



## A guide to hygrothermal computer simulations

## Guide pour simulations hygrothermiques

### Deskriptoren

Hygrothermik, hygrothermische Simulation, Wärme- und Feuchtetransport, Materialkennwerte, Randbedingungen, Sensitivität

### Key Words

hygrothermics, hygrothermal simulation, heat and moisture transport, material properties, boundary conditions, sensitivity

### Mots-Clés

hygrothermique, simulation hygrothermique, transport de chaleur et d'humidité, propriétés des matériaux, conditions de bord, sensibilité

### Erläuterungen zum Merkblatt

Dieses Merkblatt gibt Hinweise zur Durchführung hygrothermischer Simulationsberechnungen.

Ergänzend sind folgende WTA-Merkblätter in der jeweils aktuellen deutschen Fassung zu beachten:

- 6-2 "Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse"
- 6-3 „Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos“
- 6-5 „Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren“
- 6-8 „Feuchtetechnische Bewertung von Holzbauteilen – Vereinfachte Nachweise und Simulation“

### Inhalt

	Seite
1 Inhalt und Ziel des Merkblatts	4
2 Schritt 1: Problemdefinition	4
2.1 Einleitung	4
2.2 Abgrenzung der angestrebten Aussage	4
2.3 Erforderliche Genauigkeit und Sicherheit	6
2.4 Festlegung der untersuchten Konstruktion	8
2.5 Festlegung der benötigten hygrothermischen Kenndaten	8
2.6 Festlegung der verwendeten Randbedingungen	9
2.7 Berücksichtigung von Wärme- und Feuchtequellen	10
2.8 Konzentration auf bestimmte Problemaspekte	10
2.9 Festlegung des Zeit- und Finanzrahmens der Untersuchungen	11
3 Schritt 2: Vorbereitung der Rechnung	11
3.1 Auswahl der Bewertungskriterien	11
3.2 Testrechnungen und Variantenanalysen	11
3.3 Festlegen der Berechnungsfälle	11
3.4 Ermittlung der Eingabedaten	11
4 Schritt 3: Durchführung der Rechnung	12
4.1 Dateneingabe und Rechnung	12
4.2 Ausgabe und Kontrolle der Ergebnisse	12
5 Schritt 4: Analyse der Ergebnisse	12
5.1 Analyse der rechentechnischen Zuverlässigkeit	12
5.2 Analyse der hygrothermischen Zustände	12
5.3 Analyse der Ergebnisvariation	13
6 Schritt 5: Interpretation und Bewertung	13
6.1 Beurteilung der Berechnungsergebnisse	13
6.2 Folgeuntersuchungen	13
7 Schritt 6: Berichterstattung	13
8 Literatur	14



Merkblatt E-6-1 Ausgabe: 07.2022/D

## Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen

Deutsche Fassung vom Juli 2022

### Referat 6 Bauphysik

#### Leiter des Referates

Gregor Scheffler

#### Leiter der Arbeitsgruppe

Daniel Kehl

#### Mitglieder der Arbeitsgruppe

Julia Bachinger  
Christian Bludau  
Robert Borsch-Laaks  
Martin Epple  
Stefan Hückstädt  
Robert Heinicke  
Heiko Fechner

Claudia Fülle  
Bernd Nusser  
Hartwig Künzel  
Oskar Pankratz  
Ulrich Ruisinger  
Gregor Scheffler  
Johannes Tieben

Martin Teibinger  
Benjamin Weiss  
Jörg Wollnow  
Daniel Zirkelbach  
Markus Zumoberhaus

#### Erarbeitung des Merkblattes

Beginn der Arbeiten: November 1997  
Ende der Arbeiten: Mai 2001  
Merkblattentwurf: Juli 2001  
Endgültige Fassung: Mai 2002

#### 1. Überarbeitung

Beginn der Arbeiten: August 2018  
Ende der Arbeiten: März 2019  
Merkblattentwurf: Juli 2022  
Endgültige Fassung: —

ISBN 978-3-7388-0762-2

#### WTA-Merkblätter

#### Herausgeber

WTA, Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege International e.V.

#### Schriftleitung

Clemens Hecht, Tobias Steiner

#### Vertrieb

WTA Publications  
Tel. +49-89-578 697 27, Fax +49-89-578 697 29, email: wta@wta.de

Die WTA ist stets bemüht in ihren Merkblättern den jeweiligen aktuellen Stand des Wissens festzuhalten. Wenn Sie vor Ablauf der Einspruchsfrist Verbesserungen, Änderungen vorschlagen möchten, wenden Sie sich bitte direkt an den Leiter der Arbeitsgruppe.

© Alle Rechte bei der WTA International e.V. Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung gestattet.  
Die Angaben in diesem Merkblatt stützen sich auf den derzeitigen Stand unserer Kenntnisse. Die WTA International e.V. kann jedoch keinerlei Haftung übernehmen. Vorschläge oder Einwände, die gegebenenfalls bei einer Neuauflage berücksichtigt werden können, sind an die Geschäftsstelle der WTA International e.V. zu richten.  
Bei Streitfällen ist die deutsche Fassung gültig.  
Den auftragvergebenden Architekten, Denkmalpflegeämtern und den staatlichen, kommunalen und kirchlichen Bauämtern wird nahegelegt, auf dieses und die weiteren Merkblätter der WTA zum Bautenschutz und zur Bauwerksinstandsetzung in Ausschreibungen und Aufträgen Bezug zu nehmen und deren Kenntnisnahme allen Auftragnehmern zur Auflage zu machen.

