

Dampfkonvektion wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leicht- baukonstruktionen

D. Zirkelbach¹, H.M. Künzel¹, B. Schafaczek¹, R. Borsch-Laaks²

¹ Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Postfach 1152, D- 83601 Holzkirchen

² Büro für Bauphysik, D- 52066 Aachen

Kurzfassung

Bei der Beurteilung von Konstruktionen mit Hilfe hygrothermischer Simulationen wird bisher in der Regel der idealdichte Regelquerschnitt betrachtet. Bei Leichtbauteilen normalerweise immer auftretende zusätzliche Befeuchtungen durch Konvektion wird nicht berücksichtigt, so dass diffusionsdichte Konstruktionen im Widerspruch zur Praxis günstiger erscheinen als diffusionsoffener. Aufbauend auf einer pauschalen Berücksichtigung über feste Quellmengen wird nun ein instationäres Modell vorgestellt, das den Feuchteeintrag über Konvektion in Abhängigkeit von den tatsächlichen Konstruktions- und Randbedingungen quantifiziert und so situationsspezifische Anforderungen an die Luftdichtheit von Bauteilen ermöglicht.

Schlüsselwörter

Feuchte, Wasserdampf-Konvektion, Trocknungsreserve

EINLEITUNG

Hygrothermische Simulationen stellen mittlerweile den Stand der Technik zur Beurteilung der Feuchtesicherheit von Baukonstruktionen dar. Meist wird dazu eine eindimensionale Berechnung durch den Regelquerschnitt des Bauteils durchgeführt – dies bedeutet allerdings, dass ebenso wie beim sog. „Glaserverfahren“ Undichtheiten zunächst nicht erfasst werden und beidseitig diffusionsdichte Konstruktionen im Widerspruch zu den praktischen Erfahrungen unproblematisch erscheinen. Da in der Praxis aber auch bei sorgfältig luftdicht ausgeführten Konstruktionen immer Restleckagen verbleiben, durch die bei entsprechenden Temperatur- und Druckverhältnissen auch Feuchte in die Konstruktionen eindringen kann, muss über eine entsprechende Trocknungsreserve die Schadensfreiheit solcher Konstruktionen gewährleistet werden.

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 wirklich weiter, da zum einen der Aufwand hierfür bei einer Bauteilbeurteilung 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. Im Gegensatz zu dem pauschalen Ansatz, der bereits vor zehn Jahren von [8] für das Glaserverfahren vorgeschlagen wurde, soll nun aber der Einfluss von Außen- und Innenklima, Dichtheit der Gebäudehülle und Höhe des zusammenhängenden innenseitigen Luftraums auf die Tauwassermenge berücksichtigt werden, um die Möglichkeiten einer realitätsnahen Simulation auch sinnvoll zu nutzen.

STAND VON WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Die Luftdichtheit von Gebäuden hat in den letzten Jahren in Deutschland und international stark an Bedeutung gewonnen. Dies wird auch durch zahlreiche Untersuchungen und Publikationen belegt, die sich mit dem Thema beschäftigen. Im Folgenden soll ein kurzer Überblick über die ausgewertete Literatur insbesondere in Bezug auf deren Verwertbarkeit für ein instationäres konvektives Befeuchtungsmodell gegeben werden.

In Mitteleuropa liegt die Feuchtekonzentration im Innenraum und damit 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 allerdings 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 die Zeiträume mit einer höheren Innenraum- als Außenlufttemperatur, wobei dem durch thermischen Auftrieb entstandenen Überdruck im oberen Gebäudebereich mit Durchströmung von innen nach außen ein Unterdruck im unteren Bereich mit Durchströmung von außen nach innen gegenübersteht. Bei gleichmäßiger Verteilung der Undichtheiten würde die druckneutrale Ebene bezogen auf den Hüllflächenanteil mittig liegen. Bei ungleichmäßiger Verteilung verschiebt sich die druckneutrale Ebene in Richtung der größeren Undichtheiten. Recht ausführlich beschäftigt sich u.a. [5] mit dieser Thematik. Einen einfacheren Ansatz für den Überdruck im Innenraum infolge von Temperaturdifferenzen und in Abhängigkeit der Höhe des zusammenhängenden Luftraums liefert [1], wobei die neutrale Ebene in der Mitte des zusammenhängenden Luftraums liegend und die Leckagen als gleichmäßig verteilt angenommen werden.

