchtetechnisch bedeutsam und müssen in einem Dampfkonvektionsmodell berücksichtigt werden. Nach einer Abschätzung in [2] beträgt ihr Anteil an der Luftdurchlässigkeit der gesamten Gebäudehülle nur etwa 7 %.

In Mitteleuropa ist die Feuchtekonzentration im Innenraum (und damit auch der Wasserdampfpartialdruck) fast immer höher als in der Außenluft. Lediglich bei hohen Temperaturen und gleichzeitigen Niederschlägen können sich diese Verhältnisse kurzfristig umkehren. Eine nennenswerte Durchströmung von undichten Bauteilen findet nur statt, wenn die Druckverhältnisse dies ermöglichen also z. B. bei Winddruck von außen oder bei größeren Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen durch thermischen Auftrieb. Während eine Durchströmung von außen eher zu einer Trocknung des Bauteils beiträgt, kann eine Durchströmung von innen zu einer nennenswerten Feuchtezufuhr führen, wenn entlang des Strömungswegs die Taupunkttemperatur unterschritten wird. Befeuchtungsrelevant sind also nur Zeiträume mit einer höheren Innenraum- als Außenlufttemperatur, wenn gleichzeitig ein Luftdruckgefälle von innen nach außen vorliegt.



2.2 Luftdruckunterschiede zwischen innen und außen

Die Luftdruckdifferenz über einem Bauteil ist die treibende Kraft für die Durchströmung. Solche Druckdifferenzen können folgende Ursachen haben:

- Thermische Auftriebskräfte,
- Windanströmung,
- Gesamtdruckunterschiede durch mechanische Lüftungsanlagen, Dunstabzüge und offene Feuerstellen.

Entlüftungsventilatoren in Feuchträumen, Dunstabzüge oder offene Feuerstellen führen in der Regel zu einem Unterdruck im Gebäude und sind deshalb in unserem Klima unproblematisch. Zentrale Lüftungsanlagen sollten druckneutral eingestellt sein außer sie bedienen Reinnräume, was eine spezielle Betrachtung notwendig macht.

Windanströmung

Für den Wind stellt jedes Gebäude ein Hindernis dar, das umströmt werden muss. Dies führt bei einer voll entwickelten Strömung, die entsteht, wenn der Wind über Wiesen und Felder weht, zu den in Bild 2 beispielhaft dargestellten Luftwirbeln und Rückströmungsgebieten. Für die Umlenkung der Strömung sind Kräfte erforderlich, die sich in der Form von Über- und Unterdrücken am Gebäude äußern.

In der Regel sind Rezirkulationsströmungen und Wirbel, wie sie auf der Lee-Seite eines Gebäudes und bei

größer als auf der Lee-Seite des Gebäudes und können über die jeweilige Fassade gemittelt bis zu 65 % des negativen Staudrucks ausmachen. Ähnliche Unterdrücke sind auch auf der Wind abgewandten Seite von geneigten Dächern zu verzeichnen (Bild 3).

Am größten sind die Unterdrücke jedoch bei Flachdächern, wie in Bild 3 oben zu sehen. Hier werden an der Luv-Kante Unterdrücke erreicht, deren Beträge etwa das Andert-halb-fache des Staudrucks erreichen. Im weiteren Verlauf zur gegenüberliegenden Seite werden die Unterdrücke jedoch kontinuierlich kleiner bis sie ab der Dachmitte im Durchschnitt auf etwa 30 % des Staudrucks absinken.

Der Staudruck im ungestörten Bereich vor dem Gebäude lässt sich aus der Windgeschwindigkeit in Gebäudehöhe mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung ermitteln:

$$P_S = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2 \quad (1)$$

mit:

P_S	[Pa]	Staudruck infolge Windanströmung
ρ	[kg/m ³]	Dichte der Außenluft ($\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$)
u	[m/s]	Windgeschwindigkeit in Gebäudehöhe

Da die Windgeschwindigkeit in Gleichung 1 im Quadrat eingeht, lässt sich der mittlere Staudruck nicht unmittelbar aus der mittleren Windgeschwindigkeit, sondern nur aus den mittleren Quadraten der Geschwindigkeit berechnen. In Holzkirchen beträgt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit 2,4 m/s in der Standardhöhe von 10 m gemessen und über einen Zeitraum von fünf Jahren gemittelt. Das mittlere Quadrat der Windgeschwindigkeit beträgt 10,1 m²/s² (die Wurzel daraus ist 3,2 m/s), wobei in den Wintermonaten etwas höhere Werte erzielt werden als im Sommer. Daraus ergibt sich ein mittlerer Staudruck für den Standort Holzkirchen von 6,6 Pa.

Berücksichtigt man die entsprechenden Druckbeiwerte resultiert daraus ein durchschnittlicher äußerer Unterdruck bei Wänden und geneigten Dächern von maximal 4,3 Pa. Damit liegen die windinduzierten Staudrücke bei diesen Bauteilen im Bereich der Druckdifferenzen die durch thermische Auftriebskräfte bei Einfamilienhäusern entstehen (siehe unten). Dennoch besteht hier ein prinzipieller Unterschied. Während der Wind immer wieder aus unterschiedlichen Richtungen bläst und damit an Wänden und geneigten Dächern Unter- und Überdrücke im Wechsel erzeugt, wirken die thermischen Auftriebskräfte im Winter immer nur in einer Richtung. Etwas anders sieht es bei Flachdächern aus. Dort wirkt gemäß Bild 3 immer ein gewisser Unterdruck, egal aus welcher Richtung der Wind weht. Über die gesamte Dachfläche gemittelt ergibt sich hier ein durchschnittlicher Unterdruck von etwa 4 Pa.