Fraunhofer IRB Verlag, 2022  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 80 04 69, D-70504 Stuttgart  
Telefon (07 11) 9 70-25 00  
Telefax (07 11) 9 70-25 99  
E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de  
<http://www.baufachinformation.de>

## Kurzfassung

Während die rechnerische Erfassung der Wärme- und Feuchteverhältnisse in Bauteilen oftmals immer noch auf stark vereinfachte Bewertungsmethoden wie z. B. das Glaser-Verfahren beschränkt werden, existieren mittlerweile Computerprogramme, die eine realistische und detaillierte Simulation des hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen unter natürlichen Randbedingungen erlauben. Mit diesen erweiterten Möglichkeiten sind allerdings auch die Ansprüche an den Anwender gestiegen. Dieser kann sich jetzt nicht mehr an ein vorgegebenes Rechenschema mit explizit tabellierten Eingabedaten halten, sondern muss unter den angebotenen Möglichkeiten in eigener Verantwortung das für seine Problemstellung geeignete Berechnungsmodell auswählen. So stellt sich insbesondere bei der Bemessung die Frage, mit welcher Prognosegenauigkeit gerechnet werden kann und wie die entsprechend notwendigen Sicherheitszuschläge im Berechnungsmodell eingebaut werden können. Aber auch bei Simulationen von Schadenfällen und anderen Aufgabestellungen ist eine Beurteilung der Prognosegenauigkeit notwendig. Dabei liegen oft keine detaillierten Klima- und Materialdaten vor, so dass die erforderlichen Kennwerte aus einer gewissen Bandbreite von Angaben ausgewählt oder abgeschätzt werden müssen. Die Merkblätter 6-1, 6-2 und 6-8 erläutern das Vorgehen bei derartigen Fragestellungen und liefern die Grundlagen für die erfolgreiche Bemessung und Beurteilung von hygrothermischen Simulationsrechnungen.

**Deskriptoren:** hygrothermische Simulation, Wärme- und Feuchtetransport, Materialkennwerte, Randbedingungen, Sensitivität

## Abstract

Whereas the computational determination of thermal and moisture conditions in building components was is often still limited to highly simplified evaluation methods such as the Glaser method, computer programs now exist that allow realistic and detailed simulation of the hygrothermal behavior of building components under natural boundary conditions. With these extended possibilities, however, the demands on the user have also increased. The user can no longer adhere to a given calculation scheme with explicitly tabulated input data, but must select the calculation model suitable for his problem from the possibilities offered on his own responsibility. In particular, the question arises in the design process as to the forecast accuracy that can be calculated and how the necessary safety margins can be incorporated into the calculation model. But also for simulations of damage events and other tasks, an assessment of the forecast accuracy is necessary. Often, no detailed climatic and material data are available, so that the required characteristic values have to be selected or estimated from a certain range of data. Guidelines 6-1, 6-2 and 6-8 explain the procedure for such problems and provide the basis for the successful design and evaluation of hygrothermal simulation calculations.

**Key Words:** hygrothermal simulation, heat and moisture transport, material properties, boundary conditions, sensitivity

## Résumé

Alors que la saisie par calcul des conditions de chaleur et d'humidité dans les éléments de construction se limite encore souvent à des méthodes d'évaluation très simplifiées, comme par exemple la méthode Glaser, il existe entre-temps des programmes informatiques qui permettent une simulation réaliste et détaillée du comportement hygrothermique des éléments de construction dans des conditions limites naturelles. Ces possibilités élargies augmentent également les exigences envers l'utilisateur. Celui-ci ne peut plus adhérer à un schéma de calcul avec des données d'entrée tabulées, mais doit – sous sa propre responsabilité – choisir le modèle de calcul adapté à son problème parmi les options à disposition. Donc, lors du dimensionnement des éléments de construction les questions de la précision des prédictions et de l'intégration des marges de sécurité nécessaires paraissent. Toutefois, une évaluation de la précision des prédictions est également nécessaire pour les simulations de dégâts de construction et d'autres investigations. Souvent, des données détaillées du climat et des matériaux de construction ne sont pas à disposition, de sorte que les valeurs requises doivent être sélectionnées ou estimées dans une marge de fluctuation. Les avis techniques 6-1, 6-2 et 6-8 expliquent la procédure à suivre pour de telles questions et fournissent la base d'une conception et d'une évaluation efficace des calculs de simulation hygrothermique.

**Mots-Clés:** simulation hygrothermique, transport de chaleur et d'humidité, propriétés des matériaux, conditions de bord, sensibilité

## 1 Inhalt und Ziel des Merkblatts

Die Anwendung hygrothermischer Simulationsverfahren ist neben nachweisfreien Konstruktionen und vereinfachten Dampfdiffusionsberechnungen eine wesentliche Nachweissäule zum klimabedingten Feuchteschutz.

Aufgrund ihrer Realitätsnähe eignen sich derartige Verfahren als effiziente Werkzeuge zur hygrothermischen Bemessung von Bauteilen, zur Entwicklung von Materialien, zur Beurteilung der Funktionstüchtigkeit von bereits ausgeführten Bauteilen und zur Schadensanalyse. Die damit verbundene Komplexität ist größer als bei den vereinfachten Diffusionsbilanzverfahren. Sie erfordert spezifisches Fachwissen vom Anwender, da die rasche Verfügbarkeit von Ergebnissen den Anwender über die Vielzahl der zu bedenkenden Einzelheiten und seine eigene Verantwortung für die Zuverlässigkeit des Ergebnisses hinwegtäuschen kann.

Insbesondere stellt sich die Frage nach der Prognosesicherheit der Ergebnisse, die von einer Vielzahl von Annahmen und Grenzen des Berechnungsmodells beeinflusst wird. Solche wichtigen Aspekte bleiben bei den einfachen Verfahren unberücksichtigt.

Das vorliegende Merkblatt 6-1 "Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen" erläutert das Vorgehen bei den unterschiedlichen Fragestellungen und bietet Hilfe bei der Wahl des Berechnungsmodells sowie der Beurteilung der Annahme und Ergebnisse.

Das Merkblatt 6-2 "Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse" vertieft die Grundlagen rechnerischer Untersuchungsmethoden im Bereich Wärme-/Feuchteschutz.

Darüber hinaus werden in den WTA-Merkblättern 6-3, 6-5 und 6-8 anwendungsspezifische Vorgehensregeln und Beurteilungskriterien behandelt.

## 2 Schritt 1: Problemdefinition

### 2.1 Einleitung

Rechnerische Untersuchungen hygrothermischer Vorgänge können ganz verschiedene Fragestellungen betreffen, die wiederum völlig unterschiedliche Vorgehensweisen und Schwerpunktsetzungen erfordern. Neben dem generellen Entschluss, für die Lösung eines Problems Berechnungen durchzuführen, muss sich der Anwender zuerst darüber klar werden:

- was mit den Berechnungen bezweckt werden soll
- welche hygrothermischen Prozesse simuliert werden sollen
- in welchem Genauigkeitsgrad die Randbedingungen, Kennwerte und Ergebnisse vorliegen müssen
- ob der Berechnungsaufwand für die Fragestellung bzw. Problemlösung angemessen ist.