In [5] wird weiterhin festgestellt, dass konvektionsbedingte Feuchteschäden in Relation zu der großen Zahl der bei Gebäuden festgestellten Undichtheiten z.B. nach [6] oder [9] seltener auftreten als zu erwarten wäre. Dies hängt damit zusammen, dass stark durchströmte Fehlstellen zwar einen bedeutenden Wärmeverlust zur Folge haben – eben dieser Wärmeverlust aber zu einer Erwärmung des durchströmten Bereichs und damit zu feuchtechnisch unkritischen Verhältnissen führt. Problematisch sind nach [5] vor allem langstreckige, langsam durchströmte Leckagen mit Umlenkungen im äußeren, kalten Bereich der Konstruktion. Eine Erwärmung findet hier kaum statt und beim Vorbeistreichen der feuchten Luft z.B. an kalten Außenbeplanungen kann sich Kondensat bilden (vgl. [3]).

Für eine Quantifizierung des Befeuchtungsrisikos wäre es also notwendig, den Anteil der befeuchtungsrelevanten Leckagen (im Bauteil selbst) an der Gesamtundichtheit der Gebäudehülle zu kennen. Hierzu finden sich derzeit leider kaum belastbare Aussagen. Die meisten Untersuchungen beschäftigen sich in erster Linie mit den energetischen Aspekten von Undichtheiten und streifen das Befeuchtungsrisiko eher am Rande. Lediglich [12] ermittelte bereits 1998 auf Basis von Untersuchungen, dass der Feuchteeintrag in eine handwerklich nach damaliger Praxis in den USA luftdicht ausgeführte Konstruktion etwa der Menge entspricht, die während der Tauperiode durch eine Dampfbremse mit 1 US-perm, umgerechnet entspricht dies einem s_d -Wert von 3,3 m, hindurch diffundieren kann. Übertragen auf deutsche Klimaverhältnisse berechnete Künzel [8] daraus eine zusätzliche Feuchtemenge von 250 g/m² pro Winter. In [9] wird vorgeschlagen, die Undichtheit von Gesamtgebäude zu Bauteil und Material jeweils um eine Größenordnung – also den Faktor 10 – abzustufen. [2] beschäftigt sich direkt mit der Simulation von Durchströmungsvorgängen von Bauteilen. Bei genau bekannten Randbedingungen ist demzufolge eine Simulation gut möglich. Die Autoren kommen jedoch ebenfalls zu dem Schluss, dass für eine praxisrelevante Beurteilung zu wenig Daten über die real auftretenden Undichtheiten und deren Verteilung auf Gebäudehülle, Bauteil und Materialien verfügbar sind.

Insgesamt ist festzustellen, dass basierend auf den ausgewerteten Publikationen und Untersuchungen ein Anteil der befeuchtungsrelevanten Leckagen an der Gesamtundichtheit von Gebäuden nicht direkt festgelegt werden kann. Die von Künzel in [8] auf Basis der Untersuchungen von TenWolde in [12] vorgeschlagene zusätzliche Befeuchtmenge von 250 g/m² pro Tauperiode bei deutschen Klimaverhältnissen wird allerdings immer wieder aufgegriffen (zuletzt in [11] und im neuen Entwurf zur Holzschutznorm DIN 68 800-2) und scheint sich für die Beurteilung der Feuchtesicherheit von Leichtbaukonstruktionen soweit bewährt zu haben. Im Vergleich zu den zulässigen Tauwassermengen nach Glaser von 500 bzw. 1000 g/m² erscheint auch die Größenordnung als sinnvoll. Daher soll dieser Ansatz dazu dienen, den Anteil der befeuchtungsrelevanten Leckagen so festzulegen, dass bei einer instationären Simulation der damals verwendeten nordorientierten Außenwandkonstruktion die vorgeschlagene Quellmenge von 250 g/m² erreicht wird.