Die geneigten Unterdrücke ergeben sich jedoch jeweils in Bezug auf die Luftdruckverhältnisse bei gleicher Höhe im ungestörten Aufwindbereich. Für die Dampfkonvektion sind jedoch nur die Differenzdrücke über dem jeweiligen

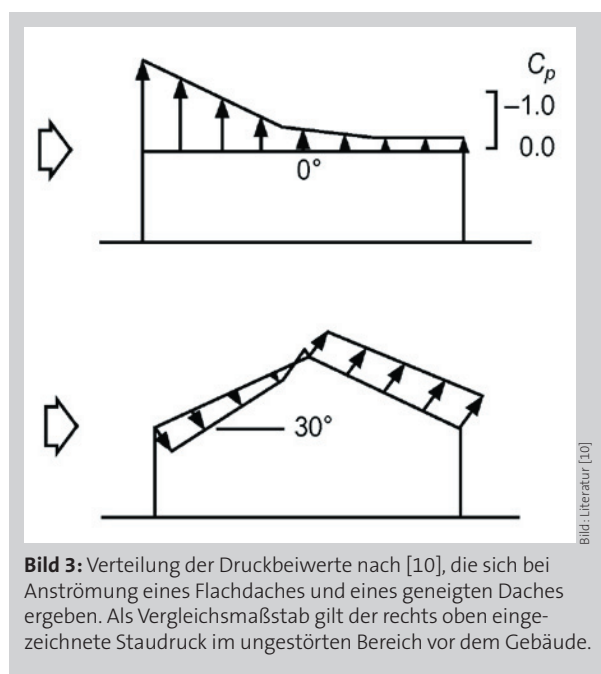


Bild 3: Verteilung der Druckbeiwerte nach [10], die sich bei Anströmung eines Flachdaches und eines geneigten Daches ergeben. Als Vergleichsmaßstab gilt der rechts oben eingezeichnete Staudruck im ungestörten Bereich vor dem Gebäude.

Flachdächern auftreten, ein Zeichen für Windsog. Dagegen ergibt sich bei Wänden auf den Wind zugewandten Seiten meist ein Überdruck. In der Regel weniger bekannt ist, dass sich auch an Wandoberflächen, die parallel zur Strömungsrichtung verlaufen, Unterdrücke ergeben. Nach [10] sind die Unterdrücke an den Parallelseiten sogar noch etwas

Bauteil relevant. Der Luftdruck im Gebäude ist abhängig von der Summe der Oberflächendrücke und der Luftdurchlässigkeiten der einzelnen Bauteile. Wenn Zwischenwände und -decken einen ungehinderten Luftaustausch verhindern, dann stellen sich in den Räumen auf der Luv-Seite höhere Drücke ein als auf der Lee-Seite. Sind keine dichten Zwischenwände vorhanden und wird auf der Luv-Seite ein Fenster geöffnet stellt sich im gesamten Gebäude ein Überdruck ein. Ist das Fenster hingegen auf der Lee-Seite geöffnet entsteht ein Unterdruck. Mit anderen Worten, die Druckverhältnisse im Gebäude sind sehr komplex und nur bedingt modellierbar. In jedem Fall führen sie dazu, dass die Differenzdrücke über den einzelnen Bauteilen kleiner sind als die oben errechneten Staudrücke an den Außenoberflächen.

Thermischer Auftrieb

Eine große Bedeutung für die auftretenden Differenzdrücke bei Bauteilen hat auch der thermische Auftrieb, der im Winter permanent auf die Gebäudehülle einwirkt und zu

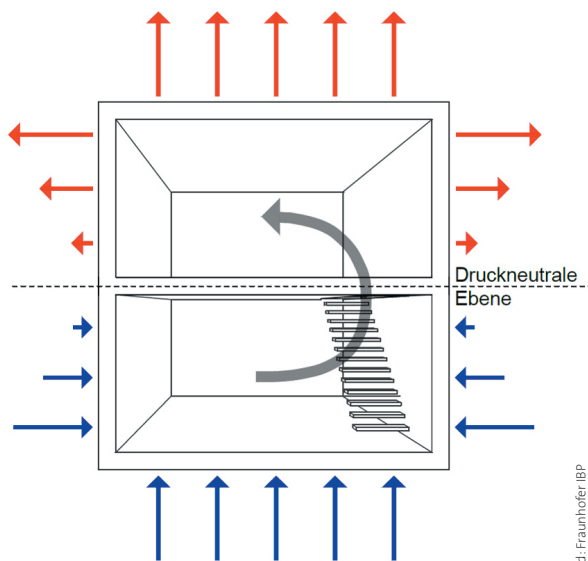


Bild 4: Druckdifferenzen über der Gebäudehülle infolge von thermischen Auftriebskräften.

den in Bild 4 schematisch angedeuteten höhenabhängigen Luftdruckverhältnissen führt. Wie bei einem Heißluftballon hat die erwärmte Luft im Raum die Tendenz nach oben zu steigen, da sie von der einströmenden kälteren und damit schwereren Luft verdrängt wird. Dadurch resultiert im oberen Bereich der Gebäudehülle ein Überdruck mit der Folge einer Durchströmung von innen nach außen. Dem steht im unteren Gebäudebereich ein Unterdruck gegenüber, der eine Durchströmung von außen nach innen bewirkt.

