



**Der Autor**

Dr.-Ing. Hartwig M. Künzel, Fraunhofer-Institut für Bauphysik

# Schadensdiagnose durch hygrothermische Simulation

Feuchte ist direkt oder indirekt für einen Großteil der Schäden an Gebäuden verantwortlich. Allerdings ist es häufig nicht klar, wie es zu einem bestimmten Schadensbild kommen konnte und vor allem, wer an dem Schaden die Schuld trägt.

## 1. Einleitung

Selbst erfahrene Sachverständige kommen gelegentlich zu ganz unterschiedlichen Urteilen. Da die Behebung des Schadens häufig aufwändig und teuer ist, wird oft versucht, die Kosten auf mehrere Schultern zu verteilen, d.h. es wird jeweils eine Teilschuld beim Planer wie auch bei den ausführenden Firmen gesucht. Deshalb stellen größere Schadensfälle meist eine juristische Herausforderung dar, die sich jedoch soweit wie möglich auf technisch gesicherte Fakten stützen sollte. In der Regel werden diese Fakten im Rahmen einer Begutachtung des Schadens gesammelt. Basierend auf vielen Fotos und manchmal auch einigen Messungen sowie Erfahrungen aus tatsächlich oder vermeintlich vergleichbaren Fällen, wird auf die Schadensursache geschlossen. Gelegentlich werden auch Abweichungen der Konstruktion von einschlägigen Normen ins Feld geführt, selbst wenn diese Abweichungen in keinerlei Zusammenhang mit dem Schaden stehen.

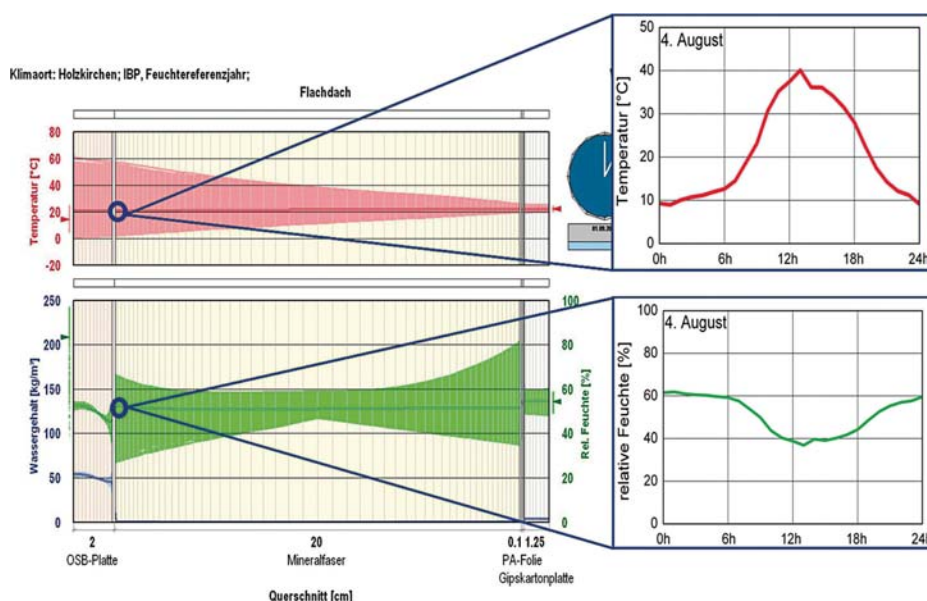
Es soll hier nicht der Eindruck erweckt werden, dass bei der Schadensbegutachtung nicht seriös genug gearbeitet wird. Vielmehr soll das Dilemma aufgezeigt werden in dem sich alle Beteiligten befinden, wenn das Schadensbild nicht ohne Weiteres auf eine bestimmte Ursache zurückgeführt werden kann. In solchen Fällen kann manchmal die hygrothermische Simulation wertvolle Dienste leisten. Gerade wenn für einen Feuchteschaden mehrere Randbedingungen oder Vorgänge ursächlich sein können, lässt sich durch Simulationsrechnungen häufig ermitteln, welche Ursache die wahrscheinlichste ist. Beispielsweise kann das Fehlen einer Dampfbremse in der Berechnung zum langsamen Aufweichen der Konstruktion führen. Allerdings kann diese langsame Feuchtezunahme nie das Maß

erreichen, das notwendig wäre, um das vorgefundene Schadensbild zu erklären. In solchen Fällen gibt es neben dem Planer wahrscheinlich noch andere Verantwortliche. Im Folgenden wird daher kurz auf die Hintergründe der feuchtetechnischen Beurteilung von Baukonstruktionen durch hygrothermische Simulation eingegangen und anschließend am Beispiel eines Flachdachs erläutert, welche Konsequenzen unterschiedliche Randbedingungen auf die Schadenswahrscheinlichkeit haben.

## 2. Feuchtetechnische Beurteilung von Baukonstruktionen

Die derzeit gültige und bauaufsichtlich eingeführte Norm für die Feuchteschutzbeurteilung von Außenbauteilen ist die DIN 4108-3 [1]. Neben Hinweisen zum Schlagregenschutz wird in dieser Norm ausschließlich der Schutz von Bauteilen vor winterlichem Tauwasser behandelt.

