

## **BERECHNUNG DES INSTATIONÄREN HYGROTHERMISCHEN VERHALTENS MEHRSCHICHTIGER BAUTEILE – FEUCHTESICHERE PLANUNG NACH EN 15026**

Christian Bludau, Daniel Zirkelbach, Hartwig Künzel  
Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen

### **EINLEITUNG**

Jährlich werden in der Bundesrepublik Bauschäden in Milliardenhöhe festgestellt. Ein Großteil dieser Schäden ist direkt oder indirekt mit der Einwirkung von Feuchte in Verbindung zu bringen. Ursache ist dabei nicht nur mangelhafte Ausführung sondern häufig auch eine fehlerhafte Planung. Die richtige Bemessung der Feuchteverhältnisse in Bauteilen hat daher einen großen Einfluss auf die spätere Lebensdauer. Im Folgenden wird auf die hygrothermische Beurteilung von Bauteilen mit Hilfe von modernen instationären Verfahren eingegangen.

### **FEUCHTESCHUTZ & BEMESSUNG**

Warum überhaupt Feuchteschutz? In Bauwerken gibt es eine ganze Reihe von Feuchtequellen, die je nach Position und Material einen negativen Einfluss auf die Konstruktion haben können. Vor allem Baustoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, darunter das im Hochbau viel verwendete Holz sind anfällig gegen zu hohe Feuchte, die je nach Ausmaß bis zur Zerstörung des Werkstoffes führen kann. Aber auch eigentlich feuchteunempfindliche Materialien, wie Ziegel können im feuchten Zustand optische Beeinträchtigungen aufweisen wie z.B. Ausblühungen oder Verfärbungen. Des Weiteren können erhöhte Feuchten an Bauteiloberflächen zur Bildung von Schimmel führen. Um derartige Probleme auszuschließen, müssen die Feuchteverhältnisse bekannt sein und die Konstruktion entsprechend bemessen werden.

#### **Feuchtequellen**

Eine Ursache von Feuchte auf und in Konstruktionen ist in der kalten Jahreszeit die Diffusion von Wasserdampf aus dem Innenraum in die Konstruktion. Wird an der Oberfläche oder innerhalb der Konstruktion die Taupunkttemperatur unterschritten kann es zur Bildung von Tauwasser kommen (z.B. auf der Kaltseite einer diffusionsoffenen Dämmung). Bei Leichtbaukonstruktionen wird dieser Effekt noch durch Luftinfiltration verstärkt, da durch kaum vermeidbare Restleckagen immer auch kleinere Feuchtemengen konvektiv in die Konstruktion gelangen können [1, 2]. Insbesondere bei beidseitig stark diffusionshemmend ausgeführten Dachkonstruktionen – für die die DIN 4108 eine Nachweisbefreiung vorsieht – kann die eingedrungene Feuchtemenge meist auch während warmer Perioden nicht mehr austrocknen, so dass

es zu einer Akkumulation von Feuchte im Bauteil kommen kann. Auf dieses Risiko wird in der Norm seit der Fassung von 2001 in einer entsprechenden Fußnote hingewiesen.

Auch Probleme infolge von Einbaufeuchte sind durchaus nicht selten. Schon eine längere Lagerung an der Außenluft führt bei den meisten Baumaterialien zur Erhöhung der Sorptionsfeuchte über den Wert den sie normalerweise im Einbauzustand haben. Werden Ziegel, Dämmmaterialien oder Hölzer gar dem Regen ausgesetzt, enthalten sie beim Einbau große Mengen an Wasser. Hinzu kommen Mörtel, Putz oder Estrich, die nach Einbau Feuchte an den Innenraum bzw. den Untergrund abgeben. Diese und andere Feuchte muss austrocknen können und sollte nicht eingeschlossen werden, da ansonsten bei Kontakt mit feuchteempfindlichen Materialien ein Schaden vorprogrammiert ist.

### **Feuchteschäden**

Feuchte kann in Konstruktionen und Bauteilen unterschiedliche Folgen haben. Je nach Material können folgende Schädigungen auftreten:

- Frostschäden
- Schäden durch Salzkristallisation
- Korrosion
- Mikrobielles Wachstum
- Alterung und Entfestigung durch Temperatur- und Feuchtezyklen

**Frostschäden** treten auf, wenn der kritische Wassergehalt im Porenraum von Materialien in Bereichen überschritten wird die einfrieren können. Das sich während des Gefrierens ausdehnende Wasser hat nicht mehr ausreichend Platz, es kommt zu einer Abwitterung oder in schlimmeren Fällen zum Abplatzen der Oberflächenschicht.

**Salzschäden** werden durch leichtlösliche Salze im Baustoff verursacht. Feuchte in Bauteilen löst diese Salze, beim Trocknungsprozess kann es zu Kristallisation kommen, die mit hohen Drücke einhergehen. Bei wiederholtem Auftreten kann das Porengefüge des Baustoffes geschädigt werden, es können Ausblühungen oder Abplatzungen an Bauteiloberfläche entstehen.

Voraussetzung für **Korrosion** ist immer das Vorhandensein von einem Elektrolyten (z.B. Feuchte) und Sauerstoff. Korrosion tritt nicht nur bei Bewehrungen sondern grundsätzlich bei allen Befestigungselementen, Verankerungen, Rohren, Blechen oder anderen Metallteilen auf, wenn die entsprechenden Voraussetzungen gegeben sind. Bei dem Vorgang der Korrosion wird das Metall langsam zersetzt. Neben einer Schwächung des Metalls kann es durch entstehende Oxidationsprodukte zu Abplatzungen im oberflächennahen Bereich kommen.

**Schäden durch mikrobiellen Bewuchs** treten überall dort auf, wo günstige Wachstumsbedingungen für Mikroorganismen vorherrschen. Diese sind meist

bei hoher Feuchte sowie günstigen Temperatur- und Nährstoffbedingungen gegeben. Darüber hinaus spielen der Salzgehalt und der pH-Wert sowie weitere Faktoren eine Rolle. Je nach angebotenen Wachstumsbedingungen werden sich unterschiedliche Mikroorganismen entwickeln. Generell kann davon ausgegangen werden, dass konstruktive Fehler, falsche Materialauswahl, aber auch ungünstiges Nutzerverhalten und mangelnde Instandsetzung wesentliche Ursachen für biologische Schäden sind. Ferner kommt es bei verschmutzten Bauteiloberflächen zu einem zusätzlichen Nährstoffangebot, dass vermehrt zu mikrobiellen Befall führen kann. Im Außenbereich bilden sich vor allem Algen, raumseitig kommt es zu Schimmelpilzbefall.

Bei einer Überlagerung von Temperatur- und Feuchteinflüssen ist eine zusätzliche mechanische Beanspruchung von Bauteilen durch thermische und hygrische Verformungen bzw. den daraus resultierenden Eigenspannungen gegeben. Naturgemäß sind diese Beanspruchungen bei bewitterten Oberflächen, wie z. B. Sichtbeton oder Außenputze, durch die dort herrschenden Klimawechsel besonders ausgeprägt. Es kommt zu einer **Alterung oder Entfestigung** durch Quell- und Schwindvorgänge sowie Temperaturwechselbeanspruchung.

