

# Hygrothermische Simulation – Anwendungsmöglichkeiten für Planer und Sachverständige

Daniel Zirkelbach

Bauteile sind nie vollständig trocken. In Abhängigkeit von den Randbedingungen stellen sich im Jahresverlauf unterschiedlich hohe Wassergehalte ein – je nachdem, welche Feuchtetransport- und Speichervorgänge gerade stattfinden. Wesentlich ist dabei, dass die Feuchtegehalte nicht so stark ansteigen, dass Schäden auftreten können.

Durch die Klimaunterschiede zwischen innen und außen ergeben sich Wasserdampfdiffusionsströme durch die Bauteile, die bei mitteleuropäischen Klimaverhältnissen meist von innen nach außen verlaufen. Nur bei hohen Außentemperaturen bzw. kühlem Raumklima richtet sich der Diffusionsstrom auch nach innen. Deutlich größere Feuchtemengen können in das Bauteil gelangen, wenn eine saugfähige Außenoberfläche in Kontakt mit Regen oder Spritzwasser kommt. Auch Tauwasserbildung in den Bauteilen bzw. auf den Oberflächen, Luftkonvektion und Erdfeuchte tragen zur Befeuchtung bei. Feuchtaufnahme und Trocknung müssen sich dabei allerdings die Waage halten, so dass weder im Jahresverlauf noch langfristig kritisch hohe Feuchtegehalte überschritten werden. Die Idee der Feuchtebilanz ist bereits im Glaserverfahren nach DIN 4108-3 [1] enthalten; das Verfahren ist allerdings beschränkt auf den winterlichen Tauwasserschutz und lässt viele wichtige Effekte außer Acht. Hygrothermische Simulationen nach DIN EN 15026 [2] ermöglichen dagegen eine Berücksichtigung fast aller relevanten Einflussfaktoren und erlauben damit eine deutlich umfassendere und zuverlässigere Beurteilung der Feuchteverhältnisse in Bauteilen – sowohl für die Planung als auch für die nachträgliche Analyse von Schäden und deren Ursachen.

Dieser Beitrag verdeutlicht die Unterschiede zwischen dem Glaser-Verfahren und der hygrothermischen Simulation und stellt die zahlreichen Anwendungsbereiche von Simulationen für Planer und Sachverständige praxisnah vor.

## Hygrothermische Simulation – Anwendungsmöglichkeiten für Planer und Sachverständige

### Glaser versus hygrothermische Simulation

Für die Feuchtschutzbeurteilung von Bauteilen gibt es in Deutschland die bauaufsichtlich eingeführte und damit verbindliche DIN 4108-3, die neben Hinweisen zum Schlagregenschutz ein Beurteilungsverfahren für den winterlichen Tauwasserschutz enthält [1].

Bei diesem Verfahren wird grafisch oder rechnerisch eine Bilanz der Diffusionsströme erstellt, die sich im Jahresverlauf durch das Bauteil hindurch einstellen. Als Raum- und Außenklima werden Blockrandbedingungen für Temperatur- und Luftfeuchte verwendet, die sich zwar an der Realität orientieren, dann aber so angepasst wurden, dass bewährte Bauteile durch das Verfahren zugelassen, kritische dagegen aussortiert werden. Die Randbedingungen können also nicht eindeutig aus den realen Verhältnissen abgeleitet oder angepasst werden: dies wird vor allem an den Innenraumtemperaturen von konstant 12°C im Sommer deutlich, die mit Sicherheit in keinem genutzten Wohnraum in dieser Form auftreten. Andere Klimaeinflüsse wie Sonneneinstrahlung, Wind, Schlagregen oder langwellige Abstrahlung bleiben unberücksichtigt. Knapp zusammengefasst beschränkt sich Glaser auf Befeuchtung im Winter und Trocknung im Sommer – jeweils ausschließlich aufgrund von Wasserdampfdiffusion.

