

EIN NEUES VERFAHREN ZUR BEWERTUNG DER FROSTBESTÄNDIGKEIT VON KAPILLARPORÖSEN BAUSTOFFEN UNTER HYGROTHERMISCHER BELASTUNG

John Grunewald¹

¹ Technische Universität Dresden, Deutschland, E-Mail: john.grunewald@tu-dresden.de

Kurzfassung

Der Beitrag präsentiert ein neues Verfahren zur Bewertung der Frostbeständigkeit von kapillarporösen Baustoffen unter hygrothermischer Belastung.

Das Verfahren basiert auf einer neu definierten Materialcharakteristik - dem differentiellen Porenklassenschädigungspotential - das aus der Adaption des klassischen Frost-Tau-Wechselversuchs (CDF-Test) abgeleitet wird. Während im CDF-Test wassergesättigte Materialien im Labor Temperaturzyklen zwischen -20°C und $+20^{\circ}\text{C}$ ausgesetzt werden, sollen hier abgestufte Randbedingungen (Teilsättigung, mildere Temperaturen) angewendet werden. Damit lassen sich die Beiträge einzelner Porenklassenbereiche zur Frostschädigung eines Materials differenziert bewerten.

Einleitung

Das übergeordnete Ziel des Verfahrens besteht in der Bewertung der Frostbeständigkeit von kapillarporösen Baustoffen unter hygrothermischer Bewitterung, z.B. von großflächigen Fassadenverkleidungen (Fliesen, PV-Module) auf Wärmedämmverbundsystemen (WDVS). Da Dampfdiffusionsströme eine Feuchteanreicherung hinter der Fassadenverkleidung verursachen können, ist diese so zu begrenzen, dass Frostschäden für die geplante Lebensdauer der Fassadenelemente ausgeschlossen werden können. Allgemein kann das Verfahren auf jedes kapillarporöse Material angewendet werden, das der Bewitterung durch Feuchtigkeit ausgesetzt ist.

Die hygrothermische Simulation des Verhaltens von Außenwandkonstruktionen unter realen Klimabedingungen mit DELPHIN¹ schließt auch die Beschreibung von Gefrierprozessen (Sontag, Nicolai, & Grunewald, 2014) mit ein. Die in der Simulation prognostizierte Eisbildung in der Konstruktion kann schon als Indikator für mögliche Frostschäden gewertet werden. Allerdings ist das noch kein

hinreichendes Kriterium. Trotz Eisbildung muss nicht unbedingt eine Frostschädigung vorliegen, da von frostbeständigen Materialien erwartet wird, dass sie eine definierte Anzahl von Frost-Tau-Wechseln (FTW) schadlos überstehen.

Die Anwendung des hier vorgestellten Verfahrens zur Bewertung der Frostbeständigkeit setzt die hygrothermische Simulation der betreffenden Baukonstruktion voraus. Die Auswertung berechneter Feuchte- und Temperaturverläufe an vorselektierten kritischen Punkten der Konstruktion führt auf eine prognostizierte Anzahl FTW, wie im Anschluss erläutert wird. Darauf aufbauend ermöglicht die Anwendung des hier definierten porenklassenspezifischen Schädigungspotentials Vorhersagen über die zu erwartende Lebensdauer von Fassadenkonstruktionen.

Gefriergrenze

Aus thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen zwischen Eis und Flüssigwasser im Porensystem lässt sich eine Beziehung zwischen Kapillardruck und Gefriertemperatur (Gefriergrenze) ableiten (Xu, 1998). Mit der bekannten Gleichung zur Berechnung der kapillaren Steighöhe kann man daraus eine Beziehung zwischen Kapillarradius und Temperatur herleiten. Bei Anwendung der Kelvingleichung, welche ein thermodynamisches Gleichgewicht zwischen Flüssig- und Dampfphase voraussetzt, ergibt sich eine Beziehung zwischen relativer Luftfeuchte und Temperatur (Abbildung 1). Die relative Luftfeuchte im luftgefüllten Teil des Porensystems steht dabei mit der Wasseraktivität der größten ungefrorenen Pore im Gleichgewicht.