MODELLENTWURF

Für das instationäre Modell wird zunächst festgelegt, bis zu welcher Position in der Konstruktion eine Durchströmung im Falle von Undichtheiten möglich ist. Eine Befeuchtung wird im Modell vereinfachend nur dann berücksichtigt, wenn am Durchströmungsbereich die Taupunkttemperatur des Innenraumklimas unterschritten wird – sich also an der betreffenden Position Kondensat bilden würde. Die Taupunkttemperatur des Innenklimas berechnet sich dabei gemäß [13]. Eine Erhöhung der Sorptionsfeuchte infolge einer durch die Konvektion bedingten Zunahme der Luftfeuchte unterhalb von Tauwasserbedingungen wird aufgrund der geringeren Mengen und der aufwändigen Berechnung hier vernachlässigt. Im Falle einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur in der Durchströmungsebene wird der aus der Temperaturdifferenz resultierende Überdruck im Innenraum entsprechend dem Ansatz in [1] nach Eqn. 1 ermittelt. Aufgrund der so berechneten Druckdifferenzen stellt sich eine dichtheitsabhängige Durchströmung der einzelnen Bauteile ein. Diese wird aus der Gesamtdichtheit des Gebäudes abgeleitet.

$$\dot{A}P = \tilde{n} \cdot \frac{T_a - T_i}{T_i} \cdot g \cdot \frac{h}{2} \quad \text{Eqn. 1}$$

ΔP	Druckdifferenz innen-außen [Pa]
ρ	Dichte der Außenluft = 1,3 kg/m ³
T_a	Lufttemperatur außen [K]
T_i	Lufttemperatur innen [K]
g	Fallbeschleunigung = 9,81 m/s ²
h	Höhe des zusammenhängenden Innen-Luftraums [m]

Da die befeuchtungsrelevanten Leckagen eher langsam und laminar durchströmt werden, erfolgt die Umrechnung zwischen den Messdruckdifferenzen auf die niedrigeren Druckdifferenzen bei normaler Nutzung linear. Damit ergibt sich der Luftstrom durch das Bauteil nach Eqn. 2.

$$q_{\dot{A}P} = |\dot{A}P| \cdot \frac{q_{50, \text{Bauteil}}}{50 \text{ Pa}} \quad \text{Eqn. 2}$$

$q_{\Delta P}$	resultierender Luftstrom durch das Bauteil [m ³ /hm ²]
$q_{50, \text{Bauteil}}$	Luftstr. durch d. Bauteil bei 50 Pa Druckdiff. [m ³ /hm ²]

In [9] wird der in den USA bei einer Messdruckdifferenz von 75 Pa maximal zulässige Luftstrom durch die Gebäudehülle q_{75} mit 2 l/m²s bzw. 7,2 m³/hm² angegeben. Bezogen auf das einzelne Bauteil wird der Wert für q_{75} , Bauteil um den Faktor 1/10 geringer mit 0,2 l/m²s oder 0,72 m³/hm² vorgeschlagen. Um analog zu [8] bei einer nordorientierten nach damaligen US-Vorgaben gerade noch luftdichten Leichtbauaußenwand auf die konvektive Befeuchtungsmenge von 250 g/m² zu kommen, ist dieser Faktor allerdings etwas zu groß. Daher wird hier nun eine, im Vergleich zur Gesamthülle um den Faktor 1/15 geringere Bauteildurchströmung vorgeschlagen. Für die Gebäudedichtheit werden daher, bezogen auf die in Europa üblichere Messdruckdifferenz von 50 Pa die in Tabelle 1 Luftdichtheitsklassen vorgeschlagen:

Tabelle 1: Luftdichtheitsklassen abhängig von der der Hüll- und Bauteildurchströmung

Luftdichtheitsklasse	Durchströmung Hülle q_{50} [m ³ /hm ²]	Durchströmung Bauteil $q_{50, \text{Bauteil}}$ [m ³ /hm ²]
A	1,0	0,07
B	3,0	0,20
C	5,0	0,33

Bezogen auf ein Einfamilienhaus (A_e/V_e 0,8 bis 0,9 1/m bei Außenmaßbezug) ergibt sich in etwa eine Zahlenwertgleichheit von q_{50} - Wert und dem üblicherweise bei Objektprüfungen ermittelten n_{50} - Wert. Dies tritt dann ein, wenn der q_{50} - Wert auf die Gebäudeaußenhülle bezogen wird, was aus Gründen der Vereinfachung der Ermittlung ratsam ist. Dann liegt der Faktor zur Umrechnung des Außen- in das Innenvolumens in etwa beim gleichen Zahlenwert wie das o.ä. außenmaßbezogenen A/V-Verhältnis. Klasse A entspricht dabei in etwa den künftigen Anforderung nach DIN 4108 Teil 7 an ein Gebäude mit kontrollierter Lüftung mit Wärmerückgewinnung ($n_{50} = 1,0$ 1/h) und Klasse B spiegelt die Mindestanforderungen der Bonusregelung der deutschen EnEV für ein luftdichtes Gebäude wieder ($n_{50} = 3,0$ 1/h). Klasse C – ohne Nachweis - entspricht in etwa der zuvor genannten nordamerikanischen Anforderung