### 2.2 Abgrenzung der angestrebten Aussage

Der für eine rechnerische Untersuchung notwendige Aufwand hängt unter anderem von der Art, der Allgemeingültigkeit und der angestrebten Zuverlässigkeit der resultierenden Aussage ab. Es können im Wesentlichen drei Anwendungsbereiche unterschieden werden:

- Fallstudie, Verhaltens- bzw. Schadenanalyse
- hygrothermische Bemessung eines objektbezogenen Bauteils
- generelle Beurteilung von Konstruktionsaufbauten und allgemeingültigen Regeln

### 2.2.1 Fallstudie, Verhaltens- bzw. Schadensanalyse

Gegenstand der Analyse ist das hygrothermische Verhalten einer bestimmten, zumeist schon ausgeführten Konstruktion unter vorgegebenen Randbedingungen. In diesen Bereich fällt z. B. die wissenschaftliche Untersuchung eines Freiland- oder Laborversuches, die Beurteilung von möglichen Ursachen eines Schadensfalles oder eine Risikoanalyse von möglichen Versagensszenarien eines Bauteils.

Hier werden hohe Anforderungen an die Genauigkeit des Berechnungsmodells und der Eingabedaten, d. h. der Kennwerte und Randbedingungen gestellt. In der Regel muss ein Berechnungsprogramm gewählt werden, mit welchem die hygrothermischen Prozesse umfassend und möglichst präzise erfasst werden können. Im Idealfall sind alle relevanten Parameter mit hinreichender Genauigkeit bekannt. "Hinreichend" heißt: die durch die Unsicherheit der Eingabedaten (z. B. unvermeidliche Messfehler, Streuung bzw. Inhomogenität von Materialeigenschaften, nichtrepräsentative Probenahme etc.) verursachte Unsicherheit der Ergebnisse liegt im vorgegebenen Bereich.

Als Ergebnis der durchgeführten Rechnung werden Zahlenwerte mit einem möglichst kleinen Unsicherheitsbereich erwartet.

### 2.2.2 Hygrothermische Bemessung eines objektbezogenen Bauteils

Gegenstand der Analyse ist die Sicherstellung der langfristigen hygrothermischen Tauglichkeit eines konkreten Konstruktionsaufbaus unter festgelegten Randbedingungen. Hier soll untersucht und beurteilt werden, ob bei fachgerechter Ausführung kritische Feuchteerscheinungen innerhalb einer Konstruktion mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden können.

Dazu sind aufgrund von unausweichlichen Unsicherheiten bei den Berechnungsannahmen und Ausführungsschwankungen Sicherheitsüberlegungen notwendig. Der Anwender muss sich klar darüber sein:

- welche Feuchtevorgänge durch das Berechnungsmodell erfasst sind
- wie Vereinfachungen und nicht berücksichtigte Feuchtevorgänge das Berechnungsergebnis beeinflussen
- welche Grenzwerte das kritische Verhalten definieren
- ob das Berechnungsprogramm oder die gewählten Grenzwerte bereits Sicherheiten einschließen
- bei welchen Kennwerten und Randbedingungen Sicherheitszuschläge berücksichtigt werden können bzw. welche Annahmen 'auf der sicheren Seite' liegen
- wie groß die Schadenrisiken sind bzw. wie groß die Sicherheitszuschläge sein müssen.

Das Ergebnis einer derartigen Untersuchung gibt Auskunft über allfällige Schadenrisiken eines Bauteils und kann zur Bauteilwahl herangezogen werden.

### 2.2.3 Generelle Beurteilung von Konstruktionsaufbauten und allgemeingültigen Regeln

Gegenstand der Analyse ist das allgemeine, typische Verhalten einer Konstruktionsart oder eines Schichtaufbaus in einer bestimmten Klimaregion. In diesen Bereich fällt z. B. die Untersuchung, ob sich eine in regenarmen Gegenden bewährte Bauweise auch für regenreiche Gegenden eignet oder ob allgemeingültige Regeln bezüglich Schichtaufbau von Bauteilen erweitert werden können.

Hier soll eine generelle Aussage über eine Vielzahl von Objekten getroffen werden, die trotz ihrer Ähnlichkeit eine bestimmte Bandbreite von Konstruktions- und Materialkennwerten aufweisen. Diese Objekte sind außerdem ähnlichen, aber innerhalb einer gewissen Bandbreite variierenden Witterungseinflüssen ausgesetzt.

Die Beurteilung eines konkreten Einzelobjekts bzw. Konstruktionsaufbaus ist dafür nicht genügend aussagekräftig. Vielmehr muss die Bandbreite der Eingabedaten, d. h. die Bandbreite der Materialkennwerte und Klimarandbedingungen vergrößert werden. Die Fragestellung lautet in diesem Fall: Können innerhalb der Bandbreite der Eingabedaten und Ergebnisse kritische Feuchteerscheinungen mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden? Dazu sind sinngemäß alle Sicherheitsüberlegungen notwendig, wie sie in Kap. 2.2.2 formuliert sind.

In diesen Rahmen gehören auch Fälle, in denen Einzelobjekte untersucht werden sollen, aber bestimmte Kennwerte oder Eingabedaten nicht oder nur ungenügend bekannt sind. Es müssen dann typische Werte

und deren mögliche Variationsbreiten geschätzt werden. Gegebenenfalls sind auch umfassende Variantenberechnungen im Sinne von Extremwertbetrachtungen zielführend.

Grenzfälle: Zeigt sich, dass die Variation eines Eingabeparameters vernachlässigbare Auswirkungen auf das Ergebnis hat, so kann er bei weiteren Rechnungen durch einen typischen Wert ersetzt werden. Ist dagegen die Variation der Ergebnisse so groß, dass keine sinnvolle Aussage mehr möglich ist, so ist eine genauere Bestimmung des Parameters erforderlich. Generell kann es instruktiv sein, die Auswirkungen der Schwankung eines geschätzten Eingangswerts auf die Ergebnisse zu kennen, als ein einzelnes mit vermeintlich 'präzisen' Eingangsdaten berechnetes Ergebnis zu haben, über dessen Zuverlässigkeit aber nichts Genaues bekannt ist.