Trotzdem wird Glaser seit vielen Jahren eingesetzt und hat sich durchaus gut bewährt, nämlich für die Bauteile, für die das Verfahren entwickelt wurde: Leichtbaukonstruktionen, bei denen weder Einbaufeuchte noch Regenwasseraufnahme oder Strahlungsabsorption eine entscheidende Rolle spielen. Eine Ausnahme stellen allerdings beidseitig dampfdichte Leichtbaudächer dar. Sie weisen in der Praxis häufig Schäden auf, obwohl die Glaser-Beurteilung grünes Licht gibt und für diese Art von Dächern auch geeignet ist. Dies liegt daran, dass bei der Beurteilung ein ideal dichtes und trockenes Bauteil angenommen wird; ein Zustand, der in der Baupraxis aber kaum gewährleistet werden kann. Ohne Feuchteintrag ist die geringe Trocknungsmöglich-

keit solcher Bauteile nicht problematisch – wenn aber Feuchte eingebaut wird oder über Undichtheiten in die Konstruktion gelangt, führt dies häufig zu Schäden.

Viele andere 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 Klimatelemente 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 bereits belegt, obwohl sie die Glaser-Kriterien eventuell nicht erfüllen würden.

Die Anwendungsgrenzen des Glaserverfahrens führen direkt zur hygrothermischen Simulation, die über physikalische Modelle eine realitätsnahe Berechnung der Wärme- und Feuchteverhältnisse ermöglicht und fast alle baupraktisch relevanten Einflussgrößen berücksichtigen kann. Die DIN 4108-3 selbst empfiehlt seit 2001 für die Bauteile, die nicht im Anwendungsbereich des genormten Verfahrens liegen, eine Beurteilung mit Hilfe hygrothermischer Simulationen (vgl. Kapitel A.2.1 und A.2.2). Dies war zum damaligen Zeitpunkt noch ein Novum – mittlerweile finden die Simulationen aber auch infolge der Regelung durch die europäische Norm DIN EN 15026 (2007) immer breitere Anwendung.

Über die Diffusionsbilanz des Glaserverfahrens hinaus werden unter anderem folgende Effekte und Randbedingungen erfasst:

- 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 kurzwellige Einstrahlung
- Unterkühlung durch langwellige Abstrahlung und Tauwasserbildung.

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.

### Vorgehensweise bei der Simulation

Die Vorgehensweise zur Durchführung und Bewertung einer hygrothermischen Bauteilberechnung wird hier anhand der eindimensionalen Version WUFI® Pro [3] dargestellt. Abb. 2 zeigt die Benutzeroberfläche von WUFI® mit den Eingaben für eine innen gedämmte Mauerwerkswand.

