

DIN EN 15026

ICS 91.120.01

Entwurf

Einsprüche bis 2022-05-11
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 15026:2007-07

**Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und
Bauelementen –
Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation;
Deutsche und Englische Fassung prEN 15026:2022**

Hygrothermal performance of building components and building elements –
Assessment of moisture transfer by numerical simulation;
German and English version prEN 15026:2022

Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments –
Evaluation du transfert d'humidité par simulation numérique;
Version allemande et anglaise prEN 15026:2022

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2022-03-11 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an nabau@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), 10772 Berlin oder Am DIN-Platz, Burggrafenstr. 6, 10787 Berlin.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 96 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 15026:2022) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 89 „Wärmeschutz von Gebäuden und Bauteilen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von SIS (Schweden) gehalten wird.

Das zuständige nationale Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-56-99 AA „Feuchte (SpA zu CEN/TC 89/WG 10, ISO/TC 163/SC 1/WG 8, ISO/TC 163/SC 2/WG 16)“ im DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 11357-4 siehe DIN EN ISO 11357-4

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 15026:2007-07 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Einleitung überarbeitet;
- b) Anwendungsbereich überarbeitet;
- c) normative Verweisungen aktualisiert;
- d) Abschnitt 4 redaktionell und inhaltlich überarbeitet;
- e) Abschnitt 5 redaktionell und inhaltlich überarbeitet;
- f) neuer Abschnitt 6 ergänzt;
- g) Abschnitt 7 (vormals Abschnitt 6) redaktionell und inhaltlich überarbeitet;
- h) neuer informativer Anhang A ergänzt;
- i) Anhang B (vormals Anhang A) redaktionell und inhaltlich überarbeitet;
- j) Anhang C (vormals Anhang B) redaktionell und inhaltlich überarbeitet;
- k) Anhang D (vormals Anhang C) redaktionell und inhaltlich überarbeitet;
- l) neuer normativer Anhang E ergänzt;
- m) Literaturhinweise aktualisiert und ergänzt.

Nationaler Anhang NA
(informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 11357-4, *Kunststoffe — Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) — Teil 4: Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität*

– *Entwurf* –

E DIN EN 15026:2022-04

– Leerseite –

**Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen –
Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation**

Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation

Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments – Evaluation du transfert d'humidité par simulation numérique

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe, Symbole und Einheiten	8
4 Auf die Wärme- und Feuchtetechnik bezogene Gleichungen und Baustoffeigenschaften	10
4.1 Annahmen	10
4.2 Bilanzgleichungen	10
4.2.1 Allgemeines	10
4.2.2 Innere Energiedichte	10
4.2.3 Zusätzliche Quellenterme	11
4.3 Beziehungen zwischen treibenden Potentialen und Erhaltungsgrößen	11
4.4 Transport von Wärme und Feuchte	12
4.4.1 Wärme- und Enthalpietransport innerhalb von Baustoffen	12
4.4.2 Feuchtetransport	13
4.4.3 Feuchtetransport über Baustoffgrenzflächen/Wasserdampfbremsen/Folien hinweg	14
4.4.4 Luftschichten in Innenräumen	14
4.5 Baustoffeigenschaften	14
5 Rand- und Anfangsbedingungen	15
5.1 Innenraumbedingungen	15
5.1.1 Nutzungsbedingungen	15
5.1.2 Parameter	15
5.1.3 Datenquellen	15
5.2 Außenbedingungen	15
5.2.1 Datenquellen	15
5.2.2 Klimaparameter	16
5.3 Interpolation von tabellarischen Klimadaten	17
5.4 Grenz-Wärme- und -Feuchteströme	17
5.4.1 Wärmeübertragung	17
5.4.2 Dampfdiffusion	20
5.4.3 Konvektionsbedingter latenter Wärmestrom	20
5.4.4 Schlagregen	20
5.5 Anfangsbedingungen	21
6 Numerische Simulation	21
6.1 Hintergrund	21
6.2 Geometrische Modellierung	21
6.3 Studien zur Gitter- und Zeitschrittsensitivität	22
7 Dokumentation der Eingangsdaten und Ergebnisse	23
7.1 Allgemeines	23
7.2 Problembeschreibung	23
7.2.1 Allgemeines	23
7.2.2 Anwendungsbereich und Simulationsgegenstand	23
7.3 Modellgeometrie und Eingangsparameter	23
7.3.1 Simulierte Geometrie	23
7.3.2 Anfangsbedingungen	23
7.3.3 Randbedingungen	23
7.3.4 Baustoffparameter	24
7.3.5 Hilfsmodelle	24
7.3.6 Ausgangsspezifikationen	24
7.4 Simulationsverfahren und numerische Eigenschaften	24
7.4.1 Allgemeines	24

7.4.2	Simulationswerkzeug	24
7.4.3	Eigenschaften der numerischen Simulation	24
7.4.4	Überwachung der numerischen Präzision	25
7.5	Berechnungsbericht	25
7.5.1	Allgemeines	25
7.5.2	Darstellung der Ergebnisse	25
7.5.3	Interpretation der Ergebnisse	25
Anhang A (informativ) Baustoffparameter		27
A.1	Allgemeines	27
A.2	Wärmespeicherung	27
A.3	Wärmetransport	27
A.4	Feuchtespeicherung	29
A.5	Feuchtetransporteigenschaften	30
A.5.1	Wasserdampfdiffusionswiderstand	30
A.5.2	Flüssigkeitstransporteigenschaften	31
A.6	Baustoffbezogene Einschränkungen der Modelle	33
A.6.1	Einfluss von Baustoffgrenzen auf den Flüssigfeuchtetransport	33
A.6.2	Hysteresephänomene	33
A.6.3	Quellung	34
A.6.4	Bewitterung und Alterung	34
Anhang B (normativ) Vergleichsprüfungen		35
B.1	Allgemeines	35
B.1.1	Referenzimplementierung	35
B.2	Problembeschreibung	35
B.3	Ergebnisse	36
B.4	Andere Vergleichsfälle und Validierungsprogrammsammlungen	38
Anhang C (informativ) Jahre bis zur Reife des Designs		39
Anhang D (normativ) Randbedingungen für die Innenräume von Wohn- und Bürogebäuden		40
Anhang E (normativ) Hilfsmodelle für die vereinfachte Einbeziehung von speziellen Auswirkungen		41
E.1	Allgemeines	41
E.2	Hinterlüftung und Belüftung von Bauteilen	41
E.3	Durch Luftströme durch Bauteile verursachte Kondensation	42
E.4	Schlagregeneindringung	43
Literaturhinweise		44

Bilder

Bild A.1	— Zuordnung von typischen Feuchtetransportversuchen zu den Feuchtebereichen [34]	33
Bild B.1	— Bezugslösung für die Feuchtegehaltsprofile nach 7 Tagen, 30 Tagen und 365 Tagen und für die Annehmbarkeit geltende obere und untere Grenzwerte	37
Bild D.1	— Tagesmittel der relativen Luftfeuchte und Temperatur in Gebäuden und Büros in Abhängigkeit von der Außentemperatur	40

Tabellen

Tabelle 1	— Wärmekapazitäten und latente Verdampfungswärme	12
Tabelle 2	— Typische Wärmeübergangskoeffizienten und Wasserdampf-Diffusionsübergangskoeffizienten	18
Tabelle 3	— Typische Absorptionskoeffizienten für kurzwellige Strahlung	19
Tabelle B.1	— Feuchtegehalte in kg/m ³ an einzelnen Stellen nach 7 Tagen, 30 Tagen und 365 Tagen nach Claesson (ref) und zulässiger Wertebereich (Mindest- und Höchstwerte, ± 2,5 %-Intervall)	37

Tabelle B.2 — Temperaturen in °C an einzelnen Stellen nach 7 Tagen, 30 Tagen und 365 Tagen nach Claesson (ref) und zulässiger Wertebereich (Mindest- und Höchstwerte, ± 1 %-Intervall)	37
---	-----------

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 15026:2022) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 89 „Wärmeschutz von Gebäuden und Bauteilen“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom SIS gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN 15026:2007 ersetzen.

Einleitung

Dieses Dokument legt die praktische Anwendung von Software für die wärme- und feuchtetechnische Simulation fest, die bei der Vorhersage der transienten Wärme- und Feuchteübertragung in Bauteilen von mehrschichtigen Gebäudehüllen eingesetzt wird, die auf beiden Seiten dynamischen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sind.

Im Gegensatz zur stationären Bewertung von Porenkondenswasser nach dem (in EN ISO 13788 beschriebenen) Glaser-Verfahren liefert die transiente wärme- und feuchtetechnische Simulation detailliertere und genauere Informationen zur Gefahr feuchtebedingter Probleme in Bauteilen und zur Entwicklung entsprechender Abhilfemaßnahmen. Während das Verfahren nach Glaser lediglich die stationäre Wärmeleitung und Dampfdiffusion berücksichtigt, beziehen die aus den in diesem Dokument festgelegten Gleichungen gebildeten wärme- und feuchtetechnischen Simulationsmodelle auch die Wärme- und Feuchtespeicherung, Wirkungen latenter Wärme und den Transport mittels Flüssigkeiten und Konvektion unter realistischen Rand- und Anfangsbedingungen mit ein. Die Anwendung derartiger Modelle im Bauwesen hat in den letzten Jahren stark zugenommen, was zu einer bedeutenden Verbesserung der Genauigkeit und Vergleichpräzision der wärme- und feuchtetechnischen Simulation geführt hat.