nach [9]. In [7] untersuchte neuere Holzhäuser in Deutschland wiesen im Mittel nur geringere Durchströmungen der Hülle von umgerechnet etwa $3,5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ auf.

Die konvektive Tauwassermenge wird dann aus der Differenz der in der Innenraumluft vorhandenen Wasserdampfkonzentration und der Sättigungskonzentration bei der Temperatur in der Tauwasserebene nach Eqn. 3 ermittelt und kann dem Bauteil als Feuchtequelle zugeführt werden.

$$m = q_{\text{ÄP}} \cdot (c_{\text{Di}} - c_{\text{sT}}) \quad \text{Eqn. 3}$$

m	ausfallende Tauwassermenge [kg/hm^2]
c_{Di}	Wasserdampfkonzentration innen [kg/m^3]
c_{sT}	Wasserdampfsättigungskonzentration bei der Temperatur in der Tauwasserebene [kg/m^3]

Das Modell ermöglicht also eine instationäre Ermittlung der konvektiv eingetragenen Feuchtemenge in Abhängigkeit vom Dichtheitsgrad der Gebäudehülle, von der Höhe des zusammenhängenden Luftraums innen, dem jeweiligen Bauteilaufbau und der möglichen Durchströmungsebenen sowie den aktuellen Außen- und Raumklimabedingungen.

ANWENDUNGSBEISPIEL

Anhand einer Flachdachkonstruktion mit 240 mm Mineralfaserdämmung und OSB-Beplankung soll der Einfluss der konvektiven Befeuchtung auf die feuchtetechnische Beurteilung verdeutlicht werden. Die äußere Abdichtungsbahn des Dachs weist einen Diffusionswiderstand von 300 m und eine kurzweilige Strahlungsabsorptionszahl von 0,6 (graue Farbgebung) auf.

Auf der Innenseite wird jeweils eine nach DIN 4108 Teil 3 nachweisfreie Dampfbremse mit einem s_d -Wert von 100 m und eine Dampfbremse mit einem deutlich geringeren Diffusionswiderstand von nur 2 m verwendet. Als Außenklima wird zunächst der für deutsche Klimaverhältnisse als kritisch repräsentativ geltende Klimadatensatz von Holzkirchen verwendet. Im Innraum herrschen Wohnraumverhältnisse mit normaler Feuchtelast nach [14]. Als mögliche Durchströmungsebene wird der Grenzbereich zwischen OSB-Platte und Mineralfaserdämmung ausgewählt. Die Berechnungen werden mit Hilfe des am Fraunhofer Institut für Bauphysik entwickelten und vielfach validierten Verfahrens zur Berechnung des instationären Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen WUFI[®] durchgeführt. Der konvektive Feuchteeintrag wird entsprechend dem vorigen Absatz berechnet und als Quelle an der Grenzschicht zwischen der Mineralfaserdämmung und der OSB-Beplankung eingebracht. Die Bewertung erfolgt anhand der Holzfeuchte in der äußeren OSB-Beplankung. Der Verlauf dieser Holzfeuchte über den Berechnungszeitraum von sieben Jahren ist für die Konstruktion mit der Dampfbremse mit einem s_d -Wert von 100 m in Abb. 1 oben dargestellt.

Da diese Variante nach außen und innen weitgehend diffusionsdicht ausgeführt ist, kann vorhandene oder eindringende Feuchte kaum austrocknen – daher führt bereits eine geringe konvektiv bedingte Feuchtequelle von etwa $42 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$ bei einer sehr guten Luftdichtheit von $q_{50} = 1 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ zu einer langsamen Akkumulation (hellgraue

Kurve) der Feuchte in der OSB-Schalung. Im Falle der Luftdichtheit nach EnEV mit $q_{50} = 3 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (Quellmenge $122 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$) führt die Akkumulation nach 6 Jahren zu Holzfeuchten über 20 M.-%, bei einem q_{50} Wert von $5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ (Quellmenge $201 \text{ g}/\text{m}^2\text{a}$) wird die kritische Holzfeuchte bereits nach 4 Jahren überschritten.