Bei gleichmäßiger Verteilung der Undichtheiten würde die druckneutrale Ebene bezogen auf den Hüllflächenanteil, wie in Bild 4 dargestellt, in der Gebäudemitte liegen. Bei ungleichmäßiger Verteilung verschiebt sich die druckneutrale Ebene in Richtung der größeren Undichtheiten. Eine

ausführliche Beschreibung der thermischen Auftriebsphänomene bei Gebäuden ist z. B. in [11] zu finden. Am Dach und in den oberen Wandbereichen eines beheizten Gebäudes liegt also im Winter von innen immer ein Überdruck an. Die Berechnung der maximalen auftriebsbedingten Druckdifferenzen erfolgt mit dem Ansatz in Gleichung 2, bei dem die neutrale Ebene in der Mitte des zusammenhängenden Luftraums liegend und die Leckagen als gleichmäßig verteilt angenommen werden:

$$\Delta P = \rho \cdot \frac{T_a - T_i}{T_i} \cdot g \cdot \frac{h}{2} \quad (2)$$

mit:

ΔP	[Pa]	Druckdifferenz zwischen innen und außen
ρ	[kg/m ³]	Dichte der Außenluft ($\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$)
T_a	[K]	Lufttemperatur außen
T_i	[K]	Lufttemperatur innen
g	[m/s ²]	Gravitationskonstante ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
h	[m]	Höhe des zusammenhängenden Luftraums im Gebäude

Die Luftdruckdifferenzen durch thermischen Auftrieb steigen also proportional zur Gebäudehöhe und zum Temperaturgefälle zwischen innen und außen an. Das bedeutet, dass bei hohen Gebäuden mit zusammenhängendem Luftvolumen oder bei solchen mit hohen Raumtemperaturen (z. B. Schwimmbäder) entsprechend große Differenzdrücke anliegen. Während beispielsweise im Winter (außen 0°C) im Dachgeschoss eines Einfamilienhauses (Raumtemperatur 20°C) mit einer Höhe von 5 m ein thermisch bedingter Überdruck von 2,2 Pa anliegt, ergibt sich für eine Schwimmhalle von 15 m Höhe mit einer Raumlufttemperatur von 30°C schon mehr als ein Vierfaches davon (9,5 Pa). Im Sommer (außen 20°C) sinkt der Überdruck in der Schwimmhalle auf etwa 3 Pa während bei Gebäuden mit normalen Raumtemperaturen die thermisch bedingten Überdrücke gegen Null gehen.

2.2 Dampfkonvektionsmodell

Die windinduzierten und die thermischen Druckdifferenzen, die als Antriebskräfte für die Dampfkonvektion in Frage kommen, erreichen im Mittel häufig eine ähnliche Größenordnung. Dennoch werden für das Konvektionsmodell ausschließlich die thermischen Auftriebskräfte berücksichtigt und zwar aus folgenden Gründen: Die windinduzierten Druckdifferenzen sind großen Schwankungen unterworfen und können in ihren Spitzen dazu führen, dass aus einer „Feuchte-Leckage“ aufgrund der starken Durchströmung eine aus feuchtetechnischer Sicht unkritische „Wärme-Leckage“ (siehe Bild 1) wird. Außerdem wirken sie in ähnlicher Weise das ganze Jahr über (der Wind hört im Som-

mer nicht auf zu blasen), so dass im Winter ausgefallenes Tauwasser im Sommer wieder konvektiv austrocknet, selbst wenn die Luft aus dem Raum nach außen strömt.

Im Gegensatz dazu führen die thermisch bedingten Luftströmungen durch das Bauteil im Winter zu einer kontinuierlichen und gleichmäßigen Befeuchtung. Eine thermisch bedingte Austrocknung findet so gut wie nicht statt, da die Temperaturunterschiede und damit auch die Differenzdrücke im Sommer sehr klein werden. Daher stellen die thermisch bedingten Auftriebskräfte für die Befeuchtung von Bauteilen infolge Dampfkonvektion die kritischen Randbedingungen dar. Sie lassen sich nebenbei auch leichter modellieren, so dass es Sinn macht, sich bei der Erstellung eines Dampfkonvektionsmodells zunächst darauf zu konzentrieren.

Für das instationäre Dampfkonvektionsmodell ist zunächst die Festlegung einer potentiellen Tauwasserzone notwendig. D. h. es muss vor der Berechnung überlegt werden bis zu welcher Position in der Konstruktion eine Durchströmung im Falle von Undichtheiten möglich ist, z. B. bis zur äußeren Beplankung des Bauteils. Eine Befeuchtung wird im Modell vereinfachend nur dann berücksichtigt, wenn im Durchströmungsbereich die Taupunkttemperatur des Innenraumklimas unterschritten wird - sich also an der betreffenden Position Kondensat bilden würde. Eine Erhöhung der Sorptionsfeuchte infolge einer durch die Konvektion bedingten Zunahme der Luftfeuchte unterhalb von Tauwasserbedingungen wird hierbei aufgrund der geringeren Mengen und der aufwändigen Berechnung vernachlässigt. Ebenfalls vernachlässigt wird die Kondensationswärme, die sich beim Ausfallen des Tauwassers ergeben würde. Im Falle einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur in der Durchströmungsebene wird der aus der Temperaturdifferenz resultierende auftriebsbedingte Überdruck im Innenraum ermittelt.

