

# HYGROTHERMISCHE SIMULATION

## Anwendungsmöglichkeiten in der Planung

Daniel Zirkelbach, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen



Sankt-Gotthard-Hospiz auf 2.091 m Höhe: Extremes Außenklima, realisiert mit Stamisol DW Dachunterspannbahn, funktionssicher auch nach einem Winter mit freier Bewitterung der Dachunterspannbahn

## Feuchtebilanz von Bauteilen

Bauteile sind in der Regel nie ganz trocken. In Abhängigkeit von den Randbedingungen und den verwendeten Materialien stellen sich im Jahresverlauf variierende Gleichgewichtsfeuchtegehalte ein.

Infolge der Klimaunterschiede zwischen innen und außen ergeben sich Wasserdampfdiffusionsströme durch die Bauteile, die bei den Klimaverhältnissen in Deutschland meist von innen nach außen verlaufen. Nur bei hohen Außentemperaturen bzw. kühlem Raumklima richtet sich der Diffusionsstrom nach innen. Deutlich größere Feuchtemengen können in das Bauteil gelangen, wenn eine saugfähige Außenoberfläche in Kontakt mit Regen oder Spritzwasser kommt. Weiterhin tragen Tauwasserbildung auf den Bauteiloberflächen, Luftkonvektion und Erdfeuchte zur Befeuchtung bei. Feuchteaufnahme und Trocknung müssen sich dabei die Waage halten, so dass weder im Jahresverlauf noch langfristig kritisch hohe Feuchtegehalte erreicht werden. Die Idee der Feuchtebilanz ist bereits seit vielen Jahren im sogenannten Glaserverfahren enthalten – es ist allerdings beschränkt auf den winterlichen Tauwasserschutz und lässt somit wichtige Effekte wie Niederschlag oder Erwärmung durch Sonnenstrahlung außer Acht. Die Neufassung der DIN 4108-3 [1] von 2014 sieht daher für alle Fälle, die außerhalb des Anwendungsbereichs von Glaser liegen, eine hygrothermische Simulation nach DIN EN 15026 [2] vor. Diese berücksichtigt alle relevanten Einflussfaktoren und erlaubt damit eine deutlich umfassendere und zuverlässigere Beurteilung der Feuchteverhältnisse in Bauteilen.

Dieser Beitrag zeigt die Unterschiede zwischen Glaser und hygrothermischer Simulation und stellt die Anwendungsbereiche der Simulationen für die Planung anhand von Praxisbeispielen dar.

### Wann reicht Glaser – wann sollte simuliert werden?

Beim Glaser-Verfahren wird grafisch oder rechnerisch eine Bilanz der Diffusionsströme erstellt, die sich im Jahresverlauf in bzw. durch die Bauteile einstellen. Als Raum- und Außenklima werden Blockrandbedingungen für den Wasserdampfpartialdruck verwendet, die sich zwar an der Realität orientieren, aber so modifiziert wurden, dass sich in verkürzten und extremen „Tau- und Verdunstungsperioden“ in der Summe ähnliche Diffusionsströme ergeben wie in einem realen Jahr. Aufgrund dieser Modifikation können die Randbedingungen für das Verfahren nicht eindeutig aus den realen Verhältnissen abgeleitet oder angepasst werden. Die Anwendung bleibt daher beschränkt auf nicht klimatisierte Wohngebäude oder wohnähnlich genutzte Räume und ein „normales“ Außenklima.

Trotz dieser Einschränkungen hat sich das Glaser-Verfahren in den letzten etwa 35 Jahren durchaus etabliert und zumindest für die bis 2014 gültigen Randbedingungen auch bewährt – nämlich für die Bauteile, für die das Verfahren entwickelt wurde: Leichtbaukonstruktionen bei denen weder Einbaufeuchte noch Regenwasseraufnahme oder Strahlungsabsorption eine entscheidende Rolle spielen. Die meisten anderen Konstruktionstypen sind entweder aufgrund der in der Norm genannten Anwendungsgrenzen von der Beurteilung mit Glaser ausgeschlossen

oder von der Nachweispflicht befreit. Im ersten Fall sind Effekte oder Klimaelemente dominant, die in Glaser nicht berücksichtigt werden: beispielsweise Einbaufeuchte, Regenwasseraufnahme, extremes Außenklima, Dachbegrünungen oder Räume, die klimatisiert oder nicht für Büro- und Wohnzwecke genutzt werden. Im zweiten Fall haben die Bauweisen ihre langfristige Funktionsfähigkeit in der Praxis belegt und können daher ausgeführt werden, auch wenn sie die Glaser-Kriterien eventuell nicht erfüllen.