Frost-Tau-Schäden und Schäden durch Salzkristallisation treten hauptsächlich in porösen Baustoffen auf, Korrosion bei Metallen, mikrobielles Wachstum kann auf nahezu allen Untergründen entstehen, die Alterung und Entfestigung kann bei den meisten Baustoffen auftreten. Hygrothermische Simulationsverfahren können helfen, das Schadenspotential zu beurteilen und frühzeitig Abhilfe einzuplanen.

### **Glaser-Verfahren**

Die Grundlage für die Feuchteschutzbemessung bildet in Deutschland die DIN 4108-3 [3]. Für den Nachweis des winterlichen Tauwasserschutzes wird hier das Glaser-Verfahren [4] verwendet. Es handelt sich um ein tabellarisch-grafisch basiertes Bilanz-Verfahren, das mit einfachen Kennwerten und festgelegten Randbedingungen auskommt und auch ohne Computer durchgeführt werden kann. Dieses Verfahren behandelt jedoch nur Tauwasserbildung durch Diffusion, andere auftretende Effekte wie z.B. Flüssigtransport, Sorption oder Feuchteintrag durch Konvektion können neben vielen anderen Effekten nicht berücksichtigt werden. Weitere realistische Randbedingungen wie z.B. der Klimastandort, oder die Farbe der Dachbahn sind nicht erfassbar. Das Glaser-Verfahren geht vereinfachend von extremen, konstanten Randbedingungen für eine Tau- und eine Verdunstungsperiode aus, wie sie in der Realität nicht auftreten. Weiterhin finden sich bei Überschreitung der Anwendungsgrenzen (wenn die unberücksichtigten Effekte dominieren, z.B. Rücktrocknung) oder für spezielle Konstruktionen (z.B. Gründächer) Hinweise in der Norm, dass solche Fragestellungen mit Hilfe instationärer Berechnungsverfahren beantwortet werden müssen.

Im restlichen Europa wird das Glaserverfahren für die DIN EN ISO 13788 [5] im Prinzip übernommen. Hierbei werden Randbedingungen verwendet, die durch Monatsmittelwerte an die regionalen Klimaverhältnisse angepasst sind. Ausgehend von den Monatsmittelwerten der Außenlufttemperatur und Feuchte werden monatlichen Wasserdampfkonzentrationen errechnet, wobei im Innenraum von deutlich erhöhten Feuchteklassen ausgegangen wird. Die Überhöhung der raumseitigen Randbedingungen ist wenig plausibel und deshalb für die Feuchteschutzbeurteilung in der Praxis kaum geeignet. Bereits in der Einleitung weißt die DIN EN ISO 13788 [5] darauf hin, dass wichtige physikalische Effekte durch das Verfahren nicht berücksichtigt werden können und wenn diese Effekte einen starken Einfluss auf das Feuchteverhalten der Konstruktion haben, dann darf es nicht angewendet werden. In diesem Fall wird auf hygrothermische Simulationsverfahren verwiesen.

In beiden Normen berücksichtigt das Glaser-Verfahren z.B. keine Feuchtespeicherung im Material (Tauwasser kann in unbegrenzter Menge ausfallen), und keine Flüssigtransportvorgänge im Material (auch keine Kapillaren). Ein zusätzlicher Feuchteeintrag, wie er z.B. durch Fugen in die Konstruktion (aufgrund von schadhafte Luftdichtheitsebenen) eindringen kann und dort als zusätzliches Tauwasser kondensiert oder die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  von der momentanen Bauteilfeuchte, die sich durch den Feuchteeintrag ins Bauteil erhöhen kann, kann ebenfalls nicht berücksichtigt werden. Gerade für die Beurteilung von Leichtbaukonstruktionen, wie sie immer häufiger eingesetzt werden, ist das Glaser-Verfahren nur bedingt geeignet.

### **Hygrothermische Simulationsverfahren**

Mit der DIN EN 15026 [6] wurden im Jahr 2007 erstmals alle baupraktisch relevante Wärme- und Feuchtephänomene normativ zusammengefasst. Diese Phänomene sind:

- Austrocknung von Baufeuchte und Einbaufeuchte
- Feuchteakkumulation infolge winterlicher Tauwasserbildung
- Absorption von Niederschlagsfeuchte  
Vor allem bei Wänden mit saugfähiger Außenoberfläche (z.B. verputzte Ziegelwände) hat dieser Effekt großen Einfluss.
- Sommerkondensation von Feuchtwanderung von Außen nach Innen
- Oberflächentauwasser infolge Unterkühlung durch nächtliche Abstrahlung
- Wärmeverluste durch Transmission und Verdunstung

Dazu sind die gekoppelten Differentialgleichungen für folgende Speicher- und Transportvorgänge angegeben:

- Wärmespeicherung in den Baumaterialien sowie im enthaltenen Wasser
- Wärmetransport durch feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit
- Latentwärmehtransport durch Wasserdampfdiffusion
- Feuchtespeicherung durch Sorption und Kapillarität
- Feuchtehtransport durch Wasserdampfdiffusion
- Flüssigtransport (Oberflächendiffusion und Kapillartransport)

Die Berechnung von Bauteilen basierend auf den in DIN EN 15026 [6] angegebenen Gleichungen erfordert neben geeigneter Software Kenntnisse über

- den Bauteilaufbau,
- die Randbedingungen
- und die Materialdaten

Der Schichtaufbau des Bauteils, die Orientierung und Neigung sowie der Standort sind in der Regel bekannt. Für die Orientierung wird bei mehreren Oberflächen in der Regel die ungünstigere gewählt, z.B. die Nordseite mit der geringsten Sonneneinstrahlung oder die Westseite mit der hierzulande höchsten Schlagregenbelastung. Für die Randbedingungen werden Klimadaten der Klimaregion benötigt. Diese können z.B. für viele Standorte in Deutschland vom Deutschen Wetterdienst (DWD) in stündlichen Werten bezogen werden oder mit geeigneter Software für weltweit beliebige Standorte generiert werden [7]. Für das Innenklima stehen ebenfalls Modelle zur Verfügung, z.B. kann es vom vorherrschenden Außenklima abgeleitet werden (siehe Bild 1).

Des Weiteren können Anfangsbedingungen, wie z.B. eine mögliche Baufeuchte angegeben werden. Neben den meist bekannten Daten wie Rohdichte, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit und Diffusionswiderstand werden Informationen über die Feuchtespeicherung und den Feuchtetransport im Material benötigt. Für viele typische Baustoffe in den Materialdatenbank der Programme enthalten – Herstellerspezifische Daten sind jedoch bisher nur in geringem Umfang verfügbar. Einige Simulationsprogramme verfügen jedoch bereits über breite Datenbanken und bei völligem Fehlen der Daten kann das Material auf Grundlage eines ähnlichen Materials nach Herstellerangaben angepasst werden.

