

Variable Dampfbremsen: Ermittlung feuchteabhängiger Diffusionswiderstände aus Cup-Messungen

Zur Verbesserung der Feuchtebilanz von Leichtbaukonstruktionen kommen immer häufiger sogenannte variable Dampfbremsen zum Einsatz, deren Diffusionswiderstand sich mit der anliegenden relativen Feuchte ändert und die damit zu einer Verbesserung der Feuchtebilanz durch weniger Feuchteeintrag im Winter und mehr Trocknung im Sommer beitragen. Die erste variable Dampfbremse wurde vor über 30 Jahren am Fraunhofer IBP zusammen mit einem Industriepartner entwickelt. Inzwischen gibt es viele konkurrierende Produkte mit unterschiedlichen Spreizungen des Diffusionswiderstands und unterschiedlichen Umschlagsbereichen von diffusionshemmend nach diffusionsoffen. Das Verhalten im Bauteil hängt stark von den genauen Eigenschaften dieser Dampfbremsen ab – daher ist es wesentlich, diese Eigenschaften im Labor adäquat zu messen und richtig auszuwerten. Der vorliegende Beitrag beschreibt zum einen die Problematik und zum anderen, wie Messung und Auswertung in zuverlässiger Form durchgeführt werden können.

Stichworte Variable Dampfbremse; Diffusionswiderstand; Dampfdurchlässigkeit; Cup-Messung; Messwertediskussion

Variable Vapor Retarders: Determination of the moisture dependent vapor permeability based on cup measurements

To improve the moisture balance of lightweight structures, variable vapor retarders are increasingly being used. These membranes change their diffusion resistance depending on the relative humidity, thus improving the moisture balance by reducing moisture ingress in winter and increasing drying in summer. The first variable vapor barrier was developed over 30 years ago at the Fraunhofer IBP in collaboration with an industrial partner. There are now many competing products with different diffusion resistance spreads and different transition ranges from vapor retarding to vapor permeable. The behavior in the component depends heavily on the exact properties — it is therefore essential to measure the properties adequately in the laboratory and to evaluate them correctly. This article describes the problem and how measurement and evaluation can be carried out reliably.

Keywords variable vapor retarders; diffusion resistance; vapor permeability; cup measurement; measurement discussion

1 Einleitung

Variable Dampfbremsen verbessern die Feuchtebilanz von Leichtbauteilen, da sie in Abhängigkeit von den anliegenden Randbedingungen ihre Durchlässigkeit für Wasserdampfdiffusion verändern und damit die Konstruktion je nach anliegendem Klima einerseits vor ungewünschtem Feuchteeintrag schützen, andererseits eine gewünschte Trocknung zulassen können.

Viele solche Dampfbremsen haben sich mittlerweile gut bewährt und Untersuchungen haben gezeigt, dass die erforderliche Variabilität in der Regel dauerhaft gewährleistet ist und sich nicht oder nur unwesentlich verändert. Für Zulassungen und ETAs muss diese Dauerhaftigkeit belegt werden. Variable Dampfbremsen ermöglichen so Bauweisen, die mit konventionellen Dampfbremsen mit konstantem Diffusionswiderstand nicht funktionsfähig wären – und immer noch findet eine Optimierung der Produkte für bestimmte Anwendungsbereiche wie Leichtbauwände, begrünte Bauteile oder verschattete Flach- oder Steildächer statt. Bei diesen Anwendungen ergeben sich unterschiedlich starke Befeuchtungs- und Trocknungsdiffusionsströme, sodass je nach Anwendungsfall mal eine hohe Dichtheit im

Winter, mal eine möglichst hohe Diffusionsoffenheit im Sommer oder eben auch der Feuchtebereich, in dem sich das Diffusionsverhalten ändert, ausschlaggebend ist. Daraus ergeben sich anwendungsspezifische Optimierungsmöglichkeiten.

Um das Verhalten der variablen Dampfbremsen in unterschiedlichen Feuchtebereichen adäquat zu erfassen, sind entsprechende Messungen und auch eine geeignete Auswertung der Messergebnisse erforderlich. Da bei der Messung im Querschnitt der Folie kein einzelner Feuchtewert, sondern ein dem angelegten Differenzklima entsprechender Feuchtebereich vorliegt, stellt sich die Frage, welcher Feuchte der gemessene Widerstandswert zugeordnet werden soll. Dies hängt von der Krümmung der Widerstandskurve ab, die noch nicht bekannt ist – nicht korrekt ist es jedenfalls, den Widerstandswert einfach dem Mittelwert der Randbedingungen zuzuordnen.

Da die speziellen Eigenschaften der variablen Dampfbremsen immer stärker genutzt und ausgereizt werden, kommt der korrekten Erfassung von deren feuchteabhängigen Dampfdiffusionswiderständen eine entsprechend größere Bedeutung zu. Dies ist daher Thema des vorliegenden Beitrags.

2 Hintergrund

Dampfbremsen dienen bei Holz- und Leichtbauteilen oder bei der Innendämmung von Mauerwerk dazu, den Feuchteeintrag in die Konstruktion auf ein unkritisches Maß zu begrenzen. Dazu werden sie auf der warmen Seite der Dämmung angeordnet, um die Dampfdiffusion in die Konstruktion mit der Folge von Tauwasserausfall auf der Kaltseite zu begrenzen. Gleichzeitig dienen die Dampfbremsen meist auch als Dichtung gegen den konvektiven Eintrag feuchter Luft aus dem Raum. In Mitteleuropa ist die warme Seite im überwiegenden Teil des Jahres die Raumseite – nur im Sommer und bei Erwärmung der Außenoberfläche durch die Sonne drehen sich die Verhältnisse um und der Diffusionsstrom richtet sich nach innen; eine klassische Dampfbremse behindert dabei das Austrocknen der Feuchte in den Raum.

Diese Behinderung der Trocknung nach innen war vor über 30 Jahren Anlass für Überlegungen am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Dampfbremsen zu entwickeln, die die Trocknung vorhandener Feuchte in der Konstruktion bei außenseitiger Erwärmung durch Erhöhung der Dampfdurchlässigkeit im Sommer fördern. Die als Lösung für das Problem gefundenen feuchtevariablen Dampfbremsen weisen eine Abhängigkeit des Diffusionswiderstands von der am und im Material herrschenden relativen Feuchte auf. Mit relativer Feuchte ist in diesem Beitrag allgemein die in der Luft bzw. in den Luftporen von Materialien vorhandene relative Luftfeuchte gemeint.