Unter der Annahme, dass sich in den kleinen befeuchtungsrelevanten Strömungskanälen eine laminare Luftströmung ausbildet, ergibt sich daraus für den leakagebedingten Volumenstrom q_{CL} (CL = component leakage) im oberen Bereich der Gebäudehülle:

$$q_{CL} = k_{CL} \cdot \Delta P \quad (3)$$

mit:

q_{CL} [m³/(m² · h)] Luftvolumenstrom durch das Bauteil
 k_{CL} [m/(h · Pa)] Durchlässigkeitskoeffizient des Bauteils

wobei der Koeffizient k_{CL} mangels anderer Erkenntnisse so anzupassen ist, dass sich für den eingangs beschriebenen Referenzfall eine über den Winter aufsummierte konvektionsbedingte Feuchtequelle von 250 g/m² ergibt. Die aus der Dampfkonvektion resultierende Tauwassermenge wird dann aus der Differenz der in der Innenraumluft vorhandenen Wasserdampfkonzentration und der Sättigungskonzentration bei der Temperatur in der Tauwasserebene nach

Gleichung 4 ermittelt und der entsprechenden Bauteilschicht als Feuchtequelle S_{CL} zugeführt:

$$S_{CL} = q_{CL} \cdot (c_i - c_{sat,p}) \quad (4)$$

mit:

S_{CL} [kg/(m² · h)] dampfkonvektionsbedingte Feuchtequelle im Bauteil
 c_i [kg/m³] Wasserdampfkonzentration in der Raumluft
 $c_{sat,p}$ [kg/m³] Wasserdampfsättigungskonzentration an der Position p, wo der konvektionsbedingte Tauwasserausfall vermutet wird

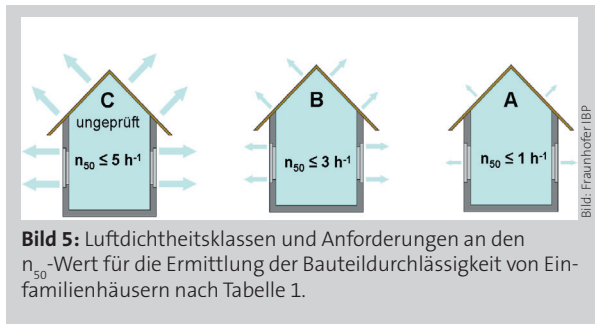
Das Modell ermöglicht also eine instationäre Ermittlung der konvektiv eingetragenen Feuchtemenge in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitskoeffizient k_{CL} des betrachteten Bauteils, von der Höhe des zusammenhängenden Raumluftvolumens, der Temperatur in der vorher festgelegten potentiellen Tauwasserebene des Bauteils sowie von den aktuellen Außen- und Raumklimabedingungen. Die einzige noch unbekannte Größe ist dabei der Koeffizient k_{CL} . Wie eingangs erwähnt wird dieser aus einer Rückrechnung mit Hilfe von WUFI® 5 gewonnen, bei der, wie in [3], die Nordwand eines Einfamilienhauses (2 Geschosse, h = 5 m) unter Holzkirchner Klimabedingungen betrachtet wird. Dort soll im oberen Bereich der äußeren Beplankung der mit 20 cm Mineralwolle gedämmten Holzkonstruktion eine konvektionsbedingte Tauwassermenge von 250 g/m² anfallen. Der sich daraus ergebende Durchlässigkeitskoeffizient k_{CL} beträgt 0,007 m/(h · Pa) (Klasse C in Tabelle 1).

Luftdichtheitsklasse	Durchströmung Hülle q_{50} [m ³ /m ² h]	Durchlässigkeitskoeff. Bauteil k_{CL} [m/hPa]
A	1,0	0,0015
B	3,0	0,004
C	5,0	0,007

Tabelle 1: Luftdichtheitsklassen abhängig von der Durchströmung der Gebäudehülle.

Bei diesem Referenzfall wurde davon ausgegangen, dass das Bauteil gemäß dem Stand der Technik luftdicht ausgeführt wurde, d. h. der n_{50} -Wert für das Gebäude liegt nicht über dem Durchschnitt für neuere Gebäude, in jedem Fall aber unter 5 h⁻¹. Wenn ein besonderer Wert auf die Luftdichtheit der Gebäudehülle gelegt wird und diese durch Blowerdoor-Messungen zusätzlich überprüft wird, dann ist davon auszugehen, dass auch die Bauteilleckagen und damit die Bauteildurchlässigkeit abnehmen. Geht man von einem näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen der Bauteildurchlässigkeit und der Durchströmung der gesamten Gebäudehülle bei 50 Pa Druckdifferenz aus, lässt sich die in Tabelle 1 vorgestellte Abstufung von k_{CL} anhand von Luftdichtheitsklassen vornehmen. Im Fall von Einfamilienhäusern ergibt sich näherungsweise Zahlenwertgleich-