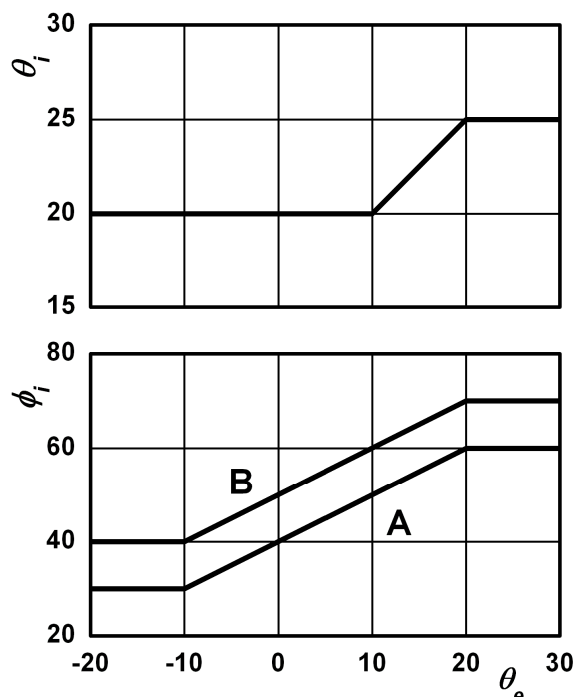


Bild 1: Ableitung der Innenraumtemperatur  $\theta_i$  und –feuchte  $\Phi_i$  aus der Außenlufttemperatur  $\theta_e$  nach DIN EN 15026 [6]

Die Wärme- und Feuchteberechnungen von Bauteilen ergeben dann den zeitlichen Verlauf der Temperatur- und Feuchtefelder des Bauteils, sowie daraus abgeleitet die Wassergehaltsverläufe in den Materialschichten, die Wärmeströme an den Bauteilgrenzen usw. Diese müssen dann entsprechend den Anforderungen an das Bauteil und die Gebrauchstauglichkeit interpretiert werden.

Auch die Simulationsverfahren nach DIN EN 15026 [6] haben Anwendungsgrenzen. Die folgenden Einflüsse werden in den Modellen nicht berücksichtigt. Dominieren diese Einflüsse, ist das Simulationsergebnis nur bedingt aussagekräftig.

- Konvektion durch Undichtheiten der Konstruktion  
Dieser Effekt kann über vereinfachte Modelle bereits teilweise berücksichtigt werden
- Dominanter Einfluss mehrdimensionaler Effekte (aufsteigende Feuchte, Wärmebrücken, Feuchtetransport durch Gravitation)  
In diesem Fall ist die Anwendung zweidimensionaler Simulationstools erforderlich.
- Temperaturen deutlich über 50 °C (Dampfkonnektion ist in den Modellen nicht berücksichtigt, wird bei hohen Temperaturen zunehmend dominant)
- Einwirken von hydraulischen, osmotischen Kräften (drückendes Wasser, Salzbelastung)

## **ANWENDUNGSBEISPIELE**

Die in DIN EN 15026 [6] angegebenen Formeln zur instationären hygrothermischen Beurteilung von Konstruktionen können nun mit Hilfe geeigneter Software angewandt werden. In Folgenden werden drei Beispielfälle aus der Praxis dargestellt. Die Berechnungen erfolgen mit dem am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) entwickelten und vielfach verifizierten Verfahren zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen WUFI® [8]. Das Programm entspricht u.a. den Anforderungen aus [6] und [9] für hygrothermische Simulationen. Die Simulation ermöglicht die Überprüfung des Verhaltens von Bauteilen hinsichtlich ihres Wärme- und Feuchtehaushalts in Abhängigkeit von den Außenklimabedingungen inklusive Strahlung und Niederschlag und des Innenraums und berücksichtigt die oben beschriebenen Effekte. Ergebnisse der Berechnungen sind unter anderem die Verläufe der Temperatur, relativen Feuchte, des Wassergehalts in den einzelnen Materialschichten, die dann entsprechend der Anforderung ausgewertet werden müssen.

### **Flachdach Holzleichtbaukonstruktion**

Die folgende Flachdachkonstruktion in Bild 2 mit 240 mm Mineralfaserdämmung und äußerer OSB-Schalung soll im folgenden Beispiel aus hygrothermischer Sicht bewertet werden. Hierbei soll zusätzlich der Einfluss einer Feuchtequelle infolge von Dampfkonnektion betrachtet werden. Die

Berücksichtigung der Dampfkongvektion durch das Vorhalten einer Trocknungsreserve in Form einer Feuchtequelle von  $250 \text{ g/m}^2$  stößt in der Praxis bereits auf eine breite Akzeptanz. Entsprechende Hinweise bzw. Berechnungsvorschriften befinden sich im Spezialheft Flachdach des Informationsdienstes Holz [15], in einem Beitrag zu den Aachener Bausachverständigentagen [16] oder bald auch in der Holzschutznorm DIN 68 800-2, deren aktuelle Fassung momentan nur als Entwurf vorliegt [17]. Auf Grundlage dessen wurde am Fraunhofer Institut für Bauphysik ein Modell entwickelt um die zusätzlich eingetragenen Feuchte durch Kongvektion zu berücksichtigen, dass Abhängig von der Dichtigkeit der Gebäudehülle einen bestimmten Betrag an Feuchte in die Konstruktion einbringt [1]. In diesem Fall werden die benötigten Druckbeiwerte entsprechend der Gebäudehöhe eines Einfamilienhauses von 5 m zugrunde gelegt.

Die Abdichtung des Dachs weist einen Diffusionswiderstand von  $300 \text{ m}$  und eine kurzwellige 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 eine Dampfsperre mit einem  $s_d$ -Wert von  $100 \text{ m}$  mit einer Dampfbremse mit einem deutlich geringeren Diffusionswiderstand von nur  $2 \text{ m}$  bzw. einer feuchteadaptiven Dampfbremse auf Polyamidbasis verglichen.

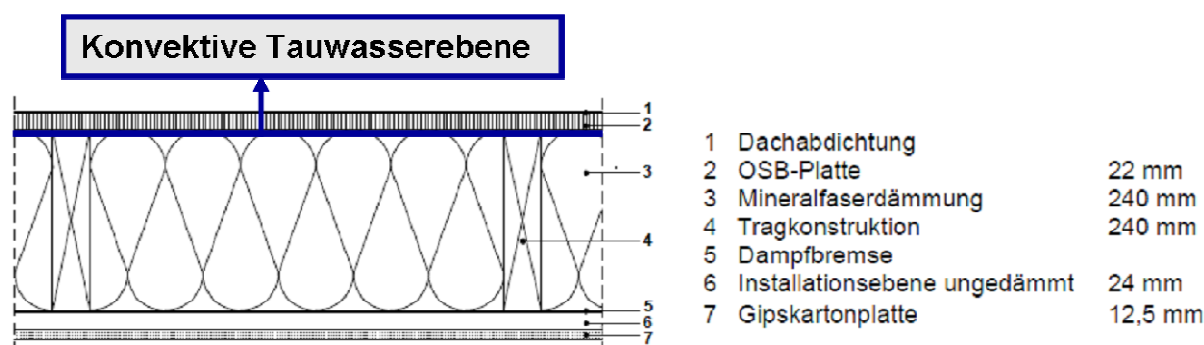


Bild 2: Aufbau der untersuchten Flachdachkonstruktion mit Angabe der ausgewählten Position für die konvektive Feuchtequelle.