Die erste variable Dampfbremse aus Polyamid wurde in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner vor ca. 30 Jahren am Fraunhofer IBP bis zur Marktreife entwickelt und hatte in der eingesetzten Dicke eine Bandbreite des s_d -Werts von etwa 0,1 bis 4,0 m [1]. Um den Verlauf des Diffusionswiderstands dieser Bahn zu ermitteln, wurden zunächst die klassischen Wet- und Dry-Cup-Messungen durchgeführt und dann durch Messungen bei weiteren Differenzklimaten – zwei dazwischen und eine im höheren Feuchtebereich – ergänzt. Der jeweils ermittelte Diffusionswiderstand wurde dabei vereinfacht auf den Mittelwert der angelegten relativen Feuchten bezogen. Dies unterstellt, dass der Diffusionswiderstand sich linear mit der Feuchte ändert, was bei einer feuchtevariablen Dampfbremse nicht der Fall ist. Allerdings waren die dadurch bedingten Ungenauigkeiten wegen der vergleichsweise moderaten s_d -Wertspreizungen durchaus akzeptabel.

Seit etwa 15 Jahren kommen weitere, in [2] als zweite Generation der variablen Dampfbremsen bezeichnete Produkte auf den Markt, die eine größere Spreizung aufweisen als die ursprüngliche feuchtevariable Dampfbremse und vor allem im Trockenbereich bis um den Faktor 7 höhere s_d -Werte erreichen. Zwar ist der Unterschied zwischen einer konstanten Dampfbremse und der ersten feuchtevariablen Bahn ein deutlich größerer gewesen als die Verbesserung, die jetzt durch höhere Sperrwerte und größere Spreizungen erzielt werden kann. Trotzdem können mit diesen Produkten bei speziellen Anwendungen,



Bild 1 Die zu messende Folie ist über eine mit Trockenmittel gefüllte Schüssel gespannt und seitlich abgedichtet
The membrane to be measured is sealed across the mouth of a cup filled with drying agent

bei denen vor allem ein geringer Feuchteeintrag in den Wintermonaten erforderlich ist, nochmals erhebliche Verbesserungen erzielt und Bauweisen ermöglicht werden, die vorher als zu risikoreich eingeschätzt wurden. Die neuen Bahnen unterscheiden sich oft nicht so sehr durch die maximalen und minimalen Diffusionswiderstände, sondern eher durch die Lage des Übergangsbereichs zwischen dampfbremsend und diffusionsoffen.

Um Bandbreite und Verlauf des variablen Diffusionswiderstands über der relativen Luftfeuchte adäquat ermitteln zu können, ist sowohl eine ausreichende Anzahl an Messungen über möglichst überlappende Feuchtebereiche als auch eine Berücksichtigung des sich in der Folie einstellenden Widerstandsprofils erforderlich. Eine einfache Zuordnung des gemessenen Widerstands zum Mittelwert der beiden Randbedingungen ist hier nicht mehr sinnvoll, da dies u. U. zu einer deutlichen Fehleinschätzung des realen Verhaltens führen kann. Die dadurch verursachten Fehler können sogar größer sein als die Unterschiede zwischen verschiedenen Produkten. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich daher mit den erforderlichen Messungen und deren sachgemäßer Auswertung, um die derzeit verfügbaren Dampfbremsen in hygrothermischen Simulationen korrekt zu erfassen und das für die jeweilige Anwendung geeignete Produkt zuverlässig identifizieren zu können.

3 Cup-Messungen

3.1 Messmethode

Der Diffusionswiderstand eines Materials wird üblicherweise ermittelt, indem man eine Materialprobe auf beiden Seiten verschiedenen relativen Feuchten aussetzt und den durch die Probe fließenden Dampfstrom misst. Schichtförmige Proben, insbesondere Folien, kann man zu diesem Zweck über die Öffnung einer Schüssel (Cup) spannen (Bild 1).

Innerhalb der Schüssel wird eine definierte relative Feuchte durch ein Trockenmittel oder eine gesättigte Salzlösung eingestellt. Die äußere relative Feuchte kann auf dem gewünschten Wert konstant gehalten werden, indem man die Schüssel in einen Klimaschrank oder einen geeignet konditionierten Laborraum stellt. Wiederholte Wägungen registrieren die Gewichtsänderungen der Schüssel und erlauben nach einer Stabilisierungsphase, den durch die Probe fließenden Dampfstrom zu ermitteln.

Ist der Diffusionswiderstand der Probe feuchteunabhängig, so genügt die Messung mit einem einzigen Satz von Randbedingungen. Die angelegten Feuchten sind in diesem Fall beliebig und können nach laborpraktischen Gesichtspunkten gewählt werden.

Bei Proben mit feuchteabhängigem Diffusionswiderstand ist die Messung aufwendiger. Eine geringe Feuchteabhängigkeit wird in der Regel vereinfacht dadurch erfasst, dass man eine Messung in einem niedrigeren Feuchtebereich, beispielsweise mit den Randbedingungen 3 % und 50 % relativer Feuchte (üblicherweise als dry cup bezeichnet) und eine zweite Messung in einem höheren Feuchtebereich (z. B. zwischen 50 % und 95 %, wet cup) durchführt.

Für die Charakterisierung moderner feuchtevariabler Dampfbremsfolien ist diese Datengrundlage nicht mehr ausreichend. Hier ist eine differenziertere Ermittlung der Spreizung der Widerstandskurve sowie der Lage und ungefähren Form des Übergangsbereichs erforderlich. Wünschenswert ist die Ermittlung einer Reihe von Widerstandswerten bei bestimmten relativen Feuchten, sodass eine hinreichend detaillierte feuchteabhängige Widerstandskurve gezeichnet werden kann.