Vorausgesetzt wird, dass keine Rohbaufeuchte in der Konstruktion vorhanden ist, was in der Realität nur selten der Fall ist. Ebenfalls nicht berücksichtigt werden sog. sommerliche Umkehrdiffusionsprozesse, bei denen Wasserdampf von außen in ein Bauteil eindringt und kondensiert. Das vor allem in den skandinavischen Ländern und in Nordamerika gefürchtete Phänomen tritt auf, wenn die Sonne auf ein regennasses Bauteil scheint und dieses erwärmt. Die feuchtetechnische Beurteilung von Bauteilen beschränkt sich in der DIN 4108-3 also auf die reine Dampfdiffusion unter winterliche Bedingungen. Dazu wird das in den 50er Jahren entwickelte Glaser-Verfahren eingesetzt, das mit stationären Randbedingungen arbeitet. Es vernachlässigt alle wärme- und feuchtetechnischen Speicherphänomene sowie den Feuchte-transport durch Kapillarleitung. Daher ist es für viele Anwendungen entweder ungeeignet oder von beschränkter Aussage-



**Abb. 1:** WUFI®-Simulation – Beobachtung der instationären Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Bauteilinneren, die sich als Reaktion auf die klimatischen Randbedingungen einstellen.

kraft, d.h. Bauteile, die nach der Glaser-methode versagen, können in der Realität funktionieren und auch umgekehrt.

Bereits seit vielen Jahren sind Verfahren zur instationären Berechnung des Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen dem Praktiker verfügbar. Sie bieten u.a. den Vorteil, die Temperatur- und Feuchteverhältnisse in Bauteilen quasi sichtbar und für den Anwender nachvollziehbar zu machen (Abb. 1). Die steigende Anzahl von einschlägigen Fachveröffentlichungen zeigt, dass diese Verfahren zunehmend eingesetzt werden. Wegen der bereits erwähnten Einschränkungen der stationären Dampfdiffusionsbetrachtungen nach Glaser wird in der DIN 4108-3 [1] zur Beurteilung von Sonderfällen, wie z.B. begrünten Dachkonstruktionen oder zur Berechnung der Austrocknung von Rohbau- oder eingedrungener Regenfeuchte sowie bei außergewöhnlichen Klimabedingungen, auf diese instationären hygrothermischen Berechnungsmodelle verwiesen. Seit 2007 existiert mit der DIN EN 15026 [2] eine europäische Norm, die diese Modelle und ihre Anwendung regelt. Diese Norm bildet die Grundlage für die instationäre Feuchteschutzbeurteilung von Baukonstruktionen durch die Betrachtung der sich unter natürlichen Klimabedingungen innerhalb eines Bauteils einstellenden Temperatur und Feuchteverhältnisse.

Um den Anforderungen der Norm gerecht zu werden, muss ein Rechenmodell folgende Speicher- und Transportphänomene erfassen:

- Wärmespeicherung des trockenen Baustoffes und des darin enthaltenen Wassers
- Wärmetransport durch feuchteabhängige Wärmeleitung
- Wärmeübertragung durch Dampfdiffusion (Latentwärmeeffekte)
- Feuchtespeicherung durch Wasserdampfsorption und Kapillarkräfte
- Feuchtetransport durch Wasserdampfdiffusion
- Flüssigtransport durch Oberflächendiffusion und Kapillarleitung

Als Randbedingungen sind folgende Klimaparameter zu berücksichtigen:

- Raum- und Außentemperatur
- raum- und außenseitige Luftfeuchte
- kurz- (Sonnenstrahlung) und langwellige Strahlung
- Niederschlag und Wind

Die Beurteilung der Ergebnisse von Simulationsberechnungen erfordert einschlägige Erfahrung. Ähnlich wie bei der Be-

urteilung nach Glaser kommt es darauf an, dass sich in der Konstruktion langfristig kein Wasser ansammelt. Deshalb wird zunächst der Verlauf des Gesamtwassergehalts analysiert. Anschließend werden die hygrothermischen Verhältnisse in den einzelnen Materialschichten sowie an den Oberflächen und Materialgrenzen betrachtet. An den raumseitigen Oberflächen sowie im Bereich von Luftschichten in den wärmeren Bereichen eines Bauteils besteht die Gefahr von Schimmelpilzbildung, wenn die über einen Monat gemittelte relative Luftfeuchte über 80 % ansteigt. Zur Beurteilung der Wassergehalte in den einzelnen Schichten ist ein Vergleich mit den Grenzwassergehalten für die einzelnen Baustoffe – falls vorhanden – zweckmäßig. Bei Holz- oder Holzwerkstoffen wird meist eine Grenze von 20 M.-% bzw. 18 M.-% angenommen. Holzfäule beginnt allerdings erst bei Fasersättigung (25 – 30 M.-%). Für die meisten mineralischen Baustoffe gibt es eine solche Grenze nicht. Hier müssen andere Überlegungen angestellt werden, wie z.B. dass die Feuchte in potenziell frostempfindlichen Materialien nicht über einen kritischen Wert ansteigen soll.

### 3. Instationäres Temperatur- und Feuchteverhalten von Bauteilen

Die Gebäudehülle bildet eine hygrothermische Grenze zwischen dem Innenraum- und dem Außenklima. Sie schützt das Gebäudeinnere vor der natürlichen Witterung und dämpft die Auswirkungen der äußeren Temperatur- und Feuchtebedingungen. Während Raumlufttemperatur und -feuchte eher kleinen tages- und jahreszeitliche Veränderungen unterworfen sind, kann z.B. die Außenoberflä-

chentemperatur von Dächern im Tag-Nacht-Rhythmus um bis zu 70K schwanken. Dabei kommt der Hauptenergieeintrag während des Tages von der solaren Einstrahlung (Abb. 2, links). Einen Teil dieser Energie verliert die Oberfläche wieder über die langwellige Abstrahlung. Dazu kommt ein Energieaustausch durch Konvektion. Ist die Außenoberfläche feucht, finden außerdem Trocknungsvorgänge statt, die zusätzlich Wärme über Verdunstung entziehen. In die Konstruktion wird Wärme geleitet und es bildet sich ein Temperaturgradient von außen nach innen, der ein ebensolches Dampfdruckgefälle zur Folge hat, sodass Wasserdampf in Richtung Innenseite wandert.