Die DIN 4108-3 [1] verweist in Ihrer Neufassung von 2014 an vielen Stellen auf die in Anhang D als „genauere Berechnungsverfahren“ beschriebenen Simulationen – und zwar nicht nur beim Verlassen des Anwendungsbereichs, sondern explizit auch in den Fällen, in denen der Glaser-Nachweis für ein Bauteil innerhalb des Anwendungsbereichs zunächst nicht gelingt. Eine hygrothermische Simulation stellt also im Zweifel das höherwertigere und maßgeblichere Bewertungsverfahren dar, da über physikalische Modelle eine realitätsnahe Berechnung der Wärme- und Feuchteverhältnisse ermöglicht wird und fast alle baupraktisch relevanten Einflussgrößen berücksichtigt werden. Dies sind u. a.:

- Regenwasseraufnahme und Flüssigtransport
- Feuchtespeicherung und Austrocknung von

Einbaufeuchte

- Wärmespeicherung und thermische Trägheit
- Einfluss des Feuchtegehalts auf die Dämmwirkung
- Wirkung feuchtevariabler Dampfbremsen
- Eisbildung und Verdunstung
- Erwärmung durch Sonnenstrahlung
- Unterkühlung durch langwellige Abstrahlung und Tauwasserbildung

Das Wesentliche für eine zuverlässige Berechnung sind geeignete Materialkennwerte, die neben den für Glaser benötigten Daten auch die Feuchtespeicherung, den Flüssigtransport und die Feuchteabhängigkeit einiger Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit oder Wasserdampfdiffusionswiderstand beinhalten. Da einige Schadensmechanismen auch durch kurzfristige Vorgänge wie den Tagesgang des Außenklimas beeinflusst werden (vgl. Bild 1), sind zudem geeignete Klimadaten für den jeweiligen Standort in normalerweise stündlicher Auflösung erforderlich. Sie sollten je nach Fragestellung neben Temperatur und Luftfeuchte auch Sonnenstrahlung, Wind, Niederschlag und atmosphärische Gegenstrahlung enthalten. Das Raumklima kann in gemessener Form, durch geeignete nutzungsabhängige Modelle oder entsprechend der geplanten Sollwerte abgebildet werden.

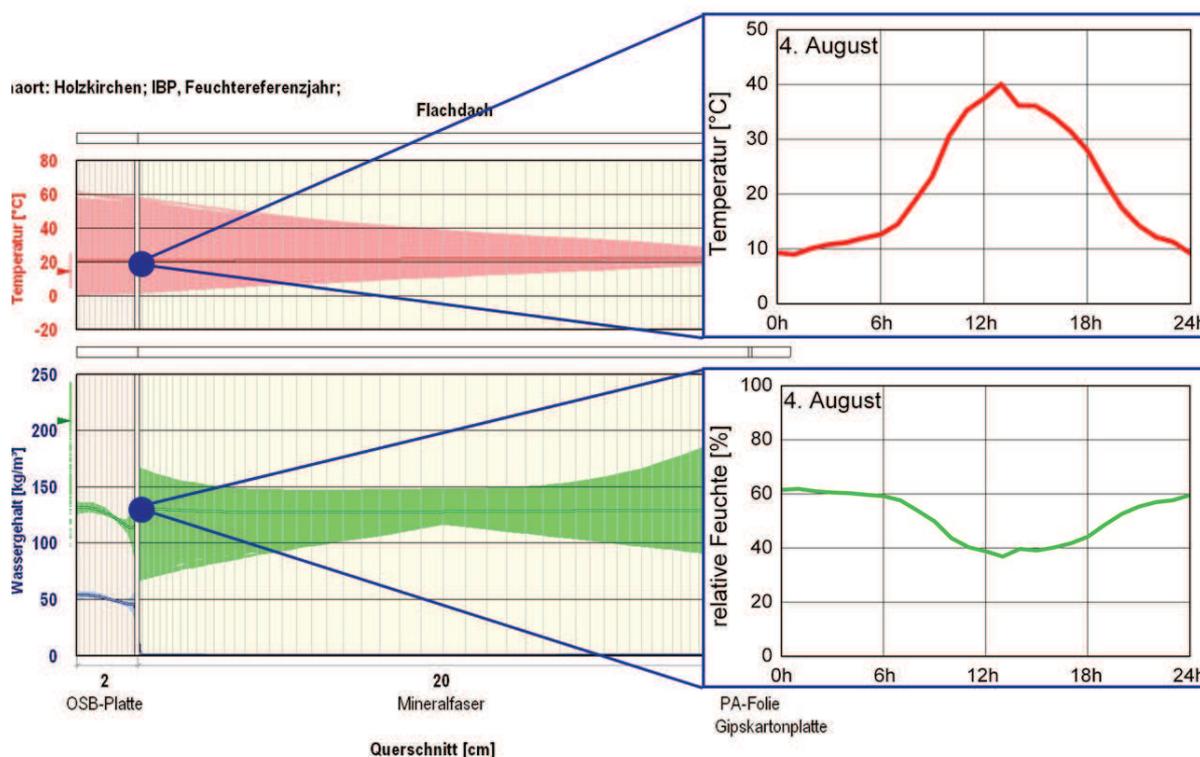


Bild 1: WUFI® Simulation nach [3] – Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte unter der äußeren Bepankung eines Flachdaches an einem Sommertag

## Vorgehensweise bei der Simulation

Die Vorgehensweise zur Durchführung und Bewertung einer hygrothermischen Bauteilberechnung wird hier beispielhaft anhand der eindimensionalen Simulationssoftware WUFI® Pro (Wärme Und Feuchte Instationär) [3] dargestellt. Bild 2 zeigt die Benutzeroberfläche von WUFI® mit den Eingaben für eine innengeämmte Mauerwerkswand.