Folgende Beispiele für transiente Wärme- und Feuchteerscheinungen in Bauteilen können mit Hilfe der in diesem Dokument behandelten Modelle simuliert werden:

- Trocknen der baubedingten Anfangsfeuchte;
- Feuchteansammlung durch Porenkondensation aufgrund von Diffusion im Winter;
- Eindringen von Feuchte aufgrund von Schlagregen;
- Sommerkondensation aufgrund der Feuchteausbreitung von der Außen- zur Raumseite;
- Kondensation auf den Außenflächen aufgrund von Abkühlung durch den Austausch von Langwellenstrahlung;
- feuchtebedingte Wärmeverluste aufgrund von Transmission und Verdampfung von Feuchte.

Die für die wärme- und feuchtetechnische Simulation von Bauteilen maßgebenden Faktoren sind im Folgenden zusammengefasst. Dieses Dokument beginnt mit der Beschreibung des physikalischen Modells, auf dem die wärme- und feuchteschutztechnischen Simulationswerkzeuge beruhen. Anschließend werden die notwendigen Eingangsparameter sowie deren Ermittlung behandelt. Den letzten Teil bilden die Beurteilung, Auswertung und Dokumentation der Ausgangsdaten. Vergleichsfälle für die Beurteilung von Werkzeugen für die numerische Simulation werden in Anhang B erörtert.

Zu den Eingangsparametern gehören:

- Montage, Ausrichtung und Neigung des Bauteils;
- wärme- und feuchtetechnische Baustoffparameter und Funktionen;
- Randbedingungen, Oberflächenübertragung für Innenraum- und Außenklima;
- Anfangsbedingung, Berechnungszeitraum, numerische Überwachungsparameter.

Zu den Ausgangsparametern gehören:

- Temperatur- und Wärmeflussverteilung sowie zeitliche Schwankungen;
- Wassergehalt, relative Luftfeuchte und Feuchteflussverteilung sowie zeitliche Schwankungen.

Die Nachbearbeitung umfasst:

- Energieverbrauch, Wirtschaftlichkeit und Ökologie;
- biologisches Wachstum, Fäule und Korrosion;
- feuchtebedingter Schaden und Zersetzung.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt die in einem numerischen Modell der wärme- und feuchtetechnischen Simulation zur Berechnung der transienten Wärme- und Feuchteübertragung innerhalb von Bauwerken zu verwendenden Modellkomponenten fest.

Dieses Dokument legt ein Verfahren fest, das dazu dient, zu validieren, dass das betreffende numerische Modell der wärme- und feuchtetechnischen Simulation diesem Dokument entspricht.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN ISO 7345, *Wärmeverhalten von Gebäuden und Baustoffen — Physikalische Größen und Definitionen* (ISO 7345:2018)

EN ISO 9346, *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Gebäuden und Baustoffen — Physikalische Größen für den Stofftransport — Begriffe* (ISO 9346:2007)

3 Begriffe, Symbole und Einheiten

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN ISO 9346 und EN ISO 7345 und die folgenden von diesen Dokumenten nicht abgedeckten spezifischen Begriffe.

Symbol	Größe	Einheit
a_r	Regenwasserrückhaltungszahl einer Oberfläche	– (0 ... 1)
c_1	spezifische Wärmekapazität von Flüssigwasser	J/(kg·K)
c_v	spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf	J/(kg·K)
c_{ice}	spezifische Wärmekapazität von Eis	J/(kg·K)
c_a	spezifische Wärmekapazität von Luft	J/(kg·K)
c_s	spezifische Wärmekapazität von trockenen Baustoffen (Feststoffen)	J/(kg·K)
D_1	Leitfähigkeit von Flüssigkeiten	m ² /s
E_{sol}	Gesamtflussdichte von einfallender Solarstrahlung	W/m ²
g, g_w	Feuchtestromdichte	kg/(m ² ·s)
g_l	Flüssigwasserstromdichte	kg/(m ² ·s)
g_v	Dampfstromdichte	kg/(m ² ·s)
$g_{l,max}$	Dichte des Wasserstroms, der an der Oberfläche eines Baustoffes absorbiert werden kann	kg/(m ² ·s)
g_p	Feuchtestromdichte des durch Niederschlag zur Verfügung stehenden Wassers	kg/(m ² ·s)
h	Oberflächen-Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² ·K)
h_c	Konvektionswärmeübergangskoeffizient	W/(m ² ·K)
h_r	Strahlungswärmeübergangskoeffizient	W/(m ² ·K)
h_e	spezifische latente Verdampfungs- oder Kondensationsenthalpie	J/kg
h_l	spezifische Enthalpie von Flüssigwasser	J/kg

Symbol	Größe	Einheit
h_v	spezifische Enthalpie von Wasserdampf	J/kg
K_l	Leitfähigkeit von Flüssigkeiten	s/m
n_{vent}	Luftwechselrate	1/s
p_a	Umgebungsluftdruck	Pa
p_c	Kapillardruck	Pa
p_v	Wasserdampfteildruck	Pa
$p_{v,e}$	Wasserdampfteildruck in der Umgebungs-/Raumluft	Pa
$p_{v,s}$	Wasserdampfteildruck an einer Oberfläche	Pa
$p_{v,\text{sat}}$	Sättigungsdampfdruck	Pa
q	Wärmestromdichte	W/m ²
q_{sens}	Dichte des fühlbaren Wärmestroms	W/m ²
r_l	Widerstand der Grenzfläche gegen Flüssigfeuchteströmung	m/s
R_N	Geschwindigkeit des Regenfalls senkrecht (d. h. rechtwinklig) zur Ebenen	mm/s
r_s	Regenexpositionsfaktor einer Oberfläche	—
r_v	Wasserdampf-Diffusionswiderstand der Oberfläche	m/s
R_v	Gaskonstante des Wasserdampfes	J/(kg·K)
$S_{d,s}$	äquivalente Dampfdiffusionsdicke einer Oberflächenschicht	m
S_u	Quellenterm für die innere Energie	J/(m ³ ·s)
S_w	Feuchtequellenterm	kg/(m ³ ·s)
T	thermodynamische Temperatur	K
T_a	Umgebungslufttemperatur	K
T_s	Temperatur einer Oberfläche	K
t	Zeit	s
u	Dichte der inneren Energie des Baustoffs	J/m ³
v	Windgeschwindigkeit	m/s
w	Feuchtegehalt	kg/m ³
w_l	Flüssigwassergehalt	kg/m ³
w_{sat}	Sättigungsfeuchtegehalt	kg/m ³
w_{ice}	Eisgehalt	kg/m ³
x	Entfernung	m
α_{sol}	solarer Absorptionsgrad	– (0 ... 1)
δ_0	Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient der ruhenden Luft	kg/(m·s·Pa)
δ_v	Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient eines Baustoffs	kg/(m·s·Pa)
ε	Langwellenemissionsgrad der Außenfläche	– (0 ... 1)
ϑ	Celsius-Temperatur	°C
λ	Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)
φ	relative Luftfeuchte	– (0 ... 1)

Symbol	Größe	Einheit
μ	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	—
ρ_a	Luftdichte	kg/m ³
ρ_s	Dichte der Feststoffmatrix	kg/m ³
ρ_l	Flüssigwasserdichte	kg/m ³
σ_s	Stefan-Boltzmann-Konstante	W/(m ² ·K ⁴)

4 Auf die Wärme- und Feuchtetechnik bezogene Gleichungen und Baustoffeigenschaften

4.1 Annahmen

Die auf Wärme- und Feuchtetechnik bezogenen Gleichungen (1) bis (16) basieren auf den folgenden Annahmen:

- Die Geometrie bleibt konstant, ohne zu quellen oder zu schrumpfen;
- es treten keine chemischen Reaktionen auf;
- zwischen Flüssigkeit und Dampf besteht ein lokales Gleichgewicht ohne Hysterese; und
- die Feuchtespeicherfunktion ist temperaturunabhängig.

4.2 Bilanzgleichungen

4.2.1 Allgemeines

Die Entwicklung der Gleichungen basiert auf der Erhaltung von Energie und Feuchtemasse. Der mathematische Ausdruck für die Erhaltungssätze findet sich in den Bilanzgleichungen. Der Wärmeerhalt muss durch die Änderung der inneren Energie u über die Zeit entsprechend Gleichung (1) ausgedrückt werden.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{\partial (q + h_v g_v + h_l g_l)_k}{\partial x_k} + S_u \quad (1)$$

Der Feuchtemassenerhalt muss entsprechend Gleichung (2) ausgedrückt werden.