Der Diffusionswiderstand eines Materials wird durch die Diffusionswiderstandszahl, auch μ -Wert genannt, beschrieben. Sie gibt an, um welchen Faktor der Diffusionswiderstand größer ist als derjenige ruhender Luft. Ist der μ -Wert feuchteunabhängig, so liefert eine Cup-Messung bei beliebigen Randbedingungen den μ -Wert des Materials. Ist er feuchteabhängig, dann stellt sich im Querschnitt der Probe eine Abfolge verschiedener örtlicher μ -Werte ein, entsprechend dem von den Randbedingungen abhängigen Feuchteprofil innerhalb der Probe. Könnte man die örtlichen Feuchtezustände und die zugehörigen μ -Werte im Probenquerschnitt individuell messen, dann hätte man die gewünschten Datenpunkte erfasst, zumindest für den in der Probe vorliegenden Bereich relativer Feuchten. Der Messung zugänglich ist aber nur der durch die Probe fließende Dampfstrom, der durch den Gesamtwiderstand bestimmt wird, also durch die Summe der in Reihe geschalteten örtlichen Einzelwiderstände. Der Dampfstrom gibt nur Auskunft über diesen Gesamtwiderstand und nicht über die den einzelnen örtlichen Feuchtezuständen entsprechenden μ -Werte. Führt man die Messung bei veränderten Randbedingungen durch, ändert sich der Feuchtebereich innerhalb der Probe, und der Dampfstrom entspricht nun dem für den neuen Bereich charakteristischen Gesamtwiderstand.

Die im Labor durchgeführte Auswertung jeder einzelnen Cup-Messung muss die Probe üblicherweise so behandeln, als ob sie einen feuchteunabhängigen μ -Wert hätte. Das Ergebnis ist ein μ -Wert μ_{Cup} , den eine Probe mit feuchteunabhängigem μ -Wert hätte, die unter denselben Randbedingungen denselben Dampfstrom durchließe. Die Aufgabe besteht nun darin, aus dem Vergleich von μ_{Cup} -Ergebnissen in verschiedenen Feuchtebereichen möglichst detaillierte Informationen über den Verlauf der feuchteabhängigen μ -Kurve abzuleiten.

Wie sich zeigen lässt [3], ist der aus einer Cup-Messung abgeleitete μ_{Cup} -Wert der Mittelwert über den Bereich der μ -Kurve, der dem in der Probe vorliegenden Feuchtebereich entspricht. Genauer – das harmonische Mittel: Der Kehrwert des gemessenen μ_{Cup} ist das arithmetische Mittel über den betreffenden Bereich des Kehrwerts der μ -Kurve, Gl. (1).

$$\frac{1}{\mu_{\text{Cup}}} = \frac{1}{\varphi_2 - \varphi_1} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{1}{\mu(\varphi)} d\varphi \quad (1)$$

mit:

- μ_{Cup} Ergebnis der Cup-Messung
- φ_1, φ_2 an die beiden Probenseiten angelegte relative Feuchten, %
- $\mu(\varphi)$ feuchteabhängiger μ -Wert des Probenmaterials

Eine Cup-Messung liefert also Information über das mittlere Niveau der μ -Kurve im verwendeten Feuchtebereich, nicht aber über ihren detaillierten punktwisen Verlauf (Bild 2). In der Zusammenschau aller Cup-Messungen lässt sich jedoch bereits ein erster Eindruck über den Verlauf der μ -Kurve gewinnen. Bild 3 zeigt die Ergebnisse verschiedener Cup-Messungen als Balken, die sich entlang der x-Achse über den jeweils angelegten Feuchtebereich erstrecken und deren jeweilige Lage in y-Richtung das gemessene μ_{Cup} markiert. Die verwendeten Feuchtebereiche sollten zusammen den gesamten Bereich von 0 % bis 100 % überdecken, um eine lückenlose Aussage zu ermöglichen.

3.2 Zerlegung in nicht überlappende Bereiche

Könnte man Cup-Messungen in aneinandergrenzenden, nicht überlappenden Feuchtebereichen durchführen, so wäre sofort ein Überblick über das mittlere Niveau der μ -Kurve in den einzelnen Bereichen in Form einer Treppenkurve gegeben. Die Feuchtebereiche verschiedener Cup-Messungen müssen einander aber oft überlappen, wenn labortechnische Einschränkungen in der Wahl der Feuchtekompositionen bestehen. Wird die äußere Feuchte durch einen Klimaschrank geregelt, kann sie beliebig vorgegeben werden. Die innere Feuchte muss jedoch durch eine der verfügbaren Salzlösungen eingestellt werden.

Die Zerlegung der überlappenden Ergebnisse in nicht überlappende Feuchtebereiche muss daher auf

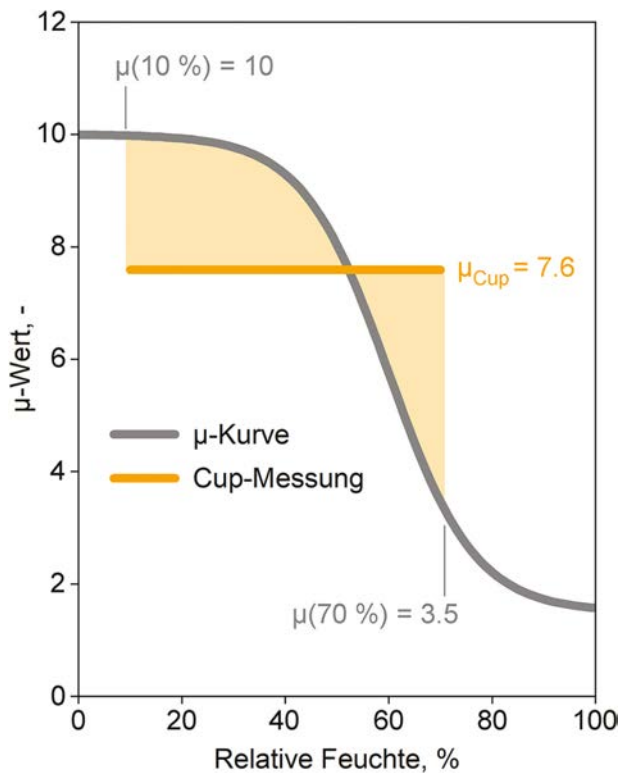


Bild 2 Das Ergebnis einer Cup-Messung ist der harmonische Mittelwert der μ -Kurve des Probenmaterials in dem bei der Messung angelegten Feuchtebereich (schematische Darstellung)
The result of a cup measurement is the harmonic mean of the μ curve of the specimen material, taken over the humidity range applied during the measurement (schematic diagram)

mathematischem Weg erfolgen. Für diesen Zweck lässt sich ein Additionstheorem [5] für μ_{Cup} -Werte in aneinandergrenzenden Bereichen verwenden, Gl. (2):

$$\frac{\varphi_3 - \varphi_1}{\mu_{\text{Cup}1 \rightarrow 3}} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\mu_{\text{Cup}1 \rightarrow 2}} + \frac{\varphi_3 - \varphi_2}{\mu_{\text{Cup}2 \rightarrow 3}} \quad (2)$$