Während der Nacht drehen sich diese Vorgänge um (Abb. 2 rechts). In klaren Nächten ist die Energiesenke durch langwellige Abstrahlung so groß, dass es häufig zu einer Abkühlung der Oberflächentemperatur unter die Außenlufttemperatur kommt. Wird dabei die Taupunkttemperatur der Außenluft erreicht – was bei hochgedämmten Konstruktionen regelmäßig der Fall ist – fällt Tauwasser aus. Durch die Abkühlung der Außenoberfläche dreht sich auch in der Konstruktion die Wärme- und Wasserdampftransportrichtung um.

#### 3.1 Feuchtequellen

Häufig wird Feuchteschutz ausschließlich mit dem Schutz vor Dampfdiffusion aus dem Raum (Tauwasserschutz) gleichgesetzt. Übersehen wird dabei, dass es daneben auch noch andere Feuchtequellen gibt, wie z.B.

- Tauwasser infolge von einströmender Raumluft im Winter
- Sorptionsfeuchte bzw. Wassereintrag vor oder während der Bauphase (Baufeuchte)

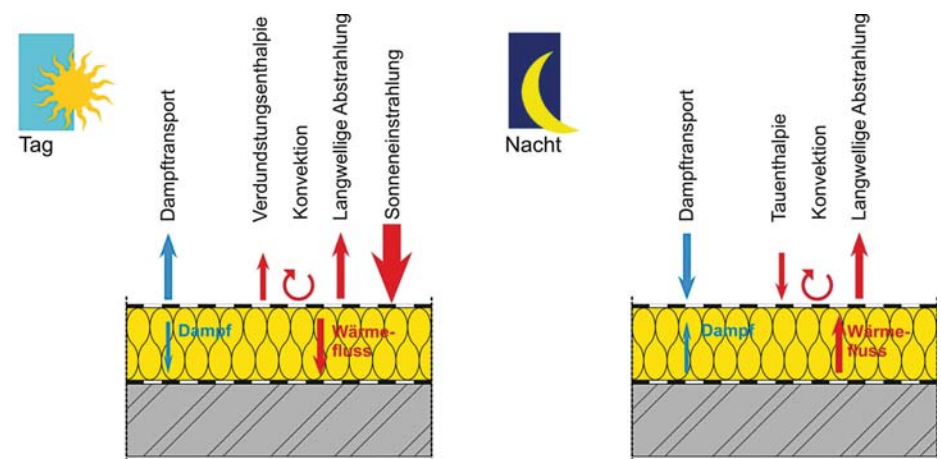
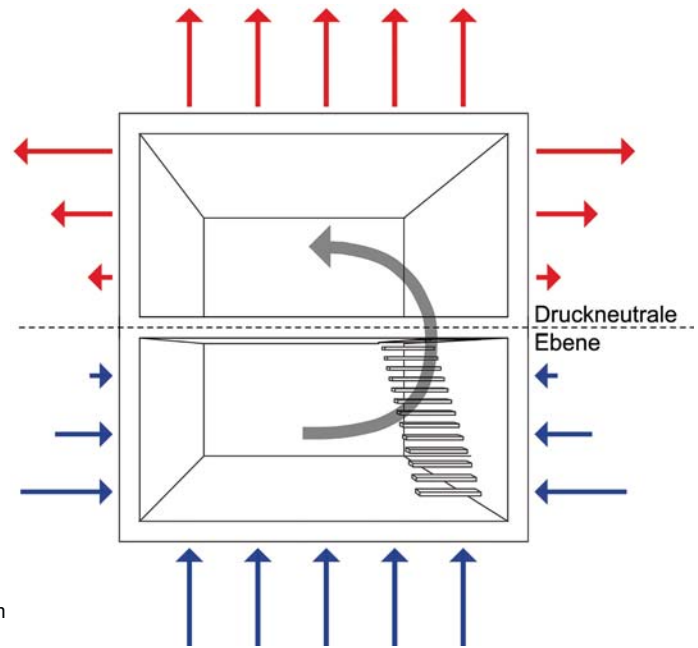


Abb. 2: Instationär auf eine Flachdachoberfläche einwirkende Klimafaktoren am Tag und in der Nacht, sowie deren Auswirkungen auf den Wärme- und Feuchtetransport im Bauteilinneren.

▪ Eindringendes Niederschlagswasser  
Um Bauteile vor Tauwasser durch Feuchte aus dem Raum zu schützen, wird häufig auf der Warmseite eine möglichst dichte Dampfsperre angebracht. Gerade bei Bauteilen, die auch außen dampfdicht sind, wie z.B. unbelüftete Flachdächer, kann dies problematisch sein. Eine Vielzahl von schadhafte Holzdachkonstruktionen [3, 4] haben in den letzten Jahren die Probleme der bisherigen Feuchteschutzbeurteilung nach DIN 4108-3 [1] mehr ins Bewusstsein gerückt. Dabei hat sich gezeigt, dass Feuchte aus dem Raum nicht nur infolge Dampfdiffusion, sondern auch durch Konvektion in die Konstruktion gelangen kann. Eine Dampfsperre hilft an dieser Stelle alleine wenig – im Gegenteil, sie kann sogar nachteilig sein, weil sie eine mögliche Austrocknung der Feuchte im Sommer stark behindert. Die Praxiserfahrung zeigt, dass ein gewisser Feuchteeintrag durch Luftkonvektion vor allem bei Leichtbaudächern kaum zu vermeiden ist [5]. Dies sollte bei der feuchtechnischen Bemessung berücksichtigt werden, z. B. indem man das Feuchteverhalten der Konstruktion durch eine hygrothermische Simulation analysiert oder bei der Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser eine Trocknungsreserve (s. u.) vorhält.