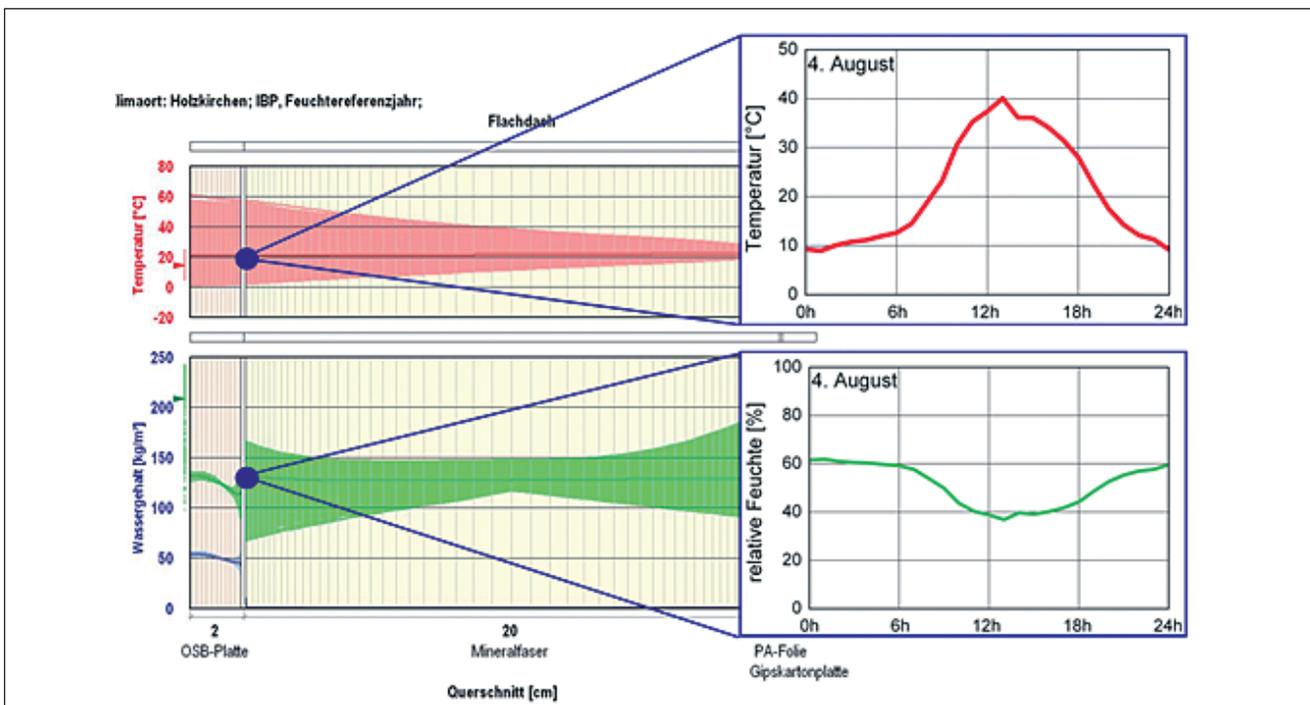


Abb. 1: WUFI® Simulation nach [3]- Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte unter der äußeren Bepunktung eines Flachdaches an einem Sommertag.

Wesentlich 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. Abb. 1), sind zudem repräsentative Klimadaten für den jeweiligen Standort in normalerweise stündlicher Auflösung erforderlich.

Zunächst wird der Wandaufbau mit den Materialschichten und Dicken eingegeben. Dabei enthalten die Programme in der Regel eine Materialdatenbank, die sowohl neue und herstellereigenspezifische als auch generische historische Materialdaten enthält. 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 ein-

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

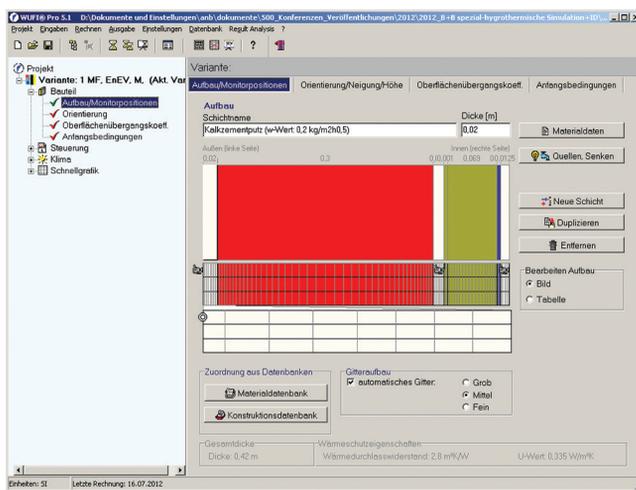


Abb. 2: Benutzeroberfläche der hygrothermischen Simulationssoftware WUFI®-Pro: Bauteilaufbau einer Ziegelwand mit Innendämmung.

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 teilweise in Abhängigkeit vom Außenklima abbilden (WTA 6-2-01/D [4], EN 13788 [5], EN 15026 [2] oder ASHRAE 160 [6]). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, andere Datensätze, eigene Messwerte oder Laborbedingungen zu importieren und 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 Quellen und Senken bieten zudem die Möglichkeit, mehrdimensionale Effekte wie Hinterlüftung, Konvektion, Schlagregenleckagen o. ä. vereinfacht zu berücksichtigen. Startzeitpunkt und Dauer der Berechnung werden situationspezifisch gewählt. Dabei benötigen diffusionshemmende Konstruktionen erfahrungsgemäß mehr Zeit als diffusionsoffene Bauteile, um den so genannten 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 allerdings oft nur wenige Minuten.