Als Ergebnis einer solchen Untersuchung werden allgemeingültige Aussagen erwartet. Diese beinhalten Ergebnisbereiche oder die Wahrscheinlichkeit für ein bestimmtes hygrothermisches Verhalten des Bauteils. Die Durchführung und Beurteilung solcher Untersuchungen erfordern Erfahrung und ein umfassendes Urteilsvermögen des Anwenders.

## 2.3 Erforderliche Genauigkeit und Sicherheit

Die Frage nach der notwendigen Genauigkeit und Sicherheit richtet sich entscheidend nach dem Ziel der Berechnungen. Je nach Ziel der Berechnung werden deshalb unterschiedlich strenge Anforderungen an die Genauigkeit des Berechnungsmodells und der Eingabedaten gestellt. Alle Berechnungsprogramme weisen Vereinfachungen und Modellannahmen auf. Auch die Eingabedaten sind mit unterschiedlichen Streuungen behaftet. Diese Voraussetzungen beeinflussen – zusammen mit dem gewählten Ziel der Berechnungen – maßgeblich das Sicherheitskonzept.

### **Beispiel**

*Im Rahmen einer Schadenanalyse soll beurteilt werden, ob Produktionsabweichungen bei einer bestimmten OSB-Platte zu Fäulnisschäden bei einer Dachkonstruktion führten. Eine verlässliche Aussage ist nur dann möglich, wenn die abweichenden Materialeigenschaften der OSB-Platte, die Klimarandbedingungen und weitere mögliche Schadenursachen detailliert bekannt sind. Dies bedingt weitergehende Abklärungen wie Laboruntersuchungen, Beschaffung von Klimadaten über die maßgebenden Jahre usw. Bei dieser Problemstellung wird angestrebt, die realen Verhältnisse möglichst genau, d. h. ohne Sicherheitszuschläge abzubilden. Das Ergebnis der Berechnungen und damit die Sicherheit der Aussage ist umso präziser, je genauer die Eingabedaten und das Berechnungsmodell sind.*

*Soll hingegen beurteilt werden, ob OSB-Platten überhaupt für eine bestimmte Dachkonstruktion an einem bestimmten Klimastandort geeignet sind, muss von vornherein mit einer Vielzahl verschiedener Plattentypen und zu erwartender Streuungen der Materialeigenschaften gerechnet werden. Die Ergebnisse liegen in einer gewissen Bandbreite, die zudem von weiteren Einflussfaktoren wie z. B. Ausführungsqualität, Eigenschaften von Nachbarmaterialien und Nutzungsrandbedingungen beeinflusst wird. Da die Funktionstüchtigkeit des Bauteils jedoch für die gesamte Bandbreite zu gewährleisten ist, müssten an sich die jeweils ungünstigsten Voraussetzungen kombiniert werden. Dies ist jedoch oft schwierig und aufwendig. Man behilft sich deshalb damit, geeignete Sicherheiten im Berechnungsmodell, bei den Eingabedaten und bei den Grenzwerten einzubauen.*

### 2.3.1 Verwendetes Berechnungsmodell

Bezüglich des Berechnungsmodells sind folgende Fragestellungen zu klären:

- Wie genau bildet das Berechnungsmodell die physikalische Realität ab? Welches sind die Grenzen des gewählten Rechenmodells?
- Welche der Mechanismen bezüglich Wärme-/Feuchtetransport und -speicherung müssen berücksichtigt werden? Wie relevant sind die einzelnen Transport- und Speicherprozesse (z. B. Dampfkonvektion, Eisbildungen)?
- Ist eine detaillierte oder nur eine grobe Simulation der Klimarandbedingungen innen und außen notwendig (z.B. Strahlung, Belüftungsschichten)?
- Sind Hilfsprogramme und weitere Untersuchungen notwendig (z. B. Laboruntersuchungen von Materialien, Erstellung standortspezifischer Klimadatensätze, Verschattungsberechnungen).

### 2.3.2 Genauigkeit der Eingabedaten

Die endliche Genauigkeit der Eingabedaten führt zu einer Unsicherheit der Rechenergebnisse. Je nach der akzeptablen Unsicherheit der Ergebnisse und dem Einfluss der Fehlerfortpflanzung werden unterschiedliche Anforderungen an die erlaubten Unsicherheiten der Eingabedaten gestellt.

Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass das Ausmaß der Fehlerfortpflanzung nicht nur von der individuellen Konstruktion, den eingesetzten Materialien und dem benutzten Rechenmodell, sondern auch von den konkret verwendeten Randbedingungen abhängt. In diesen Zusammenhang gehört auch die ggf. zu berücksichtigende Abhängigkeit einzelner Materialkennwerte von Feuchte und Temperatur z. B. bei der Wärmeleitfähigkeit, der Diffusionswiderstandszahl.

#### **Beispiel**

*Beregnetes Ziegelsichtmauerwerk folgt sehr rasch den klimatischen Randbedingungen. Sein Wassergehalt zu einem bestimmten Zeitpunkt hängt mehr von der kurzfristig auftretenden Regenmenge ab als von der genauen Eindringtiefe der Feuchtefront oder der exakten Austrockengeschwindigkeit. Daher ist die realistische Bestimmung der Klimabedingungen in diesem Fall sehr wichtig.*

*Eine austrocknende baufeuchte Betonwand hingegen reagiert wegen ihrer hygrothermischen Trägheit nur auf den langfristigen Charakter der Randbedingungen. Die Klimadaten müssen in diesem Fall nur den längerfristigen Trend richtig wiedergeben, kurzfristige Wetterereignisse sind weniger wichtig. Stattdessen sind möglichst exakte Materialkennwerte ausschlaggebend.*

### 2.3.3 Sicherheitsüberlegungen

Ob und welche Sicherheiten im Berechnungsmodell einzubauen sind, ist u. a. abhängig von folgenden Fragestellungen:

- Was ist das Ziel der Berechnungen?
- Welche Risiken oder Folgeschäden sind beim Überschreiten der Grenzwerte zu erwarten? Muss in diesem Fall mit einem vollständigen Versagen des Bauteils oder nur mit ästhetischen Mängeln gerechnet werden? Wird die Funktionstüchtigkeit des Bauteils im Betriebszustand periodisch kontrolliert? Welche Lebensdauer wird erwartet?
- Wie genau und umfassend ist das Berechnungsmodell? Können im Modell nicht berücksichtigte Transport- und Speichermechanismen eine maßgebende Rolle spielen?
- Mit welcher Bandbreite bei den Materialeigenschaften muss gerechnet werden? Welche Rolle spielen zusätzliche Materialien und Gegebenheiten, die bei der Berechnung nicht erfasst werden (z. B. Klebschicht bei Mehrschichtplatten, inhomogene Konstruktionsaufbauten, Veränderungen des Feuchtegehalts während der Lagerung oder Bauphase)
- Wie aussagekräftig sind die gewählten Annahmen beim Klimastandort? Muss mit Verschattungen oder erhöhtem Schlagregen gerechnet werden?
- Welche Nutzungs- bzw. Klimarandbedingungen innen können vorausgesetzt werden?
- Welche Ausführungsqualität kann erwartet werden?
- Ist mit speziellen Klimabedingungen während dem Einbau zu rechnen?

Diese Fragestellungen sollten in einem Sicherheitskonzept beantwortet werden.

#### **Beispiel**

*Bei der feuchtetechnischen Dimensionierung von Holzbauteilen sind feuchtetechnisch unterschiedliche Sicherheiten einzuplanen, wenn z. B.*

- a) *die Holztragkonstruktion raumseitig sichtbar und somit jederzeit kontrollierbar ist*
- b) *sich die tragenden Holzbauteile im Bereich der Wärmedämmschicht befinden und in Folien (Abdichtung, Dampfbremse) eingeschlossen sind*
- c) *nicht das Risiko von Fäulnisschäden, sondern das Risiko von ästhetischen Veränderungen oder von Schimmelpilzbefall beurteilt werden soll*
- d) *mit Winterbaubedingungen bzw. Einstellung der Bauarbeiten gerechnet werden muss-*

Das Sicherheitskonzept im Fall b) umfasst z. B. nachfolgende Prozesse und Eingabedatensätze:

- *Dampfdiffusion (Definition eines Austrocknungspotentials)*
- *Dampfkonvektion (Ansatz Luftinfiltrationsmodell)*
- *Feuchtespeicherung (definierter Grenzwert Holzfeuchte)*
- *Einbaufeuchte (Annahme hohe Ausgangsfeuchte)*
- *Außenklima (Berechnung mit Referenzjahr)*
- *Innenklima (Abhängigkeit vom Außenklima)*
- *Verschattung (reduzierte Strahlungskennwerte)*

Zusätzlich können weitere Sicherheiten z. B. durch Kontrollen (Blower-Door-Test mit Leckageortung, Monitoring) und beim Konstruktionsaufbau (Einbau einer sekundären Abdichtung oder Bauzeitabdichtung) definiert werden.

In den anwendungsbezogenen WTA-Merkblättern 6-3, 6-5 und 6-8 wird gezeigt, wie die Sicherheitsüberlegungen in einem Sicherheitskonzept umgesetzt werden können. Die konkrete Anwendung und die Wahl von sinnvollen 'sicheren' Parametern ist eine individuelle Entscheidung, die sich auf die Praxiserfahrung und das Urteilsvermögen des Anwenders stützen muss.

## 2.4 Festlegung der untersuchten Konstruktion

Es muss Klarheit darüber geschaffen werden, welche Konstruktion untersucht werden soll, welche Details dieser Konstruktion wesentlich sind und welche vernachlässigt werden können. Genügt eine eindimensionale Rechnung oder muss mehrdimensional gerechnet werden? Wie sieht der geometrische Aufbau der Konstruktion aus? Können evtl. ganze Teile davon weggelassen werden.

### **Beispiel**

*Sind die Befestigungsdübel in einem Wärmedämmverbundsystem mit ihrer Wärmebrückenwirkung für die vorliegende Untersuchung wesentlich oder können sie weggelassen werden?*

*Die in einer Ecke auftretende geometrische Wärmebrücke kann durch eine eindimensionale Rechnung nicht erfasst werden.*

*Kann man eine Durchlüftungsschicht unterhalb der Deckung bei geneigten Dächern weglassen oder lässt sich diese einfach simulieren?*

## 2.5 Festlegung der benötigten hygrothermischen Kenndaten

Für die gewählte Konstruktion sind die relevanten Materialkenndaten und gegebenenfalls ihre zu erwartenden oder zulässigen Streubreiten festzulegen.

Soll eine konkret bestehende Konstruktion berechnet werden oder ein Konstruktionstyp mit einer bestimmten Bandbreite möglicher Kenndaten? Mit welchen herstellungsbedingten Schwankungen der Kenndaten ist zu rechnen, mit welchen ausführungsbedingten Variationen in den Eigenschaften der Konstruktion?

### **Beispiele**

*Die unterschiedlichen Diffusionswiderstände verschiedener Betonvarianten können, sofern sie für das Rechenergebnis bedeutsam sind, ggf. sogar eine Einzelprüfung nötig machen.*

*Handgefertigte Ziegel oder Naturbaustoffe können auch innerhalb einer Wand solche Variationen aufweisen, dass von vorneherein nur pauschale Aussagen über eine bestimmte Ergebnisbandbreite möglich sind.*

*Verfahrensbedingte Schwankungen von Eigenschaften treten z. B. an Fugen im Beton bei Kletterbauweise auf, hier nicht innerhalb einer Wand, aber innerhalb eines Bauwerks.*



Ist eine alterungsbedingte Änderung der Eigenschaften der Materialien oder der Konstruktion zu erwarten? Welchen Einfluss haben diese Änderungen? Liegen keine ausreichenden Daten über solche, zum Teil sehr komplexe Prozesse vor, ist eine zeitliche Extrapolation u. U. problematisch.