Diese unterschiedlichen Darstellungsmöglichkeiten der Gefriergrenze sind Ausdruck desselben physikalischen Sachverhalts: Wasser unterliegt in einem Porensystem einer zusätzlichen Kapillarspannung, deren Betrag in kleineren Poren zunimmt und die Fähigkeit der Wassermoleküle zum

¹ <https://www.bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php>

Phasenwechsel einschränkt. Dadurch stellt sich ein neues thermodynamisches Gleichgewicht zwischen den Phasen ein, während die (Gefrier-)Temperatur sinkt.

Die horizontale blaue Linie in Abbildung 1 zeigt die Temperaturzyklen zwischen -20°C und $+20^{\circ}\text{C}$ an, die beim CDF-Test mit wassergesättigten Probekörpern

(100% rel. Luftfeuchte im Porensystem) im Labor durchgeführt werden. Wenn Materialien diesen Test bestehen, gelten sie als frostbeständig. Daraus ergibt sich, dass die Überschreitung der Gefriergrenze allein kein hinreichendes Kriterium für Frostschädigung ist, sondern zur Charakterisierung der Frostbeständigkeit weitere Aspekte mit einbezogen werden müssen.

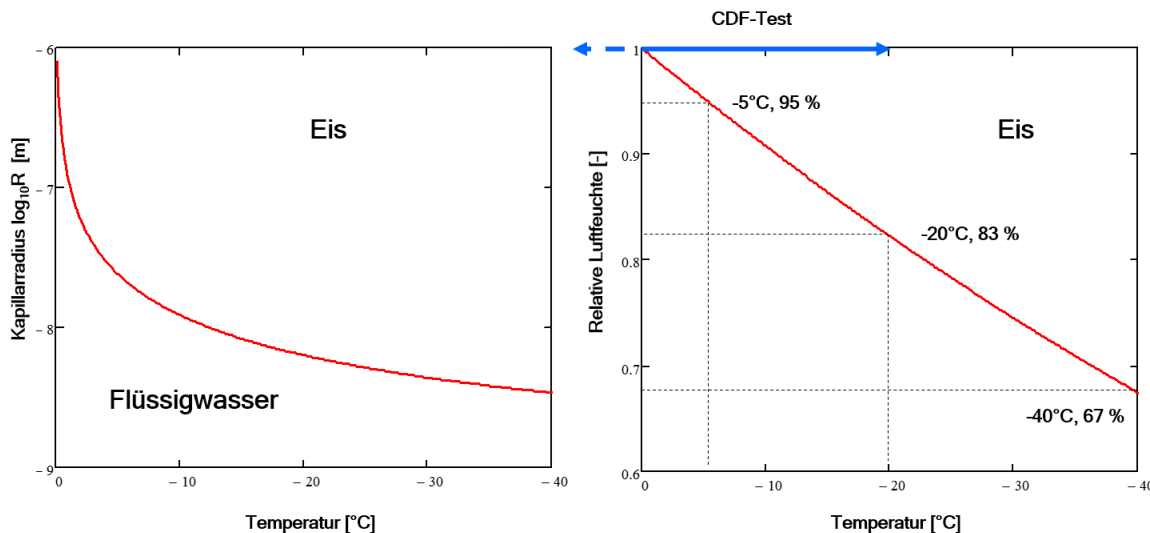


Abbildung 1: Gefriergrenze von Flüssigwasser im Porensystem, hier dargestellt als Kapillarradius über Temperatur (links) und relative Luftfeuchte über Temperatur (rechts)

Prozessrichtungen bei Kapillarkondensation und Eisbildung

Aus thermodynamischen Gleichgewichtsansätzen folgt, dass sich Kapillarkondensation bei den kleinsten Poren beginnend hin zu den größeren Poren fortsetzt. Diese würde also bei der in Abbildung 2 vorausgesetzten schematischen Porenvolumenverteilung bei

Poren eines Radius von 1 nm beginnen, was einem Durchmesser von ca. 6 Wassermolekülen entspricht.

Die Eisbildung verläuft dagegen umgekehrt, von der größten hin zu den kleineren Poren. Abbildung 2 veranschaulicht diese Prozesse auf einer Porenskala über sechs Größenordnungen.