Zunächst wird der Wandaufbau mit den Materialschichten und -dicken eingegeben. Dabei enthalten die Programme in der Regel eine Materialdatenbank, die sowohl neue und herstellerspezifische als auch generische historische Materialdaten umfasst. Neben den Standardkennwerten zu Diffusionswiderstand und Wärmeleitfähigkeit sind zusätzlich in Laborversuchen ermittelte Daten für Feuchtespeicherung und Flüssigtransport sowie die Abhängigkeit der Kennwerte von Temperatur und Feuchte (beispielsweise die Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wassergehalt) hinterlegt. Der Nutzer hat auch die Möglichkeit, eigene Materialdaten auf Basis von Messwerten oder Datenblättern einzugeben oder die hinterlegten Daten bei Bedarf objektspezifisch anzupassen. Dabei sind allerdings die große Bandbreite und die gegenseitige Abhängigkeit der unterschiedlichen Kennwerte zu berücksichtigen und unsichere Parameter ggf. mit Sensitivitätsanalysen zu überprüfen.

Dem zu simulierenden Bauteil (Dach, Wand) wird dann eine bestimmte Neigung und Orientierung zugewiesen, um die in den Klimadaten enthaltenen richtungsabhängigen Lasten wie Sonnenstrahlung oder Schlagregen korrekt berechnen zu können.

Zur Berücksichtigung des Außenklimas sind zahlreiche Klimadatensätze mit stündlichen Werten enthalten. Für das Innenklima von Wohn- und Bürogebäuden kann auf unterschiedliche Modelle zurückgegriffen werden, die typische Verhältnisse meist in Abhängigkeit vom Außenklima abbilden (z. B. nach EN 15026 [2], WTA 6-2 [4], EN 13788 [5], oder ASHRAE 160 [6]). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit andere Datensätze, eigene Messwerte oder Laborbedingungen in der Simulation zu verwenden.

Die Einwirkung der Klimarandbedingungen auf die Bauteiloberfläche wird über die Oberflächenübergangparameter berücksichtigt. Dabei führt beispielsweise die höhere Strahlungsabsorptionszahl einer dunklen Oberfläche zu einer stärkeren Erwärmung der Außenoberfläche oder der zusätzliche Diffusionswiderstand ( $s_d$ -Wert) eines Anstrichs zu einer langsameren Trocknung.

Zu Beginn der Berechnung können sowohl typische Baufeuchten als auch rechnerisch ermittelte oder gemessene Feuchteprofile angenommen werden. Unterschiedliche Quell- und Senkenfunktionen bieten zudem die Möglichkeit, mehrdimensionale Effekte wie Hinterlüftung, Konvektion, Schlagregenleckagen o. ä. vereinfacht eindimensional zu berücksichtigen (vgl. auch Hilfsmodelle nach [4]). Startzeitpunkt und Dauer der Berechnung werden situationspezifisch gewählt. Dabei benötigen diffusionshemmende Konstruktionen erfahrungsgemäß mehr Zeit als diffusionsoffene Bauteile, um den sogenannten „eingeschwungenen Zustand“ zu erreichen, bei dem sich die Verhältnisse nur noch mit den Jahreszeiten aber nicht mehr von Jahr zu Jahr ändern. Auch langfristige, langsame Feuchteakkumulationen, die erst nach vielen Jahren zu kritischen Verhältnissen führen, können erfasst werden.

Meist sind Berechnungszeiträume von etwa drei bis zehn Jahren sinnvoll; die Simulation dauert dabei allerdings meist nur wenige Minuten.

Die Eingabe der erforderlichen Daten und die Handhabung der Software, ist vergleichsweise einfach – allerdings erfordert es sowohl entsprechende Fachkenntnisse als auch einige Erfahrung um die Eingaben korrekt wählen zu können. Unrealistische Annahmen wie beispielsweise eine Berechnung ohne Schlagregen oder mit falschen Strahlungsabsorptionswerten können einen verfälschenden Einfluss auf die berechneten Verhältnisse und damit auf die Bewertung des Bauteils haben.