Sind also die Messergebnisse μ_{Cup} in zwei aneinandergrenzenden Feuchtebereichen $\varphi_1 \dots \varphi_2$ und $\varphi_2 \dots \varphi_3$ bekannt, dann lässt sich daraus μ_{Cup} für den gesamten Bereich $\varphi_1 \dots \varphi_3$ berechnen. Umgekehrt kann aus der teilweisen Überlappung zweier Messungen das μ_{Cup} für den nicht überlappenden Teil berechnet werden. Auf diese Weise können die überlappenden Messbereiche in nicht überlappende Bereiche zerlegt werden. Dies erfordert in der Regel die Lösung eines Gleichungssystems. Wenn mehr Messungen als Zielbereiche vorliegen, erfolgt die Lösung mit der Methode kleinster Fehlerquadrate. Ein Vorteil dabei ist, dass die Messfehler sich teilweise kompensieren können und dass eine Abschätzung der Messfehler möglich wird. Wenn das Ergebnis für einen sehr schmalen Zielbereich aus der Differenz ähnlicher Zahlen resultiert, kann die aus der Fehlerfortpflanzung resultierende Unsicherheit allerdings recht groß werden. In diesem Fall kann der Bereich mit einem der Nachbarbereiche zusammengelegt werden, was allerdings die Detailauflösung der Auswertung verringert.

In Bild 4 ist die aus den teilweise überlappenden Messungen stammende Information so auf nicht überlappende Feuchtebereiche umverteilt (blaue Kurve, jede Stufe entspricht einem Feuchtebereich), dass sofort ersicht-

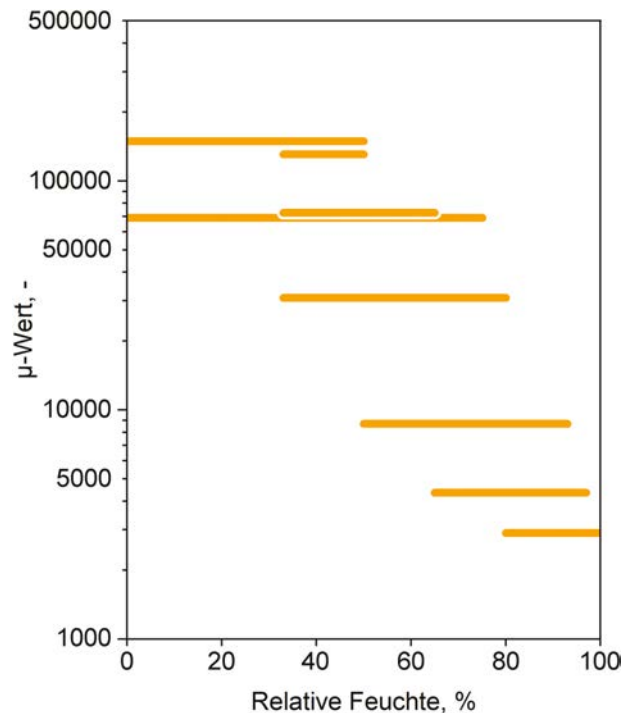


Bild 3 Eine Zusammenschau der Cup-Messungen lässt die Feuchteabhängigkeit des Probenwiderstands bereits in groben Zügen erkennen
A plot of the raw cup results provides a first rough idea of the humidity-dependence of the sample's vapor resistance

lich wird, welche mittleren μ -Werte in den individuellen Feuchtebereichen vorliegen. Diese Treppenkurve stellt exakt die von den Cup-Messungen gelieferte Information dar. Eine Information, die sich der Treppenkurve nicht entnehmen lässt, ist im Messdatensatz nicht vorhanden.

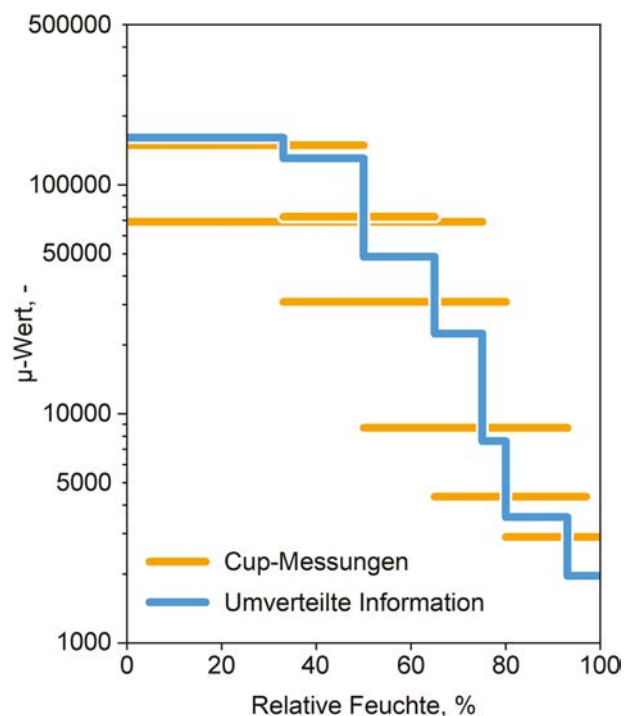


Bild 4 Treppenkurve zur Darstellung der Cup-Ergebnisse in nicht überlappenden Feuchteintervallen
Redistributing the information provided by the cup tests into non-overlapping humidity intervals results in a step curve showing the mean μ -value in the different humidity intervals