$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \frac{\partial (g_v + g_l)_k}{\partial x_k} + S_w \quad (2)$$

Der Index k bezeichnet die Richtungen x, y, z sowohl für die Koordinaten als auch die entsprechenden Flussgrößen q und g . Wird der Index k aus den Gleichungen gestrichen, so ergibt sich der Ansatz für eindimensionale Probleme. q und g sind Vektoren, und z. B. die Ableitung des Vektors q erweitert sich für zweidimensionale Probleme auf Gleichung (3).

$$\frac{\partial q_k}{\partial x_k} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad (3)$$

4.2.2 Innere Energiedichte

Für die Festlegung der inneren Energiedichte und der zugehörigen Enthalpien muss ein Bezugszustand ausgewählt werden. Dann wird u als Energiedichte im Verhältnis zu einigen Bezugsenergiedichten u_{ref} bei der Bezugstemperatur T_{ref} festgelegt.

$$u = \rho_s \cdot c_s \cdot (T - T_{\text{ref}}) + w_l \cdot c_l \cdot (T - T_{\text{ref}}) + w_{\text{ice}} \cdot (c_{\text{ice}} (T - T_{\text{ref}}) - h_{\text{ice}}) \quad (4)$$

ANMERKUNG 1 Die innere Energie u eines trockenen Baustoffs hängt von dessen Temperatur ab. Innerhalb der Temperaturbereiche, die in Gebäuden auftreten können, ist es möglich, eine lineare Beziehung für diesen Zweck anzuwenden. Die innere Energie von im flüssigen Zustand und/oder als Eis vorliegendem Wasser ist in feuchten Baustoffen zusätzlich vorhanden. Die in der Gasphase, d. h. in trockener Luft und in Wasserdampf gespeicherte innere Energie kann vernachlässigt werden.

Bei den für die Anwendung dieses Dokuments maßgebenden Zeiträumen gelten Frost-Tau-Wechselprozesse als ausreichend schnell, um das Gefrieren von Wasser und das Auftauen des so entstandenen Eises im porenhaltigen Baustoff als Gleichgewichtsprozesse zu behandeln. Auf der makroskopischen Ebene kann noch eine Zeitverzögerung in den Frost-Tau-Wechseln beobachtet werden, die dann hauptsächlich durch die Fähigkeit des Baustoffs, Wärme in die Gefrierzone einzutragen oder aus ihr abzuführen, bestimmt wird.

Je nachdem, welche Bezugstemperatur T_{ref} gewählt wurde (0 K oder 273,15 K), muss die entsprechende Gefrier- bzw. Erstarrungsenthalpie h_{ice} in Gleichung (4) eingesetzt werden (siehe Tabelle 1).

ANMERKUNG 2 Ein in sich widerspruchsfreies Modell kann sicherstellen, dass im Falle der Anwesenheit von Eis die Summe der Volumengehalte an Flüssigwasser und Eis den verfügbaren Porenanteil des Baustoffs nicht überschreitet.

4.2.3 Zusätzliche Quellenterme

Falls zusätzliche Quellenterme verwendet werden, müssen diese durch Anwendung der in Anhang E angegebenen Hilfsmodelle einbezogen werden.

ANMERKUNG Zusätzliche Wärmequellen S_u und Feuchtequellen S_w ermöglichen es, spezielle Wirkungen, wie z. B. die Bauteillüftung oder zusätzliche durch das Eindringen von Regenwasser bedingte Feuchtequellen, zu betrachten. Die Anwendung von Quellentermen ermöglicht es, Hilfsmodelle in die Bilanzgleichungen einzubeziehen, die auf die einzubeziehenden Faktoren maßgeschneidert werden können.

4.3 Beziehungen zwischen treibenden Potentialen und Erhaltungsgrößen

Die Primärzustandsvariablen oder Erhaltungsgrößen sind die innere Energiedichte u und der Wassergehalt (Feuchtemassendichte) w , die durch die Bilanzgleichungen für Energie und Feuchtemasse bestimmt werden. Für die Berechnung der Energie- und Massenströme der einzelnen Transportprozesse sind zusätzliche Zustandsvariablen oder treibende Potentiale erforderlich, nämlich der Kapillardruck p_c , der Wasserdampf-Teildruck p_v und die Temperatur T .

Die relative Luftfeuchte ist nach Gleichung (5) zu berechnen:

$$\psi = \frac{p_v}{p_{v,\text{sat}}(T)} \quad (5)$$

Zwischen dem Kapillardruck des Porenwassers und der relativen Feuchte der Umgebungsluft besteht durch die Kelvin-Gleichung (6) folgende Beziehung:

$$p_c = \rho_l R_v T \ln(\varphi) \quad (6)$$

Um die Feuchteübertragung in kapillar wirkenden Baustoffen berücksichtigen zu können, ist eine ausreichend genau festgelegte Sorptionsisotherme im Luftfeuchtebereich $92 \% \leq \varphi \leq 100 \%$ erforderlich.

4.4 Transport von Wärme und Feuchte

In den für den Transport geltenden Gleichungen (7) bis (9) werden eindimensionale Flussdichteausdrücke verwendet. 2D- und 3D-Ansätze erhält man durch Verwendung direktionaler Indizes k für die Vektor-Flussgrößen (siehe 7.2).

4.4.1 Wärme- und Enthalpietransport innerhalb von Baustoffen

Der Wärmetransport muss aus fühlbaren und latenten Komponenten zusammengesetzt werden. Der Wärmetransport durch Wärmeleitung, q , ist mit Hilfe des Fourier-Gesetzes (Gleichung (7)) mit einer Wärmeleitfähigkeit, die vom Feuchtegehalt abhängt, zu berechnen. Falls Eis in die Berechnung einbezogen wird, hängt die Wärmeleitfähigkeit $\lambda(w, w_{ice})$ auch vom Eisgehalt ab w_{ice} (siehe A.3).

$$q = \lambda(w) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (7)$$

Die Kondensation von Wasserdampf zu Flüssigwasser ist ein Phasenübergang, bei dem Wärme frei wird. Die Verdampfung ist ein Phasenübergang, bei dem Wärme absorbiert wird. Mathematisch wird dies in das Modell einbezogen, indem die Flüssigkeits- und Dampf-Massenströme mit unterschiedlichen Graden der Enthalpie verbunden werden. Diese Ströme werden mit konvektiv transportierter fühlbarer und latenter Energie verbunden.

Der konvektive Wärmetransport mittels Wasserdampf ist nach Gleichung (8) zu berechnen:

$$h_v g_v = (c_v \cdot (T - T_{ref}) \cdot g_l) \quad (8)$$

Der konvektive Wärmetransport mittels Flüssigwasser ist nach Gleichung (9) zu berechnen:

$$h_l g_l = c_l \cdot (T - T_{ref}) \cdot g_l \quad (9)$$

ANMERKUNG Die konvektive Übertragung von fühlbarer Wärme, d. h. die die Wärmekapazitäten c_v und c_l enthaltenden Terme, können im Falle von Anwendungen, bei denen nur geringe Feuchteströme auftreten, außer Acht gelassen werden. In anderen Fällen können diese Terme wichtig werden, z. B. dann, wenn das Eindringen von Schlagregen oder die Aufnahme von Flüssigwasser zu berücksichtigen ist. Im Falle des Eindringens von Regenwasser muss darauf geachtet werden, zwischen der Temperatur des Regenwassers und der Umgebungslufttemperatur zu unterscheiden.

Die latente Verdampfungswärme h_e muss in Übereinstimmung mit der gewählten Bezugstemperatur T_{ref} in der für die innere Energiedichte geltenden Gleichung (1) festgelegt werden. Hierfür müssen die in Tabelle 1 aufgeführten Konstanten der Wärmekapazitäten und der latenten Verdampfungswärme verwendet werden. In ähnlicher Weise muss die Erstarrungsenthalpie (Schmelzwärme) anhand der gewählten Bezugstemperatur gewählt werden.

Tabelle 1 — Wärmekapazitäten und latente Verdampfungswärme

Eigenschaft	Symbol	Wert
Spezifische Wärmekapazität von Flüssigwasser	c_l	4 180 J/(kg·K)
Spezifische Wärmekapazität von Wasserdampf	c_v	2 050 J/(kg·K)
Spezifische Wärmekapazität von Eis	c_{ice}	2 108 J/(kg·K)
Latente Verdampfungswärme, $T_{ref} = 273,15$ K	h_e	2 503 000 J/kg
Latente Verdampfungswärme, $T_{ref} = 0$ K	$h_{e,0K}$	3 084 810 J/kg
Latente Erstarrungswärme, $T_{ref} = 273,15$ K	h_{ice}	333 550 J/kg

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Eigenschaft	Symbol	Wert
Latente Erstarrungswärme, $T_{\text{ref}} = 0 \text{ K}$	$h_{\text{ice,OK}}$	$-232\,417 \text{ J/kg}$
ANMERKUNG Die Konstante c_v hat nur geringen Einfluss auf die Simulationsergebnisse, weil die latente Verdampfungswärme den Energietransport in der Gasphase dominiert. Daher wirkt sich auch die Verwendung anderer Werte für diese Konstante nur in geringem Maße auf die Simulationsergebnisse aus.		

