

DIN EN 15026



ICS 91.120.01

Ersatz für
DIN EN 15026:2007-07

**Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen –
Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation;
Deutsche Fassung EN 15026:2023**

Hygrothermal performance of building components and building elements –
Assessment of moisture transfer by numerical simulation;
German version EN 15026:2023

Performance hygrothermique des composants et parois de bâtiments –
Évaluation du transfert d'humidité par simulation numérique;
Version allemande EN 15026:2023

Gesamtumfang 47 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 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).

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.

Frühere Ausgaben

DIN EN 15026: 2007-07

Deutsche Fassung

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 —
Évaluation du transfert d'humidité par
simulation numérique

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 26. Juni 2023 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim CEN-CENELEC-Management-Zentrum oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, der Republik Nordmazedonien, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

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	11
4.4.1 Allgemeines	11
4.4.2 Wärme- und Enthalpietransport innerhalb von Baustoffen	12
4.4.3 Feuchtetransport	13
4.4.4 Feuchtetransport über Baustoffgrenzflächen/Wasserdampfbremsen/Folien hinweg	14
4.4.5 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	16
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	22
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	24
7.3.1 Simulierte Geometrie	24
7.3.2 Anfangsbedingungen	24
7.3.3 Randbedingungen	24
7.3.4 Baustoffparameter	24
7.3.5 Hilfsmodelle	24
7.3.6 Ausgangsspezifikationen	24
7.4 Simulationsverfahren und numerische Eigenschaften	25

7.4.1	Allgemeines	25
7.4.2	Simulationswerkzeug	25
7.4.3	Eigenschaften der numerischen Simulation	25
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	26
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	Allgemeines	30
A.5.2	Wasserdampfdiffusionswiderstand	30
A.5.3	Flüssigkeitstransporteigenschaften	31
A.6	Baustoffbezogene Einschränkungen der Modelle	33
A.6.1	Allgemeines	33
A.6.2	Einfluss von Baustoffgrenzen auf den Flüssigfeuchtetransport	33
A.6.3	Hysteresephänomene	34
A.6.4	Quellung	34
A.6.5	Bewitterung und Alterung	34
Anhang B (normativ) Vergleichsprüfungen		35
B.1	Allgemeines	35
B.1.1	Allgemeiner Hintergrund	35
B.1.2	Referenzimplementierung	35
B.2	Problembeschreibung	35
B.3	Ergebnisse	36
B.4	Andere Vergleichsfälle und Validierungsprogrammsammlungen	38
Anhang C (informativ) Feuchteauslegungsjahre		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 [21][22][21]	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)	38

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 15026:2023) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 89 „Wärmeschutz von Gebäuden und Bauteilen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von SIS gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Januar 2024, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Januar 2024 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument wird EN 15026:2007 ersetzen.

Die wesentlichen Änderungen im Vergleich zu der Vorgängerausgabe EN 15026:2007 sind folgende:

- Anwendungsbereich überarbeitet;
- alle Transportformeln sind für zweidimensionale Berechnungen angegeben, und es wurden Quellterme für Hilfsmodelle hinzugefügt, die spezielle Effekte berücksichtigen;
- Ansätze zur Berechnung von Quellen und Senken in den Transportformeln zur Berücksichtigung dieser speziellen Effekte, d. h. Gebäudebelüftung, Regenwasserinfiltration und Luftinfiltration, sind in Anhang E dokumentiert;
- Eisbildung und Gefrierenthalpie wurden in die Wärmetransportformel aufgenommen;
- der Abschnitt über die Materialeigenschaften wurde erweitert und enthält nun ausführlichere Informationen in Anhang A;
- die Abschnitte über innere und äußere Randbedingungen und die entsprechenden Anhänge wurden geändert, um neue Forschungsergebnisse zu berücksichtigen.

Rückmeldungen oder Fragen zu diesem Dokument sollten an das jeweilige nationale Normungsinstitut des Anwenders gerichtet werden. Eine vollständige Liste dieser Institute ist auf den Internetseiten von CEN abrufbar.

Entsprechend der CEN CENELEC Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, die Republik Nordmazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Türkei, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

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 Tauwasserbildung im Bauteilinneren 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 Tauwasserbildung im Bauteilinneren 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.

Basierend auf den Ausgangsparametern können experimentell validierte Nachbearbeitungswerkzeuge dabei helfen, Folgendes zu bewerten:

- feuchteabhängige Wärmeleistung;
- biologisches Wachstum, Fäule und Korrosion;
- feuchtebedingter Schaden und Zersetzung.

Die Ergebnisse der Berechnungen sind für verschiedene Zwecke nützlich, aber deren Anwendung ist von der Norm nicht abgedeckt und erfolgt auf eigenes Risiko des Benutzers.

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 zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. 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. Es gelten die folgenden Symbole und Einheiten.

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 Sonnenstrahlung	W/m ²
g, g_w	Feuchtestromdichte	kg/(m ² · s)
g_l	Flüssigwasserstromdichte	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)
g_v	Dampfstromdichte	kg/(m ² · s)
h	Oberflächen-Wärmeübergangskoeffizient	W/(m ² · K)
h_c	Konvektionswärmeübergangskoeffizient	W/(m ² · K)
h_e	spezifische latente Verdampfungs- oder Kondensationsenthalpie	J/kg
h_l	spezifische Enthalpie von Flüssigwasser	J/kg
h_r	Strahlungswärmeübergangskoeffizient	W/(m ² · K)

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
$p_{v,sat}$	Sättigungsdampfdruck	Pa
q	Wärmestromdichte	W/m ²
q_{sens}	Dichte des fühlbaren Wärmestroms	W/m ²
η	Widerstand der Grenzfläche gegen Flüssigfeuchteströmung	m/s
R_N	Geschwindigkeit des Regenfalls senkrecht (d. h. rechtwinklig) zur Ebene	mm/s
r_s	Regenexpositionsfaktor einer Oberfläche	—
r_v	Wasserdampf-Diffusionswiderstand der Grenzfläche	m/s
R_v	Gaskonstante des Wasserdampfes	J/(kg · K)
$S_{d,s}$	wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke 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)

Symbol	Größe	Einheit
φ	relative Luftfeuchte	– (0 ... 1)
μ	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl	—
ρ_a	Luftdichte	kg/m ³
ρ_s	Dichte der Feststoffmatrix	kg/m ³
ρ_l	Flüssigwasserdichte	kg/m ³

4 Auf die Wärme- und Feuchtetechnik bezogene Gleichungen und Baustoffeigenschaften

4.1 Annahmen

Gleichung (1) bis Gleichung (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 Energiedichte 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:

$$\varphi = \frac{P_v}{P_{v,\text{sat}}(T)} \quad (5)$$

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

4.4.1 Allgemeines

In Gleichung (7) bis Gleichung (9) werden eindimensionale Flussdichteausdrücke verwendet. 2-D- und 3-D-Ansätze werden durch Verwendung direktonaler Indizes k für die Vektor-Flussgrößen erhalten (siehe 7.2).

4.4.2 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).

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

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:

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

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

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

ANMERKUNG Die konvektive Übertragung von fühlbarer Wärme, d.h. die die Wärmekapazitäten c_v^{N1} und c_l^{N1} 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 (4) 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 Erstarrungswärme, $T_{ref} = 273,15$ K	h_{ice}	333 550 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.		

N1 Nationale Fußnote: Es handelt sich hier um die Symbole c_v und c_l (Typfehler in der englischsprachigen Originalfassung).

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).

4.4.3 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.