Die Eingabe der erforderlichen Daten und die Durchführung der Berechnung, also 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.

## Bewertung der Ergebnisse

Ergebnis einer hygrothermischen Simulation sind die zeitlichen Verläufe der Temperatur- und Feuchteprofile (vgl. Abbildung 1) bzw. die Wassergehalts- und Temperaturverläufe in den verschiedenen Materialschichten. Im Unterschied zum Glaserverfahren gibt es keine allgemein gültigen „Versagenskriterien“; 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. Anschließend werden die Feuchteverhältnisse in den einzelnen Materialschichten bewertet. Auch hier darf der Wassergehalt nicht während des gesamten Berechnungszeitraums steigen; 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 anderen Baustoffe sind jedoch keine Grenzwerte bekannt. Das neue 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 20 bzw. 18 M. % nicht längerfristig überschritten werden. Ähnliches gilt für andere organischen 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. Modelle zur genaueren Beurteilung des Holzfäulerisikos in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und der gleichzeitig auftretenden Temperatur sind derzeit in Bearbeitung [8].

### Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit

Bei feuchteunempfindlichen Dämmstoffen wie Hartschaumkunststoff 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. Bis etwa 2 Vol.-% kann in der Regel von einem nur geringen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit ausgegangen werden.

### Schimmel

Auf der Innenoberfläche sowie in Hohlräumen an den Materialgrenzen kann bei höheren Feuchteverhältnissen Schimmelpilzbildung auftreten. Aus der DIN 4108 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 mithilfe des biohygrothermischen Modells nach [10] möglich, dass über eine Modellspore die spezifische Keimungs- und Wachstumsgeschwindigkeit des Schimmels berechnet. Das Modell WUFI® Bio steht auf der WUFI®-Homepage kostenlos 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 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 wird. Das Fraunhofer IBP entwickelt derzeit in Zusammenarbeit mit der Politecnico die Milano ein Modell, das Korrosionsrisiko und -geschwindigkeit in verschiedenen mineralischen Baustoffen in Abhängigkeit von Temperatur und relativer Luftfeuchte quantifiziert [11].

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 Trocknungspotenzials eher als schadensanfällig herausstellen.

Grundregel bei der Feuchteschutzplanung sollte sein, Bauteile gerade so diffusionsdicht wie nötig, gleichzeitig aber so diffusionsoffen wie möglich, auszuführen. Dies führt durch Trocknungsreserven zu mehr Fehlertoleranz.

**Einbaufeuchte**

Um ein geeignetes Trocknungspotenzial zu gewährleisten, kann die Simulation beispielsweise mit einer realistisch erhöhten Anfangsfeuchte (z.B. für baufeuchtes Mauerwerk oder eine berechnete 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 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 Abbildung 3).

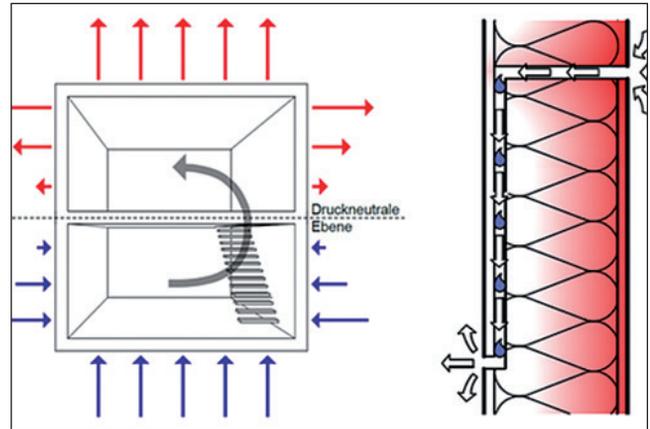


Abb. 3: Druckdifferenzen am Gebäude infolge von thermischem Auftrieb (links) und Durchströmung einer Leckage mit Tauwasserausfall auf der kalten Seite (rechts).