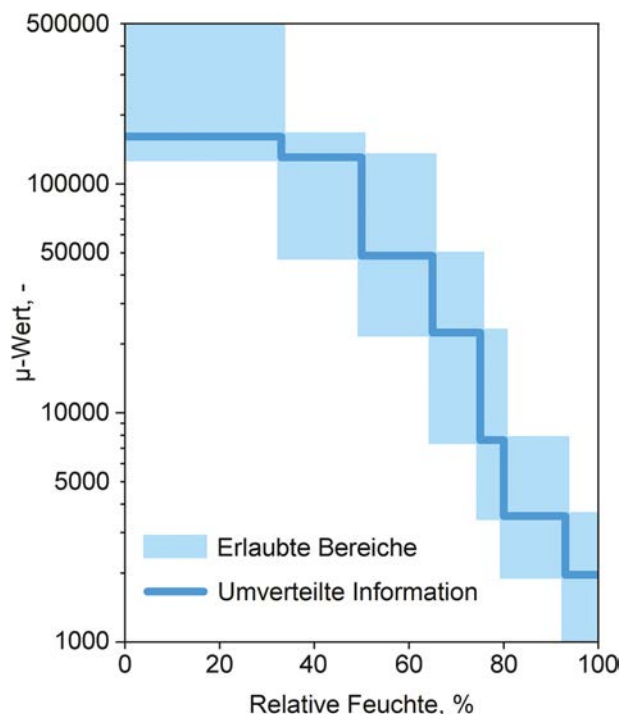


Bild 5 Die reale μ -Kurve muss alle waagerechten und senkrechten Segmente der Treppenkurve genau einmal schneiden. Sie kann daher nur innerhalb der farblich hervorgehobenen Bereiche liegen. Zusätzlich muss ihr Mittelwert in jedem Intervall dem waagerechten Kurvensegment entsprechen

The real μ curve must intersect each horizontal or vertical curve segment exactly once, going in strictly downward direction. It can therefore only lie within the coloured regions. In addition, in each humidity interval its harmonic mean must correspond to the horizontal curve segment

3.3 Erlaubte Bereiche für die μ -Kurve

Die Treppenkurve zeigt auch, welche realen, glatten Kurvenverläufe $\mu(\varphi)$ mit der vorliegenden Information verträglich sind und welche nicht. Jedes horizontale Stück der Treppenkurve gibt an, welchen Mittelwert die reale μ -Kurve im betreffenden Feuchteintervall hat. Die μ -Kurve kann in diesem Intervall nicht vollständig über oder unter diesem Niveau liegen, da sich sonst nicht der betreffende Mittelwert ergeben könnte. Sie muss das Niveau daher mindestens einmal schneiden. Geht man von der zusätzlichen Annahme aus, dass die Kurve nirgends ansteigen kann, dann schneidet sie jede Niveaustufe genau einmal, und zwar von oben nach unten verlaufend. Sie muss das aktuelle Intervall also unterhalb des Mittelwert-Niveaus verlassen. Gleichzeitig muss sie in das benachbarte Intervall oberhalb von dessen Mittelwert eintreten, damit sie auch diesen nach unten verlaufend schneiden kann. Der Übergang von einem Feuchteintervall in das nächste muss also durch den senkrechten Teil der Treppenkurve gehen.

Bild 5 zeigt, auf welche Bereiche die möglichen realen μ -Kurven aufgrund der von den Cup-Messungen gelieferten Information beschränkt sind: Sie müssen innerhalb der farblich hervorgehobenen Bereiche liegen und ihr Mittelwert in jedem Bereich muss dem horizontalen Teil der Treppenstufe entsprechen. Es sind keine Annahmen oder Modellvorstellungen eingegangen, außer dass die μ -Kurve nirgends ansteigt. Über den realen Kurvenverlauf liegen keine darüber hinausgehenden Informationen vor.

Eine Auswahl unter den möglichen, mit den Messdaten verträglichen μ -Kurven bedarf weiterer Annahmen wie beispielsweise größtmöglicher Glattheit.

Für die Produktentwicklung kann die Treppenkurve, die exakt die vorliegenden Daten darstellt und ihre Grenzen erkennen lässt, nützlicher sein als eine glatte, mit gewisser Wahlfreiheit durch die Daten gelegte Kurve, deren Unsicherheitsgrenzen aber unbekannt sind.

Die Treppenkurve lässt erkennen, ob eine gewünschte Aussage über ein in Entwicklung befindliches Produkt, etwa betreffs der Lage und Breite des Übergangsbereichs, mit der erforderlichen Sicherheit den vorliegenden Daten entnommen werden kann. Andernfalls zeigt sie, an welcher Stelle noch ein zusätzlicher Feuchtebereich zur feineren Unterteilung der Treppenkurve eingefügt werden sollte.

Der erste „erlaubte Kasten“ des Diagramms ist nicht nach oben beschränkt, der letzte nicht nach unten. Es ist daher keine genauere Aussage über den Beginn und das Ende der realen μ -Kurve möglich, als dass ihr Beginn über der Untergrenze des ersten Kastens und ihr Ende unter der Obergrenze des letzten Kastens liegen müssen. Dies ist eine grundsätzliche Einschränkung des Cup-Messverfahrens, das nur Bereichsmittelwerte liefert. In diesen beiden Feuchtebereichen sollten sich Aussagen über den Kurvenverlauf auf die Bereichsmittelwerte beschränken, auch wenn konkrete Aussagen über den Anfangswert und den Endwert der Kurve für Bemessungszwecke oft von besonderem Interesse wären. Die Erfahrung mit den bisher ausgewerteten variablen Dampfbremsen legt nahe, dass die Variation in der Regel am „trockenen Ende“ gering, am „feuchten Ende“ aber oft sehr ausgeprägt ist. Es empfiehlt sich daher, den höheren Feuchtebereich feiner zu unterteilen, um den Verlauf dort möglichst detailliert zu charakterisieren. Insbesondere sollte das letzte Intervall möglichst schmal gewählt werden, damit der Mittelwert dieses Intervalls möglichst repräsentativ für den unbekannten realen Kurvenverlauf ist. Da überlappende Messbereiche zugelassen sind, müssen bei der Messung nicht beispielsweise die relativen Feuchten 97 % und 100 % angelegt werden, sondern es ist etwa auch eine Kombination zweier Messungen mit den Bereichen 65 % ... 97 % und 80 % ... 100 % möglich.

Für die dazwischenliegenden Kästen ist der Verlauf der μ -Kurve enger eingegrenzt, weil wegen der beschriebenen Übergangsbedingungen zwischen den Feuchteintervallen die Kurve hier auf beiden Seiten jedes Kastens nur durch begrenzte erlaubte Bereiche des μ -Werts laufen kann.