**Beispiele**

*Die bei der Carbonatisierung von Beton eintretende Gefügeänderung muss bei langfristigen Berechnungen evtl. berücksichtigt werden.*

*Verwitterungsvorgänge an der Oberfläche von Natursandsteinwänden können schon in relativ kurzer Zeit deren Wasseraufnahmeverhalten ändern.*

Gibt es Wechselwirkungen zwischen den Baumaterialien, so dass Grenzschichten mit neuen Eigenschaften entstehen?

**Beispiel**

*Zwischen Mauerwerk und Putz kann sich, wenn Bestandteile des Putzmörtels die Mauerwerksporen verstopfen, eine Übergangsschicht mit erheblichem Widerstand gegenüber Kapillartransport bilden.*

## 2.6 Festlegung der verwendeten Randbedingungen

Welche Randbedingungen in welcher Form zu berücksichtigen sind, ist fallspezifisch. Die nachfolgenden Fragen helfen, das Thema einzugrenzen. Sie sind bei Bedarf zu ergänzen:

- Soll rückblickend das Verhalten eines bestimmten Bauteils unter Verwendung der an Ort und Stelle gemessenen Wetterdaten nachvollzogen werden? (siehe 2.2.1)
- Soll das real zu erwartende typische Verhalten eines Bauteils unter Verwendung repräsentativer Wetterdaten einer Klimaregion vorhergesagt werden? (siehe 2.2.2)
- Soll eine Beurteilung unter besonders strengen, nicht unbedingt realistischen Bedingungen erfolgen? (siehe 2.2.3)
- Sollen gemessene oder synthetische Wetterdaten verwendet werden?

**Beispiel**

*Für die Planung der objektspezifischen Schlagregenbelastung sollten die Datensätze von Referenzstandorten entsprechend der lokalen Bedingungen (Normalregenmenge, Windgeschwindigkeit und -richtung) angepasst werden.*

- Unter welchen Gesichtspunkten wurden letztere erzeugt oder müssen sie erzeugt werden?

**Beispiel**

*Stündliche Regendaten geben zwar die Regenmenge richtig wieder, setzen die Niederschlagsdauer aber u. U. etwas zu hoch an. Die damit errechnete Schlagregenaufnahme kann ggf. zu hoch sein.*

- Welche Klimawirkungen haben einen relevanten Einfluss auf die zu untersuchende Konstruktion?

**Beispiel**

*Für die Untersuchung des Feuchtehaushalts eines beschatteten Norddaches sind genaue Daten über die Sonneneinstrahlung weniger wichtig als für die Untersuchung der Wärmegewinne einer Südwand.*

Insbesondere ist bei Verwendung eines vermeintlich 'typischen' oder 'strengen' Jahres zu beachten, dass ein und dasselbe Jahr durchaus für eine Konstruktion milde Verhältnisse, für eine andere Konstruktion aber strenge Verhältnisse darstellen kann.

**Beispiel**

*Kommt es z. B. auf die Belastung eines Mauerwerks durch Frost-Tau-Wechsel an, so ist ein 'strenges' Jahr nicht etwa ein besonders kaltes, sondern gerade eines mit Temperaturen, die häufig um den Nullpunkt herum schwanken. Verschärft wird dieses Jahr noch, wenn im Winter der Niederschlag hauptsächlich als Regen fällt.*

*Soll hingegen die Belastung eines WDVS oder eines zweischaligen Mauerwerks durch Sommerkondensation (Feuchtwanderung von der erwärmten feuchten Putzschicht bzw. Vorsatz-*

*schale ins Mauerwerk hinein) untersucht werden, so wird die Belastung hauptsächlich durch warme, sonnenreiche Sommer verursacht. Beim WDVS wird ein 'strenges' Jahr noch häufige Regenfälle vor dem Aufheizen der Putzschicht enthalten. In der Vorsatzschale des zweischaligen Mauerwerks dagegen herrscht ständig eine erhöhte relative Feuchte, so dass die Sommerkondensation hauptsächlich von den Temperaturverhältnissen und kaum von der Niederschlagsmenge, -häufigkeit und -dauer beeinflusst wird.*

- Wie groß ist der Einfluss kurzfristiger Wetterereignisse, d. h. wie groß die hygrothermische Trägheit der Konstruktion? Muss nur der längerfristige Wettertrend richtig wiedergegeben werden oder ist jeder Schlagregen realistisch abzubilden?

**Beispiel**

*Siehe obigen Vergleich zwischen einem Ziegelsichtmauerwerk und einer Betonwand.*

- Genügen für das Innenklima pauschale mittlere Werte oder müssen individuell gemessene oder simulierte Werte verwendet werden?
- Über welchen Zeitraum soll gerechnet werden? Soll nur eine bestimmte kurzfristige Belastungssituation nachgerechnet werden oder das langjährige Verhalten unter typischen Wetterbedingungen?
- Falls über ein oder mehrere Jahre gerechnet werden soll: zu welchem Zeitpunkt im Jahr ist die Rechnung zu starten?

**Beispiel**

*Soll das Austrocknenverhalten eines baufeuchten Mauerwerks untersucht werden, so bietet sich an, die Rechnung 'auf der sicheren Seite' mit Beginn der Heizperiode zu starten, so dass das Trocknungspotential des ersten Sommers nicht mehr genutzt werden kann. Ist hingegen die Feuchtebelastung durch Sommerkondensation verursacht, z. B. in einem Wärmedämmverbundsystem, so sollte die Rechnung die besondere Feuchtebelastung des ersten Sommers berücksichtigen, indem sie im Frühsommer startet.*

- Welche Übergangsbedingungen sollen den Wärme- und Feuchteausaustausch zwischen Konstruktion und Umgebung beschreiben?
- Genügen pauschale Standardwerte oder sind konstruktions- und standortbedingte Besonderheiten zu berücksichtigen?

**Beispiel**

*In windgeschützten Lagen sind ggf. andere Wärmeübergangskoeffizienten anzusetzen als in exponierten Lagen. Bei verschatteten Bauteilen ist die genaue Wahl der Strahlungsabsorptionsszahl von untergeordneter Bedeutung.*

## 2.7 Berücksichtigung von Wärme- und Feuchtequellen

Welche Wärme-/Feuchtequellen sind für die vorliegenden Untersuchungen wichtig? Interessiert nur der alltägliche Feuchteeintrag durch Regen sowie Außen- und Innenluftfeuchte? Ist Tauwasserausfall zu erwarten? Kann durch Luftströmung Feuchte in die Konstruktion gelangen oder abgeführt werden?