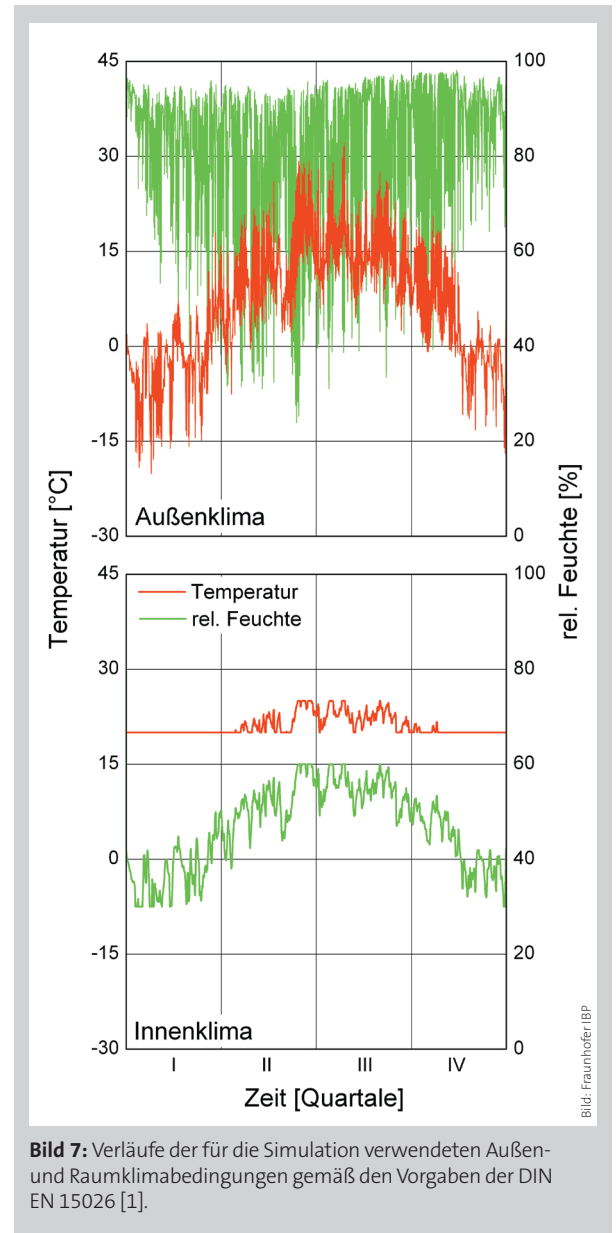
heit zwischen dem q_{50} -Wert und dem üblicherweise bei Objektprüfungen ermitteltem n_{50} -Wert, so dass die Luftdichtheitsklassen hier mit den Anforderungen an den Luftwechsel übereinstimmen. Wie in Bild 5 gezeigt, entspricht Klasse A dabei dem künftigen Grenzwert für ein Gebäude mit kontrollierter Lüftung und Wärmerückgewinnung nach



DIN 4108-7 ($n_{50} = 1,0 \text{ h}^{-1}$). Klasse B spiegelt die Mindestanforderungen der Bonusregelung der deutschen Energieeinsparverordnung für ein luftdichtes Gebäude wieder ($n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$) während Klasse C - ohne Nachweis - in etwa dem Mindeststandard neuerer Holzhäuser in Deutschland ($n_{50} \leq 5,0 \text{ h}^{-1}$) entspricht [1].

3. Anwendungsbeispiel

Anhand einer Flachdachkonstruktion (Bild 6) mit 240 mm Mineralfaserdämmung und äußerer OSB-Schalung soll der Einfluss der Dampfkongvektion auf die feuchtetechnische Beurteilung verdeutlicht werden. Die Abdichtung des Dachs weist einen Diffusionswiderstand von 300 m und eine kurzweilige Strahlungsabsorptionszahl von 0,6 auf. Ein Absorptionsgrad von 0,6 stellt die untere Grenze für die Strahlungsabsorption von konventionellen Dachbahnen oder Auflasten (Ausnahme Dachbegrünung) dar. Bituminöse und andere dunkle Dachbahnen zeichnen sich typischerweise durch Absorptionsgrade zwischen 0,8 und 0,95 aus. Auf der Innenseite wird entweder eine Dampfsperre mit einem s_d -Wert von 100 m oder eine Dampfbremse mit einem deutlich geringeren Diffusionswiderstand von nur 2 m bzw. eine feuchteadaptive Dampfbremse auf Polyamidbasis eingesetzt. Als Standardfall für die Berechnung der



Dampfkongvektion werden die thermisch bedingten Druckdifferenzen über dem Flachdach eines Einfamilienhauses mit einer Höhe von 5 m zugrunde gelegt.

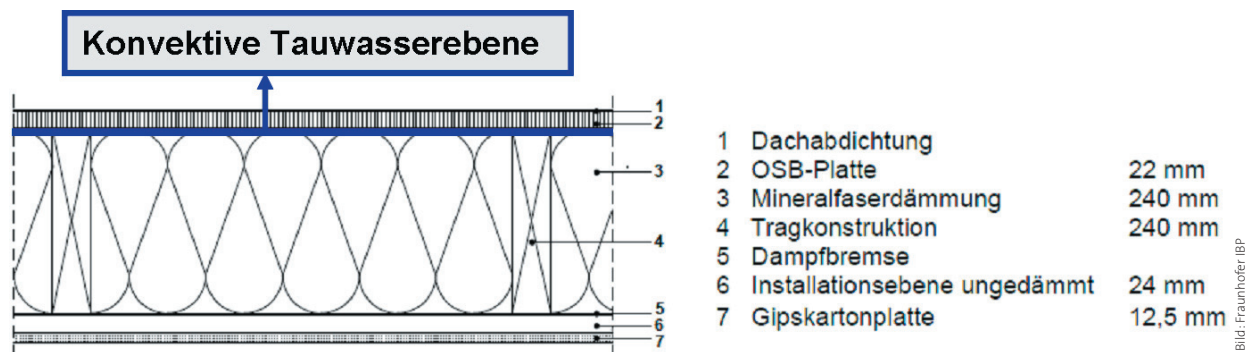


Bild 6: Aufbau der untersuchten Flachdachkonstruktion mit Angabe der ausgewählten Position für die konvektive Feuchtequelle.

Als Außenklima wird das Feuchte-Referenzjahr von Holzkirchen verwendet, ein für relativ extreme deutsche Klimaverhältnisse als repräsentativ geltender meteorologischer Datensatz. Im Innenraum herrschen Wohnraumverhältnisse gemäß [1] für eine normale Belegung. Die sich daraus ergebenden äußeren und inneren Randbedingungen sind in Bild 7 dargestellt. Die Oberflächenübergangswiderstände entsprechen ebenfalls den Vorgaben in [1].