3.4 Die Messwerte sind nicht die Kurvenwerte in der Feuchtebereichsmitte

Für Datenblätter oder Datensätze zu hygrothermischen Simulationsrechnungen werden anstelle treppenförmiger erlaubter Bereiche aber konkrete Kurvenverläufe benötigt. Die ermittelten μ_{Cup} -Werte einfach gegen die

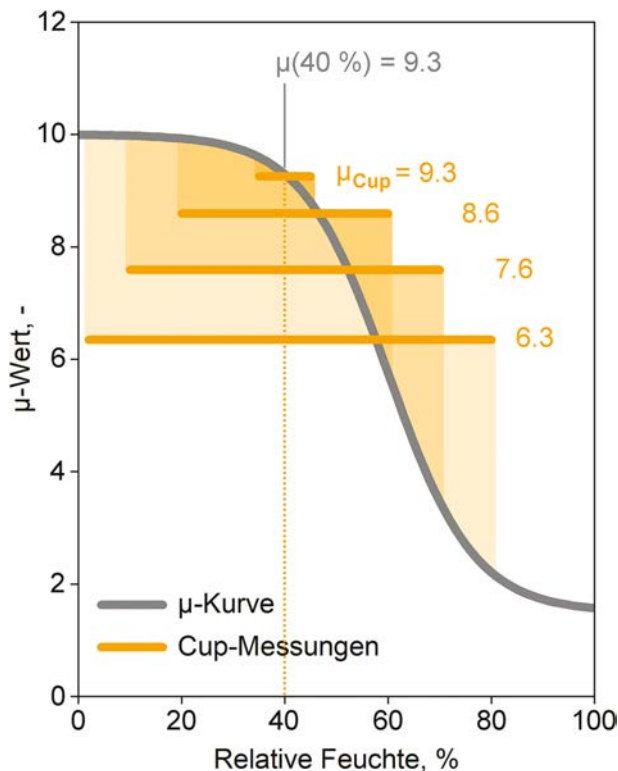


Bild 6 Der über verschieden breite Feuchtebereiche berechnete Mittelwert der μ -Kurve fällt mit zunehmender Bereichsbreite immer kleiner aus, wenn der Bereich abwärts gekrümmte Kurvenanteile enthält. Der Kurvenmittelwert kann im Allgemeinen also nicht identisch mit dem Kurvenwert in der Bereichsmitte sein (schematische Darstellung)
In regions of the μ curve which include parts with downward curvature, the mean value over an interval is the smaller the wider the interval is. Therefore, in general the mean value over the curve cannot be identical with the curve value at the midpoints of those intervals (schematic diagram)

Mittelwerte der zugehörigen Feuchtebereiche aufzutragen, wie es bisher meist üblich war, ist bei den hier betrachteten starken Kurvenspreizungen jedoch oft irreführend. Enthält ein Feuchtebereich stark gekrümmte Kurvenanteile, ist der Mittelwert der μ -Kurve über diesen Bereich nicht identisch mit dem Kurvenwert für den Mittelpunkt des Bereichs, wie das folgende Beispiel zeigt.

Eine Serie von Cup-Messungen, bei der Feuchtebereiche mit demselben Mittelwert (hier 40 %), aber zunehmender Breite verwendet werden, ergibt abnehmende Gesamtwiderstände, weil mit breiter werdendem Feuchtebereich auf der rechten Seite immer größere Teile des abnehmenden Kurvenbereichs in den gemessenen Feuchtebereich gelangen, während der konstante Kurvenbereich auf der linken Seite stets denselben Beitrag zum Mittelwert liefert (Bild 6).

In diesem Beispiel liefert eine Cup-Messung mit den angelegten Feuchten 35 % und 45 % einen Gesamtwiderstand μ_{Cup} von 9,3 und damit praktisch den Kurvenwert für 40 %, während eine Messung mit angelegten Feuchten 0 % und 80 % bei gleicher mittlerer Feuchte nur einen Gesamtwiderstand $\mu_{\text{Cup}} = 6,3$ ergibt.

Bild 7 zeigt als rote Kurve einen irreführenden Verlauf einer μ -Kurve, wie er sich beispielhaft bei unkritischer

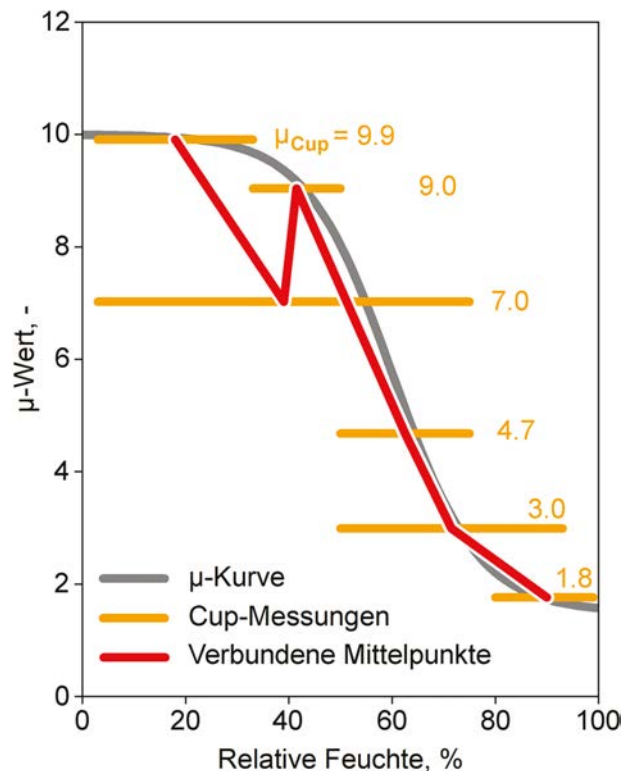


Bild 7 Auftragung der Cup-Ergebnisse gegen die Mittelwerte der verwendeten Feuchtebereiche kann zu irreführenden Kurvenverläufen führen (schematische Darstellung)
Plotting the cup results against the midpoints of the applied humidity ranges may lead to misleading curves (schematic diagram)

Auftragung der jeweiligen Cup-Messung gegen die mittlere Feuchte ergeben könnte.

Neben der teilweise irreführenden Kurvenform ist die rote Kurve im Allgemeinen auch nicht zahlenmäßig mit der Originalkurve deckungsgleich, sodass es mit der roten Kurve insbesondere nicht einmal möglich wäre, die ihr zugrunde liegenden Cup-Messungen in einer hygrothermischen Simulationsrechnung nachzuvollziehen. Bei modernen, stark feuchtevariablen Folien kann die Abweichung zwischen den mit falscher μ -Kurve durchgeführten Simulationen und den Originalmessungen unter Umständen einen Faktor zwei bis drei ausmachen.