Die Sorptionswärme und die Kondensationswärme werden im Modell mittels Gleichung (3) und Gleichung (7) berücksichtigt. Feuchte, die in ein porenhaltiges System als Dampf mit der zugehörigen latenten Wärme (7) eindringt und durch Kondensation in die Flüssigphase übergeht, verursacht dabei einen Anstieg der Temperatur (3). Feuchte, die zunächst im flüssigen Zustand vorliegt und dann verdampft, verlässt das porenhaltige System mit der zugehörigen latenten Wärme, wodurch die Temperatur abfällt (3).

4.4.2 Feuchtetransport

In porenhaltigen Baustoffen erfolgt die Feuchteübertragung durch kapillaren Flüssigkeitstransport und durch die Diffusion von Wasserdampf, wie in Gleichung (10) festgelegt:

$$g_w = g_v + g_l \quad (10)$$

Diesen Prozessen liegen verschiedene physikalische Transportmechanismen zugrunde. Dampfdiffusion ist die Folge eines Teildruckgradienten des in der Porenluft enthaltenen Wasserdampfes und umfasst somit die Auswirkungen von Unterschieden in der Wasserdampfkonzentration in der Porenluft und der Temperatur, wie in Gleichung (11) festgelegt.

$$g_v = -\frac{\delta_0}{\mu} \frac{\partial p_v}{\partial \chi} \quad (11)$$

Der Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient δ_0 der ruhenden Luft wird durch die vom Baustoff abhängige Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ geteilt, um der Verringerung des für den Dampftransport verfügbaren Querschnitts und dem längeren Diffusionspfad entlang der gewundenen Poren Rechnung zu tragen, falls die Diffusion in einem Porensystem stattfindet und nicht in einem kompakten Luftvolumen. Diese Baustoffeigenschaft ist gewöhnlich von der Feuchte abhängig und wird üblicherweise durch $\mu(w)$ oder $\mu(\varphi)$ ausgedrückt. Der Wasserdampfdiffusions-Leitkoeffizient δ_v eines Baustoffs ist durch Gleichung (12) definiert:

$$\delta_v(T, w) = \frac{\delta_0(T)}{\mu(w)} \quad (12)$$

Die Transportfunktion wird dann durch Gleichung (13) definiert.

$$g_v = -\delta_v(T, w) \frac{\partial p_v}{\partial \chi} \quad (13)$$

Beim Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizienten der Luft, δ_0 , handelt es sich um eine von der Temperatur abhängige Größe. Für die Anwendung in der Praxis kann diese als konstant oder als von der Temperatur und dem Umgebungsdruck abhängig angenommen werden.

Zum Flüssigkeitstransport kommt es in Folge von Kapillarkräften, und er steht mit dem Kapillardruckgradienten in der in Gleichung (14) angegebenen Beziehung:

$$g_w = -K_l \frac{\partial p_c}{\partial \chi} \quad (14)$$

Die Flüssigwasserleitfähigkeit K_l ist vom Feuchtegehalt abhängig und wird üblicherweise als $K_l(w)$ oder $K_l(p_c)$ ausgedrückt. Nachrangige Transportmechanismen, wie z. B. die Oberflächendiffusion, müssen in die Funktion der Flüssigwasserleitfähigkeit einbezogen werden (diese Wirkungen gesondert zu messen, ist in der Regel nicht möglich).

Die Temperaturabhängigkeit der Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl und die Flüssigwasserleitfähigkeit dürfen vernachlässigt werden. In Fällen, in denen eine solche Abhängigkeit kritisch ist, wie z. B. bei Polymeren, muss die Temperaturabhängigkeit in die Funktion des Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizienten einbezogen werden.

ANMERKUNG Der Temperaturanstieg setzt die Viskosität und die Oberflächenspannung der Porenflüssigkeit herab. Für den Anwendungsbereich dieses Dokuments gelten die Auswirkungen dessen als geringfügig. Es ist daher ausreichend, unter Laborbedingungen erhaltene Parametrierungen auch für andere Temperaturen zu verwenden.

Für den Flüssigkeitstransport können alternative Potentiale, wie z. B. die relative Luftfeuchte und der Feuchtegehalt, verwendet werden, falls die Transportkoeffizienten entsprechend transformiert werden und die Grenzflächen zwischen zwei Baustoffen so gehandhabt werden, dass der Saugdruck und der Dampfteildruck über die Grenzfläche dennoch kontinuierliche Funktionen ergeben.

4.4.3 Feuchtetransport über Baustoffgrenzflächen/Wasserdampfbremsen/Folien hinweg

Die einzelnen Aspekte des Kontaktes zweier Baustoffschichten können den Feuchtetransport stark beeinflussen. Zusätzliche Beschichtungen, wie z. B. Klebstoffe, können den Feuchtetransport durch Diffusion und den Flüssigkeitstransport verändern.

Kleine Luftspalte zwischen den Baustoffen und die Änderung der Porenstrukturen an den Baustoffgrenzflächen durch chemische Reaktionsprodukte verringern den kapillaren Wassertransport über die Grenzfläche. Der Einfluss der Grenzfläche auf die Strömung flüssiger Feuchte kann durch einen Feuchtwiderstand η beschrieben und nach Gleichung (15) berechnet werden:

$$g_l = \frac{\Delta p_c}{\eta} \quad (15)$$

In ähnlicher Weise kann ein zusätzlicher Widerstand, der durch Gleichung (16) definiert ist, für den Dampfstrom eingeführt werden:

$$g_v = \frac{\Delta p_v}{r_v} \quad (16)$$

ANMERKUNG Im Falle von luftfeuchteabhängigen Wasserdampfbremsen kann der Diffusionswiderstand r_v eine Funktion des Feuchtegehalts sein.

4.4.4 Luftschichten in Innenräumen

Im Falle eines an eine Innenraumluftschicht angrenzenden Baustoffs, d. h. bei Hohlräumen, muss der Dampfstrom vom Baustoff zur Luft in Form von Wärme- und Dampfdiffusionsrandbedingungen unter Verwendung von Übertragungskoeffizienten für die Wärmeübertragung (Wärmeleitung und Langwellenstrahlung) und die Dampfdiffusion ausgedrückt werden.

4.5 Baustoffeigenschaften

Für jeden im Simulationsmodell verwendeten Baustoff werden die folgenden Baustoffeigenschaften benötigt:

- Feuchterückhaltungsfunktion $w(p_c)$ oder Sorptionsisotherme $w(\varphi)$;
- spezifische Wärmekapazität c_s und Dichte ρ_s des trockenen Baustoffs;
- Wärmeleitfähigkeit des trockenen Baustoffs, λ_{dry} , oder als Funktion der Feuchte, $\lambda(wS)$;

- Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl $\mu(\varphi)$, $\mu(w)$ oder Wasserdampf-Diffusionsleitkoeffizient δ_v ;
- Flüssigwasserleitfähigkeit $K_l(w)$ oder Flüssigkeitsausbreitungsvermögen $D_w(w)$.

ANMERKUNG Alle oben genannten Transporteigenschaften können von der Temperatur, der Feuchte und anderen Zustandsvariablen abhängen.

Für Hintergrundinformationen zu den Baustoffeigenschaften und für eine Beschreibung der zum Erhalt dieser Parameter anzuwendenden Mess- und Kalibrierverfahren siehe Anhang A.

5 Rand- und Anfangsbedingungen

5.1 Innenraumbedingungen

5.1.1 Nutzungsbedingungen

Bei der Beurteilung der Konstruktion eines neuen Gebäudes sind Innenraumbedingungen anzuwenden, die der wahrscheinlich stärksten Beanspruchung des Gebäudes angemessen sind. Dies kann sich im Sinne einer konservativen Analyse durch Wahl einer ein wenig höheren Luftfeuchtelast der Innenräume umsetzen.

5.1.2 Parameter

Zur Festlegung des Innenraumklimas sind die folgenden Parameter anzuwenden:

- Raumlufttemperatur; und
- Raumdampfdruck oder sonstiger Luftfeuchteparameter (üblicherweise die relative Luftfeuchte), der die Berechnung des Dampfdruckes ermöglicht.

5.1.3 Datenquellen

Verfügbare Daten sind aus den folgenden drei Optionen auszuwählen:

- Messwerte für ein ähnliches Gebäude in einem ähnlichen Klima (diese sollten vom Planungsingenieur begründet werden) oder durch Klimaanlagen festgelegte Sollwerte;
- Nationale Normen; oder
- Näherungswerte für Wohn- oder Bürogebäude in Übereinstimmung mit Anhang D.

Wärme- und feuchteschutztechnische Gebäudesimulationen dürfen ebenfalls angewendet werden, um brauchbare Schätzwerte für das Innenraumklima zu erhalten. Aufgrund der Komplexität der Durchführung derartiger Simulationen müssen die Ergebnisse verifiziert und dokumentiert und anhand einiger Referenz-Messdaten kalibriert werden.