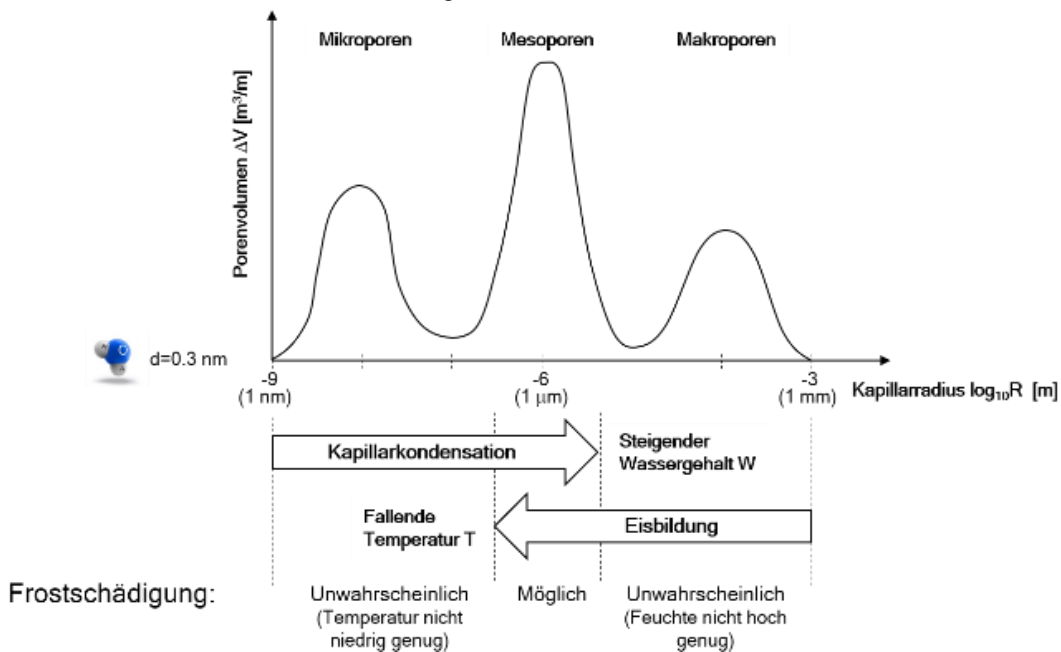


Abbildung 2: Veranschaulichung der Prozessrichtung der Kondensation und Eisbildung unter thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen an einer differentiellen Porenvolumenverteilung

In einer Fassadenkonstruktion treten sehr hohe Feuchtegehalte und sehr tiefe Temperaturen unter natürlichen Klimabedingungen nur selten gleichzeitig auf. Daraus folgt, dass Eisbildung und damit Frostschädigung in den mittleren Porenbereichen wahrscheinlicher ist, die wassergefüllt sind und aufgrund der vorhandenen Temperaturen gefrieren können.

Derzeitige numerische Simulationsmodelle sind bislang allerdings nicht in der Lage, die von Eisbildung betroffenen spezifischen Porenbereiche auszuweisen. Ebenso wenig besteht die Möglichkeit, einen Schädigungsgrad des Materials oder die Lebensdauer einer Baukonstruktion mit Hilfe der hygrothermischen Simulation zu prognostizieren.

CDF-Test

Der CDF-Test lässt sich unter der eingangs eingeführten schematischen Porenvolumenverteilung veranschaulichen. Durch die spezielle Wahl der Randbedingungen (wassergesättigt, -20°C - 20°C)

werden nahezu im gesamten Porenspektrum Frostbedingungen eingestellt. Beim Durchlaufen eines jeden FTW würde das Porensystem nach hinreichend langer Einstellzeit bis zu einem Porenradius von ca. 6.3 nm durchgefroren (entspricht dem Durchmesser von etwa 21 Wassermolekülen) und anschließend wieder aufgetaut (Abbildung 3). Im Ergebnis des Experiments steht die Anzahl FTW, die zu einer vollständigen Frostschädigung des Probekörpers führt. Unter der Annahme eines gleichmäßig graduell wachsenden Schädigungsgrades ist damit der Beitrag jedes einzelnen FTW durch das Reziproke der gemessenen Anzahl FTW gegeben. Beispielsweise würde ein FTW 2 % Schädigungsgrad beitragen, wenn 50 FTW zur vollständigen Materialzerstörung führen.