3.5 Anpassen eines Polygonzugs

Eine sachgerechte Methode besteht darin, eine geeignete Modellkurve so an die Cup-Daten anzupassen, dass die Kurvenmittelwerte über die gemessenen Feuchtebereiche möglichst gut mit den Cup-Ergebnissen übereinstimmen. Mathematische Funktionen können als Modellkurven für einfachere Materialien verwendet werden [4], sind aber für die sehr individuellen μ -Kurven feuchtevariabler Dampfbremsen nicht geeignet. Als sehr flexibel erwiesen haben sich Polygonzüge mit einer variablen Anzahl von Stützstellen und linearer oder logarithmischer Interpolation zwischen den Stützstellen.

Zum Anpassen an die Messdaten werden für eine Testkurve die harmonischen Mittelwerte μ_{Test} über die Feuchtebereiche der Cup-Messungen berechnet und mit den entsprechenden Messergebnissen μ_{Cup} verglichen. Dann werden die y- und eventuell x-Positionen der Stützpunkte so lange variiert, bis die Mittelwerte über die Kurve bestmöglich mit den Cup-Messwerten übereinstimmen. Aufgrund messtechnischer Unsicherheiten bei den Cup-Messungen ist es meistens nicht möglich, perfekte Übereinstimmung mit allen Mittelwerten zu erreichen. In diesem Fall wird die beste Übereinstimmung im Sinne kleinster Fehlerquadrate ermittelt. Stützstellen, die nicht zur Formgebung der Kurve beitragen, z. B., weil sie auf einem geraden Kurvenabschnitt zu liegen kommen, können während der Anpassung entfernt werden. An Stellen, an denen die Messdaten eine differenziertere Kurvenform nahelegen, können weitere Stützpunkte hinzugefügt werden. Die Anzahl der für eine zufriedenstellende Formgebung der Fit-Kurve nötigen Stützpunkte kann größer oder kleiner sein als die Anzahl der gemessenen Feuchtebereiche, ihre Lage muss nicht mit Feuchtebereichsgrenzen zusammenfallen. Das Ergebnis der Anpassung ist eine Tabelle der ermittelten Stützpunkte, die beispielsweise in einen Datensatz für hygrothermische Simulations-Software aufgenommen werden kann.

Die Anpassung – also die Minimierung der Summe der Fehlerquadrate – kann durch ein geeignetes Dienstprogramm automatisch durchgeführt werden. Die Erfahrung zeigt jedoch, dass ein rein automatisches Verfahren versucht, kleine, durch Messungenauigkeiten verursachte Inkonsistenzen in den Messdaten getreu nachzuvollziehen, was zwar zu mathematisch optimalen, aber physikalisch unplausiblen, oft sehr eckigen oder teilweise wieder ansteigenden Kurvenverläufen führen kann. Bislang muss in solchen Fällen manuell ein geeignetes Anpassungsniveau gewählt werden. Versuche, als Nebenbedingung eine möglichst glatte konvexe Rundung der Kurve zu verlangen, erscheinen vielversprechend.

Da wie oben erläutert der Verlauf am Anfang und am Ende der μ -Kurve durch die Messdaten nur innerhalb eines sehr weiten Bereichs festgelegt ist, empfiehlt es sich, zur Vermeidung sehr unsicherer Extrapolation horizontale Kurvenendstücke zu verwenden.

Bild 8 zeigt einen nach der beschriebenen Methode an die Cup-Messungen angepassten Polygonzug. Die zur Tabellierung mit logarithmischer Interpolation dienenden Stützpunkte sind hervorgehoben. Am Anfang und am Ende der Kurve wurden zur Vermeidung eventuell überschießender Extrapolationen horizontale Verläufe verlangt.

Während mathematische Modellfunktionen, etwa Exponentialfunktionen oder Polynome, eine „Grundform“ haben, die durch die Wahl von Parametern nur in Grenzen variiert werden kann, lassen sich Polygonzüge ohne Einschränkung an alle denkbaren – auch an noch unbekannte – materialspezifische Widerstandskurven anpassen. Die Anzahl der Stützstellen kann je nach

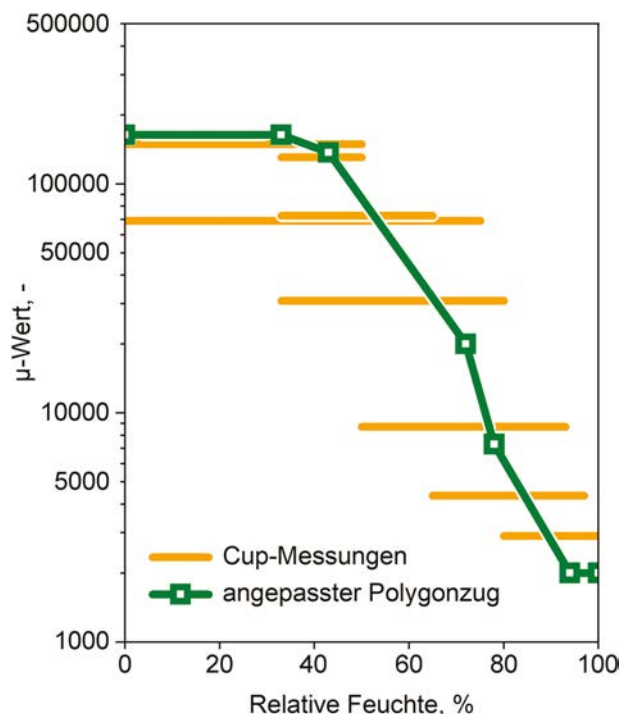


Bild 8 Der an die Messergebnisse angepasste Polygonzug ist so gewählt, dass seine Mittelwerte über die bei der Messung verwendeten Feuchtebereiche möglichst gut mit den gemessenen μ_{Cup} -Werten übereinstimmen

The polyline fitted to the cup results has been determined in such a way that its mean values, taken over the humidity ranges applied during the measurements, agree as well as possible with the measured μ_{Cup} values in these ranges

Detailreichtum der Widerstandskurve kleiner oder größer gewählt werden. Für Anwendungszwecke, die tabellierte Kurven benötigen, müssen mathematische Modellfunktionen in einem Extraschritt tabelliert werden, während die Stützpunkte eines Polygonzugs bereits eine fertige Tabellierung sind.