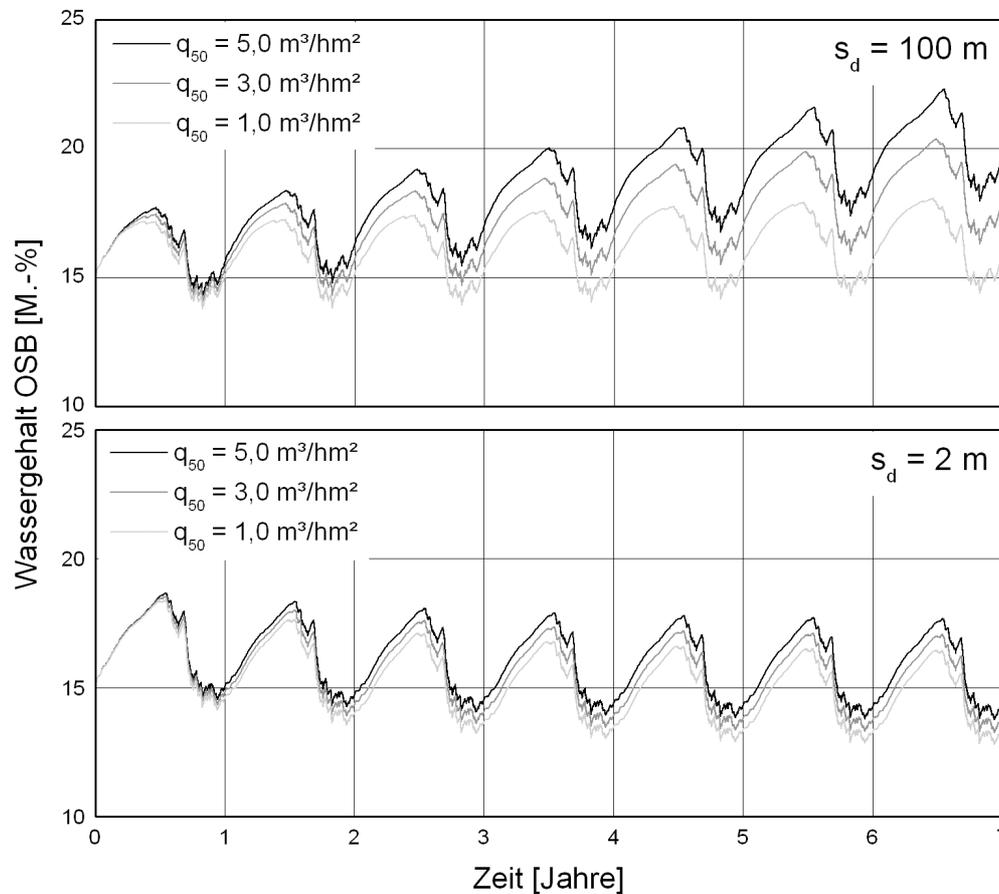


Abb. 1: Berechneter zeitlicher Verlauf der Holzfeuchte in der OSB-Platte in Abhängigkeit von der Dichtheit der Gebäudehülle für einen s_d -Wert der Dampfbremse von 100 m (oben) und 2 m (unten)

Anders liegen die Ergebnisse bei der Dampfbremisvariante von nur 2 m s_d -Wert in Abb. 1 rechts. Hier nimmt die Feuchte bei nur geringen Unterschieden zwischen den drei Luftdichtheiten ausgehend von einem Gleichgewichtszustand bei 80 % r.F. jeweils langsam ab. Dies zeigt, dass beidseitig stark diffusionshemmend ausgeführte Konstruktionen wenig fehlertolerant sind und dementsprechend hohe Anforderungen an eine luftdichte Ausführung gestellt werden müssen. Nur bei Erfüllung der höchsten Luftdichtheitsanforderung kann die Feuchteakkumulation langfristig auf unkritische Wassergehalte begrenzt werden. Bei der diffusionsoffeneren Ausführung werden die hygrothermischen Verhältnisse durch zusätzliche Feuchtequellen dagegen weit weniger stark beeinflusst. Da die konvektive Feuchtequelle nicht nur von der Luftdichtheit und dem Konstruktionstyp abhängt, sondern auch von der Innenraumlufthöhe und dem Außenklima, werden die Einflüsse anderer Raumlufthöhen von 10 und 15 m (Abb. 2 oben) sowie des wärmeren Standorts Locarno und des kühleren Standorts Davos (