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 EN 15025 [6] für eine normale Belegung.

Die zusätzlich durch konvektiven Eintrag entstehende Feuchte wird an der Innenseite der „kalten“ OSB-Schalung eingebracht. Die Berechnungen werden mit Hilfe der hygrothermischen Simulationssoftware WUFI® 5 durchgeführt. 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  $80\% \text{ r.F.}$ , startet die Berechnung im Oktober und wird mit demselben Klima-

datensatz 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 3 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.

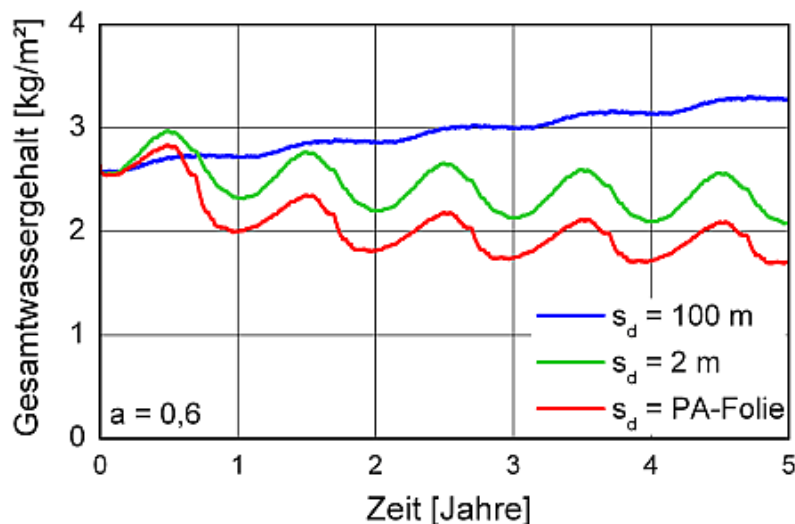


Bild 3: Berechneter Verlauf des Gesamtwassergehalts im Dach in Abhängigkeit von den Dampfdiffusionseigenschaften der eingesetzten Dampfbremse. Der Anfangswassergehalt entspricht dem Wassergehalt der eingebauten Materialien im lufttrockenen Zustand (Ausgleichsfeuchte bei 80% r.F.).

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 OSB-Schalung, deren Wassergehaltsverläufe für die drei unterschiedlichen Konstruktionsvarianten in Bild 4 dargestellt 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 werden, 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 Austrocknungspotential 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 5 zeigen.



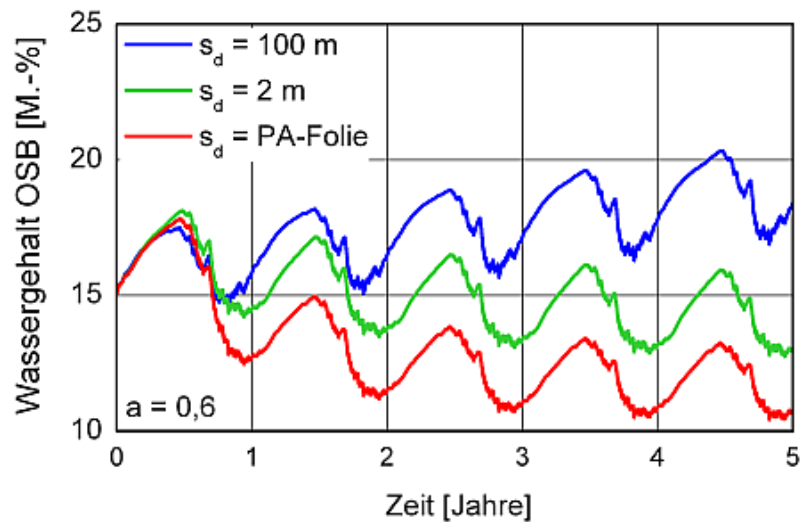


Bild 4: Berechneter Verlauf der Holzfeuchte in der äußeren OSB-Schalung des Flachdachs in Abhängigkeit von den Dampfdiffusionseigenschaften der eingesetzten Dampfbremse.

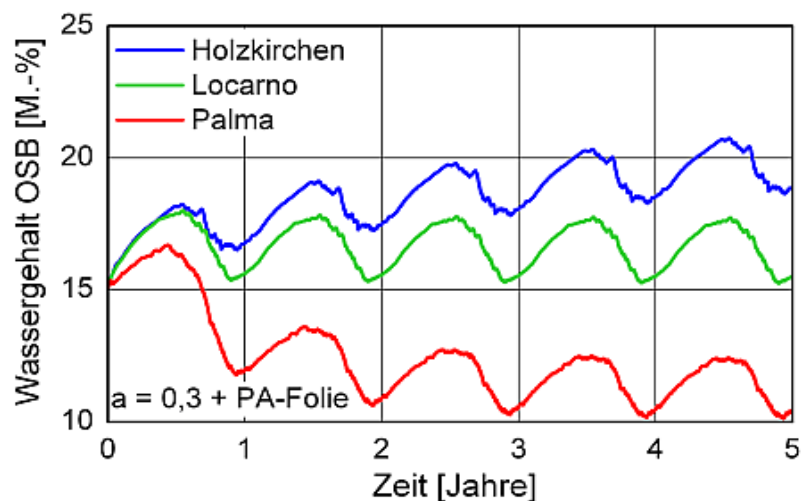


Bild 5: Berechneter Verlauf der Holzfeuchte in der äußeren OSB-Schalung des Flachdachs mit feuchteadaptiver Dampfbremse (PA-Folie) und reflektierender (weißer) Abdichtung in Abhängigkeit vom Außenklima am jeweiligen Standort.

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 nicht mehr ausreichend ist. In einem wärmeren Klima, wie z.B. in Locarno (Südschweiz) oder Palma die Mallorca würde das Dach jedoch auch

mit reflektierender Dachoberfläche problemlos funktionieren. Dazu kommt, dass reflektierende Dachbahnen auch aus energetischen Gründen unter deutschen Klimabedingungen nur wenig Sinn machen. 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.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine derartige Leichtbau-Dachkonstruktion mit einer Standartabdichtung (dunkle Farbe) aus hygrothermischer Sicht auch mit zusätzlich eingebrachter Feuchte gut funktioniert, wenn sie einen angepassten Dampfdiffusionswiderstand an der Innenseite aufweist. Die nachweisfreie Variante nach DIN 4108 [3] mit einer Dampfbremse mit einem  $s_d$ -Wert von 100 m ist, wenn Feuchteeintrag durch Dampfkongvektion berücksichtigt wird, kritisch zu bewerten. In den häufig ausgeführten Leichtbau-Dachkonstruktionen sind herstellungsbedingt immer geringe Fehlstellen vorhanden, die ein konvektives Eindringen von Feuchte ermöglichen. Diese Feuchte wird bei Verwendung einer Dampfsperre ( $s_d > 100$  m) an der Innenseite eingesperrt und kann dadurch zu einer Schädigung der Konstruktion führen.

