



Bild: Thinkstock / GreenTomato

# Glaser war kein Simulant

**HYGROTHERMISCHE SIMULATION** Für die bauphysikalische Bewertung einer Konstruktion hinsichtlich des Feuchteschutzes wird heute immer noch das Glaser-Verfahren herangezogen, das jedoch über den Eintrag von Feuchte über Diffusion hinaus keine anderen Feuchtequellen wie Einbaufeuchte oder Niederschlag berücksichtigt. Hierzu schreibt die DIN 4108-3 hygrothermische Simulationen mittels geeigneter Software wie zum Beispiel WUFI vor, mit der sich über physikalische Modelle die Wärme- und Feuchteverhältnisse in Bauteilen realitätsnah abbilden lassen. Daniel Zirkelbach, Philipp Kölsch

□ Häufig legen Architekten und Fachplaner den Fokus bei ihrer Arbeit auf energetische Aspekte, während der Feuchteschutz der Bauteile eher vernachlässigt wird. Dies führt immer wieder zu teils gravierenden Feuchteschäden, da gerade gut gedämmte Bauteile aufgrund der geringen Wärmeverluste im Mittel außen kühler bleiben und infolgedessen langsamer trocknen.

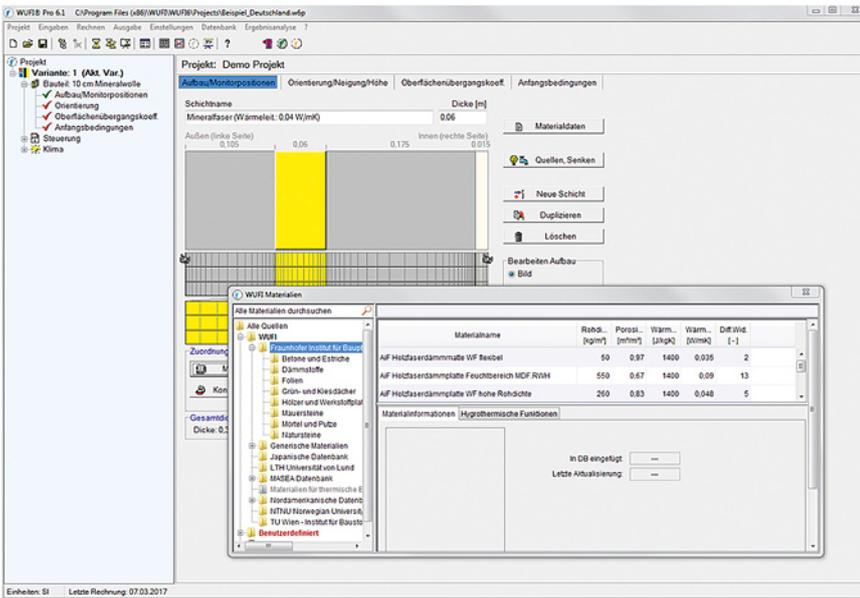
In der Praxis weisen Bauteile in Abhängigkeit von den Randbedingungen und den verwendeten Materialien im Jahresverlauf unterschiedlich hohe Feuchtegehalte auf – sind aber nie ganz trocken. Dabei kann die Feuchte mal von innen, mal von außen in die Konstruktion gelangen. So führen die unterschiedlichen Temperaturen und Feuchtegehalte zwischen Innen- und Außenklima zu Wasserdampf-Diffusions-Strömen durch die Gebäudehülle. Unter mitteleuropäischen Klimabedingungen sind diese meist von innen nach außen gerichtet. In anderen Klimazonen oder bei klimatisierten oder gekühlten Gebäuden können sich diese Diffusions-Ströme aber auch umkehren. Ebenfalls große Feuchtemengen können in die Konstruktion gelangen, wenn zum Beispiel saugfähige Baustoffe und

Bauteile dem Regen ausgesetzt sind, Leckagen in Leichtkonstruktionen die Luftkonvektion begünstigen oder nicht abgedichtete Kellerwände an feuchtes Erdreich grenzen.