Als mögliche konvektive Befeuchtungsebene wird die in Bild 6 eingezeichnete Zone zwischen OSB-Schalung und darunter liegender Mineralfaserdämmung ausgewählt. Die Berechnungen werden mit Hilfe der hygrothermischen Simulationssoftware WUFI® 5 durchgeführt. Der konvektive Feuchteeintrag wird entsprechend Gleichung 4 berechnet, wobei die Position p die ausgewählte Tauwasserebene (Bild 6) bezeichnet. Die Beurteilung der feuchtetechnischen Gebrauchstauglichkeit erfolgt anhand der berechneten Wassergehaltsverläufe im Bauteil.

Ausgehend vom lufttrockenen Zustand der Konstruktion, d. h. alle Materialien im Dach sind zu Beginn im Gleichgewicht mit der mittleren Außenluftfeuchte von 80% r.F., startet die Berechnung im Oktober und wird mit demselben Klimadatensatz über einen Zeitraum von fünf Jahren fortgeführt. Die sich dabei ergebenden Verläufe des Gesamtwassergehalts im Dach sind für die Konstruktionsvarianten mit den verschiedenen Dampfbremsen in Bild 8 dargestellt. Die stetige Zunahme der Feuchte im Dachaufbau mit der stark diffusionshemmenden Dampfbremse ($s_d = 100 \text{ m}$) zeigt, dass hier ein Problem vorhanden ist.

Für die genauere Auswertung ist es sinnvoll, die Bauteilschicht zu betrachten, die das größte feuchtetechnische Risiko in sich birgt. In diesem Fall ist das die obere Schalung aus OSB, deren Wassergehaltsverläufe für die drei unterschiedlichen Konstruktionsvarianten in Bild 9 eingezeichnet sind. Die Tatsache, dass der Feuchtegehalt der OSB-Schalung im Dach mit der stark diffusionshemmenden Dampfbremse innerhalb von fünf Jahren die als kritisch geltenden 20 M.-% erreicht, während die Schalung bei den Varianten mit den anderen Dampfbremsen immer trockener wird, zeigt eindeutig, welcher Konstruktionsaufbau nicht gewählt werden sollte. Am besten schneidet hier der Aufbau mit der feuchteadaptiven PA-Folie ab, da deren variabler Dampfdiffusionswiderstand im Winter, wenn Tauwassergefahr herrscht größer ist als im Sommer, wenn das Dach austrocknen soll.

Allerdings hat auch das Austrocknungspotenzial der PA-Folie seine Grenzen, wie die Ergebnisse für den Wassergehalt der OSB-Schalung derselben Konstruktion, diesmal jedoch mit reflektierender (extrem weißer) Dachoberfläche, in Bild 10 zeigen. Durch die starke Reflektion der solaren Einstrahlung - der kurzzeitige Absorptionsgrad beträgt hier mit 0,3 nur ein Drittel bis die Hälfte einer herkömmlichen Flachdachoberfläche - erwärmt sich die Dachoberfläche nur sehr wenig, so dass die Rücktrocknung im Sommer unter Holzkirchner Klimabedingungen unzureichend ist. In einem wärmeren Klima, wie z. B. in Locarno (Südschweiz)

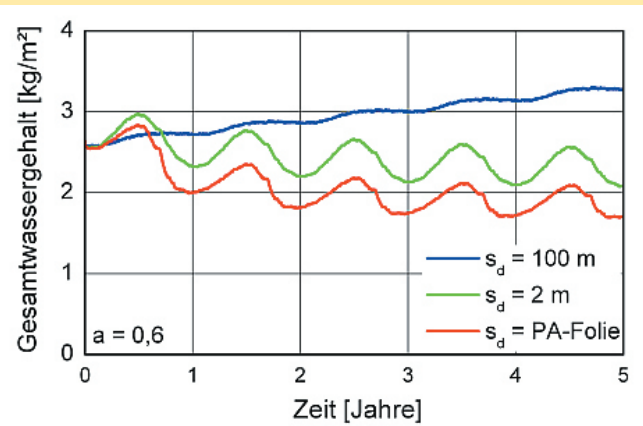


Bild: Fraunhofer IBP

Bild 8: Berechneter Verlauf des Gesamtwassergehalts im Dach in Abhängigkeit von den Dampfdiffusionseigenschaften der eingesetzten Dampfbremse. Der Anfangswassergehalt entspricht dem Wassergehalt der eingebauten Materialien im lufttrockenen Zustand (Gleichgewichtsfeuchte bei 80% r.F.).

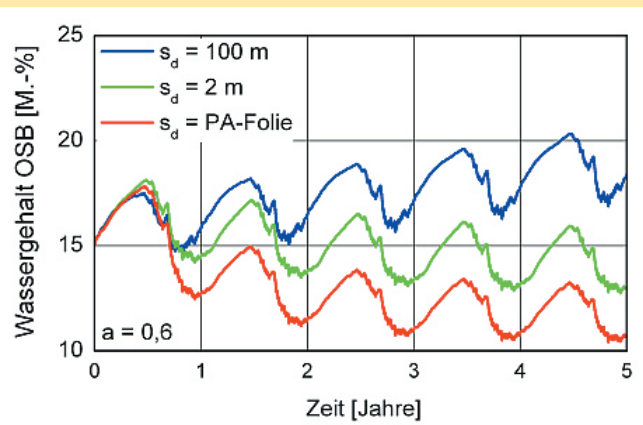


Bild: Fraunhofer IBP

Bild 9: Berechneter Verlauf der Holzfeuchte in der äußeren OSB-Schalung des Flachdachs in Abhängigkeit von den Dampfdiffusionseigenschaften der eingesetzten Dampfbremse.

