

# Auswertung von Cup-Messungen variabler $\mu$ -Werte

## Wasserdampftransport

Zur Berechnung des Wasserdampftransports infolge Dampfdiffusion in den Baumaterialien benötigt WUFI Angaben zu den Dampfdiffusionswiderständen in den beteiligten Materialien. Die Stärke des Diffusionsstroms an einem beliebigen Punkt im Baumaterial wird beschrieben durch die Gleichung

$$g_v = -\delta_p \frac{dp}{dx} = -\frac{\delta}{\mu} \frac{dp}{dx}$$

$g_v$	[kg/m <sup>2</sup> s]	: Dampfdiffusionsstrom
$\delta_p$	[kg/m s Pa]	: Wasserdampfpermeabilität des Baustoffs
$\delta$	[kg/m s Pa]	: Wasserdampfpermeabilität ruhender Luft
$\mu$	[-]	: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl ("μ-Wert") des Baustoffs
$p$	[Pa]	: Wasserdampfpartialdruck
$x$	[m]	: x-Koordinate
$-dp/dx$	[Pa/m]	: Partialdruckgefälle

Gemäß der Definition der relativen Feuchte  $\varphi$  als Verhältnis des Wasserdampfpartialdrucks  $p$  zum Wasserdampfsättigungsdruck  $p_{sat}$  bei der gegebenen Temperatur lässt sich der Wasserdampfpartialdruck auch als Produkt von relativer Feuchte und Sättigungsdampfdruck schreiben:  $p = \varphi p_{sat}$ . Ist die Temperatur über den Bauteilquerschnitt konstant - wie es bei den im Folgenden beschriebenen Laborversuchen der Fall ist - so kann  $p_{sat}$  vor die Ableitung gezogen werden:

$$g_v = -\frac{\delta}{\mu} \cdot p_{sat} \frac{d\varphi}{dx}$$

$p_{sat}$	[Pa]	: Wasserdampfsättigungsdruck
$\varphi$	[-]	: relative Feuchte
$-d\varphi/dx$	[1/m]	: Feuchtegefälle

Der Diffusionsstrom an einem beliebigen Punkt des Bauteils ist also proportional zum Gefälle der relativen Feuchte  $-d\varphi/dx$  an diesem Punkt. Die Proportionalitätsfaktoren sind die Permeabilität  $\delta$  der Porenluft, der Sättigungsdampfdruck  $p_{sat}$  bei der lokalen Temperatur und der lokale  $\mu$ -Wert des Baustoffs.

# Stationäre Feuchteprofile

Wird eine Baustoffprobe so lange einer konstanten beidseitigen Feuchtedifferenz ausgesetzt, bis das Feuchteprofil in der Probe sich nicht mehr ändert, so ist der "stationäre" Zustand erreicht. In diesem Zustand hat der Diffusionsstrom  $g_v$  überall innerhalb der Probe denselben Wert. Wäre dies nämlich nicht der Fall, und wären deshalb für ein kleines Volumenelement der Probe zu- und abfließender Diffusionsstrom nicht gleich, so würde der Feuchtegehalt dieses Volumenelements mit der Zeit zu- oder abnehmen, im Widerspruch zur Voraussetzung eines sich nicht mehr ändernden Feuchteprofils.