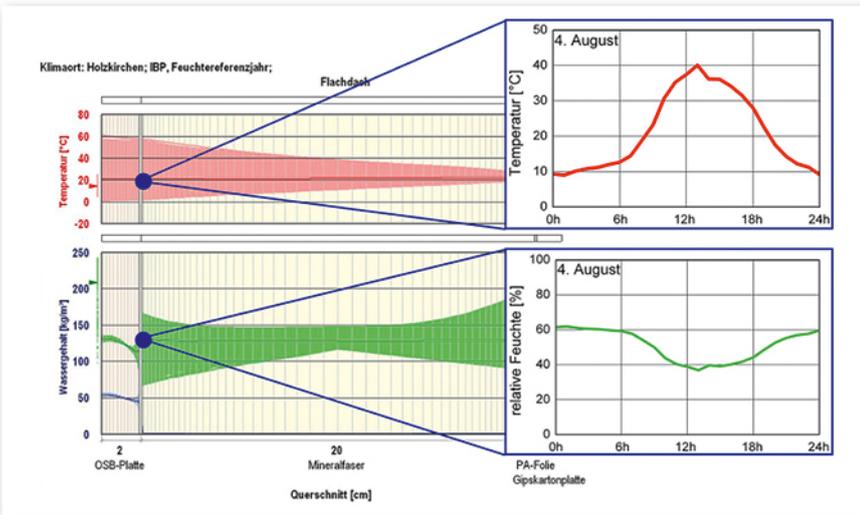
Beim Feuchteschutz geht es daher nicht darum, ein Bauteil vollständig trocken zu halten, sondern zu gewährleisten, dass Feuchteaufnahme und Trocknung möglichst ausgeglichen sind und sich im Bauteil weder langfristig noch im Jahresverlauf unzulässig hohe Feuchtegehalte einstellen, die die Materialien schädigen können.

## Feuchtebilanz mit Glaser

Ein einfaches, stationäres Verfahren zur Feuchtebilanzierung, bei dem rechnerisch oder grafisch eine Bilanz der Diffusionsströme erstellt wird, ist in der bauaufsichtlich eingeführten DIN 4108-3: 2014 [1] enthalten. Feuchteschutz ist also in Deutschland gesetzlich vorgeschrieben. Das in der Norm beschriebene sogenannte Glaser-Verfahren beschränkt sich allerdings auf den winterlichen Tauwasserschutz – also auf den Eintrag von Feuchte über Diffusion aus dem Innenraum. Andere Feuchtequellen, wie Einbaufeuchte oder Niederschlag, werden nicht



**1 Eingabe des Bauteils und Zuweisung der Materialdaten in WUFI Pro.**



**2 WUFI-Simulation gem. [2]: Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte unter der äußeren Beplankung eines Flachdaches an einem Sommertag.**

berücksichtigt und können damit dementsprechend auch nicht beurteilt werden.

Für das Außen- und Innenklima werden Blockrandbedingungen zugrunde gelegt, die eine verkürzte Sommer- und Winter-Periode abbilden. Die im Glaser-Verfahren angewendeten Temperaturen und Feuchtegehalte sind jedoch nicht direkt aus dem realen Außen- und Innenklima abgeleitet, sondern zu Bemessungszwecken weiter modifiziert. Die Werte lassen sich daher nicht an andere Nutzungsbedingungen anpassen, weshalb die Anwendung des Verfahrens dementsprechend auf nicht klimatisierte Wohngebäude bzw. Gebäude mit ähnlicher Nutzung beschränkt ist.

Bei abweichenden Gebäudenutzungen, erhöhter Einbaufeuchte in der Konstruktion, Einfluss von Regen, extremem Außenklima oder Dachbegrünungen schreibt die Norm deshalb eine hygrothermische Simulation nach DIN EN 15026 [2] vor.