Unter Umständen sind fallspezifische Anfangszustände zu berücksichtigen, z. B. Baufeuchte, deren Austrockendauer ermittelt werden soll, oder es müssen spezielle Szenarien untersucht werden, wie z. B. Wasserschäden oder aufsteigende Feuchte.

## 2.8 Konzentration auf bestimmte Problemaspekte

Sollen statt einer umfassenden hygrothermischen Analyse einer Konstruktion nur bestimmte Aspekte untersucht werden, so kann sich der Aufwand erheblich reduzieren.

**Beispiel**

*Wenn in einer zweischaligen Wand nur die Verhältnisse im Dämmstoff untersucht werden sollen, so können u. U. die Fugen im Mauerwerk mit den Mauersteinen zu einem homogenen Material 'verschmiert' werden. Spielt jedoch die Wasseraufnahme der Mörtelfugen eine Rolle, so müssen sie explizit im Modell abgebildet werden.*

## 2.9 Festlegung des Zeit- und Finanzrahmens der Untersuchungen

Der Zeit- und Finanzrahmen hat einen großen Einfluss auf die Zahl der untersuchten Fälle, den Umfang von Parameterstudien und die Gründlichkeit, mit der die Eingabedaten erhoben werden können. Gegebenenfalls ist zu entscheiden, ob und worauf die Untersuchung beschränkt werden kann oder welche Prioritäten gesetzt werden müssen. Andererseits können rechnerische Parameterstudien exakte Labormessungen überflüssig machen.

## 3 Schritt 2: Vorbereitung der Rechnung

Im ersten Schritt wurden Zielrichtung und Umfang der geplanten Untersuchungen allgemein geklärt. Im zweiten Schritt müssen nun die entsprechenden Eingabedaten und Rechenabläufe konkret festgelegt werden.

### 3.1 Auswahl der Bewertungskriterien

In Abhängigkeit vom Ziel der Analyse sind die zu beurteilenden Aspekte und geeignete Bewertungskriterien festzulegen (siehe Kapitel 6). Bei der Eingabe ist sicher zu stellen, dass die zu bewertenden Ergebnisgrößen an den kritischen Positionen ausgegeben werden.

### 3.2 Testrechnungen und Variantenanalysen

Sofern das allgemeine Verhalten der Konstruktion nicht bereits aufgrund von Erfahrungen in der Praxis oder mit ähnlich gelagerten Simulationen hinreichend genau abgeschätzt werden kann, liefern vorläufige Testrechnungen, ggf. mit nur geschätzten Kenndaten, erste Einsichten in die maßgeblichen Vorgänge. Danach kann entschieden werden, welche Aspekte von Interesse sind, welche Eingabedaten relevanten Einfluss haben und welche Parameter eventuell variiert werden müssen (Sensitivitätsanalyse).

### 3.3 Festlegen der Berechnungsfälle

Anschließend ist festzulegen, welche maßgeblichen Fälle gerechnet werden sollen und welche Parameter ggf. in welchem Umfang zu variieren sind. Danach richtet sich auch der Aufwand zur Beschaffung der nötigen Eingabedaten.

### 3.4 Ermittlung der Eingabedaten

#### 3.4.1 Geometrie der Konstruktion

Der geometrische Aufbau wird in diesem Schritt in Zahlen gefasst. Für manche Materialschichten kann die Verwendung effektiver Dicken und entsprechend angepasster effektiver Transportkoeffizienten erforderlich oder nützlich sein.

#### **Beispiel**

*Wenn im Fall von Luftschichten aufgrund von Beschränkungen des Rechenmodells nicht explizit mit Konvektionsströmungen gerechnet werden kann, so dass der Einfluss der Konvektion auf Wärmetransport und Dampfdiffusion durch Wahl effektiver Transportkoeffizienten berücksichtigt werden muss. Dann lässt sich der Einfluss verschiedener Luftschichtdicken auch gleich mit in die effektiven Transportkoeffizienten aufnehmen.*

*Wenn dünne Schichten wie Folien in der Konstruktion vorkommen, können diese ggf. über Datensätze mit vereinheitlichter Schichtstärke (1 mm) diskretisiert, oder ohne Diskretisierung über Transportwiderstände zwischen den Materialschichten modelliert werden.*

#### 3.4.2 Materialkenndaten

Die notwendigen Materialkenndaten sind aus der Programmdatenbank oder der Literatur zu entnehmen, durch Messungen zu ermitteln oder aus anderen Daten rechnerisch abzuleiten. In Abhängigkeit von der Genauigkeit der vorliegenden Daten ist ggf. eine Sensitivitätsanalyse sinnvoll.

### 3.4.3 Klimadaten und Übergangskoeffizienten

Je nach Berechnungsfall sind die Klimadaten im erforderlichen Umfang aus Messreihen zu entnehmen, von Wetterämtern zu besorgen oder künstlich zu erzeugen. Für die Übergangskoeffizienten können je nach Anforderungen einfache konstante Pauschalwerte, einfache windabhängige Funktionswerte oder z. B. die Ergebnisse detaillierter strömungsmechanischer Simulationen verwendet werden.

### 3.4.4 Anfangsbedingungen

Sind keine fallspezifischen Anfangsbedingungen für die Feuchtegehalte anzusetzen, so kann der durchschnittliche 'Normalzustand' für den Start der Rechnung verwendet werden.

#### **Beispiel**

*Die Baufeuchte oder ein gemessenes Feuchteprofil kann angesetzt werden, wenn deren Weiterentwicklung rechnerisch verfolgt werden soll. Anderenfalls kann eine über das Bauteil konstante relative Feuchte von 80% verwendet, oder die Startbedingungen durch eine Vorlaufrechnung ermittelt werden.*

Die Temperaturen im Bauteil stellen sich in der Regel innerhalb weniger Stunden nach Maßgabe der Randbedingungen ein, so dass hier meist eine grobe Vorgabe ausreichend ist.