Dabei ist nicht bekannt, welche Porenklasse welchen Anteil zur Frostschädigung beigetragen hat. Es wäre naheliegend anzunehmen, dass unter diesen Testbedingungen in allen Porenklassen eine Schädigung möglich ist. Deshalb wird hier von integraler Schadensakkumulation gesprochen.

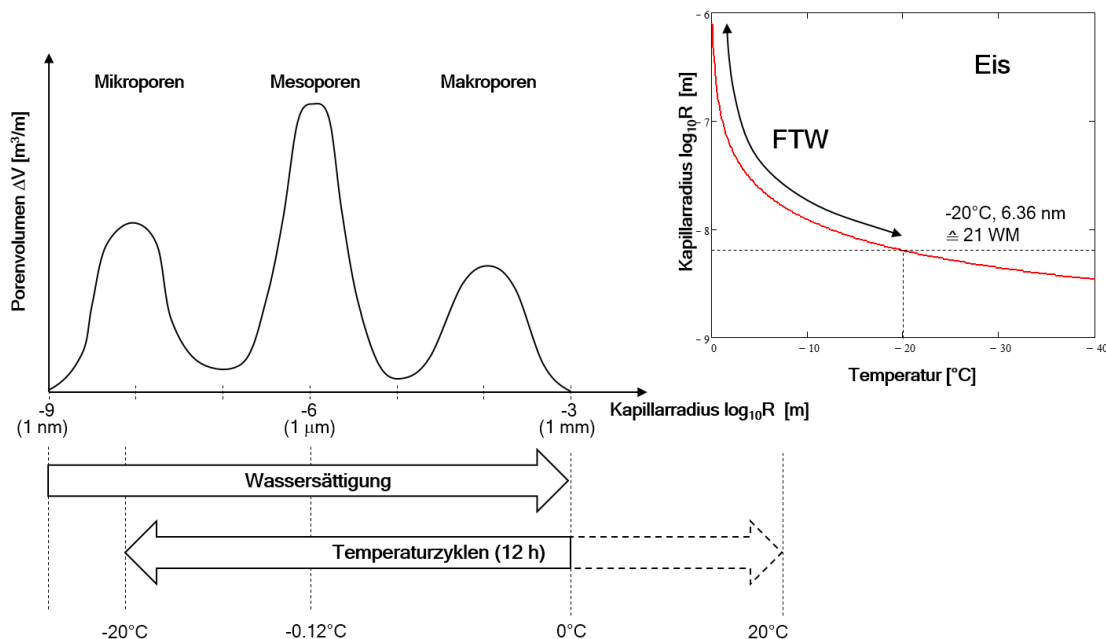


Abbildung 3: Veranschaulichung der zyklischen Frostbeanspruchung des Probekörpers im CDF-Test durch eine schematische Porenvolumenverteilung, oben rechts das zyklische Durchlaufen entlang der Gefrierengrenze

Die rechte Grafik in Abbildung 3 zeigt das Durchlaufen der Temperaturzyklen entlang der Gefrierengrenze. Zu beachten ist, dass durch die extreme Steilheit der Gefrierengrenze im Bereich von Kapillarradien größer als $1 \mu\text{m}$ ($R > 10^{-6} \text{ m}$) ein großer Teil der Makro- und Mesoporen innerhalb einer sehr kleinen Temperaturspanne von 0°C bis $-0,12^{\circ}\text{C}$ gefrieren müsste. Dabei spielen allerdings auch andere Einflüsse eine Rolle, wie z.B. die zur Induktion des Gefrierprozesses notwendige Unterkühlung und die nachfolgende Wärmeabgabe durch Phasenumwandlung. Somit ist unbestimmt, ob und wie eine Eisbildung bei solch kleinen Temperaturänderungen

im Porensystem stattfindet. Folglich ist es naheliegend, in diesem Bereich nicht die Temperatur als Führungsgröße zu wählen, sondern stattdessen mit ungesättigten Probekörpern zu arbeiten. Im Porenbereich zwischen $1 \mu\text{m}$ - 1 nm kann dagegen die Temperatur als dominierende Größe für die Eisbildung angenommen werden.