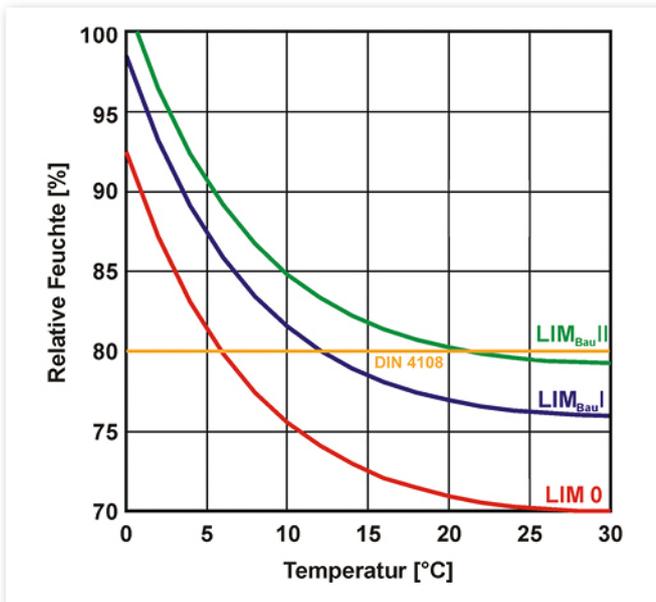
## Hygrothermische Simulation

Die hygrothermischen Simulationen werden in Anhang D der DIN 4108-3 als „genauere Berechnungsverfahren“ beschrieben

und sind nicht nur für die Fälle gedacht, wo der Anwendungsbereich von Glaser an seine Grenzen stößt, sondern können auch in den Fällen für eine genauere Überprüfung herangezogen werden, in denen der Nachweis mit Glaser gar nicht gelingt.

Im Zweifelsfall stellt eine hygrothermische Simulation immer das höherwertige und maßgebende Bewertungsinstrument dar. Die hygrothermische Simulation ermöglicht es, über physikalische Modelle die Wärme- und Feuchteverhältnisse in Bauteilen realitätsnah abzubilden und dabei fast alle bauphysikalisch relevanten Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Dies sind z.B.

- Regenwasseraufnahme und Flüssigtransport,
- Wärmespeicherung und thermische Trägheit,
- Einfluss der Feuchte auf die Dämmwirkung der Materialien,
- Feuchtespeicherung und Austrocknung,
- Berücksichtigung von Einbaufeuchte,
- konvektiver Feuchteintrag durch Infiltration,
- Eisbildung und Verdunstung,
- Erwärmung der Oberflächen durch die Sonnenstrahlung sowie



**3** Minimale Wachstums-Voraussetzungen für Schimmelpilzbildung auf biologisch nicht verwertbaren (grüne Kurve, Lim Bau II) und biologisch verwertbaren Baustoffen (blaue Kurve, LIM Bau I) sowie dem Nährboden im Labor (LIM 0). Auch der Grenzwert nach DIN 4108 von 80 % r.F. ist eingetragen.

- Unterkühlung durch langwellige Abstrahlung und Tauwasserbildung.

Für eine zuverlässige Simulation sind neben geeigneten Klimadaten in stündlicher Auflösung auch Materialkennwerte erforderlich, die neben Angaben zur Wärmeleitfähigkeit und zum Diffusionswiderstand auch solche zu Feuchtespeicherung, Flüssigtransport und eventuell auch feuchteabhängige Werte zur Wärmeleitfähigkeit oder dem Diffusionswiderstand (z.B. bei variablen Dampfbremsen) beinhalten. Das Raumklima kann für die Simulation über verschiedene Modellansätze berücksichtigt werden, wobei sich vor allem eine Ableitung vom Außenklima wie im Ansatz der DIN EN 15026 gut bewährt hat.

### Die Vorgehensweise mit Software

Wie man bei einer solchen Simulation in der Praxis vorgeht, soll kurz anhand des vom Fraunhofer-IBP entwickelten Programms WUFI® Pro (Wärme Und Feuchte Instationär) erläutert werden [3]. Dabei ist zunächst der Bauteilaufbau mit seinen verschiedenen Schichten und Dicken einzugeben (Abb. 1). Für die Materialdaten kann man auf Datensätze zurückgreifen, die in der Datenbank enthalten sind und sowohl generische als auch herstellerspezifische Materialien aus Neu- und Altbau umfassen. Je nachdem, ob es sich um eine Wand oder ein Dach handelt, werden Neigung und Orientierung des Bauteils eingegeben und die Oberflächen-Übergangs-Parameter für Wärme, Feuchte, Schlagregen und Strahlung zugewiesen. Das Außenklima

wird ebenfalls aus der Datenbank gewählt (Abb. 6) und für die Raumklima-Bedingungen stehen Modelle aus verschiedenen Normen und Merkblättern zur Verfügung. Auch spezielle Einbausituationen wie Dachbegrünungen, unterschiedlich belüftete Steildächer oder Verschattungen durch Dachterrassen oder PV-Module können erfasst und anhand von einfachen Leitfäden eingegeben und beurteilt werden.