Die über Konvektion eingetragene Feuchte muss ebenfalls über Diffusion wieder austrocknen können, ohne Schäden zu verursachen. Da Konvektion in Leichtbauteilen die Regel und nicht die Ausnahme darstellt, fordert die Neufassung der DIN 68000 [12] eine geeignete Berücksichtigung dieses Effekts bei der feuchteteknischen 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.

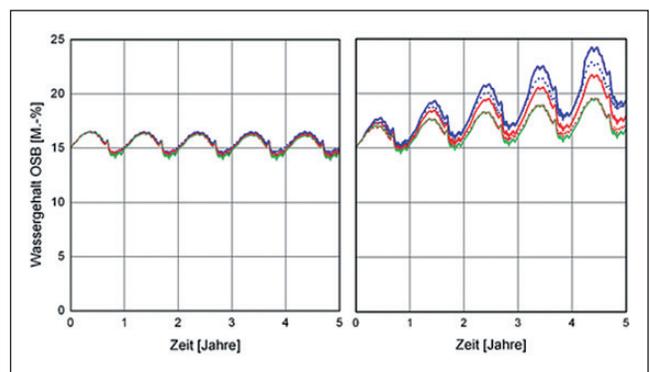


Abb. 4: Berechnete Holzfeuchte in der äußeren Beplankung eines beidseitig dampfdichten Leichtbau-Flachdachs mit heller Dachbahn bei verschiedenen hohen Feuchtelasten im Innenraum: unkritische Verhältnisse bei Annahme einer perfekt luftdichten Ausführung (links), Anstieg der Holzfeuchte in allen Varianten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

Abbildung 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 völlig unproblematische Verhältnisse mit Holzfeuchten zwischen 14 und 16 M.%. Erst die Berücksichtigung der Infiltration (rechts) zeigt, dass die Konstruktion ein sehr geringes Trocknungspotenzial aufweist: selbst kleine zusätzliche Feuchtemengen führen zu einer kontinuierlichen Feuchteakkumulation; die Konstruktion ist somit nicht ausreichend fehlertolerant.

### Feuchteintrag durch Schlagregenleckagen

Eine zusätzliche Befeuchtung findet häufig auch dann statt, wenn Schlagregen an Anschlussdetails wie Fensterlaibungen 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. Die Menge von 1% des Schlagregens hat sich inzwischen auch bei der Bewertung der Schadensfälle in Skandinavien als geeignet herausgestellt

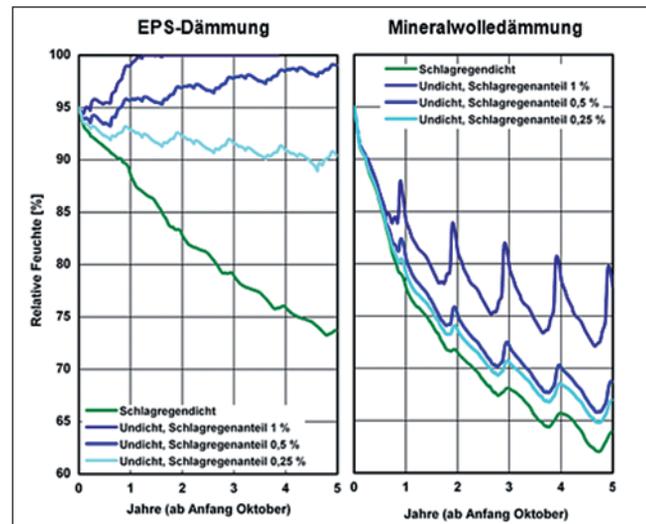


Abb. 5: Berechnete relative Luftfeuchte im Bereich der Betonbewehrung unter einem WDVS mit EPS- (links) und Mineralwollendämmung (rechts) in Abhängigkeit von der Schlagregendichtheit.