Abb. 2 unten) jeweils bei einer Luftdichtheit von $q_{50} = 5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ betrachtet. Die Raumlufthöhe hat dabei zwar einen etwas größeren Einfluss auf die konvektiven Feuchteeintrag als die hier betrachteten unterschiedlichen Außenklima (vgl. Tabelle 2), da das Außenklima aber auch für den Diffusionstransport und das Trocknungspotential der Konstruktion maßgeblich ist, weichen die resultierenden Holzfeuchten bei der Standortvariation doch deutlich stärker voneinander ab als die bei der Höhenvariation.

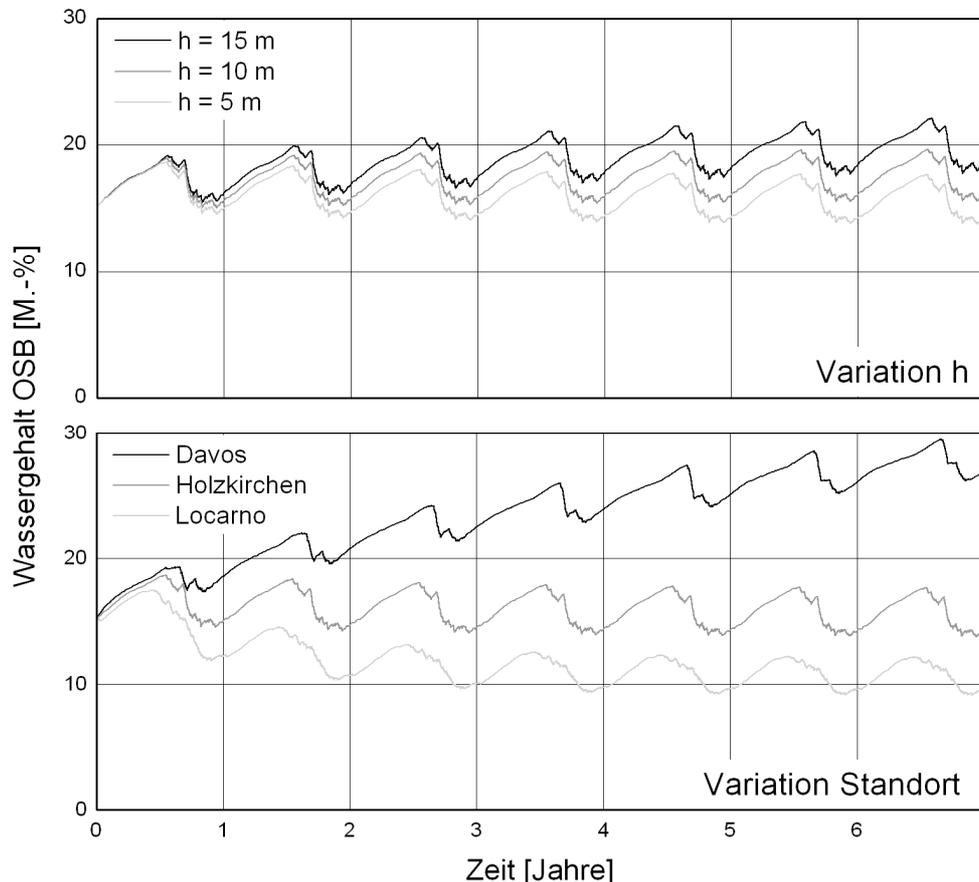


Abb. 2: Berechneter zeitlicher Verlauf der Holzfeuchte in der OSB-Platte in Abhängigkeit von der Höhe des zusammenhäng. Luftraums h in Holzkirchen (oben) und vom Außenklima (unten, bei $h = 5 \text{ m}$).

Der ebenfalls deutliche Einfluss der Innenraumfeuchtebelasten ist platzbedingt nicht als Bild sondern neben den übrigen berechneten Varianten in Tabelle 2 am Standort Holzkirchen jeweils mit der resultierenden Quellmenge und der maximalen Holzfeuchte nach sieben Jahren berücksichtigt.