Diskrete Frost-Tau-Zyklen

Um die Frostbeständigkeit von Materialien unter natürlichen Feuchte- und Temperaturbeanspruchungen zu bewerten, müssen die Grenzen bekannt sein, bis zu denen eine Konstruktion als frostsicher gelten

kann und welche spezifischen hygrothermischen Materialeigenschaften dafür vorliegen müssen. Dazu ist es notwendig, die Schadensakkumulation auch unter milderer Bedingungen experimentell bestimmen, wobei in der Regel nicht das gesamte Porenspektrum gleichermaßen betroffen ist.

Wenn man die Versuchsbedingungen so abändert, dass die Eisbildung in bestimmten Porenklassen schrittweise ausgeschlossen werden kann, ergibt sich damit die Möglichkeit einer differenzierten porenklassenspezifischen Betrachtung. Daher wird vorgeschlagen, durch geeignete Abstufung der Sättigungsgrade und Temperaturen den Porenbereich für Eisbildung Schritt für Schritt so einzuengen, wie schematisch in Abbildung 4 dargestellt ist.

Für den Porenbereich $R > 1 \mu\text{m}$ eine Abstufung des Sättigungsgrades sinnvoll, für $R < 1 \mu\text{m}$ ist dagegen eine Temperaturabstufung naheliegend. Die Kenntnis der Porenvolumenverteilung des Materials, die im Rahmen der üblichen experimentellen Materialcharakterisierung abgeleitet werden kann, ist dabei hilfreich, um eine sinnvolle Abstufung vornehmen zu können.

Für jede Abstufung der Versuchsbedingungen wird ein Testzyklus mit einer geeigneten Anzahl Probekörper gefahren. Für die parallele Ausführung aller Testzyklen ist die Herstellung möglichst homogener Probekörper mit voreingestellten Sättigungsgraden notwendig. Eine sequentielle Ausführung scheidet aus, weil vorgeschädigte Probekörper nicht wiederverwendet werden können. Außerdem bringt die parallele Herangehensweise zeitliche Vorteile. Es ist davon auszugehen, dass bei stärker frostbeständigen Materialien eine größere Anzahl an Zyklen gefahren werden muss.

Die Anzahl der bis zur vollständigen Frostschädigung notwendigen FTW wird analog zur Herangehensweise im CDF-Test erfasst. Zu erwarten ist, dass die Anzahl FTW mit stärkerer Einschränkung der Versuchsbedingungen wächst. Es entspricht den Erfahrungen, dass stärker gesättigte Materialien zu mehr Frostschäden neigen. Genauso ist zu erwarten, dass weniger harsche Temperaturbedingungen zu geringeren Schäden führen. In Abbildung 4 ist rechts unten beispielhaft das Ergebnis eines Durchlaufs aller Testzyklen aufgezeigt. Die Anzahl der FTW bis zum Erreichen der Frostschädigung nimmt mit der Anzahl der ausgeschlossenen Porenklassen zu.