### **Backsteingebäude mit Innendämmung**

Bei der Sanierung eines historischen Backsteingebäudes (ehemalige Industriehalle) darf aus Gründen des Denkmalschutzes die Außenfassade nicht verändert werden. Im Innenraum werden aufgrund der geplanten Nutzung teilweise hohe Feuchtelasten erwartet. Daher sieht die Sanierungsmaßnahme das Anbringen eines diffusionsdichten Innendämmsystems vor. Da diese Maßnahme eine Trocknung der Wand nach innen künftig vollständig ausschließt, soll vor der Ausführung überprüft werden, welche Auswirkungen sich auf den Feuchtegehalt der Wand ergeben, und ob zusätzliche Maßnahmen zur Begrenzung der Aufnahme von Niederschlagsfeuchte (Hydrophobierung der Außenoberfläche) nötig sind. Hierzu wird der Aufbau nach Bild 6 mit Innendämmung und unter Berücksichtigung einer Hydrophobierung untersucht.

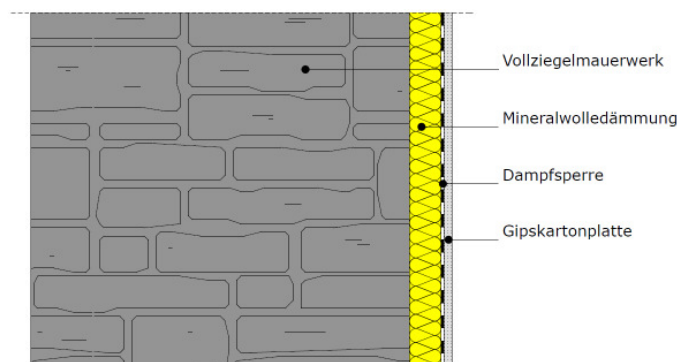


Bild 6: Schematische Darstellung des zur Berechnung verwendeten Regelquerschnitts der Außenwand

Da die Materialkenndaten der Bestandswand nicht bekannt sind, werden in einer Parameterstudie zur Ermittlung des ungünstigsten Falls 30 verschiedene Altbauziegelmauerwerke aus den in WUFI® [8] enthaltenen Datenbanken bzgl. ihres hygrothermischen Verhaltens verglichen. Die fünf kritischsten Ziegel aus hygrothermischer Sicht wurden genauer betrachtet. Bild 7 zeigt die Verläufe des Gesamtwassergehaltes und der relativen Feuchte für die Variante mit Innendämmung aber noch ohne Hydrophobierung.

Zur Bewertung der Ergebnisse wird zunächst der Gesamtwassergehalt herangezogen. Dabei wird nur der qualitative Verlauf betrachtet; das absolute Niveau der Werte hat nur eine geringe Aussagekraft, da es hauptsächlich von den verwendeten Materialien und der Dicke der Konstruktion beeinflusst wird. Steigt der Gesamtwassergehalt an, kommt es zu einer Feuchteakkumulation in der Konstruktion. Fällt die Kurve dagegen, so trocknet das Bauteil aus. Bleibt der Verlauf über mehrere Jahre auf demselben Niveau, befindet sich die Konstruktion im eingependelten Zustand. Des Weiteren wurde der Verlauf von Temperatur und relativer Feuchte an der Trennschicht Ziegelmauerwerk / Innendämmung, also an der ehemaligen Innenoberfläche, betrachtet. Die relative Feuchte sollte an dieser Stelle den kritischen Wert von 95 % nicht überschreiten, um das Auftreten von physikalisch nur schwach gebundenem Kapillarwasser, Fäulnisprozessen und Frostproblemen im Grenzbereich zwischen Dämmung und Bestandswand sicher auszuschließen. Dieser Grenzwert wird auch im Planungsleitfaden für Innendämmungen der WTA (WTA-Merkblatt 6-4 [13]) verwendet und stellt ein besonders strenges und sicheres Bewertungskriterium dar. Die Temperaturen werden hier aufgrund der nur nachrangigen Bedeutung nicht dargestellt.

Ohne Hydrophobierung steigt der Gesamtwassergehalt aller berechneten Varianten (Bild 7) über die Jahre hinweg kontinuierlich an. Im Verlauf der relativen Feuchte an der Trennschicht Ziegelmauerwerk / Innendämmung für die fünf verschiedenen Ziegel zeigt sich, dass die relative Feuchte bei allen fünf Varianten kontinuierlich steigt und im fünften Jahr mit Ausnahme von Ziegel 1 alle den kritischen Wert von 95 % (rot markierter Bereich) überschritten haben. Die Temperatur an dieser Stelle schwankt bei allen Varianten zwischen 5 °C im Winter und 27 °C im Sommer.

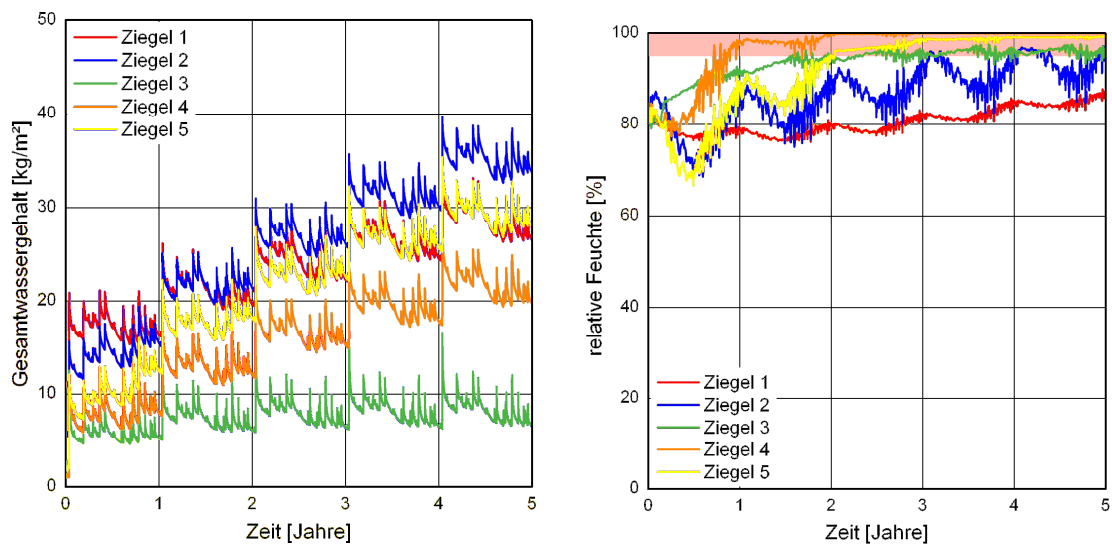


Bild 7: Berechneter Verlauf des Gesamtwassergehaltes und der relativen Feuchte für fünf verschiedene historische Ziegelmauerwerke mit Innendämmung und ohne Hydrophobierung an der Außenseite. Die relative Feuchte ist jeweils an der Trennschicht Ziegelmauerwerk / Innendämmung dargestellt.