### 3.2 Feuchteintrag durch Dampfkongvektion

Luftströmungen durch Bauteile entstehen durch Luftdruckunterschiede zwischen dem Innenraum und der Außenluft. Allerdings sind sie nur dann ein Problem, wenn sie soviel Feuchte mit sich führen, dass es zur Tauwasserbildung auf der Kaltseite des Bauteils kommt. Ein Überdruck im Gebäude, z.B. verursacht durch den thermischen Auftrieb im Winter (Abb. 3), ist deshalb ungünstig. Der thermisch bedingte Überdruck steigt proportional mit der Höhe des zusammenhängenden Luftraums und der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. Hohe Gebäude sind deshalb potenziell stärker von konvektionsbedingten Problemen betroffen als niedrige. Die Druckdifferenz infolge Thermik am Flachdach eines zweigeschossigen Einfamilienhauses beträgt beispielsweise im Winter etwa 2,5 Pa. Durch Wind oder durch mechanische Lüftungsanlagen können noch deutlich größere Druckdifferenzen entstehen. Allerdings liegen diese Drücke i.d.R. nicht permanent an, wenn man davon ausgeht, dass eine kontinuierliche Wohnraumlüftung druckneutral arbeitet



**Abb. 3:** Druckdifferenzen über der Gebäudehülle infolge von thermischen Auftriebskräften bei einem zweigeschossigen Gebäude.

und hier nur diskontinuierliche Abluftvorrichtungen, z. B. in Küche oder Bad, zu berücksichtigen sind.

Auch nach dem Stand der Technik luftdicht ausgeführte Konstruktionen sind nicht völlig frei von Fehlstellen. Ein geringer Feuchteeintrag durch Dampfkongvektion ins Bauteil gelangt, etabliert sich zunehmend das Vorhalten einer Trocknungsreserve als feuchtechnisches Bemessungsprinzip für Flachdächer in Leichtbauweise. Das bedeutet, dass eine Konstruktion in Bezug auf die Dampfdiffusion nur so dicht wie nötig, gleichzeitig aber so diffusionsoffen wie möglich auszuführen ist. Dadurch soll erreicht werden, dass auch die Feuchte austrocknen kann, die nicht durch Dampfdiffusion sondern auf andere Weise ins Bauteil gelangt. Im Neuentwurf der deutschen Holzschutznorm DIN 68800-2 [6] wird für die Bemessung von Flachdächern in Holzbauweise eine Konvektionstauwasseremenge von 250 g/m<sup>2</sup> bei der Dampfdiffusionsberechnung angesetzt. Damit ein solches Bauteil den Feuchteschutznachweis nach DIN 4108-3 [1] besteht, muss also die errechnete Verdunstungsmenge mindestens um die Trocknungsreserve von 250 g/m<sup>2</sup> größer sein als die diffusionsbedingte Tauwasseremenge. Ähnlich soll gemäß dieser Norm bei der hygrothermischen Simulation vorgegangen werden. Ein darauf aufbauender Ansatz zur Berücksichtigung des konvektiven Feuchteintrags in Abhängigkeit von

den instationären Randbedingungen ist in [7] genauer erläutert. Dieser Ansatz liegt auch den Simulationen im nachfolgenden Fallbeispiel zugrunde.

### 4. Fallbeispiel – Flachdach in Holzbauweise

Das Beispiel eines Flachdachs in Holzbauweise wird hier gewählt, weil es die Möglichkeit bietet, mithilfe der hygrothermischen Simulation zwischen Planungs- und Ausführungsmängeln zu unterscheiden. Dabei wird eine Planung, die nur im Fall einer perfekten Ausführung funktioniert, als mangelhaft angesehen. Ist eine Konstruktion so konzipiert, dass sie kleinere Fehlstellen, wie sie im Regelfall auftreten, bei bestimmungsgemäßer Nutzung ohne Schaden zu nehmen toleriert, ist die Planung in Ordnung. Versagt diese Konstruktion in der Praxis dennoch, dann liegt dies entweder an einer mangelhaften Ausführung oder aber an einer nicht bestimmungsgemäßen Nutzung bzw. unzureichenden Wartung.

Für die folgenden Untersuchungen wird das DIN EN 15026 [2] konforme Simulationsprogramm WUFI® [8] eingesetzt. Dieses Programm wurde für den Einsatz im Flachdachbereich bereits mehrfach experimentell validiert. Anhand eines typischen Flachdachs in Holzbauweise werden die Auswirkungen der Einfärbung und des Dampfdiffusionswiderstands der Dachabdichtung auf das Feuchteverhalten des Daches in Abhängigkeit von der eingesetzten Dampfbremse untersucht.