5.2 Außenbedingungen

5.2.1 Datenquellen

Bei der Beurteilung der Konstruktion eines neuen Gebäudes sind die Außenbedingungen mindestens eines ganzen Jahres anzusetzen, die auf den Gebäudestandort mit der wahrscheinlich stärksten Beanspruchung zutreffen. Die folgenden Datenquellen stehen für diese Bedingungen zur Verfügung – in der Reihenfolge von der geeignetsten zu der am wenigsten geeigneten Quelle:

- a) Referenzjahre (oder Feuchteauslegungsjahre), die zur Beurteilung des Gesamtverhaltens der baulichen Anlage wiederholt über einen Simulationszeitraum von 8 Jahren bis 10 Jahren angewendet werden;

- b) Messdaten aus mindestens zehn und vorzugsweise noch mehr Jahren;
- c) falls keine Referenzjahre vorliegen, darf eine jährliche Temperaturverschiebung von ± 2 K auf ein mittleres Jahr in Abhängigkeit davon angewendet werden, ob Kondensation eher im Sommer oder eher im Winter das Problem sein wird, wobei die relative Luftfeuchte unverändert bleibt. Hierdurch ergibt eine Änderung von 2 K Daten für ein kritisches Jahr, wie es wahrscheinlich einmal alle 10 Jahre auftritt.

ANMERKUNG 1 Anhang C enthält eine ausführliche Beschreibung der Aufstellung von Feuchteauslegungsjahren, bei der verschiedene Datenquellen, wie z. B. Daten von Wetterstationen, genutzt werden.

Wird ein Problem in einem bestehenden Gebäude untersucht, so müssen etwaige am Gebäudestandort gemessene Daten verwendet werden; anderenfalls sind die Daten eines ähnlichen Standortes zu verwenden.

In Fällen, bei denen Niederschlagsfeuchte das Bauteil beeinträchtigt, muss der meteorologische Datensatz mindestens stündliche Werte für Niederschlag und Wind (Geschwindigkeit und Richtung) enthalten.

Bei baulichen Anlagen unterhalb der Erdbodenhöhe hängt die Bodentemperatur von den Bodenbedingungen und der beobachteten Tiefe ab (EN ISO 13370). Die relative Luftfeuchte im Boden wird mit mindestens 99 % angenommen, sofern keine genaueren Daten für den betreffenden Standort zur Verfügung stehen.

Messdaten oder Simulationsergebnisse können notwendig sein, um die außenseitigen Randbedingungen für Bauteile zu definieren, die an Kriechgängen, Dachgeschosse, belüftete Hohlräume und begrünte Dächer angrenzen.

ANMERKUNG 2 Um das Verhalten einer baulichen Anlage in Bezug auf kritische Bedingungen (extreme Winter oder Sommer) analysieren zu können, kann ergänzend zur allgemeinen Analyse ein kritisches Jahr simuliert werden. Das kann hilfreich sein, wenn es darum geht, Probleme im Zusammenhang mit baulichen Anlagen zu erkennen, die in Bezug auf kritische Bedingungen besonders sensibel sind. Klimadaten für ein kritisches Jahr können durch Auswahl von Messdaten eines Jahres mit sehr kaltem Winter oder sehr nassem und kaltem Sommer erhalten werden.

5.2.2 Klimaparameter

Der Datensatz zum Außenklima muss die für die durchzuführende Analyse notwendigen Klimaparameter enthalten. Ein vollständiger Satz muss Folgendes umfassen:

- Trockenkugel-Temperatur;
- relative Luftfeuchte (oder jeder andere Luftfeuchteparameter, der zur Berechnung des Dampfdruckes verwendet werden kann);
- Global- (oder direkte) und diffuse Sonnenstrahlung;
- Himmelstemperatur oder langwellige atmosphärische Strahlung;
- Windgeschwindigkeit und Windrichtung; und
- auf Wände wirkende Niederschlags- (Regen-, Schnee-, Niesel-) oder Schlagregenlast, sofern verfügbar.

Bei der Sonnenstrahlung, der Langwellenstrahlung, der Windgeschwindigkeit und dem Niederschlag handelt es sich um gerichtete Größen. Das heißt, dass ihre Wirkung auf die simulierte Oberfläche vom Winkel zwischen dieser Oberfläche und der Klimagröße abhängt. Üblicherweise werden die Strahlung und der Niederschlag auf waagerechten Auffangflächen gemessen. Im Falle von Simulationen, in die Bauteile mit nicht waagerechten Oberflächen (besonders vertikale Fassaden) einbezogen werden, müssen maßgebende Anteile dieser auf die Oberfläche auftreffenden Größen anhand geeigneter Strahlungsmodelle bestimmt werden. Umrechnungsmodelle

delleinschränkungen werden vermieden, falls die fraglichen Größen als auf die simulierte Oberfläche einfallend direkt gemessen werden können.

ANMERKUNG Verfahren zur Berechnung der Feuchtelast aus Niederschlag finden sich in EN ISO 15927-3.

5.3 Interpolation von tabellarischen Klimadaten

Klimaparameter dürfen als stundenbezogene Daten oder in unregelmäßigen Intervallen, z. B. im Falle eines gemessenen Klimas, bereitgestellt werden. Wärme- und feuchtetechnische Simulationsmodelle können Lösungen mit höherer Frequenz berechnen und erfordern Klimaparameter zwischen den gemessenen Datenpunkten. In einem solchen Falle muss zum Erhalt der entsprechenden Datenwerte linear interpoliert werden.

ANMERKUNG Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Klimaparameter einer glatten stetigen Funktion folgen, wie sie in der Realität beobachtet wird. Dadurch werden auch Unstetigkeiten verhindert, die im Rahmen numerischer Lösungsverfahren zu Problemen führen. Sonnenstrahlungslasten werden üblicherweise als stündlich integrierte Mittelwerte der gemessenen Sonnenstrahlungsintensität angegeben. Ein einfaches Verfahren für die Rekonstruktion von Strahlungsintensitäten in kleineren Zeiteinheiten als Stunden besteht darin, den zur Mitte der Stunde gegebenen Wert zu verwenden und dazwischen linear zu interpolieren.

Bei der Interpolation von Windrichtungen muss der numerischen Unstetigkeit, die auftritt, wenn die zu interpolierenden Windrichtungen beiderseits des Nordpunktes liegen, vorschriftsmäßig Rechnung getragen werden. Wurden z. B. die Windrichtungen 355° und 5° gemessen, so sollte die für einen bestimmten Zeitpunkt interpolierte Richtung genau zwischen diesen Messungen liegen und also 360° oder 0° und nicht 180° betragen.

5.4 Grenz-Wärme- und -Feuchteströme

5.4.1 Wärmeübertragung

Der Wärmestrom aus der Umgebung in die bauliche Anlage setzt sich aus Konvektion, kurzweilliger Sonnenstrahlung, dem Langwellenstrahlungsaustausch mit dem Himmel und umgebenden Oberflächen sowie dem mit Feuchteströmen verbundenen konvektiven Enthalpietransport zusammen.

5.4.1.1 Aufgezwungene Oberflächentemperatur

Wenn die Oberflächentemperatur z. B. aufgrund von Messungen bekannt ist, kann sie direkt als Randbedingung verwendet werden. In diesem Falle unterbleibt die Berechnung der Wärmekonvektion und von Sonnen- und Langwellenstrahlungsströmen. Es ist dennoch notwendig, den mit dem Feuchtestrom verbundenen Enthalpiestrom (falls als Randbedingung berücksichtigt) zu berechnen, um die Energiebilanzgleichung in 4.2 zu erfüllen.

5.4.1.2 Wärmekonvektion

Der konvektive Wärmestrom von der Umgebung in die Gebäudehülle hängt von der Temperaturdifferenz ab und ist nach Gleichung (17) zu berechnen.

$$q = h \cdot (T_a - T_s) \quad (17)$$

Wenn die anderen Oberflächen in der Nähe der baulichen Anlage eine ähnliche Temperatur wie die Oberfläche der baulichen Anlage haben (was bei Innenflächen häufig der Fall ist), kann der Langwellenstrahlungsaustausch auf vereinfachte Art und Weise berücksichtigt werden. Die Wirkung der Langwellenstrahlung wird dann mit Hilfe von Gleichung (18) in den effektiven Wärmeübergangskoeffizienten h einbezogen:

$$h = h_c + h_r \quad (18)$$

Wird der Langwellenstrahlungsaustausch explizit berücksichtigt (siehe 5.4.1.4), so ist nur der Konvektionswärmübergangskoeffizient zu verwenden, wie in Gleichung (19) angegeben:

$$h = h_c \quad (19)$$

In Tabelle 2 sind typische Werte für Wärmeübergangskoeffizienten für Innen- und Außenflächen aufgeführt.