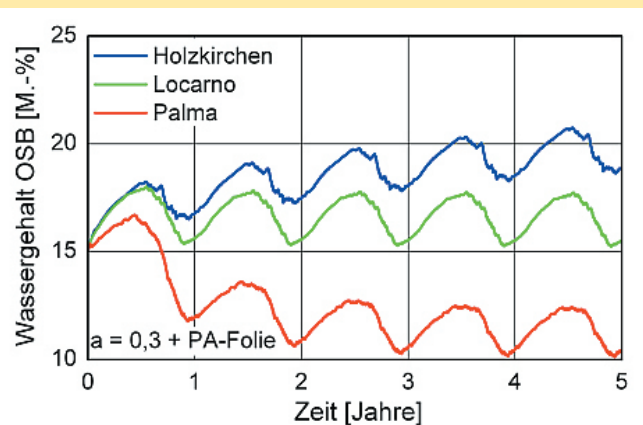


Bild: Fraunhofer IBP

Bild 10: Berechneter Verlauf der Holzfeuchte in der äußeren OSB-Schalung des Flachdachs mit feuchteadaptiver Dampfbremse (PA-Folie) und reflektierender (weißer) Abdichtung in Abhängigkeit vom Außenklima am jeweiligen Standort.

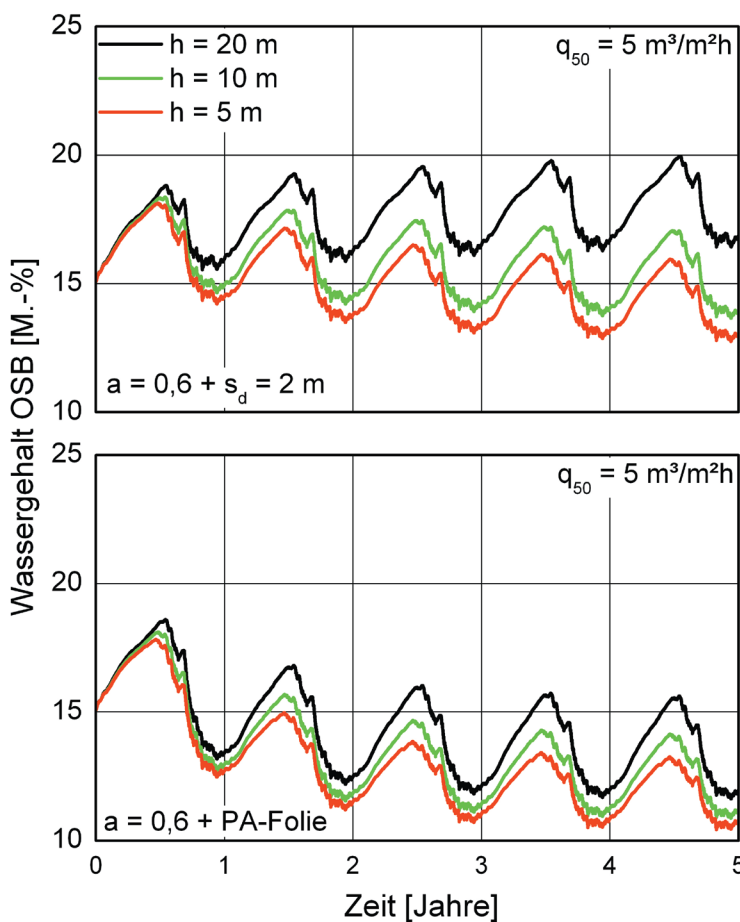


Bild 11: Berechneter Verlauf der Holzfeuchte in der äußeren OSB-Schalung des Flachdachs in Abhängigkeit von der Raumhöhe und der eingesetzten Dampfbremse.

Bild: Fraunhofer IBP

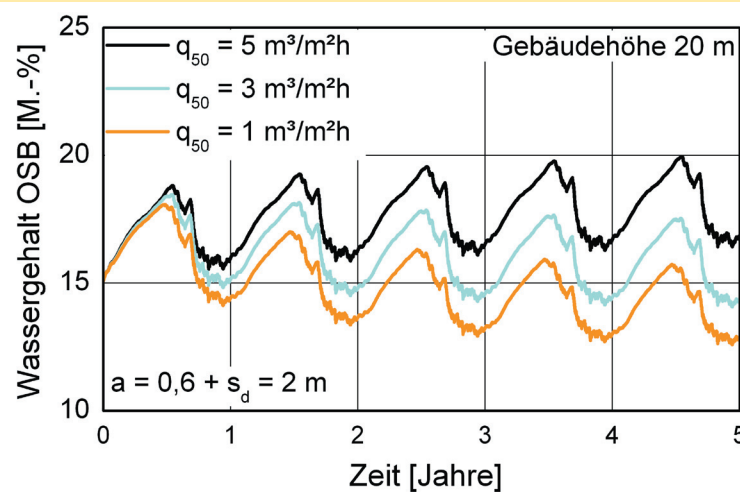


Bild 12: Berechneter Verlauf der Holzfeuchte in der äußeren OSB-Schalung des Flachdachs mit moderater Dampfbremse bei einer Raumhöhe von 20 m in Abhängigkeit von der Luftdurchlässigkeit (q_{50} -Wert).

Bild: Fraunhofer IBP

oder Palma de Mallorca würde das Dach jedoch auch mit reflektierender Dachoberfläche problemlos funktionieren. Im Übrigen machen reflektierende Dachbahnen auch aus energetischen Gründen unter deutschen Klimabedingungen wenig Sinn. Wenn sie nur dort eingesetzt werden, wo sie tatsächlich eine deutliche Verbesserung der energetischen und raumklimatischen Verhältnisse bewirken, wie z. B. im südlichen Europa, dann sind in der Regel auch keine Feuchteprobleme zu befürchten.