Die grünen Kurven in Abbildung 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 diffusions-offenen 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 Materialda-

tensätze, 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.

Dies betrifft beispielsweise auch den Klimaeinfluss. Die meisten Klimadaten wurden nicht speziell als repräsentative Jahre für hygrothermische Simulationen zusammengestellt – EN 15026 schlägt daher vor, aus einem mittleren thermischen Jahr durch eine pauschale Temperaturänderung von  $\pm 2$  K ein warmes oder ein kaltes Jahr zu erzeugen. Alternativ kann auch ein kühlerer oder wärmerer Standort aus der weiteren Umgebung gewählt werden. Ein Bauteil, das unter den Klimabedingungen von Würzburg gut funktioniert, in München aber bereits deutlich versagt, erscheint im Zuge der Planung eher nicht akzeptabel. Solche Analysen sind vor allem für den noch wenig erfahrenen Nutzer wichtig und lehrreich und helfen, bauteilspezifisch die wichtigen von den weniger wichtigen Einflussparametern zu unterscheiden.

### **Schadensanalyse – Vergleich von Planung und Ist-Zustand**

Feuchte ist eine der Hauptursachen für Schäden an Gebäuden und Bauteilen. Je nach Quelle summieren sich die Schäden alleine in Deutschland auf mehrere Milliarden Euro pro Jahr. Eine Faustregel besagt, dass die Kosten für das Vermeiden von Schäden in der Planungsphase im Vergleich zu einer nachträglichen Ertüchtigung der noch nicht geschädigten Konstruktion bis hin zur Behebung eines bereits eingetretenen Schadens jeweils um etwa den Faktor 10 steigen. Trotzdem begegnet man nach wie vor häufig der Ansicht, dass die Planung der Feuchtesicherheit eigentlich nebenbei laufen sollte und vor allem nicht mit Kosten verbunden sein darf. Dies mag

für bewährte Bauweisen gerechtfertigt sein – immer stärker gedämmte Bauteile trocknen aber aufgrund der geringen Wärmeverluste schlechter und häufig sind es nur kleine Ursachen, die dann zu großen Schäden führen.

Die Beurteilung der Ursachen eines Schadens durch verschiedene Sachverständige kann dabei durchaus unterschiedlich ausfallen. Gerade wenn mehrere Faktoren infrage kommen, stellt deren Bewertung und Gewichtung häufig eine größere Herausforderung dar. Neben klassischen Beurteilungsmethoden kann eine hygrothermische Simulation bei der Begutachtung wertvolle Hilfestellungen geben: Sie ermöglicht, den geschädigten Ist-Zustand mit der Planung zu vergleichen und mögliche Schadensursachen einzeln bezüglich ihrer Auswirkung auf das hygrothermische Verhalten des Bauteils zu analysieren.

Bei der verfaulten Holzschalung einer begrünten Dachkonstruktion stellte sich beispielsweise die Frage, ob die Wahl einer vermeintlich ungeeigneten Dampfbremse die Ursache für den Schaden darstellt, oder ob die teilweise fehlende Dämmung und Fehler an der Luftdichtheitsebene, also eine mangelhafte Ausführung, für den Feuchteintrag in das Dach, verantwortlich war. Eine rechnerische Untersuchung unter Annahme einer normalen Luftdichtheit zeigte, dass sich in der geplanten Konstruktion zwar im Winter Holzfeuchten bis knapp über 20 M.-% einstellen können und die Konstruktion damit nicht fehlertolerant ausgelegt war – ein Schaden und die gemessenen Holzfeuchten von bis zu 40 M.-% wären bei sachgemäßer Ausführung des Bauteils aber nicht aufgetreten. Eine Verwendung der vom Kläger eingeforderten alternativen Dampfbremse hätte sogar zu noch höheren Feuchtegehalten in der Konstruktion geführt als die bemängelten. Auch wenn die Planung hier verbesserungsfähig war, konnte als schadensursächlich doch eindeutig die mangelhafte Ausführung identifiziert werden.