## 4 Schritt 3: Durchführung der Rechnung

### 4.1 Dateneingabe und Rechnung

Die notwendigen Datensätze werden in das Programm eingegeben und auf Eingabefehler überprüft.

Vor dem Start der Rechnung wird das Rechengitter erzeugt, ein geeigneter Zeitschritt gewählt, ggf. Parameter zur Feinsteuerung des Programms gesetzt und sonstige programmspezifische Vorbereitungen durchgeführt.

### 4.2 Ausgabe und Kontrolle der Ergebnisse

Die Rechenergebnisse werden im gewünschten Format ausgegeben und auf offensichtliche Fehler geprüft. Gegebenenfalls wird die Fehlerursache beseitigt und die Rechnung wiederholt.

## 5 Schritt 4: Analyse der Ergebnisse

### 5.1 Analyse der rechentechnischen Zuverlässigkeit

Zunächst muss sichergestellt werden, dass die numerische Lösung des Rechenmodells fehlerfrei ist. Dies kann durch vom Programm selbst gelieferte diagnostische Daten, durch Variation des Rechengitters und der Zeitschrittweite, durch Wiederholung der Rechnung mit entsprechend abgeänderten Eingabedaten und durch Vergleich mit anderen Simulationsprogrammen geschehen.

### 5.2 Analyse der hygrothermischen Zustände

Die vom Programm gelieferten hygrothermischen Abläufe in der Konstruktion sind auf Plausibilität zu prüfen. Dies kann durch Vergleich mit der Praxiserfahrung geschehen, durch Vergleich mit anderen Programmen, die ein ähnliches oder ein anderes physikalisches Modell benutzen oder durch gezielte Variation der Eingabedaten.

Bei unerwarteten Ergebnissen ist die Ursache für das Verhalten zu klären. Mögliche Ursachen können sein: Eingabefehler, Programmfehler, unzureichendes physikalisches Modell, Auswertefehler, falsche Erwartung.

Insbesondere ist zu beachten: Übereinstimmung mit der Erwartung stellt sich auch dann ein, wenn Erwartung und Berechnung auf demselben fehlerhaften physikalischen Modell beruhen.

### 5.3 Analyse der Ergebnisvariation

Bei Durchführung einer Serie von Rechnungen mit variierten Parametern ist die Bandbreite der Ergebnisse auszuwerten und ggf. mit statistischen Methoden weiterzuverarbeiten.

## 6 Schritt 5: Interpretation und Bewertung

In einem weiteren Schritt erfolgt je nach Zielsetzung die Interpretation der Ergebnisse und eine Bewertung der maßgeblichen hygrothermischen Parameter.

### 6.1 Beurteilung der Berechnungsergebnisse

Eine Bewertung erfolgt meist, indem aus dem Berechnungsergebnis die maßgeblichen Parameter bestimmt und diese dann mit einem vorgegebenen Bewertungskriterium verglichen werden.

#### **Beispiel**

*Bleiben die Anzahl der Frost/Tauwechsel oder der maximale Wassergehalt unter einem bestimmten Grenzwert?*

*Ist die zu erwartende Austrockendauer akzeptabel?*

*Lassen die berechneten Oberflächenfeuchten und –temperaturen Schimmelpilzwachstum zu?*

*Treten durch hygrothermische Formveränderungen zu große mechanische Spannungen auf?*

*Ziehen die berechneten Tauwasserwassermengen in der Dämmung inakzeptable Wärmeverluste nach sich?*

Bewertungskriterien befinden sich u. a. in den Merkblättern 6-2, 6-3, 6-5 und 6-8.

Es ist darauf zu achten, dass die Bewertungskriterien auch zu der Berechnungsmethode passen. Stationäre Grenzwerte sind auf instationäre Simulationsergebnisse nur bedingt anwendbar. Auch Bewertungskriterien aus vereinfachten Berechnungsverfahren wie z. B. dem Glaser-Verfahren können ggf. nicht auf Ergebnisse aus der hygrothermischen Simulation angewendet werden.

#### **Beispiel**

*Die Forderung, dass die Feuchte von Holz oder Holzwerkstoffen nicht mehr als 5 % bzw. 3 % steigen darf (DIN 4108-3), ist auf die hygrothermische Simulation nicht übertragbar.*

Falls keine geeigneten Bewertungskriterien vorliegen, kann die Konstruktion immer noch mit anderen Konstruktionen verglichen und in einer Rangfolge oder auf einer Tauglichkeitsskala eingeordnet werden.

### 6.2 Folgeuntersuchungen

Die in diesem Durchlauf gewonnenen Erkenntnisse können dazu führen, dass neue Prioritäten gesetzt, die Relevanz bestimmter Einflüsse neu eingeschätzt oder andere Bewertungskriterien als geeigneter angesehen werden. In diesen Fällen wird der gesamte Vorgang ab Schritt 1 oder 2 wiederholt.

## 7 Schritt 6: Berichterstattung

Die Dokumentation sollte so ausführlich gehalten werden, dass sie einem fachkundigen Dritten ermöglicht, die Untersuchung nachzuvollziehen. Dazu zählen u. a. die Angabe der Bezugsquellen aller Daten und eine Argumentation der getroffenen Entscheidungen.

Die detaillierten Anforderungen, die eine Dokumentation erfüllen muss, sind im WTA-Merkblatt 6-2 sowie in der EN 15026 aufgeführt.

## 8 Literatur

- [1] EN 15026: 2009-07 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2009
- [2] WTA Merkblatt 6-2 Ausgabe: 12.2014/D „Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse“, Hrsg. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, Referat 6 „Bauphysik“, IRB Verlag, Stuttgart 2014
- [3] WTA Merkblatt 6-3 Ausgabe: 04.2006/D „Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos“, Hrsg. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, Referat 6 „Bauphysik“, IRB Verlag, Stuttgart 2006
- [4] WTA Merkblatt 6-5 Ausgabe: 04.2014/D „Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren“, Hrsg. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, Referat 6 „Bauphysik“, IRB Verlag, Stuttgart 2014
- [5] WTA Merkblatt 6-8 Ausgabe: 08.2016/D „Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse“, Hrsg. Wissenschaftlich Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege, Referat 6 „Bauphysik“, IRB Verlag, Stuttgart 2016