Um eine Reduzierung der kapillaren Regenwasseraufnahme zu erreichen ohne die optische Erscheinung der Fassade stärker zu beeinträchtigen, ist die Hydrophobierung der Außenfassade eine sinnvolle Maßnahme. Dabei wird die Bauteiloberfläche mit einem Tränkungsstoff benetzt, welcher durch Kapillarkräfte aufgenommen wird und nach Reaktion die Wandungen der Kapillarporen mit einem wasserabweisenden Film auskleidet. Maßgeblich für die Qualität der Hydrophobierung ist der  $w$ -Wert. In der Simulation wird im Folgenden jeweils der äußerste Zentimeter der Bestandswand mit einer Hydrophobierung unterschiedlicher Qualität (Variation des  $w$ -Wertes) versehen. Nach [13] soll der Diffusionswiderstand durch die Hydrophobierung um nicht mehr als 50 % erhöht werden, um die Austrocknung ggf. durch Fehlstellen eingedrungenen Wassers zu ermöglichen. Deshalb wird auf der sicheren Seite liegend der  $\mu$ -Wert in der hydrophobierten Schicht um 50 % erhöht. Im Bild 8 wird der Einfluss der Hydrophobierung beispielhaft am Ziegel 2 dargestellt.

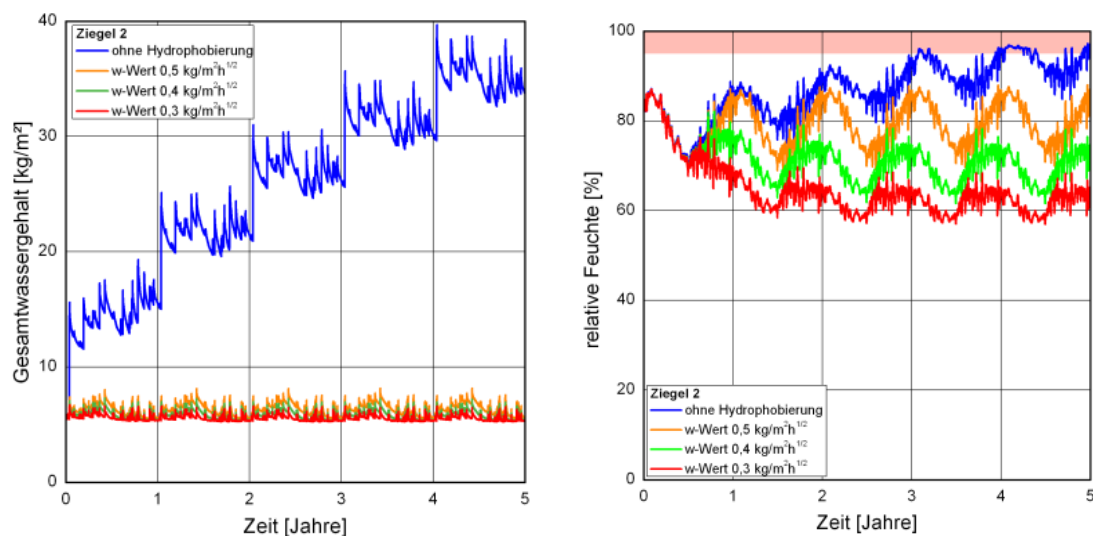


Bild 8: Berechneter Verlauf des Gesamtwassergehaltes und der relativen Feuchte für Ziegel 2 mit Innendämmung und verschiedenen Graden der Hydrophobierung an der Außenseite. Die relative Feuchte ist jeweils an der Trennschicht Ziegelmauerwerk / Innendämmung dargestellt.

Es zeigt sich in Bild 8, dass bei Verwendung einer Hydrophobierung nur noch geringe Mengen an Niederschlagswasser von der Konstruktion aufgenommen werden. Während der Gesamtwassergehalt ohne Hydrophobierung ansteigt und so zu einer Aufweitung des Mauerwerks führt, bleibt der Gesamtwassergehalt mit Hydrophobierung auf einem relativ konstanten Level. Auch die relative Feuchte hinter der Dämmung wird deutlich reduziert. Ohne Hydrophobierung steigt diese langsam an und erreicht im vierten Winter kritisches Feuchten über 95 %. Bei der Verwendung einer Hydrophobierung verschiedener  $w$ -Werte wird der Aufbau aus feuchtetechnischer Sicht deutlich günstiger. Je nach Grad der Hydrophobierung verläuft die Feuchte hinter der Dämmung im Jahresverlauf eben. Lediglich bei einem  $w$ -Wert von  $0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  an der Außenseite werden noch relative Feuchten von fast 90 % erreicht. Hier sollte in einer gesonderten Überprüfung das Schimmelrisiko betrachtet werden. Bei relativen Feuchten unter 80 % ist an dieser Position kaum mit Schimmel zu rechnen.

Die durchgeführten rechnerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Wasseraufnahme an der Außenoberfläche auf einen  $w$ -Wert von mindestens  $0,5 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  begrenzt werden muss, um Feuchteakkumulationen zu vermeiden. Empfehlenswerter erscheint allerdings ein  $w$ -Wert  $0,4 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  oder niedriger, da hiermit eine Trocknung der Konstruktion und ein dauerhaft niedrigeres Feuchteniveau gewährleistet werden kann. Das WTA-Merkblatt 3-17 für Hydrophobierungen von mineralischen Baustoffen [14] empfiehlt sogar die Einhaltung eines  $w$ -Wertes von  $< 0,1 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$ . In diesem konkreten Fall ist jedoch ein  $w$ -Wert von  $0,4 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$  ausreichend. Da die Temperaturen im Regelquerschnitt nicht unter den Gefrierpunkt fallen, ist das Risiko einer Frostschädigung auszuschließen.

## Beispiel Schimmelpilzvermeidung

Für die Beurteilung des Schimmelpilzrisikos wird häufig der aus der DIN 4108 [3] bekannte Grenzwert von 80 % r.F. an der Bauteiloberfläche herangezogen. Dieser Wert sollte weder im Regelquerschnitt noch an Wärmebrücken überschritten werden, was beim hygienischen Mindestwärmeschutz (Raumklima-verhältnissen konstant mit 20 °C und 50 % r.F.) der Begrenzung der Oberflächentemperatur auf minimal 12,6 °C entspricht.