Die typische Vorgehensweise ist also, das geplante Bauteil unter Annahme einer praxisüblich sorgfältigen Ausführung zu berechnen. Im Unterschied zur Bemessung sollte hier auf zusätzliche Sicherheiten eher verzichtet werden – d.h. es wird, soweit verfügbar, das lokale Klima und die tatsächliche Nutzung des Gebäudes berücksichtigt; die Anfangsfeuchten entsprechen den Informationen zum Bauablauf; die erreichten Feuchtegehalte werden bezüglich ihres

tatsächlichen Schadenspotenzials beurteilt. Anhand der Ergebnisse können die Ursachen eingegrenzt und ggf. sinnvolle Maßnahmen abgeleitet werden. Dazu ein paar Beispiele aus Fragestellungen, die am Fraunhofer IBP in den letzten Jahren bearbeitet wurden:

- Eine sich in der Berechnung nach zehn Jahren im Bereich um 22 M.-% einschwingende Holzfeuchte weist zwar auf eher geringe Sicherheiten hin – kann aber nicht innerhalb von fünf Jahren zum vollständigen Verfaulen einer Schalung führen – hier sind also weitere Ursachen wie Einbaufeuchte oder Luftundichtheiten zu prüfen.
- Die berechnete Holzfeuchte einer Attikaabdeckung erreicht während der Austrocknung des benachbarten Betons über die ersten Jahre auch ohne zusätzlichen Feuchteeintrag regelmäßig Holzfeuchten über 25 M. %. Neben der vermutlich erfolgten Berechnung während der Bauphase ist hier von einer fehlerhaften Planung auszugehen.
- Eine Fundamentplatte aus Beton ist nicht normgemäß bituminös abgedichtet sondern nur mit einer Dampfbremssfolie abgedeckt. Die rechnerische Untersuchung belegt allerdings, dass trotz des geringeren Diffusionswiderstands der Folie keine kritischen Feuchtegehalte auftreten. Aus bauphysikalischer Sicht ist hier also kein Handlungsbedarf gegeben.
- Die Holzkonstruktion über einem Kartoffellager ist zunächst nur durch eine überlappend verlegte Dampfbremse geschützt. Die nach einigen Jahren erhöhten Holzfeuchten in den Sparren sollen durch den Einbau einer dichten und stärker sperrenden Dampfbremse wieder reduziert werden. Da sich die Situation in der Folge weiter verschlechtert, wird eine Simulation des Bauteils durchgeführt. Ergebnis: Der Feuchteeintrag erfolgt durch die im Vergleich zur Dampfbremse diffusionsoffenerere Dachbahn im Sommer von außen. Eine Dampfbremse mit nur geringem Sperrwert konnte das Problem beheben, da eine bessere Trocknung des Holzes nach innen zugelassen wird.
- Ein Industriedach aus Trapezblech weist Feuchteschäden auf. Vermutet werden konvektive Feuchteinträge aufgrund der geringen Luftdichtheit. Simulationen unter Berücksichtigung deutlicher Luftundichtheiten zeigen aber keine mit dem Ist-Zustand vergleichbaren Feuchtezunahmen im Bauteil; eine genauere Analyse der Schäden und deren Verteilung über das Jahr ergibt, dass Regenwasserundichtheiten die Ursache für die Befeuchtung darstellen.
- Beim Einbau einer abgehängten Decke wurde die Dampfbremse der Dachkonstruktion durch die Schrauben perforiert. Mit Simulationen wurde überprüft, wie groß das Trocknungspotenzial der Dachkonstruktion ist und welche konvektiv eingetragenen Feuchtemengen dabei unter Berücksichtigung geeigneter Sicherheiten akzeptabel sind. Dabei wurde die erforderliche Luftdichtheit mit  $q_{50} \leq 4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$  ermittelt; der später am Objekt gemessene Wert lag deutlich unter diesem Grenzwert.