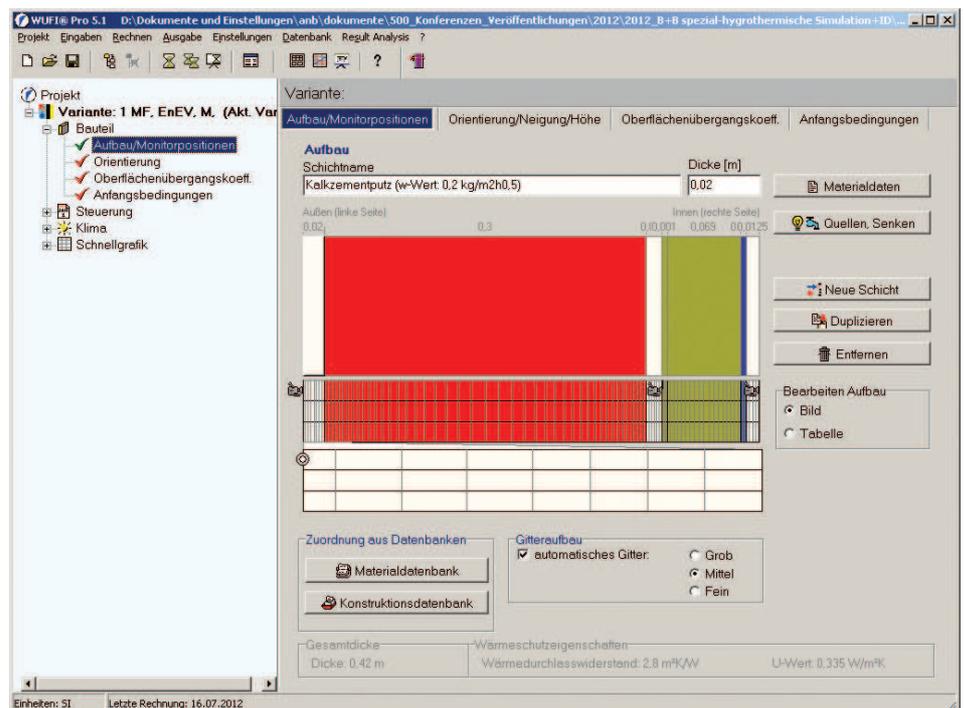


Bild 2: Benutzeroberfläche der hygrothermischen Simulationssoftware WUFI® Pro: Bauteilaufbau einer Ziegelwand mit Innendämmung

## Bewertung der Ergebnisse

Ergebnis einer hygrothermischen Simulation sind die zeitlichen Verläufe der Temperatur- und Feuchte (vgl. Bild 1) bzw. die Wassergehalts- und Temperaturverläufe in den verschiedenen Materialschichten. Im Unterschied zum Glaser-Verfahren gibt es kaum allgemein gültige „Versagungskriterien“; die Ergebnisse müssen einzeln ausgewertet und in Abhängigkeit von den eingesetzten Materialien beurteilt werden. Wie bei der Wahl der Eingabedaten sind dazu Fachkenntnisse und Erfahrung erforderlich. Einige wichtige Bewertungskriterien werden hier kurz vorgestellt.

## Hygrothermisches Verhalten

In der Konstruktion darf sich langfristig keine Feuchte anreichern. Daher wird zunächst der Verlauf des Gesamtwassergehalts betrachtet: dieser darf fallen oder auf dem Ausgangsniveau verbleiben, sollte aber nicht über den gesamten Berechnungszeitraum ansteigen. Weiterhin werden die Feuchteverhältnisse in den einzelnen Materialschichten bewertet. Auch hier darf der Wassergehalt über den gesamten Berechnungszeitraum nicht ansteigen. Dies könnte auftreten, wenn beispielsweise die Einbaufeuchte aus einer Schicht über viele Jahre lang austrocknet und sich parallel dazu in einer anderen Materialschicht anreichert.

## Frost

Im eingeschwungenen Zustand sind materialabhängig unterschiedliche Wassergehalte zulässig. Frostbeständige Putze, Mauerwerk oder Beton vertragen im Prinzip Wassergehalte bis hin zur freien Sättigung – hier ist allerdings zu beachten, dass starke Durchfeuchtungen das Risiko für Algen und Schimmel auf den Außenoberflächen erhöhen. Der Wassergehalt in frostempfindlichen Materialien sollte generell niedriger bleiben. Bei Kalksandstein treten Frostschäden bei den in Mitteleuropa üblichen Wintertemperaturen ab Wassergehalten von etwa 12 M.-% auf. Für viele andere Baustoffe sind jedoch keine Grenzwerte bekannt. Das WTA-Merkblatt zur Innendämmung [7] schlägt für nicht frostbeständige Materialien vor, einen Durchfeuchtungsgrad von 30 % bzw. eine relative Luftfeuchte in den Poren des Materials von 95 % r.F. nicht zu überschreiten. Bei diesen Verhältnissen können nach bisherigen Kenntnissen auch für empfindliche Materialien Frostschäden ausgeschlossen werden.

## Holzfäule

Bei Holz und Holzwerkstoffen dürfen zur Vermeidung von Holzfäule und Festigkeitsverlusten der Materialien nach DIN 68000 [12] 20 M.-% bzw. 18 M. % nicht längerfristig überschritten werden. Ähnliches gilt für andere organische Faserdämmungen. Die angegebenen Grenzwerte beinhalten allerdings gewisse Sicherheiten – erst ab Fasersättigung oberhalb von etwa 25 bis 30 M.-% können die Pilze dem Holz so viel Feuchte entziehen, dass ein Abbau des Materials möglich wird. Bei niedrigen Temperaturen verlangsamt sich das Wachstum der Pilze und kommt schließlich ganz zum Erliegen. Ein Modell zur genaueren Beurteilung des Holzfäuletrisikos in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und der gleichzeitig auftretenden Temperatur ist in der Entwurfsfassung des WTA-Merkblatts 6-8 [8] zur Beurteilung von Holzkonstruktionen mithilfe von Simulationen enthalten.

## Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit

Bei feuchteunempfindlichen Dämmstoffen wie Hartschaumkunststoff oder Mineralfaser kann über Diffusion aufgenommene Feuchte zu einer Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit führen – diese Abhängigkeit ist in den Materialdaten meist hinterlegt, so dass der Nutzer hieraus sinnvolle Maximalwerte ableiten kann.

## Schimmel

Auf der Innenoberfläche sowie in Hohlräumen an den Materialgrenzen kann bei höheren Feuchteverhältnissen Schimmelpilzbildung auftreten. Aus der DIN 4108 [1] ist dazu der Grenzwert von 80 % r.F. bekannt, der sich auf das Schimmelpilzrisiko an Wärmebrücken im Winter bezieht, also bei etwa 12,5 °C. Bei höheren Temperaturen z. B. im Sommer beginnt das Risiko dagegen schon bei etwa 75 % r.F. In WUFI® sind für die Bewertung der Innenoberfläche die minimalen Wachstumsbedingungen für Schimmelpilze als Grenzisoplethen hinterlegt. Bleiben die Verhältnisse an der Oberfläche unterhalb der Kurvenwerte, ist Schimmelpilzwachstum nicht möglich. Bei Überschreitung der Grenzkurven hängt das Risiko von Dauer und Grad der Überschreitung ab. Eine genaue Bewertung ist z. B. mithilfe des biohygrothermischen Modells nach [10] möglich, das repräsentativ über eine Modellspore die spezifische Keimungs- und Wachstumsgeschwindigkeit der verschiedenen Schimmelspezies berechnet.

Dazu steht das Programm WUFI® Bio auf der WUFI® Website kostenlos zum Download zur Verfügung.

## Tauwasser in Faserdämmungen

Steinwolle oder Glasfaserdämmungen weisen oft nur eine geringe Feuchtespeicherung auf. Bei Feuchteeintrag über Diffusion kommt es daher auf der Kaltseite der Dämmung in manchen Fällen zu Tauwasserbildung. Dabei sollten die Mengen so begrenzt werden, dass kein Abfließen des Kondensats stattfindet. Die Neufassung der DIN EN ISO 13788 [5] warnt deshalb vor einer Überschreitung von 200 g/m<sup>2</sup>, wenn die Materialien im Tauwasserbereich keine Feuchte aufnehmen können.

## Korrosion

Metallische Konstruktionsbestandteile können bei hohen Feuchten korrodieren. Dies ist vor allem bei Bewehrungsstahl im Beton von Bedeutung, wenn nach der Karbonatisierung der Korrosionsschutz nicht mehr gewährleistet ist. Vereinfacht kann man davon ausgehen, dass Korrosion von Stahl im karbonatisierten Beton unterhalb einer relativen Luftfeuchte in den Materialporen von 80 % nicht mehr möglich ist [9]. Auch hier beschleunigen höhere Temperaturen den Korrosionsfortschritt, was bisher allerdings kaum berücksichtigt wurde. Daher hat das Fraunhofer IBP in den vergangenen Jahren in Zusammenarbeit mit dem Politecnico di Milano ein Modell entwickelt, das basierend auf [11] Korrosionsrisiko und -geschwindigkeit in verschiedenen mineralischen Baustoffen in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte quantifiziert. Der Postprozessor WUFI® Korr steht ebenfalls kostenlos zur Verfügung.

Weitere Bewertungskriterien können sich beispielsweise aus der feuchtebedingten Entfestigung, dem chemischen Verhalten oder der hygrothermischen Dauerhaftigkeit der eingesetzten Materialien ergeben und sind bei Bedarf zu berücksichtigen.

## Sichere Planung braucht Fehlertoleranz

Für die Planung eines Bauteils ist es nicht sinnvoll, von einem perfekt dichten und trockenen Regelquerschnitt auszugehen – eine solche Betrachtung favorisiert diffusionshemmende Konstruktionen, die sich in der Praxis aufgrund ihres geringen Trocknungspotentials jedoch eher als schadensanfällig herausstellen.

Grundregel bei der Feuchteschutzplanung sollte sein, Bauteile nur so diffusionsdicht wie nötig, gleichzeitig aber so diffusionsoffen wie möglich auszuführen. Dies erleichtert die Trocknung und führt dadurch zu mehr Fehlertoleranz.

## Einbaufeuchte

Um ein geeignetes Trocknungspotential zu gewährleisten, kann die Simulation beispielsweise mit einer realistisch erhöhten Anfangsfeuchte (z. B. für baufeuchtes Mauerwerk oder eine beregnete Holzschalung) gestartet werden. Diese Einbaufeuchte sollte wieder austrocknen können, ohne Schäden an der Konstruktion zu verursachen. Eine weitere Möglichkeit ist die Berücksichtigung von Feuchte, die im Einbauzustand beispielsweise durch Luftströmung oder Regenwassereintrag über Fehlstellen in die Konstruktion gelangt.