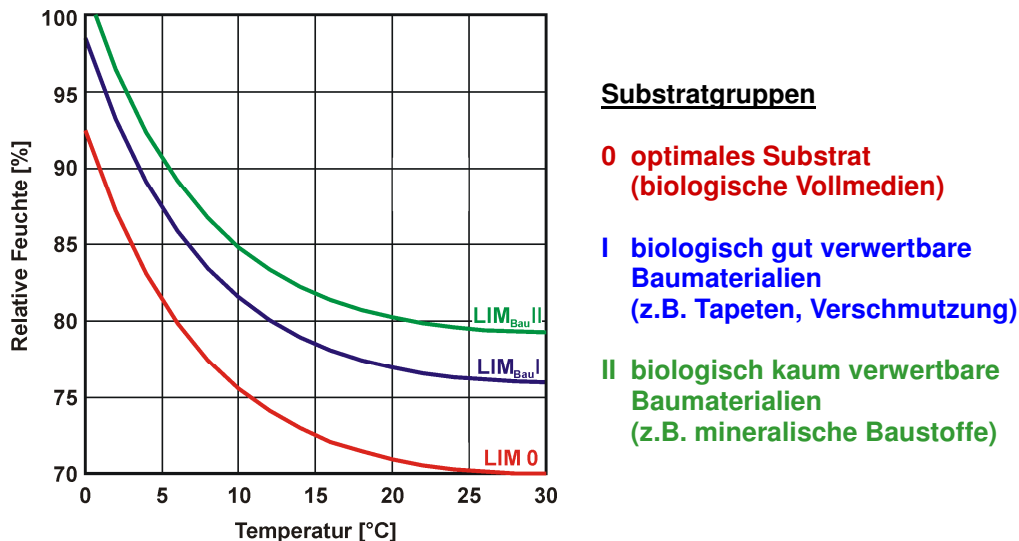


Bild 9: Minimale Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze auf Bauteilinnenoberflächen nach [14] in Abhängigkeit von relativer Feuchte, Temperatur und Substratqualität des Untergrunds

Diese stationäre Ableitung des Schimmelpilzwachstums aus der Oberflächentemperatur ist in mehrerlei Hinsicht eine starke Vereinfachung. Sie vernachlässigt erstens Einflüsse aus Baufeuchte oder Niederschlag, die die Verhältnisse verschärfen können ebenso wie die Feuchteaufnahme und -speicherung vieler Oberflächenmaterialien, die zu einer Verbesserung der Situation beitragen kann. Zweitens ist das Risiko für Schimmelpilzwachstum nicht nur von der Oberflächenfeuchte sondern auch stark von den auftretenden Temperaturen abhängig. Bei niedrigeren Temperaturen sind höhere Feuchten für einsetzendes Schimmelpilzwachstum erforderlich während umgekehrt bei höheren Temperaturen bereits unter 80 % r.F. Wachstum beobachtet werden kann. Viertens müssen die Wachstumsbedingungen über eine längere Periode ununterbrochen vorliegen, bevor tatsächlich Auskeimung von Schimmelpilzsporen und Myzelwachstum auftreten – dies wird unter anderem auch daran ersichtlich, dass die häufigsten Schimmelpilzschäden in Schlafzimmern auftreten mit zwar weniger extremen dafür aber lang anhaltenden Feuchtebelastungen. In Bädern und Küchen treten während der Nutzung zwar kurzfristig deutlich höhere Oberflächenfeuchten auf, eine anschließende Abtrocknung der Oberfläche kann dann aber ausreichend sein um Schimmelpilzwachstum zu verhindern. Abschließend ist natürlich noch das Nährstoffangebot des Untergrunds zu

berücksichtigen – biologisch abbaubare Materialien oder verschmutzte Oberflächen bieten dem Schimmel natürlich bessere Bedingungen als beispielsweise ein sauberer, metallischer Fensterrahmen.

Hygrothermische Simulationen erlauben eine deutlich genauere Beurteilung des Wachstumsrisikos für Schimmelpilze. Die bereits genannten Einflussfaktoren Baufeuchte, Niederschlag, Feuchtespeicherung und Flüssigtransport werden ebenso berücksichtigt wie die thermischen Verhältnisse. Auch die Dauer der jeweils herrschenden Oberflächenbedingungen ist in der Berechnung enthalten. Damit kann zum einen mit größerer Genauigkeit als bei stationären Verfahren ein potentiell überschreiten der kritischen Oberflächenfeuchte von 80 % beurteilt werden. Zum anderen können aber auch die zusätzlich von der Temperatur und der Substratqualität des Untergrunds abhängigen Wachstumsgrenzen nach [14] herangezogen werden, so dass bei niedrigeren Temperaturen auch höhere Feuchte als 80 % r.F. akzeptiert werden. Falls Bedingungen auftreten anhand derer ein Schimmelpilzwachstum auf der Innenoberfläche nicht ausgeschlossen werden kann, erlaubt das kostenlose Tool WUFI® Bio mit der Simulation des Feuchtehaushalts von Schimmelpilz bzw. Spore eine eindeutige Aussage ob Feuchteangebot und –dauer tatsächlich ein Wachstum an der Bauteiloberfläche ermöglichen.

Beidseitig diffusionshemmend ausgeführte Baukonstruktionen werden zwar in der DIN 4108 [3] nachweisfrei gestellt, erweisen sich in der Praxis aber häufig als besonders schadensträchtig. Ursache für die Schäden sind dabei meist eingebaute oder unplanmäßig eingedrungene Feuchtemengen aus Niederschlag oder Konvektion, die weder nach innen noch nach außen austrocknen können. Auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer IBP in Holzkirchen hat sich an einem geneigten Blechdach mit verschiedenen Dampfbremsen und etwas erhöhter Einbaufeuchte auf der Außenseite einer Dampfbremsspappe ( $s_d$ -Wert 3 m) deutlicher Schimmelpilzbewuchs (vgl. Bild 10) eingestellt. Eine zwei Sparrenfelder weiter eingebaute feuchtevariable Polyamid-Folie mit einem feuchtevariablen  $s_d$ -Wert zwischen etwa 0,15 und 4 m blieb bei ansonsten identischen Randbedingungen dagegen schimmelfrei.





Bild 10: Innenansicht und Schimmelpilzbildung auf der Rückseite der Dampfbremspappe bei Nord- und Südorientierung eines steil geneigten Blechdachs infolge austrocknender Schalungsfeuchte.

Der aufgetretene Schimmel ist infolge von Umkehrdiffusion im Sommer bei hohen Temperaturen entstanden, als die in der Konstruktion gefangene Feuchte infolge der starken Erwärmung der Blecheindeckung in Richtung Innenraum gewandert ist. Ein solches Schadensbild kann mit den Mitteln der DIN 4108 [3], die sich ausschließlich auf die winterliche Tauwasserbildung in und auf Bauteilen konzentriert, in keiner Weise beurteilt werden. Eine hygrothermische Simulation kann dagegen sowohl die unterschiedlich erhöhten Feuchten an der Außenseite der beiden Folien als auch den nur im Fall der Dampfbremspappe aufgetretenen Schimmelpilzbewuchs abbilden. Bild 11 links zeigt die relative Feuchte an der Rückseite der beiden Dampfbremsen. Bei Umkehrdiffusion in Richtung Innenraum staut sich die Feuchte hinter der Dampfbremspappe aufgrund des konstanten  $s_d$ -Werts von 3 m stärker als bei der variablen und unter diesen Bedingungen recht diffusionsoffenen ( $s_d$ -Wert  $< 0,3$  m) Polyamidfolie. Dies resultiert bei der Pappe in Feuchten über 80 % r.F. über einen Zeitraum von etwa zwei Monaten und Kondensatbedingungen für etwa 30 Tage, während bei der Polyamid-Folie die 80 % nur für etwa 20 Tage und die 90 % überhaupt nicht überschritten werden. Eine ausführlichere Bewertung unter Berücksichtigung des zeitlichen Einflusses mit Hilfe von WUFI®-Bio ist mit der Beurteilung des Grenzwassergehalts in Bild 11 rechts dargestellt. Da die Dampfbremspappe biologisch verwertbar ist, liegt der für die Auskeimung kritische Grenzwassergehalt niedriger als bei der Polyamid-Folie. Parallel dazu steigt der Wassergehalt der Spore auf der Dampfbremspappe stärker an als bei der Kunststoffolie. In Summe ergibt sich für die Variante mit Dampfbremspappe somit eine deutliche Überschreitung des Grenzwassergehalts um bis zu 35 Vol.% über einen Zeitraum von 120 Tagen.