### 4.1 Dachaufbau und Randbedingungen

Anhand der Flachdachkonstruktion in Abb. 4 soll neben der instationären Berechnung der Dampfdiffusionsvorgänge auch der Einfluss der Dampfkongvektion auf das Feuchteverhalten der Konstruktion untersucht werden. Dabei wird eine Luftdichtheit gemäß Klasse C in [7] vorausgesetzt (Standardfall: entspricht einer konvektiven Feuchtequelle von 250 g/m<sup>2</sup> während der Heizperiode). Das Dach ist mit 200mm Mineralfaserdämmung gedämmt und besitzt als oberen Abschluss eine 20mm dicke OSB-Schalung. Der Diffusionswiderstand ( $s_d$ -Wert) der oberen Abdichtung beträgt im Normalfall 100 m. Zur Überprüfung des Austrocknungspotenzials durch die Abdichtung wird jedoch auch ein Fall betrachtet, bei dem der  $s_d$ -Wert nur 20m aufweist. Dieser für Dachabdichtungen niedrige Diffusionswiderstand kann mit PVC-Bahnen heute erreicht werden. Der raumseitige Abschluss des Dachs besteht aus Gipskarton. Zwischen der Innenbeplankung und der Dämmung befindet sich eine Dampfbremse, deren  $s_d$ -Wert im Einklang mit den Vorgabengaben in [1] für eine nachweisfreie Konstruktion 100m beträgt. Als Alternative wird hier auch der Einsatz einer feuchtheadaptiven Dampfbremse auf Polyamidbasis mit variablem Dampfdiffusionswiderstand [9] untersucht. Der  $s_d$ -Wert dieser Dampfbremse ist unter winterlichen Bedingungen (Schutz der Konstruktion vor Tauwasser erforderlich) mit ca. 4 m etwa zehnmal so groß, wie im Sommer, wenn das Dach austrocknen soll. Bei einer Luftfeuchte von 100 % r.F. (z.B. bei Kontakt mit Tauwasser) sinkt der  $s_d$ -Wert unter 0,1 m. Die Zone, in der Tauwasser als Folge von Dampfkongvektion ausfallen kann, ist der Bereich zwischen OSB-Schalung und darunter liegender Mineralfaserdämmung. Die Berechnungen werden für das Flachdach eines zwei-stöckiges Hauses (h = 5 m) bzw. für ein 15 m hohes Gebäude mit zusammenhängendem Innenraumvolumen durchgeführt.

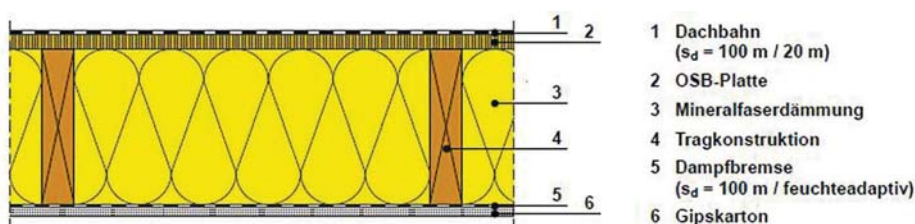


Abb. 4: Aufbau des betrachteten Flachdachs in Holzbauweise.

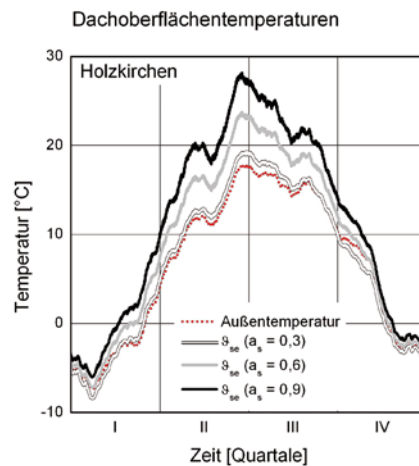


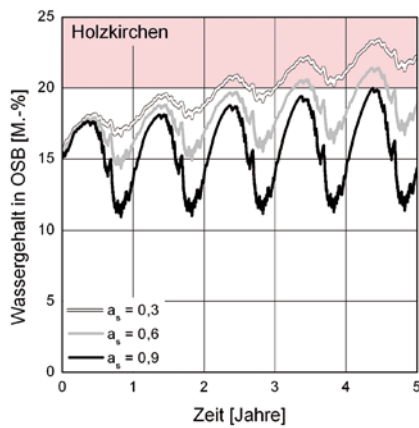
Abb. 5: Verlauf der gemittelten (30-d gleitend) Oberflächentemperaturen des betrachteten Dachaufbaus (Abb. 4) bei unterschiedlichen solaren Absorptionsgraden im Vergleich zur Außenlufttemperatur in Holzkirchen.

Gemäß DIN EN 15026 [2] wird als Außenklima das Feuchtereferenzjahr (meteorologischer Datensatz auf der Basis von Stundenwerten für ein feuchte-technisch kritisches Jahr) von Holzkirchen verwendet. Der Standort Holzkirchen zeichnet sich für deutsche Verhältnisse durch ein vergleichsweise raues Klima aus. Das Raumklima wird nach derselben Norm aus der Außenlufttemperatur unter Voraussetzung einer normalen Belegung errechnet. Da aus früheren Untersuchungen [10] bekannt ist, dass die Oberflächentemperatur für das Austrocknungsverhalten von Dächern eine große Rolle spielt, werden die Berechnungen mit drei verschiedenen solaren Absorptionsgraden durchgeführt. Bitumenbahnen und ähnlich dunkle Dachabdichtungen haben in der Regel einen Absorptionsgrad  $a_s$  von 0,9. D.h. 90 % der auftreffenden Sonnenstrahlung wird absorbiert und in Wärme umgewandelt. Der Absorptionsgrad von helleren Dachabdichtungen (z. B. grau oder beige) liegt bei etwa 0,6. Zum Zweck des sommerlichen Wärmeschutzes kommen in warmen Ländern seit einiger Zeit auch stark reflektierende, d.h. weiße Dachbahnen zum Einsatz. Ihr Absorptionsgrad beträgt im unver- schmutzten Zustand ungefähr 0,3.

Welche Auswirkungen die unterschiedlichen solaren Absorptionsgrade auf die thermischen Verhältnisse am Dach haben, zeigen die in Abb. 5 dargestellten gemittelten (gleitendes 30-Tage-Mittel) Jahresverläufe der Dachoberflächentemperaturen. Dabei entspricht der Oberflächentemperaturverlauf der reflektierenden Dachbahn ( $a_s = 0,3$ ) etwa dem der Außenlufttemperatur, d.h. die solaren Energiegewinne werden hier durch die Verluste aufgrund der langwelligen Abstrahlung näherungsweise kompensiert. Bei höheren Absorptionsgraden wird die Dachoberfläche im Mittel jedoch deutlich wärmer als die Außenluft, was auch ein entsprechend höheres Austrocknungspotenzial erwarten lässt. In der DIN 4108-3 [1] wird bei den Randbedingungen für die Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser davon ausgegangen, dass die Dachoberfläche während der Verdunstungsperiode mit 20°C um 8K wärmer ist als die Außenluft. Diese Differenz wird bei einem Flachdach mit schwarzer Abdichtung auch tatsächlich erreicht. Bei einem weißen Dach sieht es jedoch ganz anders aus, da liegt die Differenz unter 2K. Ist ein Dach begrünt oder permanent verschattet (z.B. durch aufgeständerte Photovoltaikmodule), dürfte die Oberflächentemperatur deutlich näher an der Temperatur der weißen Dachbahn liegen, als an der der schwarzen.