## Feuchteintrag über Konvektion

Leichtbaukonstruktionen sind nie vollständig luftdicht. Bei Druckdifferenzen, die vor allem im Winter aufgrund des thermischen Auftriebs im Innenraum entstehen, kommt es im oberen Bereich eines Gebäudes zu einer Durchströmung der Bauteile von innen nach außen. Wird auf dem Durchströmungsweg die Taupunkttemperatur des Raumklimas unterschritten, kommt es zur Tauwasserbildung innerhalb des Bauteils (siehe Bild 3).

Die über Konvektion eingetragene Feuchte sollte im Lauf des Jahres über Diffusion wieder austrocknen können, ohne Schäden zu verursachen. Da Konvektion in Leichtbauteilen die Regel und nicht die Ausnahme darstellt, fordert DIN 68000 [12] eine geeignete Berücksichtigung dieses Effekts bei der feuchtetechnischen Bemessung. Dies ist mit dem in [13] vorgestellten instationären Infiltrationsmodell in WUFI® einfach möglich. Die konvektive Feuchtemenge wird bauteil- und klimaspezifisch ermittelt und als Quelle an der vom Planer gewählten Position in das Bauteil eingebracht.

Bild 4 zeigt für ein beidseitig diffusionsdichtes Flachdach mit heller Oberfläche die bei verschiedenen Raumklimabedingungen berechneten Holzfeuchten in der außenseitigen OSB-Bekleidung. Bei Annahme einer perfekten Luftdichtheit (links) ergeben sich unproblematische Verhältnisse mit Holzfeuchten zwischen 14 und 16 M. %. Erst die Berücksichtigung der Infiltration (rechts) zeigt, dass die Konstruktion ein sehr geringes Trocknungspotential aufweist: Selbst kleine zusätzliche Feuchtemengen bei eher trockenem Raumklima führen zu einer kontinuierlichen Feuchteakkumulation – die Konstruktion ist somit nicht ausreichend fehlertolerant.

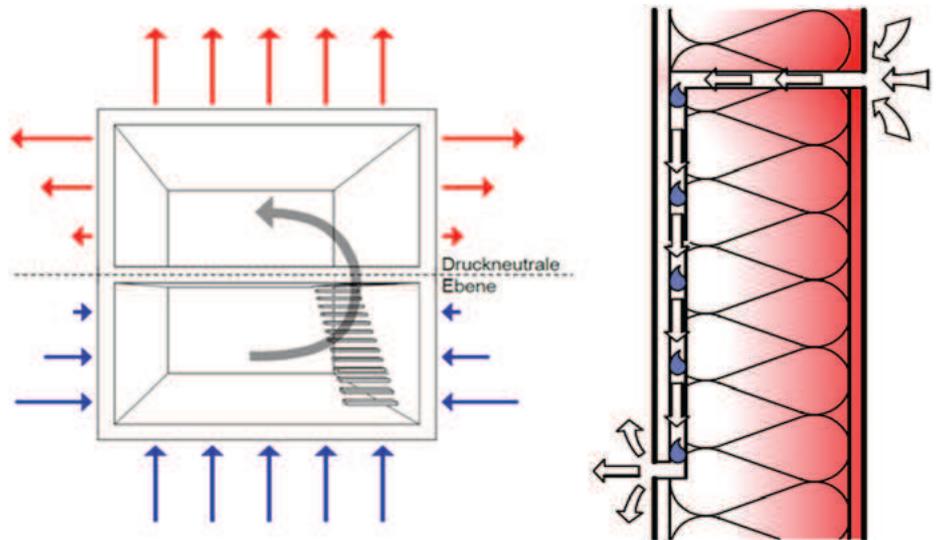


Bild 3: Druckdifferenzen am Gebäude infolge von thermischem Auftrieb (links) und Durchströmung einer Leckage mit Tauwasserausfall auf der kalten Seite (rechts)