Konsequenterweise wird für die weiteren Berechnungen wieder ein kurzweiliger Absorptionsgrad von 0,6 gewählt, der die Verhältnisse auf konventionellen Dachoberflächen, wie bereits erwähnt, besser charakterisiert bzw. an der unteren Grenze der Werte von üblichen Dachbahnen oder Eindeckungen liegt. Erweitert man die Betrachtung auch auf höhere Gebäude, wie z. B. Hallen oder mehrstöckige Häuser mit durchgehendem Raumluftvolumen, muss im Winter auch mit größeren, thermisch bedingten Differenzdrücken gerechnet werden. Bild 11 zeigt am Beispiel desselben Dachaufbaus (Bild 6), welchen Einfluss die Gebäudehöhe auf den Wassergehalt in der OSB-Schalung hat. Dargestellt sind hier nur die Verhältnisse beim Einsatz einer moderaten ($s_d = 2$ m) oder feuchteadaptiven Dampfbremse (PA-Folie), da das Dach mit der stark diffusionshemmenden Dampfbremse ($s_d = 100$ m) schon bei geringen Gebäudehöhen zu feucht wird (Bild 9).

Bei einer Höhe des zusammenhängenden Luftvolumens von 20 m führt die Befeuchtung durch Dampfkongvektion auch beim Einsatz einer moderaten Dampfbremse zu Problemen (kontinuierlicher Anstieg der Holzfeuchte in der OSB-Schalung). Hier muss entweder eine feuchteadaptive Dampfbremse verwendet werden oder die Luftdichtheit der Gebäudehülle ist zu verbessern. Eine Reduktion des q_{50} -Wertes (Luftdurchlässigkeit des Daches bei einer Druckdifferenz von 50 Pa) auf 3 bis 1 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ kann ebenfalls zur Problemlösung beitragen, wie anhand von Bild 12 zu erkennen ist. D. h. größere Gebäudehöhen können bis zu einem gewissen Grad durch eine bessere Luftdichtheit der Gebäudehülle kompensiert werden.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Berücksichtigung des Feuchteintrags durch Dampfkongvektion erhöht die Planungssicherheit im Holzbau, da sich die Auswirkungen der unterschiedlichen baulichen und klimatischen Einflussfaktoren besser abschätzen lassen. Die Feuchteschutzbeurteilung mithilfe hygrothermischer Simulationsverfahren wird dadurch praxisgerechter, denn die notwendigen Trocknungsreserven lassen sich genauer bemessen. Die mit dampfdichten Konstruktionen verbundenen Feuchterisiken werden genauso offengelegt wie die Probleme, die sich bei diffusionsoffenen Konstruktionen ergeben, wenn die sommerliche Rücktrocknung aufgrund der äußeren Klima- oder Strahlungsverhältnisse hinter den Erwartungen zurückbleibt.

Eine gewisse Unsicherheit bleibt bezüglich der Faktoren, die die befeuchtungsrelevante Undichtheit des einzelnen Bauteils aus der Gesamtundichtheit der Gebäudehülle ableiten. Eine Bewertung der vorgeschlagenen Faktoren ist aufgrund des aktuellen Erkenntnisstandes noch nicht abschließend möglich - die Größenordnungen erscheinen aber sowohl im Vergleich zu den diffusionsbedingten Tauwassermengen als auch in Bezug auf die sich ergebenden Bauteilbeurteilungen als sinnvoll.

Auch zum Einfluss von windinduzierten Luftströmungen auf das Feuchteverhalten von Bauteilen fehlen bislang aussagekräftige Untersuchungen, und zwar sowohl was die instationären Druckdifferenzen über die einzelnen Bauteile anbelangt als auch in Bezug auf die mögliche konvektive Trocknung im Sommer und in den Übergangszeiten. Obwohl hinsichtlich der Druckverhältnisse bei unterschiedlichen Gebäuden als auch bei der jeweiligen Spezifizierung der Luftdurchlässigkeit von Bauteilen noch erheblicher Untersuchungsbedarf besteht, stellt der Einsatz des hier vorgestellten Dampfkonvektionsmodells für feuchteempfindliche Konstruktionen eine deutliche Verbesserung der Risikoabschätzung gegenüber den derzeit genormten Verfahren dar.

5. Literatur

- [1] DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Juli 2007.
- [2] Zirkelbach, D.; Künzel, H.M.; Schafaczek, B. und Borsch-Laaks, R.: Dampfkonvektion wird berechenbar - Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen. Proceedings AIVC-BUILDPAIR, Berlin 2009.
- [3] Künzel, H. M.: Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser - quo vadis? IBP Mitteilung 26 (1999), Nr. 355.
- [4] TenWolde, A.; Carll, C. G.; Malinauskas, V.: Air Pressures in Wood Frame Walls. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VII. Clearwater, Florida, USA (1998).
- [5] Schmidt, D.; Winter, S.: Informationsdienst Holz Spezial - Flachdächer in Holzbauweise. H 576 (September 2008).
- [6] Borsch-Laaks, R.: Wie undicht ist dicht genug? Tagungsband Aachener Bausachverständigentage 2009, S. 119-132.
- [7] DIN 68 800-2: Holzschutz - Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau, Normentwurf 11/2009.
- [8] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Klimabedingter Feuchteschutz. Juli 2001.
- [9] Wolfseher, U. und Gertis, K.: Bodennahe Aerodynamik. Gesundheits-Ingenieur 99 (1978), H. 9, S. 259-274 und H. 11, S. 321-332.
- [10] ASHRAE Handbook of Fundamentals 2005, Chapter 15 Airflow Around Buildings.
- [11] Geißler, A. und Hauser, G.: Abschätzung des Risikopotenzials infolge konvektiven Feuchtetransports. Abschlussbericht AiF-Forschungsvorhaben 12764, Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel (Juli 2002).