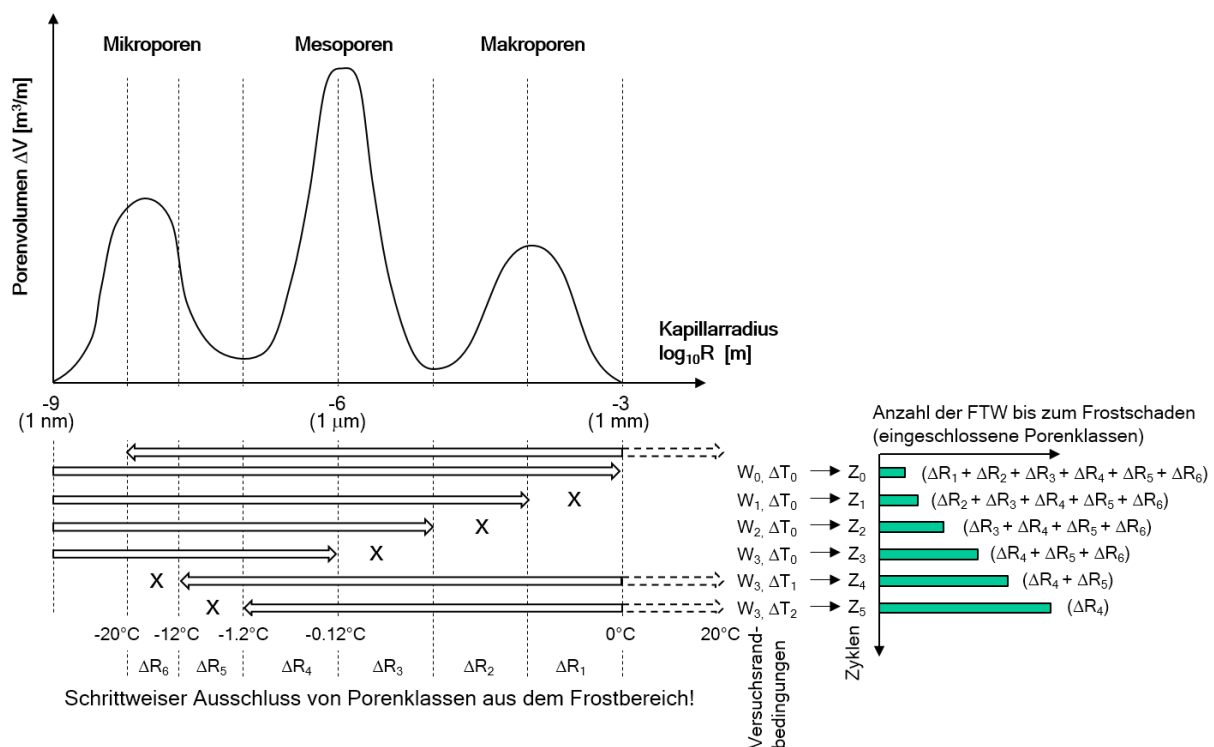


Abbildung 4: Links: Abstufung der Versuchsbedingungen für schrittweisen Ausschluss (X) von Porenklassen aus der Eisbildung; Rechts: FTW-Verteilung über Zyklen (Anzahl FTW bis zum Frostschaden bei eingeschlossenen Porenklassen).

Erstellung einer Materialcharakteristik

Die Auswertung der in Abbildung 4 dargestellten FTW-Verteilung erlaubt mittels eines einfachen Algorithmus die Ableitung eines differentiellen

Porenklassenschädigungspotentials als Materialcharakteristik (Abbildung 5).

1. **Invertierung:** Im ersten Schritt wird die FTW-Verteilung invertiert und damit das integrale Porenklassenschädigungspotential definiert:

integral deshalb, weil beim Durchfahren der Testzyklen jeweils mehrere Porenklassen an der Schadensakkumulation beteiligt sind.

Differenzenbildung der Beitrag jeder ausgeschlossenen Porenklasse zur Schädigung quantifiziert werden.

2. **Differenzierung:** Im zweiten Schritt wird das integrale Porenklassenschädigungspotential differenziert. Unter der Voraussetzung, dass es sich um eine extensive Größe handelt, kann durch

Das in Abbildung 5 hergeleitete differentielle Porenklassenschädigungspotential beschreibt den zu erwarteten Schädigungsfortschritt pro FTW in jeder einzelnen Porenklasse.