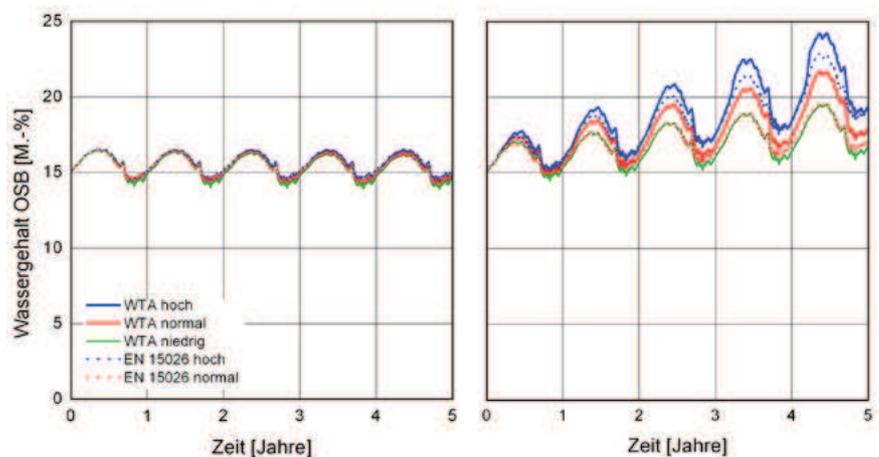


Bild 4: Berechnete Holzfeuchte in der äußeren Beplankung eines beidseitig dampfdichten Leichtbau-Flachdachs mit heller Dachbahn bei verschiedenen hohen Feuchtelasten im Innenraum: unkritische Verhältnisse bei Annahme einer perfekt luftdichten Ausführung (links), Anstieg der Holzfeuchte in allen Varianten bei Berücksichtigung von konvektivem Feuchteintrag (rechts)

## Feuchteintrag durch Schlagregenleckagen

Eine zusätzliche Befeuchtung findet häufig auch dann statt, wenn Schlagregen an Anschlussdetails wie Fensterleibungen in die Konstruktion eindringt und hinter die Dämmung oder Fassadenbekleidung läuft. Dieser Vorgang hat bei diffusionshemmenden Dämmstoffen auf Holzkonstruktionen aufgrund der schlechten Trocknung zu zahlreichen Schäden in den USA und Skandinavien geführt. Neben einer besonders sorgfältigen Ausführung der Anschlussdetails fordert der nordamerikanische ASHRAE Standard 160 [6] als Konsequenz aus den Schadensfällen die Berücksichtigung eines zusätzlichen Feuchteintrags von 1 % des auf die Fassade auftreffenden Schlagregens. Diese Feuchtemenge wird bei jedem Regenereignis hinter die Dämmung in die Unterkonstruktion eingebracht. Nur wenn diese Feuchte schadlos wieder austrocknen kann, gilt die Feuchtesicherheit des Bauteils als gewährleistet. Die Größenordnung des Schlagregeneintrags wurde dabei anhand der Schadensfälle so „kalibriert“, dass die real geschädigten Konstruktionen auch in der Simulation versagen, während die schadensfreien austrocknen können.

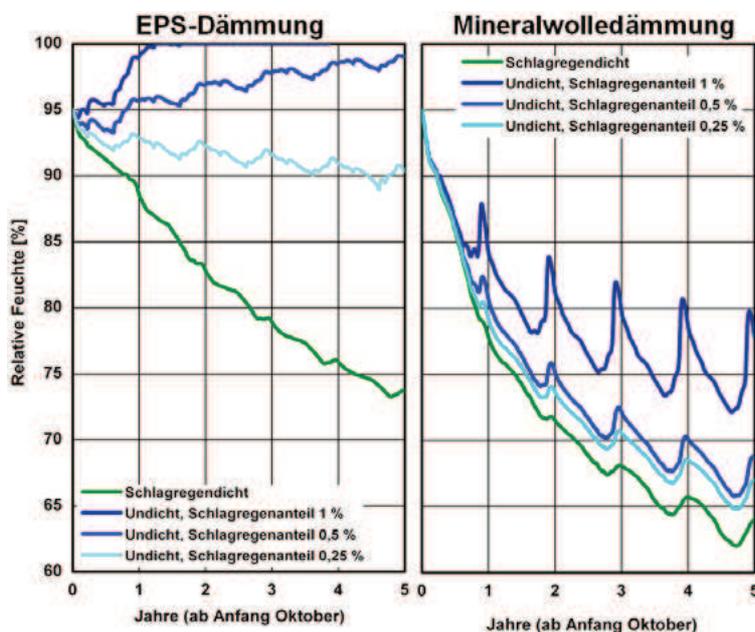


Bild 5: Berechnete relative Luftfeuchte im Bereich der Betonbewehrung unter einem WDVS mit EPS- (links) und Mineralwollendämmung (rechts) in Abhängigkeit von der Schlagregendichtheit

Die grünen Kurven in Bild 5 zeigen, dass bei der Berechnung einer Beton-Sandwichkonstruktion mit WDVS aus EPS (links) oder Mineralwolle (rechts) die anfänglich erhöhte Feuchte im Bereich der Bewehrung rasch absinkt, wenn keine Regenfeuchte hinter die Dämmung gelangen kann. Unterhalb von 80 % r.F. ist kein Risiko für Bewehrungskorrosion mehr gegeben. Mit unterschiedlich starkem Schlagregeneintrag (blaue Kurven) sinken beim diffusionsoffenen Dämmstoff (rechts) die Feuchten langfristig immer noch auf unkritische Werte. Bei der EPS-Dämmung kann die eindringende Feuchte dagegen nicht oder nur zu langsam austrocknen – die relativen Feuchten bleiben zwischen 90 und 100 % r.F. und die Korrosion setzt sich fort.