Falls der Langwellenemissionsgrad ε der Oberfläche stark vom typischen Wert von 0,9 abweicht, der für die meisten nichtmetallischen Baustoffe gilt, müssen Gleichung (20) und Gleichung (21) angewendet werden, um einen Näherungswert für den Strahlungsaustauschkoeffizienten zu erhalten:

— Außenfläche:

$$h_r = 7,0 \varepsilon \quad (20)$$

— Innenfläche:

$$h_r = 5,7 \varepsilon \quad (21)$$

Tabelle 2 — Typische Wärmeübergangskoeffizienten und Wasserdampf-Diffusionsübergangskoeffizienten

Bauteiloberfläche	h_c [W/(m ² · K)]	h_r [W/(m ² · K)]	β [s/m]
Im Freien	10,5	6,5	75×10^{-9}
In Innenräumen	2,5	5,5	25×10^{-9}

ANMERKUNG Der Konvektionswärmübergangskoeffizient h_c und der Dampf-Diffusionsübergangskoeffizient β (oder, äquivalent, der $s_{d,s}$ -Wert) hängen in erster Linie von der Luftgeschwindigkeit über die Baustoffoberfläche ab. Die Luftgeschwindigkeit über Gebäudeoberflächen hängt von der Gebäudegeometrie, der Windrichtung (windzu- oder -abgewandte Ausrichtung der Oberfläche) und der Windgeschwindigkeit um das Gebäude herum ab. Falls diese Einzelheiten von Bedeutung und die Bedingungen bekannt sind, können geschwindigkeitsabhängige Koeffizienten die Präzision des Modells erhöhen. In derartigen detaillierten Modellen darf jedoch die Luftgeschwindigkeit um das Gebäude herum oder in einer Höhe von 10 m nicht mit der Geschwindigkeit über die Baustoffoberfläche verwechselt werden. Darüber hinaus führt die Neigung der Oberfläche (Fußboden/Decke/Wand usw.) in Verbindung mit der aktuellen Wärmestromrichtung zu unterschiedlichen Wärmeübergangskoeffizienten. Bei dynamischen wärme- und feuchtetechnischen Simulationen ändert sich die Wärmestromrichtung jedoch häufig und ist eine Zuordnung von stationären Konvektionskoeffizienten für feste Strömungsrichtungen nicht praktikabel. Falls die Wirkung von Neigung und Wärmestromrichtung im Konvektionswärmübergangskoeffizienten berücksichtigt werden kann, kann im Simulationsmodell ein dynamisches Anpassungsmodell für den h_c -Koeffizienten angewendet werden.

5.4.1.3 Sonnenstrahlung

Die auf die Oberflächen wirkenden Sonnenstrahlungslasten hängen von der Ausrichtung und Neigung dieser Oberflächen, dem Standort des Gebäudes und den gemessenen Sonnenstrahlungslasten ab. Das in das Simulationswerkzeug eingebundene Sonnenstrahlungsmodell muss die senkrecht zur exponierten Oberfläche der baulichen Anlage wirkenden kurzweiligen Sonnenstrahlungslasten berechnen.

ANMERKUNG Im Sonnenstrahlungsmodell dürfen unterschiedliche Verfahren zur Berechnung der direkten und diffusen Strahlungslasten zur Anwendung kommen. So können letztere z. B. anhand isotroper oder anisotroper Himmelsmodelle berechnet werden. Die diffuse Strahlung auf Oberflächen wird auch vom Wert der Albedo beeinflusst. Bei Mischumgebungen darf eine Albedo von 0,2 angesetzt werden. Andere Albedo-Werte sind für verschiedene Gelände und Oberflächen in VDI 3789/Teil 2 aufgeführt.

Die Absorption der kurzwelligen Sonnenstrahlung hängt in erster Linie von der Färbung der Oberfläche ab. Falls keine produktspezifischen Parameter zur Verfügung stehen, können die in Tabelle 3 angegebenen Werte verwendet werden. Die Gesamt-Sonnenstrahlungslast, d. h. die Summe der diffusen und der direkten kurzwelligen Strahlung senkrecht zur Oberfläche der baulichen Anlage, ist mit diesem Absorptionskoeffizienten zu multiplizieren, um den auf die Oberfläche auftreffenden Wärmestrom zu erhalten.

Tabelle 3 — Typische Absorptionskoeffizienten für kurzwellige Strahlung

Bauteiloberfläche	Schwarz oder dunkel gefärbt	Grau oder weder hell noch dunkel gefärbt	Weiß oder hell gefärbt
Absorptionskoeffizient für Sonnenstrahlung	0,8	0,6	0,4

5.4.1.4 Langwellenstrahlungsbilanz

Für Außenflächen, besonders auf Dächern, können Langwellenstrahlungsverluste in klaren Nächten zu erheblicher Abkühlung und in deren Folge zu Kondensation führen. Diese Wirkung wird entweder durch Anwendung eines bekannten Wärmestroms als Langwellenstrahlungsbilanz q_{LW} , d. h. als der durch den Langwellenstrahlungsaustausch bedingte Netto-Wärmegewinn/-verlust der Oberfläche modelliert.

Für den Fall, dass kein bekannter Wärmestrom zur Verfügung steht, ist das in Gleichung (22) dargestellte Stefan-Boltzmann-Langwellenstrahlungsgesetz anzuwenden, um diesen Netto-Wärmestrom in die Oberfläche zu berechnen. Dabei tauscht die Oberfläche mit dem Himmel, der Luft und dem Boden Strahlung aus:

$$q_{LW} = \sigma \cdot \left(\varepsilon_{sky} \cdot F_{sky} \cdot (T_{sky}^4 - T_s^4) + \varepsilon_{gnd} \cdot F_{gnd} \cdot (T_{gnd}^4 - T_s^4) \right) \quad (22)$$

σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante von $5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$, T_s ist die Oberflächentemperatur, und T_{sky}, T_{gnd} sind die Himmelstemperatur sowie die effektive Boden- bzw. Umgebungstemperatur. Die Faktoren F bezeichnen die Einstrahlzahlen der Oberfläche zum Himmel und zum Boden und werden anhand der Neigung i der Oberfläche (0° – Flachdach, 90° – senkrechte Wand) nach Gleichung (23) berechnet:

$$\begin{aligned} F_{sky} &= \cos^2 \frac{i}{2} \\ F_{gnd} &= \sin^2 \frac{i}{2} \end{aligned} \quad (23)$$

Bei Dachkonstruktionen kann der Strahlungsaustausch mit dem Boden häufig vernachlässigt werden. Bei Wandkonstruktionen, denen gegenüber andere Gebäude stehen, sind die Temperaturdifferenzen zwischen den Oberflächen häufig klein. Aus diesen Gründen kann die Langwellenstrahlungsbilanz üblicherweise zu Gleichung (24) vereinfacht werden:

$$q_{LW} = \sigma \cdot \left(\varepsilon_{sky} \cdot F_{sky} \cdot (T_{sky}^4 - T_s^4) \right) \quad (24)$$

Die Himmelstemperatur T_{sky} wird als Klimaparameter angegeben. Falls stattdessen in den Klimadaten die Himmelsstrahlung q_{sky} (Langwellenemission des Himmels) bereitgestellt wurde, wird der Langwellenstrahlungsaustausch mit dem Himmel durch Gleichung (25) ausgedrückt:

$$q_{LW} = F_{sky} \cdot (q_{sky} - \sigma \cdot \varepsilon_{sky} \cdot T_s^4) \quad (25)$$

Die Emissionsgrade ε (für Himmel und Boden) hängen vom Baustoff und von der Struktur der Oberfläche ab. Ein Wert von 0,9 kann bei vielen Baustoffen als Vorgabewert verwendet werden, darf aber für spezifische Oberflächenwerkstoffe/Oberflächenbehandlungen (Aluminium, polierter Stahl, Glasplatten usw.) angepasst werden.

Falls der Langwellenstrahlung im Modell explizit Rechnung getragen wird, darf bei der Berechnung des Wärmeleitungsstroms nur der Konvektionswärmeübergangskoeffizient verwendet werden (siehe 5.4.1.2).

5.4.2 Dampfdiffusion

Der Dampfstrom von der Umgebung zur Oberfläche der baulichen Anlage unterliegt ähnlichen Gesetzen wie die Wärmeübertragung durch Konvektion. Er wird durch Konvektion und Diffusion durch eine Grenzschicht bestimmt, die durch die Dampfdruckdifferenz zwischen Oberfläche und Umgebung angetrieben wird und mit dem Dampf-Diffusionsübergangskoeffizienten β in der in Gleichung (26) angegebenen Beziehung steht:

$$g_v = \beta \cdot (p_{v,e} - p_{v,s}) \quad (26)$$

Typische Werte für Dampf-Diffusionsübergangskoeffizienten sind in Tabelle 2 aufgeführt. Alternativ kann der Übertragungskoeffizient in Form eines Dampfdiffusionswiderstandes ausgedrückt werden, der in Gleichung (27) als äquivalente Dicke $S_{d,s}$ angegeben ist.

$$\beta = \frac{\delta_0}{S_{d,s}} \quad (27)$$

Einem zusätzlichen z. B. durch Anstrich oder Beschichtung bedingten Dampfdiffusionswiderstand kann durch geeignete Wahl des $S_{d,s}$ -Wertes Rechnung getragen werden.

ANMERKUNG In EN ISO 10456 sind typische Werte für häufig verwendete Oberflächenbeschichtungen und Anstrichstoffe aufgeführt.

5.4.3 Konvektionsbedingter latenter Wärmestrom

Der latente Wärmestrom zu und von den Begrenzungen ist proportional zum Wasserdampfvolumenstrom an den Oberflächen (siehe 5.4.2) und ist nach Gleichung (7) zu berechnen.

5.4.4 Schlagregen

Als Eingabe für die Simulation müssen Regendaten mit ausreichend hoher Zeitauflösung verwendet werden.