### 4.2 Simulationsergebnisse

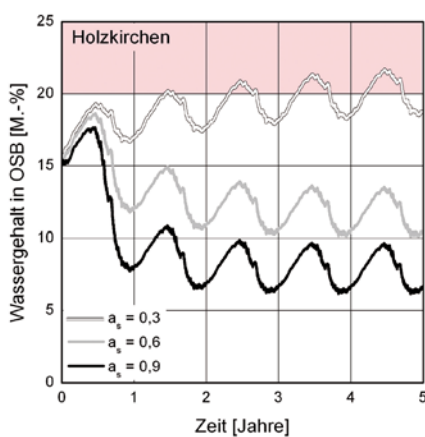
Ausgehend vom lufttrockenen Zustand der Konstruktion, d. h. alle Materialien im Dach sind zu Beginn im Gleichgewicht mit der mittleren Außenluftfeuchte von 80 % r.F., startet die Berechnung im Oktober und wird mit demselben Klimadatensatz über einen Zeitraum von fünf Jahren fortgeführt. Bei der Auswertung ist es sinnvoll, die Bauteilschicht zu betrachten, die das größte feuchte-technische Risiko in sich birgt. In diesem Fall ist das die obere Schalung aus OSB, deren Wassergehaltsverläufe im Folgenden genauer analysiert werden. Abb. 6 zeigt die Feuchteverläufe für den Standardfall (Abdichtung und Dampfbremse besitzen beide einen  $s_d$ -Wert von 100 m) in Abhängigkeit vom solaren Absorptionsgrad über einen Zeitraum von fünf Jahren. Unter Holzkirchner Klimabedingungen steigt die Feuchte der OSB-Schalung bei einer reflektierenden (weißen) Abdichtung bereits im dritten Winter über den kritischen Grenzwert von 20 M.-%. Mit einer hellen Abdichtung ( $a_s = 0,6$ ) dauert



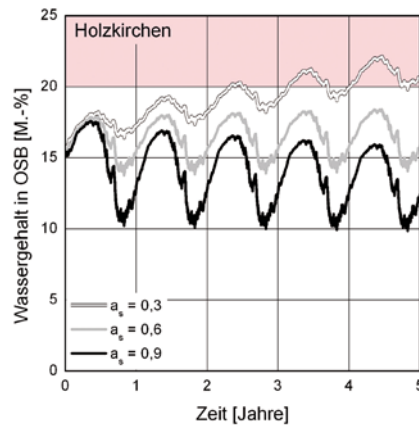
**Abb. 6:** Verlauf der Holzfeuchte der äußeren OSB-Schalung im betrachteten Dach mit beidseitig dampfdichten Sperrschichten ( $s_{d1} = 100 \text{ m}$ ,  $s_{d2} = 100 \text{ m}$ ) in Abhängigkeit vom solaren Absorptionsgrad der äußeren Abdichtung. Der kritische Holzfeuchtebereich ist farbig hinterlegt.

es nur ein Jahr länger und auch im Fall einer dunklen Abdichtung ( $a_s = 0,9$ ) wird der Grenzwert im letzten Winter erreicht. Deutlich zu erkennen ist auch in allen Fällen der weitere Anstieg der Feuchte, so dass langfristig ein Schaden unter diesen Bedingungen wahrscheinlich ist.

Dieses Ergebnis ist brisant, da der betrachtete Dachaufbau gemäß DIN 4108-3 [1] ohne rechnerischen Nachweis zulässig wäre. Es gibt in der Norm zwar einen Hinweis der aussagt, dass außen diffusionshemmende Dächer mit innerer Dampfsperre nur schlecht oder gar nicht austrocknen. Diese Anmerkung bezieht sich aber auf Dächer mit Eindeckung obwohl dies genauso für solche mit Abdichtung gilt. Der Grund für das Versagen der beidseitigen dichten Dächer bei der vorliegenden Untersuchung ist die im Neuentwurf der DIN 68800-2 [6] geforderte Berücksichtigung des konvektiven Feuchteintrags. Ohne diese zusätzliche konvektive



**Abb. 8:** Verläufe der Holzfeuchte der äußeren OSB-Schalung im betrachteten Dach mit Standardabdichtung ( $s_d = 100 \text{ m}$ ) bei Verwendung einer feuchteadaptiven Dampfbremse mit variablem  $s$ -Wert.



**Abb. 7:** Verläufe der Holzfeuchte der äußeren OSB-Schalung im betrachteten Dach bei Verwendung einer Abdichtung mit geringerem  $s_d$ -Wert (20 m).