Im vorigen Kapitel wurde bereits deutlich, dass Planung und Schadensanalyse bei der hygrothermischen Simulation über Trocknungsreserven und Fehlertoleranz eng miteinander verbunden sind. Ein Bauteil, das nur dann funktioniert, wenn es perfekt dicht und fehlerfrei ausgeführt ist, stellt aus heutiger Sicht eine Fehlplanung dar: Es dürfen keine Anforderungen gestellt werden, die in der Praxis nicht erfüllbar sind. Auch bei der bauphysikalischen Bemessung sind gewisse Sicherheiten vorzusehen, die sich zwar nicht in festen Zuschlagsfaktoren, aber doch in angemessenem Abwägen und auf der sicheren Seite liegenden Annahmen niederschlagen sollten. Auch hier kann rückwirkend untersucht werden, welche Sicherheiten bei der Bemessung berücksichtigt wurden und ob bereits kleine zusätzliche Feuchtemengen zu einer Schädigung führen.

### **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 so genau wie möglich zu erfassen sowie realistische Sicherheiten für übliche Ausführungsqualitäten vorzusehen. Dies ist durch eine Beurteilung mit dem Glaser-Verfahren nur eingeschränkt möglich.

Hygrothermische Simulationen ermöglichen bei fachgerechter Anwendung die Beurteilung fast aller baupraktisch relevanten Vorgänge wie Regenwasseraufnahme, Strahlungsabsorption, Umkehr-

diffusion, Feuchtespeicherung, Flüssigtransport, Austrocknung von Baufeuchte, langfristige Feuchteakkumulationen usw. Die Beurteilung erfolgt 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 Kühlhalle 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 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.

Bei der Beurteilung von Schäden ermöglicht die Simulation den Vergleich des vorgefundenen schadhafte mit dem geplanten Zustand. Wird der Schaden dabei auch in der Simulation erkennbar, muss man von einem Planungsfehler ausgehen; bleiben die berechneten Verhältnisse dagegen auch mit Berücksichtigung typischer Imperfektionen der Bauteile unkritisch oder deutlich günstiger als beim aufgetretenen Schaden, liegt die Verantwortung ganz oder teilweise beim Ausführenden. Auch hier muss der Sachverständige die Möglichkeiten und die Grenzen der hygrothermischen Simulation kennen, um die relevanten Einflussparameter korrekt zu erfassen.

Hygrothermische Simulationen bringen für den Planer eine größere Verantwortung mit sich als das Glaserverfahren – sie ermöglichen im Gegenzug aber eine deutlich umfassendere und spezifischere Beurteilung der Feuchtesicherheit von Bauteilen.

## Literatur

- [1] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Juli 2001
- [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 zwei-dimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994
- [4] WTA-Merkblatt 6-2-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Mai 2002
- [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. 2001
- [6] ASHRAE ANSI Standard 160: Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. 2009
- [7] WTA-Merkblatt E 6-5-12/D: Innendämmung nach WTA II - Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren. Entwurf November 2012
- [8] Kehl, D.: Holzschutz ist berechenbar – Bewertung WTA vs. Holzschutznormung. Tagungsband Bauphysik Forum. Mondsee, 18. und 19. April 2013
- [9] Marquardt, H.: Korrosionshemmung in Betonsandwichwänden durch nachträgliche Wärmedämmung. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1990
- [10] Sedlbauer, K.: Vorhersage von Schimmelpilzen auf und in Bauteilen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2001
- [11] Marra, E.: Environmental Factors Affecting Corrosion of Steel Inserts in Ancient Masonries. Dissertation, Politecnico di Milano, 2012
- [12] DIN 68800-2: Holzschutz Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. 2012
- [13] Zirkelbach, D.; Künzel, H.M.; Schafaczek, 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**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen  
Postfach 1152  
83601 Holzkirchen