Der Schlagregen hängt von der Niederschlagsmenge, der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung, aber auch von den örtlichen Gegebenheiten ab, wie unten aufgeführt:

- a) Großflächige Gebäudefassaden (Staudruck) oder Dachüberhänge können die Regenmenge, die tatsächlich auf die Oberfläche des Bauteils auftrifft, stark verringern.
- b) Wenn Regentropfen auf eine vertikale Oberfläche fallen, wird ein Teil des Wassers (etwa 30 %) unmittelbar als Spritzwasser verteilt und kann daher nicht vom Oberflächenmaterial absorbiert werden.

Der Wirkung a) muss in der Simulation durch Verwendung geeigneter Proportionalitätsfaktoren r_s Rechnung getragen werden, die die objekt- oder oberflächenspezifischen Bedingungen und den Standort des Gebäudes widerspiegeln.

Der Wirkung b) muss durch einen Niederschlagsrückhaltungszahl a_r Rechnung getragen werden. Der Wert von a_r hängt von der Rauheit der Oberfläche und der Art des Niederschlags ab und beträgt etwa 0,7; im Falle von Hagel und Schnee liegt er näher bei null.

Die Exposition gegenüber Schlagregen muss in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit nahe der Oberfläche, v , und der Niederschlagsmenge R_N nach Gleichung (28) angegeben werden:

$$g_p = r_s \cdot a_r \cdot v \cdot R_N \quad (28)$$

Die Aufnahme von Schlagregen wird durch die Wassermenge begrenzt, die vom Baustoff an der Oberfläche aufgenommen werden kann und die nach Gleichung (29) zu berechnen ist:

$$g_{w,\max} = \left(K_l (W_{\text{sat}}) \frac{\partial p_c}{\partial \chi} \right) \quad (29)$$

Somit gilt:

$$g_w = \min(g_p, g_{w,\max}) \quad (30)$$

ANMERKUNG Falls Messdaten oder ausgefeiltere Regenmodelle zur Verfügung stehen, können diese verwendet werden.

5.5 Anfangsbedingungen

Am Anfang der Berechnung müssen die Anfangsbedingungen für Feuchte und Temperatur festgelegt werden. Da sich die Temperaturbedingungen typischerweise sehr viel schneller als die Feuchtebedingungen anpassen, ist es in der Regel ausreichend, eine einheitliche Anfangstemperatur von 20 °C festzulegen. Der anfängliche Feuchtegehalt kann sich je nach Bauwerkstoff und Schicht unterscheiden.

Bei der Simulation des Verhaltens eines bestehenden Tragwerks müssen die Feuchtebedingungen repräsentativ für die Anfangsbedingung sein, und es sollten/müssen Messwerte verwendet werden. Falls keine Messwerte zur Verfügung stehen, sollte als Anfangsbedingung eine relative Luftfeuchte von 80 % angesetzt werden. Eine höhere Präzision ergäbe sich, wenn eine Vorsimulation bis zum dynamischen Gleichgewicht durchgeführt und dann von dieser ausgegangen wird.

Bei neuen baulichen Anlagen und Schichten, die bestehenden Bauteilen hinzugefügt werden, sollte/muss die anfängliche relative Luftfeuchte auf 50 % festgesetzt werden, sofern die Baustoffe geschützt und klimatisiert gelagert wurden.

6 Numerische Simulation

6.1 Hintergrund

Die Lösung der transienten Wärme- und Massenbilanzgleichungen (partielle Differentialgleichungen) wird mit Hilfe numerischer Lösungsverfahren erhalten. Auf das Berechnungsgebiet wird ein räumliches Diskretisierungsverfahren angewendet.

Bei eindimensionalen Geometrien müssen die Transportgleichungen diskretisiert (in Rasterelemente aufgeteilt) und für den eindimensionalen Querschnitt durch das betrachtete Gebäudehüllenbauteil gelöst werden. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Geometrie in den anderen Richtungen, typischerweise y und z , ins Unendliche erstreckt.

Bei zweidimensionalen Geometrien muss der Bauteilquerschnitt in der x - und der y -Richtung diskretisiert werden, und es wird davon ausgegangen, dass er sich in der z -Richtung ins Unendliche erstreckt. Im Falle von dreidimensionalen Geometrien muss die bauliche Anlage in allen drei Richtungen diskretisiert werden.

Nach der räumlichen Diskretisierung bleibt ein System von zeitabhängigen Differentialgleichungen übrig, die dann numerisch über die Zeit integriert werden. Die spezifischen Algorithmen für die Zeitintegration, die Wahl der (festen oder adaptiven) Integrationszeitschritte, die Fehler-Regelalgorithmen usw. bestimmen die Grenzabweichung der numerischen Ergebnisse. Den stärksten Einfluss jedoch hat das Diskretisierungsgitter, und dieses muss an Standorten mit erheblichen Gradienten der Lösungsvariablen verfeinert werden.

6.2 Geometrische Modellierung

In der Regel brauchen in das Simulationsmodell nur solche Baustoffschichten einbezogen zu werden, die Einfluss auf den Wärme- und Feuchtetransport haben. Dünne Schichten, wie z. B. Folien oder Filme, speichern häufig weder Feuchte noch Wärme in signifikantem Maße und können im Modell nur als zusätzlicher Wider-

stand in Bezug auf die Flüssigkeitsübertragung und Dampfdiffusion berücksichtigt werden. In ähnlicher Weise brauchen Schichten von Oberflächenbeschichtungen (Anstrichstoffen usw.) nicht als einzelne Schichten in das Modell einbezogen zu werden. Stattdessen kann deren Einfluss durch Verringerung von Oberflächenübertragungskoeffizienten Rechnung getragen werden.

Filme mit feuchteabhängigen Eigenschaften können mit Hilfe einer äquivalenten Dicke (z. B. 1 mm) so in das Modell einbezogen werden, dass der Dampfdiffusionswiderstand dem des Films mit dessen natürlicher Dicke (von üblicherweise deutlich weniger als 1 mm) entspricht.

In Bezug auf zweidimensionale Geometrien können realistische geometrische Formen im Simulationsmodell durch Verwendung von Quadern idealisiert werden. Abgerundete Ecken und Dreiecke können z. B. mit größeren Blockformen angenähert werden. Dabei müssen Wärme- und Feuchtespeicherungskennwerte erhalten bleiben. In ISO 10211 werden verschiedene Aspekte der Modellierung von Gebäuden, wie z. B. die Symmetrie und Abschnideebenen, beschrieben.

6.3 Studien zur Gitter- und Zeitschrittsensitivität

Selbst bei Verwendung derselben Eingabedaten können unterschiedliche numerische Simulationsmodelle oder Löser in Abhängigkeit von Folgendem zu unterschiedlichen numerischen Ergebnissen führen bzw. gelangen:

- Vollständigkeit der physikalischen Modellgleichungen;
- Wahl des räumlichen Diskretisierungsverfahrens (am häufigsten werden die Finite-Volumen-Methode oder die Finite-Elemente-Methode angewendet) und der Flussberechnung;
- Einzelheiten der räumlichen Rasterung, d. h. Größe der Gitterzellen und andere Gittereigenschaften (besonders bei nicht strukturierten Gittern in zweidimensionalen Simulationen); oder
- Zeitintegrationsverfahren und Zeitschrittgrößen, einschließlich verschiedener Algorithmen für die Zeitschrittanpassung.

Die Unterschiede, die sich aus der Wahl der Rasterung der Berechnung und dem Zeitintegrationsverfahren ergeben, können durch Untersuchungen zur Sensitivität quantifiziert werden. Im Rahmen einer Untersuchung zur Gittersensitivität wird die Simulation mit einer in ausreichendem Maße verfeinerten Rasterung wiederholt, üblicherweise mit einer Rasterung, die in der Nähe der Grenzen und in Bereichen mit erheblichen Gradienten der Temperatur- und Feuchteprofile stärker geclustert ist. Die Unterschiede zwischen den Simulationsergebnissen der Variante mit normaler und verfeinerter Rasterung müssen innerhalb annehmbarer Grenzwertabweichungen von den Rechenwerten liegen (z. B. bei Temperaturen < 1 K und bei relativen Luftfeuchten < 5 % sein). Sind die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Rasterungsvarianten zu groß, so muss die Rasterung so lange weiter verfeinert werden, bis das Kriterium erfüllt wird.

Die Abhängigkeit der Simulationsergebnisse vom Zeitschritt muss durch Simulation mit halbierten Zeitschritten und in ähnlicher Weise erfolgenden Vergleich der Ergebnisse geprüft werden. Falls die Software das unterstützt, müssen der Massenerhalt und der Energieerhalt überprüft werden (z. B. Netto-Feuchtezustrom im Verhältnis zur Änderung des Feuchtegehalts der gesamten baulichen Anlage). Zeitintegrationsverfahren mit adaptiven, auf örtlicher Fehlerüberwachung basierenden Zeitschritten liefern Ergebnisse mit ausreichender Grenzwertabweichung und erfordern keine Untersuchung der Zeitschrittsensitivität.