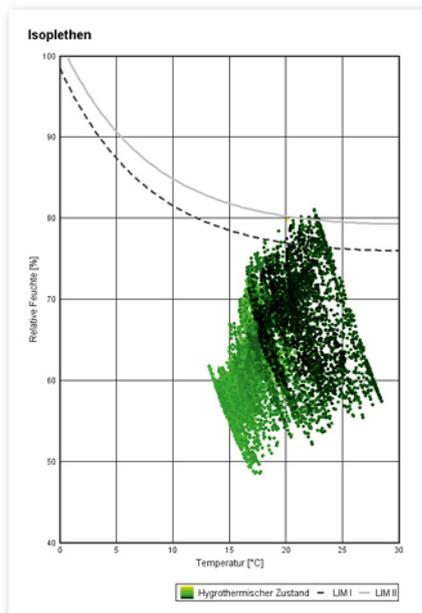
Die Fehlertoleranz des geplanten Bauteils wird dadurch verbessert, weil die Bauteile mit ihrer Einbaufeuchte berücksichtigt und auch im Einbauzustand nicht als perfekt dicht angenommen werden. Auch bei sorgfältiger Ausführung verbleiben immer noch kleinere Fehlstellen, beispielsweise in der Luftdichtheitsebene oder der Regendichtung von Anschlussfugen. Der daraus resultierende Feuchteeintrag kann über geeignete Modelle nach DIN 68800 oder WTA-Merkblatt 6-2 [4] einfach berücksichtigt werden.

### Simulationsdauer und Ergebnisse

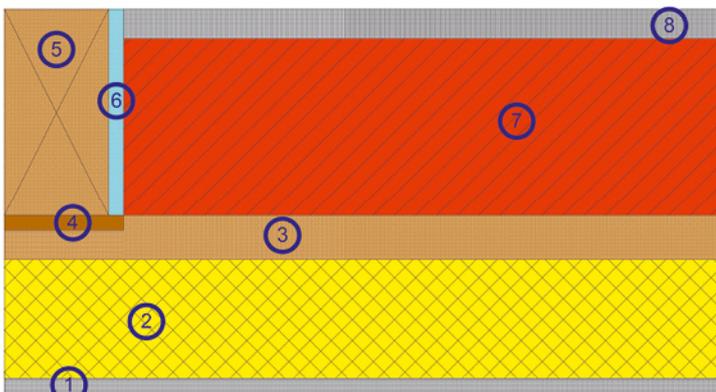
Die Simulation sollte immer so lange durchgeführt werden, bis sich der Gesamtwassergehalt in einem eingeschwungenen Zustand befindet. Das bedeutet, dass sich die Feuchtegehalte nur noch im Jahresverlauf, aber nicht mehr von Jahr zu Jahr verändern. Wird dieser Zustand nicht erreicht, treten langfristige Feuchte-Akkumulationen auf, die womöglich nach vielen Jahren zu kritischen Feuchtebedingungen im Bauteil führen. Bis der eingeschwungene Zustand erreicht ist, sind bei dichten Konstruktionen manchmal mehr als zehn Jahre zu simulieren, bei diffusionsoffenen Bauweisen geht es in der Regel deutlich schneller.

Als Ergebnis einer hygrothermischen Simulation werden die zeitlichen Verläufe von Temperatur und Feuchte bzw. Wassergehalt an den Bauteiloberflächen und in den einzelnen Materialschichten ausgegeben. In Abb. 2 ist exemplarisch der Tagesgang für ein Flachdach an einem warmen Sommertag zu sehen. Die Bewertung des Gesamtwassergehalts erfolgt ähnlich wie bei Glaser. Auch hier gilt, dass der Feuchteeintrag nicht größer sein soll als die Trocknungsmenge – dies kann nur temporär während der Einschwingphase, aber nicht langfristig toleriert werden, da dies sonst eine permanente Feuchte-Anreicherung im Bauteil

bedeuten würde. In zusätzlichen Schritten werden die Feuchtegehalte in einzelnen Schichten, Teilbereichen der Schichten oder auch an einzelnen Positionen, wie zum Beispiel der Innenoberfläche der Konstruktion bewertet. Die zulässigen Grenzwerte hängen dabei von den verwendeten Materialien und der jeweiligen Fragestellung ab. Im Folgenden werden die wichtigsten Bewertungskriterien kurz vorgestellt.