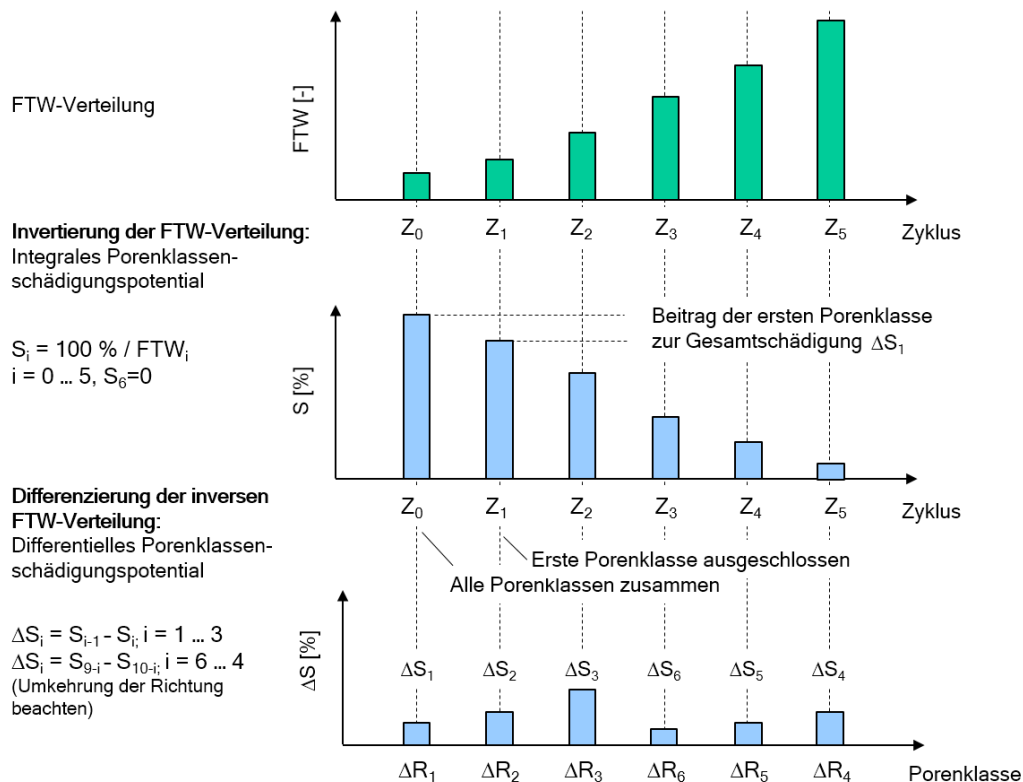


Abbildung 5: Algorithmus zur Ableitung des differentiellen Porenklassenschädigungspotentials

Auswertung von Simulationsergebnissen

Die hygrothermische Simulation liefert orts- und zeitabhängige Feuchte- und Temperaturverteilungen der Konstruktion. Ist das numerische Modell in der Lage, Gefrier- und Auftauprozesse mit zu berechnen, kann deren Wirkung auf die Feuchte- und Temperaturfelder schon vorab mit berücksichtigt werden, was einen Vorteil darstellt. Wählt man potentiell kritische Punkte der Konstruktion aus und setzt dort Feuchte- und Temperatursensoren, um zeitlich hochaufgelöste Zeitreihen (z.B. Stundenschritte) zu generieren, lässt sich daraus die Anzahl der möglichen FTW ableiten.

Auf dieser Basis kann geprüft werden, in welcher Porenklasse ein FTW stattgefunden hat. Dies ist der Fall, wenn die Porenklasse vollständig gefroren war und danach wieder aufgetaut ist. Dabei gilt:

- eine Porenklasse ist vollständig gefroren, wenn $W > W(R_i)$ und $T < T(R_{i-1})$ ist und
- eine Porenklasse ist vollständig aufgetaut, wenn $W < W(R_{i-1})$ und $T > T(R_i)$ ist.

Porenklassen können also definitionsgemäß nur zwei Zustände haben: vollständig gefroren oder vollständig aufgetaut. Zwischenzustände, wie z.B. halb gefroren oder halb aufgetaut, werden nicht betrachtet. Dies ist für die Einteilung des Porenspektrums in Porenklassen relevant.

Um die Anzahl der FTW abzuleiten, müssen die Funktionen $W(R)$ und $T(R)$ bekannt sein. $T(R)$ ist die Umkehrfunktion der eingangs eingeführten Gefriergrenze nach Umrechnung des Kapillardrucks in einen Kapillarradius. Dafür wird eine bekannte, für kreisrunde Kapillaren gültige Beziehung verwendet. Der Kapillarradius ist damit als idealisierte Hilfsgröße zu betrachten, die nur der Veranschaulichung dient. Der Kapillardruck hat dagegen eine konkrete physikalische Bedeutung (Differenzdruck zwischen Flüssig- und Gasphase). $W(R)$ ist eine Funktion, die durch Umrechnung der standardmäßig im Labor zu bestimmenden Feuchtespeicherfunktion von Kapillardruck auf Kapillarradius gewonnen wird.

Mit Kenntnis der FTW kann das differentielle Porenklassenschädigungspotential zur Auswertung heran gezogen werden, um die Entwicklung des

Frostschadigungsgrades von Baukonstruktionen unter natürlichen Klimabedingungen zu prognostizieren. In Abbildung 6 ist die schrittweise Annäherung an eine volle Schädigung als Ergebnis der Auswertung von Feuchtegehalten und Temperaturen über einen

bestimmten Simulationszeitraum schematisch dargestellt. Erreicht mindestens eine der Porenklassen den Schädigungsgrad von 100%, so ist von einer kritischen Frostschädigung des Materials auszugehen.