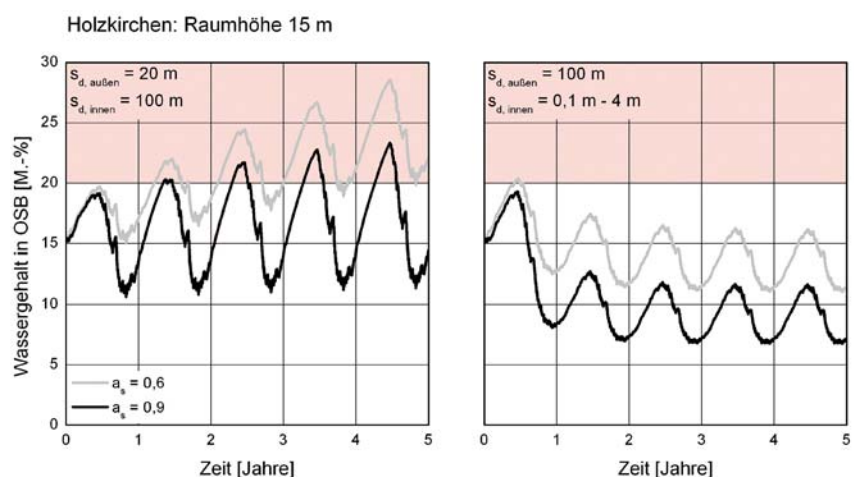
Befeuchtung wären die Dächer feuchte-technisch in Ordnung. Allerdings hat die Praxis, wie bereits erwähnt, gezeigt, dass die Vernachlässigung der Dampfkonvektion eine zu optimistische Bewertung dampfdichter Dächer zur Folge hat. Deshalb werden die Konvektionsansätze für die weiteren Berechnungen beibehalten. Es wird jedoch versucht durch eine Modifikation des Dachaufbaus feuchtetechnisch brauchbare und dauerhafte Lösungen zu finden.

Zunächst wird deshalb derselbe Dachaufbau mit einer etwas weniger diffusionshemmenden Abdichtung untersucht. Zurzeit sind am Markt Dachbahnen erhältlich deren  $s_d$ -Wert bei ca. 20 m liegt. Solche Bahnen sind sicher etwas dampfdurchlässiger als eine herkömmliche Bitumenabdichtung; diffusionsoffen, wie manchmal behauptet wird, sind sie jedoch nicht. Als diffusionsoffen gelten gemäß [1] nur Bauteilschichten mit  $s_d \leq 0,5 \text{ m}$ . Die Ergebnisse für die Holzfeuchteverläufe

in Abb. 7 zeigen, dass das etwas größere Austrocknungspotenzial der alternativen Dachabdichtung durchaus Vorteile hat. Bei einem hohen solaren Absorptionsgrad gibt es bei der vorliegenden Betrachtung keine Probleme. Auch Dachaufbauten, deren Abdichtung nur einen mittleren Absorptionsgrad ( $a_s = 0,6$ ) besitzen, scheinen noch zu funktionieren. Allerdings befindet sich die Feuchtebilanz hier schon auf der Kippe, d.h. der Einfluss der Dampfkonvektion wird gerade noch halbwegs kompensiert. Eine weiße Dachabdichtung würde allerdings schnell zum Versagen führen.

Noch etwas günstiger wirkt sich eine andere Modifikation des Dachaufbaus aus. Ersetzt man die ursprüngliche Dampfbremse durch eine feuchteadaptive Dampfbremse mit variablem  $s_d$ -Wert ( $0,1 \text{ m} \leq s_d \leq 4 \text{ m}$ ), dann findet im Sommer eine starke Austrocknung nach innen statt, wie Abb. 8 zu entnehmen ist. Dies gilt jedoch ebenfalls nur solange keine weiße ( $a_s = 0,3$ ) Dachabdichtung verwendet wird. Sind die solaren Energiegewinne der Dachoberfläche zu gering, kommt es nicht zu einer ausreichenden Erwärmung des Daches, um die Feuchte durch Dampfdiffusion nach innen zu treiben. Offensichtlich stellen stark reflektierende Außenoberflächen unabhängig vom Flachdachaufbau ein erhebliches feuchtetechnisches Risiko dar. Ihr Einsatz ist daher für mitteleuropäische Klimabedingungen nicht zu empfehlen.

Ein wichtiger Aspekt ist die Größe des sommerlichen Trocknungspotenzials. Bei stärkerer Dampfkonvektion, beispielsweise wegen größerer Fehlstellen in der Luftdichtheitsebene oder durch eine größere Gebäudehöhe, kann das Austrocknungspotenzial durch die Dachabdichtung oder



**Abb. 9:** Verläufe der Holzfeuchte der äußeren OSB-Schalung im betrachteten Dach, wenn der konvektive Feuchteeintrag aufgrund der Gebäude (15 m) dreimal so groß ist wie beim Standardfall.

die Dampfbremse schnell erschöpft sein. Deshalb werden die Berechnungen mit einem höheren konvektiven Feuchteintrag wiederholt, diesmal allerdings ohne den Fall einer weißen Dachbahn zu berücksichtigen. Geht man von einer Gebäudehöhe von 15m aus, dann verdreifacht sich auch der Anteil der Dampfkonvektion mit dem Ergebnis, dass die Austrocknung durch eine etwas weniger diffusionshemmende Abdichtung ( $s_d = 20$  m) selbst bei einem hohen solaren Absorptionsgrad nicht mehr ausreicht (Abb. 9, links). Durch den Einsatz einer feuchteadaptiven Dampfbremse werden hier deutlich bessere Ergebnisse erzielt, d.h. es treten langfristig keine kritischen Feuchtezustände auf, solange der Absorptionsgrad der Dachoberfläche nicht unter 0,6 fällt (Abb. 9, rechts).

### 4.3 Fazit aus dem Fallbeispiel

Der Feuchteschutz von Flachdächern ist ein zentrales Thema, da das Wasser nicht wie bei einem Steildach der Schwerkraft folgend abfließen kann, sondern durch eine lückenlose Abdichtung daran zu hindern ist, ins Gebäude einzudringen. Die Abdichtung führt bei konventionellen Dachaufbauten jedoch auch dazu, dass eingedrungene Feuchte so gut wie gar nicht nach außen wegtrocknen kann. Feuchteinträge während der Bauphase oder während der Nutzung, z.B. durch Raumluftkonvektion, bergen deshalb ein beträchtliches Schadensrisiko, wenn kein oder ein zu geringes Austrocknungspotenzial vorhanden ist.