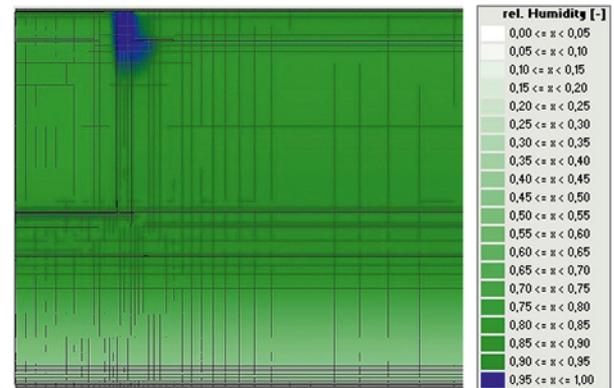


**4** Isoplethen-Darstellung zur Prognose des Schimmelwachstums auf einer Innenoberfläche als Ergebnis einer hygrothermischen Simulation. Die dunkleren Punkte bedeuten hierbei spätere Zeitpunkte im Simulationsverlauf.



- |                                      |                               |
|--------------------------------------|-------------------------------|
| 1 Innenputz (Lehm)                   | 5 Holzfachwerk                |
| 2 Mineralfaserplatte, Fabr. Multopor | 6 Putz / Mörtel               |
| 3 Lehmörtel                          | 7 Vollziegel (Gefachmauerung) |
| 4 Putzträgermatte (Schiff)           | 8 Außenputz                   |

5 Aufbau einer Fachwerkwand im Querschnitt (links) sowie das Profil der relativen Feuchte (rechts) als Ergebnis der zweidimensionalen hygrothermischen Simulation.



### Kriterien zur Beurteilung der Ergebnisse

Besonders empfindlich gegenüber hohen Feuchten sind bekanntermaßen Holzkonstruktionen. In Massivholz bzw. Holz- oder Naturfaserwerkstoffen sollen nach DIN 68800 [5] Grenzwerte von 20 M.-% bzw. 18 M.-% nicht längerfristig überschritten werden, um Holzfäule bzw. Festigkeitsverluste zu vermeiden. Diese niedrigen Grenzwerte führen allerdings erst bei Temperaturen von deutlich über 20 °C tatsächlich zu Holzfäule und sind damit vor allem im Winter mit sehr großen Sicherheiten behaftet. Ein genaueres Modell zur Prognose von Holzfäule, das nicht nur die Feuchte sondern auch die Temperaturverhältnisse berücksichtigt, ist im WTA Merkblatt 6-8 [6] beschrieben und ermöglicht eine deutlich präzisere Bewertung der Simulations-Ergebnisse.

Frostschäden können auftreten, wenn nicht beständige Materialien hohe Wassergehalte aufweisen und gleichzeitig die Temperaturen deutlich unter der Frostgrenze liegen – dabei ist allerdings zu beachten, dass das in den Poren gebundene Wasser aufgrund des kapillaren Unterdrucks eventuell erst bei deutlich niedrigeren Temperaturen friert als freies Wasser. Ursächlich für den Schaden ist die Volumenzunahme bei der Eisbildung, die die Porenstruktur aufsprengen kann. Wo Frostgefahr besteht und hohe Wassergehalte auftreten, haben daher nicht frostbeständige Materialien im Grunde nichts zu suchen. Bei der Sanierung, insbesondere mit Innendämmung, kann dies aber bezüglich der ursprünglich eingebauten Materialien oft nicht gewährleistet werden. Ist die Frostbeständigkeit nicht näher bekannt, kann nach WTA-Merkblatt 6-5 [7] eine Frostschadensfreiheit gewährleistet werden, wenn in den Materialien ein Durchfeuchtungsgrad von 30% nicht überschritten wird. Unter Umständen können auch höhere Werte toleriert werden – als alternativer Grenzwert dient dann eine relative Luftfeuchte von maximal 95% in den Poren des Materials.