## Wie stark beeinflussen unsichere Parameter das Ergebnis?

Bei der Beurteilung von Bauteilen während der Planungsphase wird im einfachsten Fall eine vorgegebene Konstruktion mithilfe einer Simulation auf ihre bauphysikalische Eignung überprüft. Der Planer erhält Informationen zum vorgesehenen Bauteilaufbau, zum Standort und zur Nutzung des Gebäudes. Auf Basis dieser Informationen erstellt er das Simulationsmodell und wählt geeignete Randbedingungen. Nach der Berechnung wertet er die Ergebnisse aus und beurteilt die Konstruktion auf ihre Eignung.

Diese Vorgehensweise enthält natürlich immer gewisse Unsicherheiten – bei der Wahl der Materialdatensätze, des Standorts, des Raumklimas usw. Auch zeitlich veränderbare Faktoren wie Verschattungen durch Bäume oder eine spätere Umnutzung mit höheren Feuchtelasten im Innenraum sind zu beachten. Dabei stellt sich die Frage, ob es akzeptabel ist, für die Unsicherheiten einfach plausible Annahmen zu treffen. Eine Antwort ist mithilfe der Simulation selbst möglich: die unsicheren Parameter sollten generell in einem sinnvollen Rahmen variiert und der Einfluss dieser Variation auf das Ergebnis beurteilt werden. Ändert sich mit der Variation das Ergebnis nur geringfügig und die Bewertung bleibt gleich, ist eine Kenntnis des betreffenden Parameters nicht mit großer Genauigkeit erforderlich. Ändert sich das Ergebnis dagegen stark, ist der Parameter entscheidend für das Funktionieren des Bauteils und sollte genau ermittelt werden.

### **Zusammenfassung: Viele Möglichkeiten und eine größere Verantwortung**

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 und so diffusionsoffen wie möglich. Dazu ist es notwendig, bei der Beurteilung die Befeuchtungsquellen und die Trocknungsbedingungen möglichst genau zu erfassen sowie realistische Sicherheiten für übliche Ausführungsqualitäten vorzusehen. Dies ist mit einer Beurteilung mithilfe der Dampfdiffusionsberechnung nach Glaser nur eingeschränkt möglich.

Hygrothermische Simulationen ermöglichen bei fachgerechter Anwendung die Beurteilung fast aller baupraktisch relevanten Vorgänge wie Regenwasseraufnahme, Strahlungsabsorption, Umkehrdiffusion, Feuchtespeicherung, Flüssigtransport, Austrocknung von Baufeuchte oder langfristige Feuchteakkumulationen. Die Beurteilung erfolgt spezifisch für die Regen- und Strahlungsbelastung am jeweiligen Standort in Abhängigkeit von Orientierung und Neigung des Bauteils. Dabei kann die Nutzung des Gebäudes von der Kühlhalle bis zum Schwimmbad beliebig ausfallen. Das Bauteil kann je nach Fragestellung zu Beginn der Berechnung trocken oder feucht angenommen werden. Dabei wird nicht nur das Funktionieren oder Versagen eines perfekt ausgeführten Bauteils erfasst, sondern es können auch angemessene Sicherheiten z. B. für Luftundichtheiten oder Regenleckagen vorgesehen werden. Da die Qualität der Simulationsergebnisse 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.

Hygrothermische Simulationen bringen für den Planer eine größere Verantwortung mit sich als das Glaser-Verfahren – sie ermöglichen im Gegenzug aber auch eine deutlich umfassendere und spezifischere Beurteilung der Feuchtesicherheit von Bauteilen. Ausführende Betriebe sind gut beraten, wenn sie vom Planer eine genauere Analyse der Feuchtesicherheit verlangen, denn im Schadensfall wird man sich zuerst an sie wenden.

### **Literatur**

- [1] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. November 2014.
- [2] DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Juli 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 6-2-14: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. 2014.
- [5] DIN EN ISO 13788: 2001-11: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Oberflächentemperatur zur Vermeidung von kritischer Oberflächenfeuchte und Tauwasserbildung im Bauteilinneren – Berechnungsverfahren. Beuth Verlag. Berlin 2001.
- [6] ASHRAE ANSI Standard 160: Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. 2009.
- [7] WTA-Merkblatt 6-5-14: Innendämmung nach WTA II – Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren. 2014.
- [8] WTA-Merkblatt E-6-8: Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation. Entwurf. September 2015.
- [9] Marquardt, H.: Korrosionshemmung in Betonsandwichwänden durch nachträgliche Wärmedämmung. Dissertation an der Technischen Universität Berlin 1990.
- [10] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzen auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart, 2001
- [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.
- [12] DIN 68800-2: Holzschutz Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau; Berlin 2012
- [13] Zirkelbach, D.; Künzel, H.M.; Schafoczek, B.; Borsch-Laaks, R.: Dampfkongvektion wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen. Proceedings 30. AIVC Conference, Berlin 2009.

Daniel Zirkelbach, Dipl.-Ing., Stellv. Leiter der Abteilung Hygrothermik, Arbeitsgruppe Feuchteschutz und Bauen in anderen Klimazonen des Fraunhofer Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen. Kontakt zum Autor: daniel.zirkelbach@ibp.fraunhofer.de