Eine umfassende Analyse der klimatischen Bauteilbeanspruchungen ist daher sehr wichtig. Standardlösungen, wie sie in Normen, Verbandsrichtlinien oder Produktbeschreibungen zu finden sind, berücksichtigen oft nur den Feuchteintrag durch Dampfdiffusion und vernachlässigen alle anderen Feuchtequellen. Sie gehen auch grundsätzlich von normalen Raum- und Außenklimaverhältnissen aus. Demgegenüber kann z.B. das Raumklima von Versammlungsstätten oder Schwimmbädern ganz andere Maßnahmen erforderlich machen. Auch die Verhältnisse auf dem Dach können im Vergleich zu den traditionellen Annahmen deutlich ungünstiger ausfallen. Besonders Dächer von verschatteten Gebäuden oder solchen in Hochlagen, deren Oberflächen sich auch im Sommer tagsüber nur wenig erwärmen, zeigen ein schlechtes Austrocknungspotenzial und damit auch eine geringe Feuchteschadenstoleranz.

### 5. Schlussfolgerungen

Das Feuchteverhalten von Baukonstruktionen wird durch zahlreiche Einflussfaktoren bestimmt, die sich selbst erfahrenen Praktikern nicht immer vollständig erschließen. Tritt ein Feuchteschaden auf, der nicht durch offensichtliche Mängel hervorgerufen wurde, ist die Ursachenfindung oft schwierig. Hier kann die hygrothermische Simulation wertvolle Dienste leisten, da sie in der Lage ist, die in der Realität ablaufenden Prozesse abzubilden. Durch eine Variation der Parameter ist es in der Regel möglich, die Einflussfaktoren zu benennen, die unter den gegebenen Voraussetzungen so große Feuchtegehalte verursachen können, dass der vorgefundene Schaden entstehen konnte. Gleichzeitig können aber auch die Faktoren ausgeschlossen werden, die dazu nicht in der Lage sind.

Ein wesentliches Element der Schadensdiagnose durch hygrothermische Simulation ist die Quantifizierung von möglichen Feuchtequellen. Wie bereits erwähnt, sollte hier zwischen dem, was bei normaler handwerklicher Ausführung unvermeidbar ist und einem echten Ausführungsfehler unterschieden werden. Die vorgestellte Berücksichtigung von Feuchteinträgen durch Konvektion feuchter Luft aus dem Raum in das Bauteil stellt ein Beispiel dafür dar. Ein weiteres Beispiel ist das Berücksichtigen von Niederschlagsfeuchte, die bei Schlagregenbeanspruchung hinter die äußere Bekleidung dringen kann. In der amerikanischen Feuchteschutznorm [11] wird davon ausgegangen, dass ohne besondere Maßnahmen, deren Wirksamkeit überprüft sein muss, etwa ein Prozent der auf die Fassade auftreffenden Schlagregenmenge durch Undichtheiten hinter die äußere Bekleidung dringt. Diese Maßgabe wurde u. a. als Reaktion auf massive Schäden bei Wärmedämmverbundsystemen auf Holzbauwänden in Nordamerika in die Norm aufgenommen. Die Auswirkungen dieser Annahme auf die Ergebnisse von Simulationsrechnungen werden beispielsweise in [12] eingehender untersucht. Es ist davon auszugehen, dass ähnliche Ansätze zur Berücksichtigung der Regenwasserpenetration auch in deutsche Regelwerke Einzug halten werden.

### 6. Literatur

- [1] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz. Juli 2001  
 [2] DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechni-

sches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Juli 2007

- [3] Mohrmann, M.: Feuchteschäden im Flachdach. Holzbau – die neue quadriga (2007), H. 3, S. 13-17  
 [4] Oswald, R.: Fehlgeleitet - Unbelüftete Holzdächer mit Dachabdichtungen. db Deutsche Bauzeitung 143(2009), H. 7, S. 74-79  
 [5] Geißler, A. und Hauser, G.: Abschätzung des Risikopotentials infolge konvektiven Feuchtetransports. Forschungsbericht, AIF-Nr.: 12764, Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik(2002)  
 [6] DIN 68800-2: Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau, Normentwurf 11/2009  
 [7] Künzel, H.M. und Zirkelbach, D.: Trocknungsreserven schaffen – Einfluss des Feuchteintrags aus Dampfkonvektion. Holzbau – die neue quadriga (2010), H. 1, S. 28-32  
 [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] Künzel, H.M.: Trocknungsfördernde Dampfbremsen – Einsatzvoraussetzungen und feuchteschutztechnische Vorteile in der Praxis. wksb 46(2001), H. 47, S. 15-23  
 [10] Künzel, H.M. und Sedlbauer, K.: Auswirkung heller Dichtungsbahnen auf das Austrocknungspotential von Leichtbau-Flachdächern. WTA-Journal 6(2008), H. 1, S. 1-10  
 [11] ANSI/ASHRAE Standard 160-2009: Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings  
 [12] Künzel, H.M. und Zirkelbach, D.: Feuchteverhalten von Holzständerkonstruktionen mit WDVS – Sind die Erfahrungen aus amerikanischen Schadensfällen auf Europa übertragbar? wksb 52(2007), H. 58, S. 50-57

#### Kontakt/Information

##### Dr.-Ing. Hartwig Künzel

Abteilungsleiter Hygrothermik, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen  
 Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley

Tel. 08024/643-245

Fax 08024/643-366

hartwig.kuenzel@ibp.fraunhofer.de

www.ibp.fraunhofer.de

www.bauphysik.de

www.wufi.de