Auch wenn Dämmstoffe wie XPS, EPS oder Mineralfaser gegen Feuchte eher unempfindlich sind, können erhöhte Feuchtegehalte die Dämmwirkung mindern. Bildet sich durch Feuchteintrag Tauwasser in Faserdämmungen, sollten die Mengen so gering sein, dass ein Abfließen des Kondensats vermieden wird. In DIN EN ISO 13788 [8] wird dafür ein Grenzwert von 200 g/m<sup>2</sup> genannt.

### Schimmelpilze und Korrosion

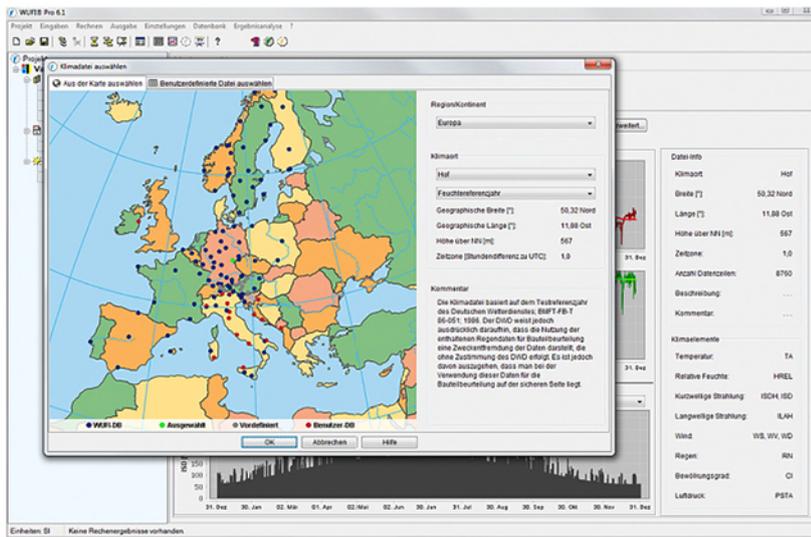
Auf Oberflächen und in Hohlräumen können bei hohen Feuchten Schimmelpilze wachsen. Der meist herangezogene Grenzwert von 80% r.F. bezieht sich dabei ausschließlich auf kalte Innenoberflächen im Winter. Bei höheren Temperaturen im Sommer gelten niedrigere, bei deutlich geringeren Temperaturen dagegen höhere Grenzwerte. Die in Abb. 3 dargestellten Grenzkurven nach [9] berücksichtigen zusätzlich zur Luftfeuchte den Einfluss der Temperatur und der Nährstoffqualität des Untergrunds (biologisch verwertbare und nicht verwertbare Baustoffe). Noch genauer lässt sich die Schimmelpilzgefahr mithilfe des kostenfreien Bewertungsprogramms WUFI-Bio ermitteln, das die Feuchteverhältnisse einer generischen Schimmelpilzspore simuliert und damit Aussagen über das Risiko von Auskeimung der Spore und Wachstums-Intensität ermöglicht [9].

Konstruktionen, die metallische Bestandteile enthalten, können bei hohen Feuchten korrodieren. Die größte Bedeutung hat dies bei Bewehrungsstahl in karbonisierten Betonbauteilen. Hier kann davon ausgegangen werden, dass unterhalb einer relativen Porenluftfeuchte von 80% r.F. im karbonisierten Beton die Korrosion des Stahls ausgeschlossen ist [10]. Aber auch der Korrosionsprozess weist neben der Feuchte- eine Temperaturabhängigkeit auf. Eine instationäre Prognose des Korrosionsfortschritts von Metall in verschiedenen mineralischen Baustoffen ist mithilfe von WUFI-Korr möglich. Dieses Modell ist aus einer Kooperation des Fraunhofer-IBP mit dem Politecnico di Milano [11] entstanden und steht Planern ebenfalls kostenfrei als Werkzeug zur Verfügung.

### Fazit

Bauteile sind nie vollständig trocken und müssen es auch nicht sein – wesentlich für den Feuchteschutz ist das richtige Verhältnis zwischen Befeuchtung und Trocknung. Die Regel sollte dabei lauten: So dicht wie nötig, aber eben auch so diffusions-offen wie möglich. Dann kann Feuchte auch ohne stärkere Erwärmung gut austrocknen.