Tabelle 2: Überblick über die berechneten Varianten, Quellmengen und resultierenden Holzfeuchten

Standort	Feuchtebelast	s_d -Wert innen [m]	q_{50} [m^3/hm^2]	h [m]	Feuchtmenge [$\text{g}/\text{m}^2\text{a}$]	Max. OSB-Holzfeuchte, 7. Jahr [M.-%]
Holzkirchen	normal	2	1	5	43	16,5
			3		121	17,1
			5		200	17,7
		100	1	5	43	18,1
			3		122	20,4
			5		201	22,3
	variabel 0,1 - 5	5		200	15,0	
		niedrig	100	3	75	18,8

	hoch			173	21,9
Locarno	normal	2	5	86	12,2
Davos				309	29,5

BEWERTUNG UND AUSBLICK

Im Unterschied zu dem bereits häufig aufgegriffenen Ansatz mit Hilfe einer pauschalen über Konvektion eingetragenen Feuchtemenge Trocknungsreserven bei Konstruktionen im Sinne einer höheren Feuchtesicherheit zuschaffen, ermöglicht das neue instationäre Modell nun eine Berücksichtigung des konvektiven Befeuchtungsrisikos in Abhängigkeit von den tatsächlich vorhandenen Konstruktions- und Randbedingungen. Dies trägt dazu bei, das Risiko von Konvektion situationsspezifisch besser beurteilen zu können und geeignete Anforderungen an die Luftdichtheit der Gebäudehülle zu stellen. 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.

Unabhängig davon können durch die instationäre Berücksichtigung des konvektiven Feuchteintrags Konstruktionen ohne ausreichende Trocknungsreserven künftig ausgeschlossen und die Planer im Sinne eines verbesserten Feuchtemanagements von Bauteilen für die verschiedenen Risikofaktoren sensibilisiert werden

REFERENZEN

- [1] ASHRAE Standard 160P (Draft). Design Criteria for Moisture Control in Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers. Atlanta, GA (2008).
- [2] Bankvall, C.; Mattsson, B.; Kalagasidis, A. S.: Air transport in and through the building envelope. Proceedings of the Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings IX. Clearwater, Florida, USA (2004).
- [3] Borsch-Laaks, R.: Risiko Dampfkonnektion. Wann gibt es wirklich Schäden? Fachartikel, Holzbau - die neue quadriga (2006), H. 3, S. 17-22.
- [4] Geißler, A.: Reproduzierbarkeit von Luftdichtheitsmessungen. wksb 42 (1998), S. 27-33.
- [5] Geißler, A.; Hauser, G.: Abschätzung des Risikopotentials infolge konvektiven Feuchtetransports. Abschlussbericht AiF-Forschungsvorhaben 12764, Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel (Juli 2002).
- [6] Hauser, G.; Geißler, A.: Untersuchung der Luftdichtheit von Holzverschalungen. Bauphysik 17 (1995), H. 6, S. 189-193.
- [7] Hauser, G.; Geißler, A.: Untersuchung der Luftdichtheit von Holzhäusern. Abschlussbericht AiF-Forschungsvorhaben 9579, Fachgebiet Bauphysik der Universität Kassel (März 1996).
- [8] Künzel, H. M.: Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser – quo vadis? IBP Mitteilung 355 (1999).
- [9] Lstiburek, J.: Understanding Air Barriers. BSD-104. Building Science Corporation (2008).
<http://www.buildingscience.com/documents/digests/>
- [10] Münzenberg, U.; Weithaas, T.; Thumulla, J.: Luftwechsel im Gebäudebestand. 7. Pilztagung des VDB, Stuttgart (2003).
- [11] Schmidt, D.; Winter, S.: Informationsdienst Holz Spezial - Flachdächer in Holzbauweise. H 576 (September 2008)
- [12] 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).
- [13] Willems, W.M.; Schild, K.; Dinter, S.: Handbuch Bauphysik, Teil 1 - Wärme- und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung. Vieweg Verlag. Wiesbaden (August 2006).
- [14] WTA-Merkblatt 6-2-01/ D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerks-erhaltung und Denkmalpflege e.V., WTA Publications, Mai 2002.