Unter der Voraussetzung, dass ein ähnliches Niveau der (in den oben stehenden Abschnitten beschriebenen) physikalischen Modelleigenschaften, die gleiche Parametrierung und ausreichend feine Rasterungen und Zeitschritte gegeben sind, müssen unterschiedliche Softwareimplementierungen zu Ergebnissen führen, die einander in Bezug auf die technische Analyse und die aus der Simulationsanalyse gezogenen Schlussfolgerungen gleichwertig sind. Der in Anhang B für typische Anwendungen angegebene Satz von Benchmarks ist zur Bewertung der numerischen wärme- und feuchte-technischen Simulationsmodelle zu verwenden.

7 Dokumentation der Eingangsdaten und Ergebnisse

7.1 Allgemeines

Die ausführliche Dokumentation von Eingangs- und Ausgangsdaten numerischer Simulationen ist eine wesentliche Voraussetzung für die Beurteilung und Überprüfung der Berechnungsergebnisse. Die Dokumentation muss so erfolgen, dass jeder, der die Simulation mit ihrer Hilfe wiederholt, äquivalente Ergebnisse erhält. Daher muss die Dokumentation mindestens die folgenden Teile umfassen.

7.2 Problembeschreibung

7.2.1 Allgemeines

Die Problembeschreibung muss alle Informationen enthalten, die zur Aufstellung der Berechnung erforderlich sind.

7.2.2 Anwendungsbereich und Simulationsgegenstand

- Problemdefinition und Grund für die Anwendung der wärme- und feuchtetechnischen Simulation;
- maßgebliche Einzelheiten zur Ausführung des zu untersuchenden Bauteils;
- praktische Hintergrundinformationen;
- erforderliche Ausgangsparameter, Beschreibung des unter Verwendung der Simulationsergebnisse erfolgenden Analyse-/Nachverarbeitungsverfahrens;
- Datum und Uhrzeit des Simulationsbeginns, Dauer der Simulation;
- grundlegende physikalische Eigenschaften und berücksichtigte Auswirkungen, z. B. Einbeziehung von Eisbildung, angewendete physikalische Konstanten (dies darf unter Verweisung auf dieses Dokument erfolgen).

7.3 Modellgeometrie und Eingangsparameter

7.3.1 Simulierte Geometrie

Zeichnung des Simulationsbereichs unter Angabe der Baustoffe, Grenzen, spezifischen Orte, wie nachstehend im Einzelnen ausgeführt.

7.3.2 Anfangsbedingungen

- Anfangstemperaturverteilung;
- Verteilung der Anfangsfeuchte. Erläuterung von spezifisch gewählten Anfangsfeuchtegehalten, z. B. bei der Festlegung anfänglich feuchter Baustoffschichten.

7.3.3 Randbedingungen

- Klimabedingungen in Innenräumen und im Freien, Datenursprung und Zeitintervall. Das Verfahren zur Aufstellung der Klimadatenätze ist festzulegen. Klimadatenätze müssen für die spätere Nutzung verfügbar gehalten werden. Falls Klimadaten bereits in die Software „eingebaut“ sind, gilt eine Verweisung auf die Software und deren Version als ausreichend. Bei nach Spezifikation geregeltem Klima müssen die Klimadatendateien der Dokumentation digital beigelegt werden.
- Umwandlung der Klimadaten in Randbedingungen (z. B. Bestimmung der Schlagregenlast). Dazu gehört auch die Beschreibung der angewendeten Randbedingungsmodellvarianten und der in diesen Modellen verwendeten Parameter;

- Oberflächenübertragungskoeffizienten für Wärmeleitung und Dampfdiffusion. Angabe, ob Langwellenstrahlung explizit berücksichtigt wird oder im effektive Wärmeübergangskoeffizienten enthalten ist.

7.3.4 Baustoffparameter

- Dokumentation der Baustoffeigenschaften durch Tabellen und Diagramme. Falls Baustoffdaten Teil der Datenbank der Simulationssoftware sind, gilt eine Verweisung auf die Software und deren Version als ausreichend. Anderenfalls müssen der Dokumentation vollständige Baustoffdaten in digitaler Form beigelegt werden.
- Quelle der Baustoffdaten;
- Annahmen und Annäherungen.

7.3.5 Hilfsmodelle

- Festlegung von Eingangsparametern für Hilfsmodelle;
- Position der Behelfswärme- und -feuchtequellen;
- Annahmen und Annäherungen.

7.3.6 Ausgangsspezifikationen

- Liste der Ausgangsspezifikationen, Messfühlerpositionen;
- Ort und Mittelungsbreite oder -bereich für spezifische Ausgangsgrößen;
- falls Integralgrößen erhalten werden, Beschreibung des Integrationsverfahrens, besonders im Falle der Zeitintegration.

7.4 Simulationsverfahren und numerische Eigenschaften

7.4.1 Allgemeines

Die Dokumentation muss sämtliche Angaben enthalten, die mit dem Berechnungsmodell und den für die Simulation gewählten Parametern zusammenhängen. Es müssen sämtliche Parameter aufgeführt werden, die Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben.

7.4.2 Simulationswerkzeug

- Name und Version der Software;
- Begründung für die Anwendbarkeit dieser Software bei der betreffenden Untersuchung und ihre für diesen Zweck ausreichende Prüfung und Validierung (siehe Anhang B).

7.4.3 Eigenschaften der numerischen Simulation

- Diskretisierung (numerisches Gitter);
- Zeitintervalle (Zeitschritte) oder zeitschrittbezogene Parameter, z. B. zulässige Abweichungen hinsichtlich der Zeitschrittanpassungsverfahren;
- sonstige numerische Überwachungsparameter (Präzision der Lösung).

7.4.4 Überwachung der numerischen Präzision

- Ergebnis einer Untersuchung der Gittersensitivität (optional, wenn zuvor ähnliche Geometrien analysiert wurden und bereits eine Untersuchung zur Gittersensitivität durchgeführt wurde; wird für 2D-Berechnungen empfohlen). Hiermit muss die Simulation mit einer in ausreichendem Maße, z. B. durch Halbierung der Gitterzellengröße, verfeinerten Rasterung (mindestens teilweise) wiederholt werden. Falls die Ergebnisse der verfeinerten Simulation die nach der Analyse/Nachbearbeitung erhaltenen Ergebnisse nicht verändern, d. h. wenn die auf der Simulation basierenden ingenieurwissenschaftlichen Entscheidungen nicht aufgrund dieser Ergebnisse geändert werden, gilt das Gitter als ausreichend detailliert. Anderenfalls muss das Verfahren der Rasterverfeinerung mit weiter verringerten Zellengrößen wiederholt werden.

ANMERKUNG Eine Untersuchung zur Gittersensitivität kann unterbleiben, falls eine derartige Analyse bereits an ähnlichen baulichen Anlagen durchgeführt wurde und die erhaltenen Rasterungskriterien in ähnlicher Weise angewendet werden. Die Dokumentation kann eine Anmerkung dazu enthalten, wie das Raster bzw. Gitter festgelegt wurde.

7.5 Berechnungsbericht

7.5.1 Allgemeines

Der Berechnungsbericht muss sämtliche mit der Darstellung, Bewertung und Interpretation der Berechnungsergebnisse zusammenhängenden Informationen und darüber hinaus Folgendes enthalten:

- Beschreibung von Analyseverfahren, die die primären Simulationsausgaben, wie z. B. die Temperatur- und die Feuchteverteilung oder die Zeitreihe der Sensorenwerte, mit den Beurteilungskriterien in Beziehung setzen;
- Auszüge aus den Simulationsdaten, die die aus der Simulation gezogenen Schlussfolgerungen begründen.
- eine Verweisung auf dieses Dokument.

7.5.2 Darstellung der Ergebnisse

Die Berechnungsergebnisse müssen in einer Form dokumentiert werden, die alle maßgeblichen Informationen zum wärme- und feuchtetechnischen Verhalten des zu untersuchenden Bauteils verdeutlicht. Dies darf in Form von graphischen Darstellungen und Tabellen der maßgeblichen wärme- und feuchtetechnischen Variablen und Randbedingungen erfolgen:

- transiente Verteilungen (Profile);
- zeitliche Schwankung an bestimmten Stellen oder integriert über Baustoffschichten;
- Spitzenwerte (Mindestwert, Höchstwert);
- örtliche Werte an bestimmten Punkten, Mittelwerte an interessierenden Schichten und Oberflächen.

7.5.3 Interpretation der Ergebnisse

Auf die Dokumentation der Berechnungsergebnisse sollte deren Interpretation im Hinblick auf die praktische Bedeutung folgen. Dabei muss mindestens eine der folgenden Vorgehensweisen angewendet werden:

- Vergleich der resultierenden wärme- und feuchtetechnischen Bedingungen mit festgelegten Grenzwerten;
- Überprüfung des Risikos einer Feuchteansammlung durch Vergleich des Gesamtfeuchtegehaltes in der baulichen Anlage nach einem Durchlauf mit der Anfangsbedingung (üblicherweise anhand über ein Jahr erhobener stundenbezogener Daten). Bei baulichen Anlagen, die im Hinblick auf die Trocknung von anfänglich vorhandener Feuchte analysiert werden, muss dieser Vergleich nach mindestens drei Jahren durchgeführt