Bei der Feuchteschutz-Beurteilung der Konstruktionen sind die Befeuchtungsquellen und die Trocknungs-Bedingungen so



6 In WUFI werden zahlreiche Klimastandorte direkt mitgeliefert.

genau wie möglich zu erfassen sowie realistische Sicherheiten für übliche Ausführungsqualitäten vorzusehen. Dies ist mit einer Beurteilung nach Glaser nur sehr eingeschränkt möglich, da lediglich der winterliche Tauwasserschutz enthalten ist. Mit hygrothermischen Simulationen lassen sich dagegen fast alle baupraktisch relevanten Vorgänge wie Regenwasseraufnahme, Strahlungsabsorption, Umkehrdiffusion, Feuchtespeicherung, Flüssigtransport, Austrocknung von Baufeuchte, langfristige Feuchteakkumulationen usw. berücksichtigen und bewerten.

Die Bewertung erfolgt sehr praxisnah, nämlich spezifisch für die Regen- und Strahlungsbelastung am jeweiligen Standort in Abhängigkeit von Orientierung und Neigung des Bauteils. Die Nutzung des Gebäudes ist beliebig von der Kühllhalle bis zum Schwimmbad; das Bauteil kann je nach Fragestellung zu Beginn der Berechnung trocken oder feucht angenommen werden. Dabei wird nicht nur Funktionieren oder Versagen eines perfekt ausgeführten Bauteils erfasst, sondern es können auch angemessene Sicherheiten beispielsweise für Luftundichtheiten oder Regenleckagen vorgesehen werden.

Da die Qualität der Simulations-Ergebnisse direkt von der Qualität der Eingabedaten abhängt, sind sowohl geeignete Material- und Klimadaten als auch ein ausreichendes Grundwissen und eine gewisse Erfahrung seitens des Planers oder Sachverständigen erforderlich. Im Gegenzug ist dafür aber auch eine deutlich umfassendere und spezifischere Beurteilung der Bauteile möglich. ■

### Literatur

- [1] DIN 4108-3:2014-11: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung (2014).
- [2] DIN EN 15026:2007-07: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Deutsche Fassung (2007).
- [3] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994
- [4] WTA Merkblatt 6-2:2014: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Fraunhofer IRB Verlag, München 2014.
- [5] DIN 68800-2 Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. Februar 2012.

- [6] WTA Merkblatt 6-8:2012-08: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation. Fraunhofer IRB Verlag, München 2016.
- [7] WTA-Merkblatt E 6-5-12/D: Innendämmung nach WTA II – Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren. Entwurf November 2012.
- [8] EN ISO 13788:2012: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Oberflächentemperatur zur Vermeidung von kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren. Beuth Verlag, Berlin 2012.
- [9] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzen auf Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart, 2001.
- [10] Marquardt, H.: Korrosionshemmung in Betonsandwichwänden durch nachträgliche Wärmedämmung. Dissertation Technische Universität Berlin. 1990.
- [11] Carsana, M.; Marra, E. und Bertolini, L.: Corrosion behaviour of metal inserts in simulated ancient masonry mortars. Construction and Building Materials 95 (2015). S. 457–466

### Dr.-Ing. Daniel Zirkelbach

studierte an der TU München Bauingenieurwesen und hat im Oktober 2016 an der Universität Stuttgart promoviert. Von 2001 bis 2004 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen; seit 2004 Gruppenleiter und seit 2007 stellvertretender Leiter der Abteilung Hygrothermik. Seine beruflichen Schwerpunkte sind hygrothermische Simulationen, Feuchteschutz und Bauen in anderen Klimazonen. Mitglied im Sachverständigenausschuss Außenliegende Wärmedämmung SVA B3 des DIBt und in den Arbeitsgruppen Innendämmung im Bestand und Feuchtetechnische Bemessung von Holzbaukonstruktion der WTA.



### Philipp Kölsch M.-Eng.

studierte an der FH München Versorgungs- und Gebäudetechnik sowie an der FH Augsburg Energie Effizienz Design. Er ist seit 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Hygrothermik am Fraunhofer Institut für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen. Seine beruflichen Schwerpunkte sind hygrothermische Simulationen, Feuchteschutz und Bauen in anderen Klimazonen.