Eine hygrothermische Simulation der Cup-Messungen unter Verwendung des erstellten Materialdatensatzes und der verwendeten Randbedingungen kann anschließend bestätigen, dass der Datensatz alle Messungen im Rahmen ihrer messtechnischen Unsicherheiten nachvollziehen kann.

3.6 Empfohlene Feuchtebedingungen für Cup-Messungen

Im Prüflabor des IBP stehen konditionierte Klimaräume mit der Lufttemperatur 23 °C und den relativen Feuchten 50 %, 65 %, 75 % und 80 % zur Verfügung. In Kombination mit den im Cup mit einem Trockenmittel oder gesättigten Salzlösungen erzeugten relativen Feuchten

3 %	Silicagel
33 %	Magnesiumchlorid
93 %	Ammoniumdihydrogenphosphat
97 %	Kaliumsulfat
100 %	destilliertes Wasser

Tab. 1 Feuchtekombinationen für Cup-Messungen mit einem Trockenmittel oder gesättigten Salzlösungen in verschiedenen Klimaräumen
Moisture combinations for cup measurements with a desiccant or saturated salt solutions in different climate chambers

3 % – 50 %	33 % – 50 %	33 % – 80 %	65 % – 97 %
3 % – 75 %	33 % – 65 %	50 % – 93 %	80 % – 100 %

werden gegenwärtig die Feuchtekombinationen für Cup-Messungen gemäß Tab. 1 verwendet, woraus nach Zerlegung in nicht überlappende Feuchtebereiche die Bereichsgrenzen

3 % – 33 % – 50 % – 65 % – 75 % – 80 % – 93 % – 97 % – 100 %

resultieren.

4 Zusammenfassung

Feuchtevariable Dampfbremsen können ihren Diffusionswiderstand je nach den Feuchteverhältnissen im Bauteil so anpassen, dass sie einerseits einen hohen Widerstand in Befeuchtungssituationen und andererseits einen niedrigen Widerstand in Trocknungssituationen aufweisen. Für eine sachgerechte Bemessung sowie für die Produktentwicklung in anspruchsvollen Anwendungsbereichen ist eine möglichst detaillierte Kenntnis der feuchteabhängigen Widerstandskurve nötig. Die üblichen Cup-

Messungen liefern nur einen mittleren Widerstandswert für den jeweils verwendeten Feuchtebereich.

Es wurde gezeigt, wie durch eine geeignete grafische Auftragung der Informationsinhalt der Cup-Messungen inklusive seiner Grenzen sinnfällig dargestellt werden kann. Cup-Messungen liefern keine eindeutige Widerstandskurve, sondern nur einen Kurvenbereich. Soll dennoch für Datenblätter eine konkrete Kurve erstellt werden, dürfen nicht einfach die einzelnen Cup-Ergebnisse gegen die Mittelwerte der jeweils angelegten Feuchtebereiche aufgetragen werden. Es empfiehlt sich, eine geeignete Modellkurve so anzupassen, dass ihre Mittelwerte in den der Messung zugrunde liegenden Feuchtebereichen möglichst gut mit den betreffenden Cup-Ergebnissen übereinstimmen. Ein Polygonzug mit einer variablen Zahl von Stützstellen und linearer oder logarithmischer Interpolation kann sich voraussetzungslos an beliebig geformte Widerstandskurven anpassen. Die Anzahl der verwendeten Stützstellen kann je nach Detailreichtum des Datensatzes (auch örtlich verschieden) gewählt werden. Die Liste der angepassten Stützstellen ist bereits eine fertige Tabellierung der Kurve, die z. B. direkt in entsprechende Simulations-Software importiert werden kann.

Eine abschließende, die Cup-Messungen mit den jeweiligen Randbedingungen nachvollziehende Simulationsrechnung kann bestätigen, dass die in den Messdaten vorhandene Information vollumfänglich durch den erstellten Materialdatensatz wiedergegeben wird, während nur minimale zusätzliche Annahmen in den Datensatz eingehen.

Literatur

- [1] Künzel, H. M.; Kasper, F.-J. (1998) *Von der Idee einer feuchteadaptiven Dampfbremse bis zur Markteinführung*. Bauphysik 20, H. 6, S. 257–260.
- [2] Kehl, D.; Künzel, H. M. (2016) *Außen dampfdichte Steildächer – ein Planungsleitfaden*. [Tagungsband] 7. Internationaler Holzbauphysikkongress, Leipzig, S. 51–55, Nachdruck: Holzbau, H. 2, S. 21–25.
- [3] Klopfer, H. (1974) *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen*. Wiesbaden: Bauverlag, S. 174.
- [4] McLean, R. C.; Galbraith, G. H.; Sanders, C. H. (1990) *Testing Building Materials*. Building Research and Practice, 18: 2, 82–91, <https://doi.org/10.1080/01823329008727018>
- [5] Galbraith, G. H.; McLean, R. C.; Guo, J. (1997) *Moisture permeability data presented as a mathematical function applicable to heat and moisture transport models*. 5th International Building Performance Simulation Association IBPSA Conference, Prague, Czech Republic.

Autor:innen

Dipl.-Phys. Thomas Schmidt
thomas.schmidt@ibp.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen
Postfach 1152
83601 Holzkirchen

Dipl.-Ing. Kristin Lengsfeld
kristin.lengsfeld@ibp.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen
Postfach 1152
83601 Holzkirchen

Eri Tanaka, M.Sc.
eri.tanaka@ibp.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen
Postfach 1152
83601 Holzkirchen

Dr.-Ing. Daniel Zirkelbach (Korrespondenzautor:in)
daniel.zirkelbach@ibp.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Bauphysik Holzkirchen
Postfach 1152
83601 Holzkirchen

Zitieren Sie diesen Beitrag

Schmidt, T.; Lengsfeld, K.; Tanaka, E.; Zirkelbach, D. (2025) *Variable Dampfbremsen: Ermittlung feuchteabhängiger Diffusionswiderstände aus Cup-Messungen*. Bauphysik 47, H. 5, S. 311–318.
<https://doi.org/10.1002/bapi.70009>