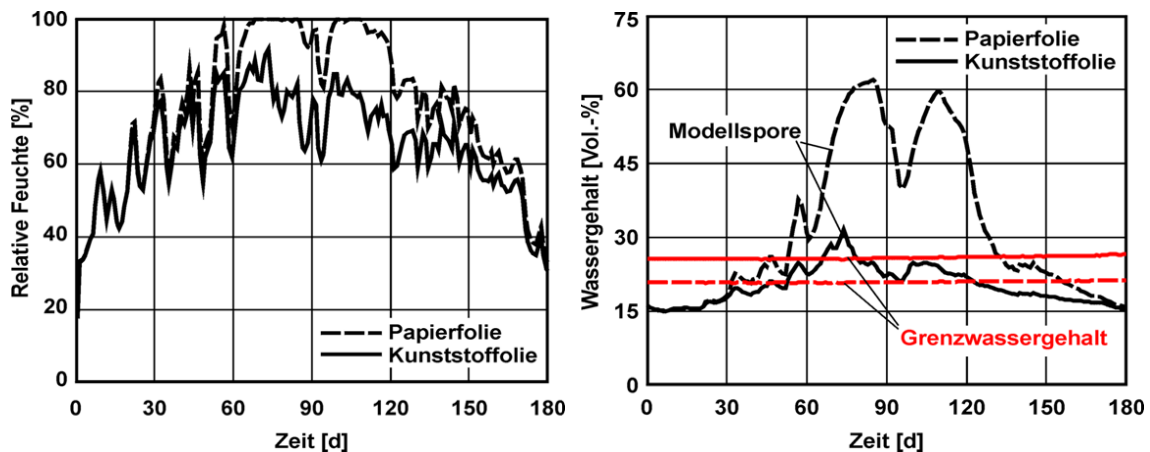


Bild 11: Links: Berechneter zeitlicher Verlauf der relativen Feuchte an der Rückseite der beiden Dampfbremsen.  
 Rechts: Mit Hilfe von WUFI® -Bio berechneter Wassergehalt in einer Modell-Schimmelspore an der Rückseite der beiden Dampfbremsen im Vergleich zum jeweiligen Grenzwassergehalt für Auskeimung und Wachstum

Bei der Polyamidfolie wird der Grenzwassergehalt zwar ebenfalls überschritten allerdings nur geringfügig um maximal 5 Vol.-% und für insgesamt etwa 10 Tage. Diese Ergebnis gibt gut das in der Realität vorgefundene starke Schimmelpilzwachstum auf der Pappe bzw. das nicht feststellbare Wachstum auf der Kunststoffolie wider. Die Wahl der geeigneten Dampfbremse und ein Vermeiden des Schimmelpilzbewuchses wäre also vorab mit Hilfe der Simulation gut möglich gewesen.

## ZUSAMMENFASSUNG

Jährlich treten in der Bundesrepublik eine Vielzahl von Feuchteschäden auf, von denen ein großer Teil durch eine zuverlässigere Planung schon im Vorfeld vermieden werden könnten. Die Feuchteschutzbemessung nach Glaser in der DIN 4108-3 [3] berücksichtigt wie oben erwähnt ausschließlich den winterlichen Tauwasserschutz – alle anderen Schadensmechanismen können nicht erfasst werden.

Hygrothermische Simulationsverfahren ermöglichen es dagegen, die meisten der baupraktisch relevanten physikalischen Vorgänge realitätsnah zu berechnen und somit auch Effekte wie austrocknende Baufeuchte, Niederschlagseinfluss, Sommerkondensation oder Strahlung zu erfassen. Anhand der Beispiele wird dargestellt, wie potentielle hygrothermische Probleme vorab durch die Berechnungen identifiziert und wie die Konstruktionen auf Basis der Ergebnisse verbessert werden können. Weder die Niederschlagsaufnahme der Ziegelwand, noch die Farbgebung der verschiedenen Dachbahnen oder die Umkehrdiffusion im Blechdach können mit dem Normverfahren (Glaser) beurteilt werden.

## LITERATUR

[1] Zirkelbach, D., Künzel, H.M., Schafaczek, B. & Borsch-Laaks, R.: Berücksichtigung der Wasserdampfkonvektion bei der Feuchteschutzbeurteilung von Holzkonstruktionen. WKSB, Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz 63/2010, Gründau 2010

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

[3] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Klima-bedingter Feuchteschutz. Beuth Verlag, Berlin, Juli 2001

[4] Glaser, H.: Vereinfachte Berechnung der Dampfdiffusion durch geschichtete Wände bei Ausscheidung von Wasser und Eis. Kältetechnik 10 (1958), H. 11, S. 358-364 und H. 12, S. 386-390

[5] DIN EN ISO 13788: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Raumseitige Oberflächentemperatur zur Vermeidung kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren. Beuth Verlag, November 2001

[6] DIN EN 15026, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation; Deutsche Fassung EN 15026:2007, Beuth Verlag, Berlin 2007

[7] Remund, J. Kunz, S.: METEONORM Version 6.1 - Global Meteorological Database for Engineers, Planners and Education. METEOTEST, Bern 2010, <http://www.meteonorm.com>

[8]..Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.

[9] WTA-Merkblatt 6-2-01/ D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., WTA Publications, Mai 2002.

[10] DIN 68800, Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Entwurf. Beuth Verlag, Berlin 2009

[11] Borsch-Laaks, R., Krus, M.: Tauwasserschutz zweidimensional, Teil 2: Welche Dampfbremse beim Deckenanschluss? Holzbau quadriga, Heft 01/2006, Verlag Kastner, 2006

[12] Müller, J. (Hrsg.): Holzschutz im Hochbau. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2005

[14] WTA-Merkblatt E 3-17: Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., WTA Publications, August 2009

[13] WTA-Merkblatt 6-4: Innendämmung nach WTA I – Planungsleitfaden. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., WTA Publications, Mai 2009

[14] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzen auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart 2001

[15] Schmidt, D.; Winter, S.: Informationsdienst Holz Spezial - Flachdächer in Holzbauweise. H 576 (September 2008).

[16] Borsch-Laaks, R.: Wie undicht ist dicht genug? Tagungsband Aachener Bausachverständigentage 2009, S. 119-132.

[17] DIN 68800 Teil 2: Holzschutz - Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau, Normentwurf 11/2009.