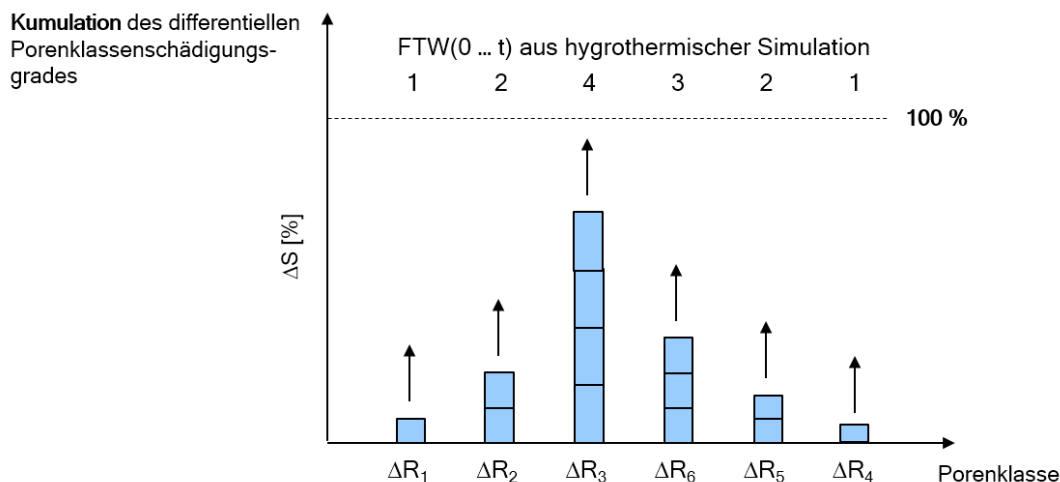


Abbildung 6: Kumulation des differentiellen Porenklassenschädigungsgrades durch Auswertung der Feuchte- und Temperaturfelder aus einer hygrothermischen Simulation

Zusammenfassung

Es wurden die theoretischen Grundlagen eines neuen Verfahrens zur Bewertung der Frostbeständigkeit von kapillarporösen Baustoffen unter hygrothermischer Bewitterung vorgestellt. Das Verfahren basiert auf dem differentiellen Porenklassenschädigungspotential, einer Materialcharakteristik, die durch Adaption des klassischen Frost-Tau-Wechselversuchs (CDF-Test) experimentell bestimmt werden kann.

Die Anwendung des Verfahrens erfolgt in Kombination mit der hygrothermischen Simulation, welche zeitliche Feuchte- und Temperaturverläufe an kritischen Punkten einer Konstruktion liefert, die mit Hilfe eines Postprozessingtools ausgewertet werden können. Daraus lässt sich die resultierende Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (FTW) für jede Porenklasse ermitteln, welche dann mit Hilfe des differentiellen Porenklassenschädigungspotentials ausgewertet werden.

Durch die Kumulation des Schädigungspotentials entsprechend der Anzahl FTW ergibt sich die Möglichkeit, die Frostbeständigkeit der Konstruktion über eine geplante Lebenszyklusdauer zu bewerten, bzw. Prognosen über den Zeitpunkt des Erreichens eines kritischen Schädigungsgrades zu erstellen.

Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesministerium für Wirtschaft und Klima für die Förderung des Projektes NaVe „Erarbeitung wissenschaftlich begründeter Bewertungskriterien und Implementierung eines Nachweisverfahrens für die schadenfreie energetische Bestandsanierung und Neubauplanung“ FKZ 03ET1649A, in dem das vorliegende theoretische Konzept entwickelt und durch entsprechende Laborexperimente unteretzt wurde.

Literatur

- Sontag, L., Nicolai, A., & Grunewald, J. (2014, 2016-04-04). *Influence of Ice Formation on Thermal Conductivity and Liquid Water Conductivity in Hygrothermal Transport Models*. Paper presented at the 10th Nordic Symposium on Building Physics, Lund, Sweden.
- Xu, Y. (1998). *Numerische Simulation der Eisbildung in kapillarporösen Baustoffen unter Berücksichtigung der gekoppelten Wärme- und Feuchtetransportprozesse: zur Erlangung des akademischen Grades Dr.- Ing. der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden*: Eigenverlag der TU.