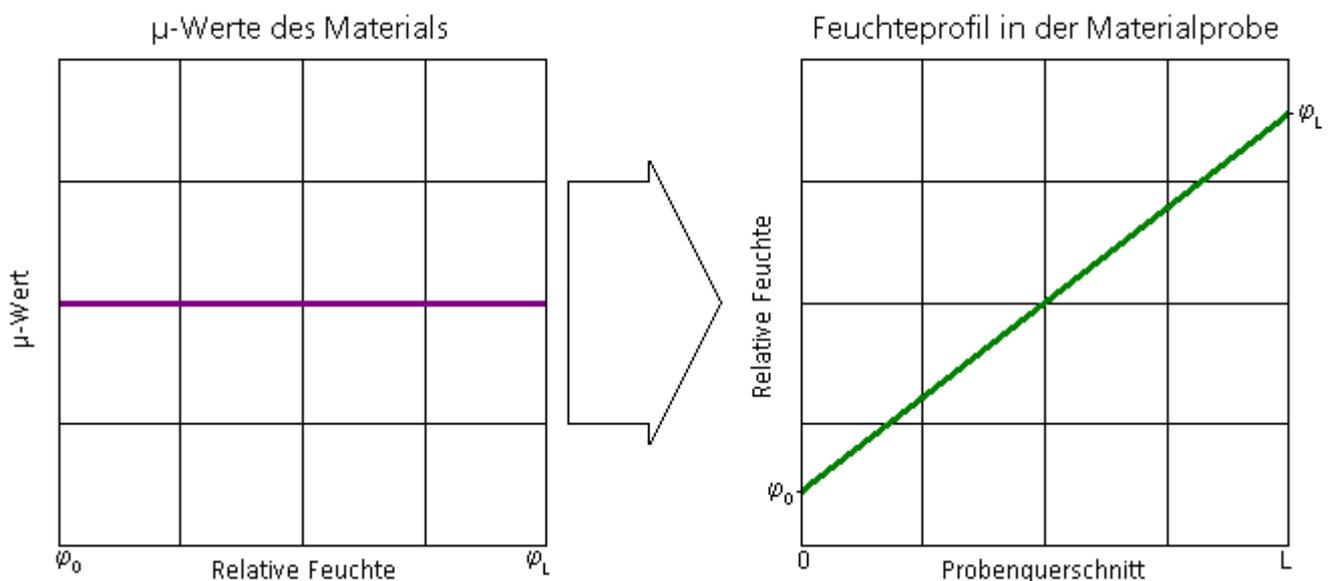
Umstellen der Transportgleichung liefert die Beziehung

$$\frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{d\varphi}{dx} = -\frac{g_v}{p_{sat}} = \text{const}$$

Im stationären Zustand ist der Diffusionsstrom  $g_v$  über den Probenquerschnitt konstant, unter isothermen Laborbedingungen ist die Temperatur und damit  $p_{sat}$  ebenfalls konstant. Das Produkt aus der Permeabilität  $\delta/\mu$  der Probe und dem Feuchtegradienten  $d\varphi/dx$  ist daher ebenfalls überall entlang des Querschnitts dasselbe.

## Konstanter $\mu$ -Wert

Falls das Material überall dieselbe Permeabilität hat, muss daher auch der Gradient des Feuchteprofils konstant sein: das Feuchteprofil innerhalb der Probe ist dann eine Gerade.



In diesem Fall lässt sich  $\mu$  leicht aus dem gemessenen Diffusionsstrom bestimmen: Der lokale Gradient des Feuchteprofils ist überall derselbe und damit auch identisch

mit der Gesamtsteigung, die sich aus der angelegten Feuchtedifferenz und der Proben Dicke berechnen lässt:

$$\frac{d\varphi}{dx}(x) = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} = \frac{\varphi_L - \varphi_0}{L}$$

$\Delta\varphi$  [-] : angelegte Feuchtedifferenz

$\varphi_0, \varphi_L$  [-] : relative Feuchten an den Probenoberflächen

$\Delta x, L$  [m] : Proben Dicke

Für den Diffusionsstrom gilt dann:

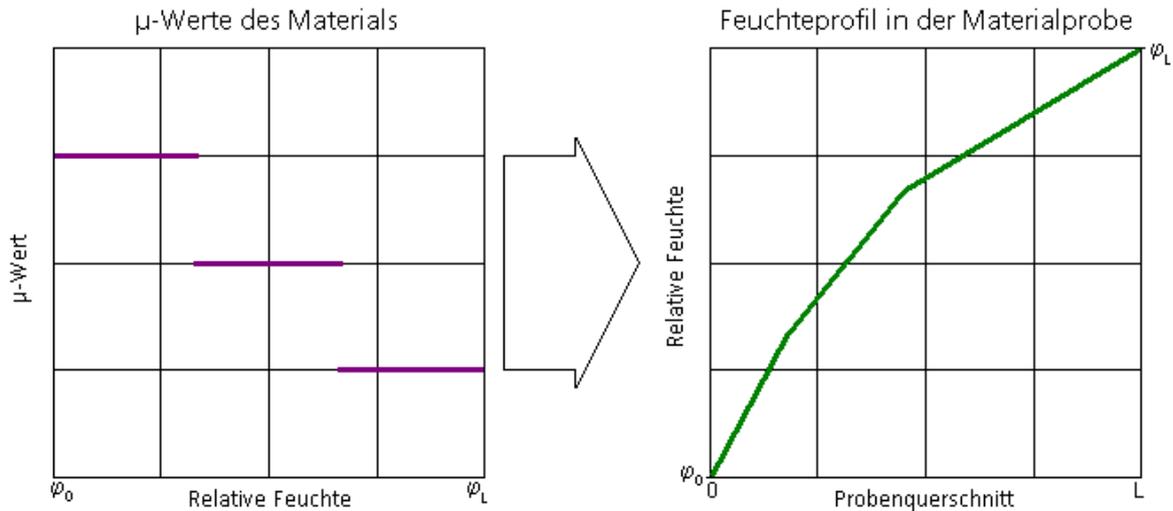
$$g_v = - \frac{\delta}{\mu} \cdot p_{sat} \frac{\Delta\varphi}{L}$$

was sich leicht nach  $\mu$  auflösen lässt. Alle anderen in der Gleichung auftretenden Größen sind bekannt.

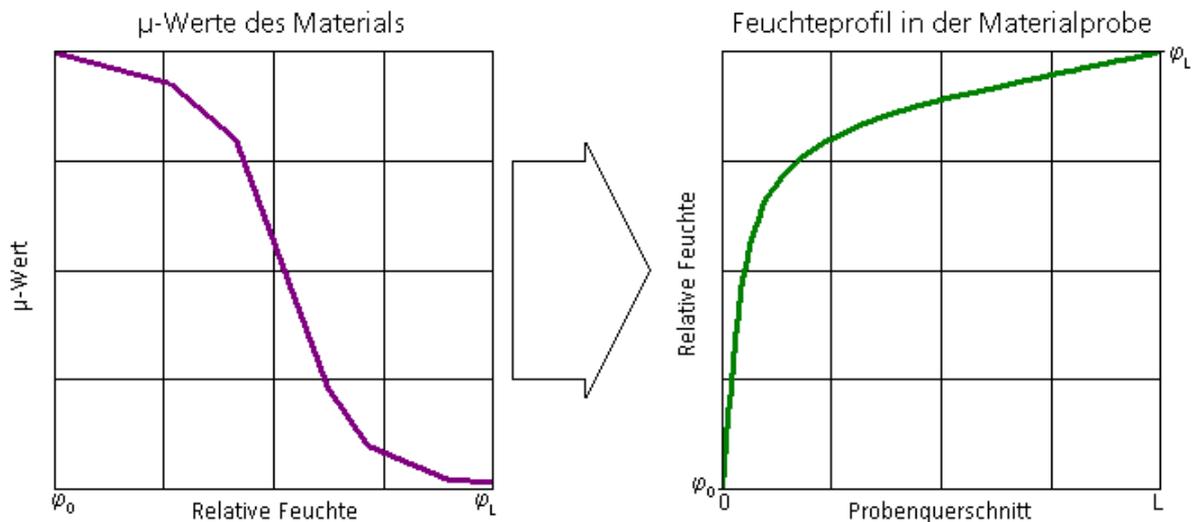
## Variabler $\mu$ -Wert

Falls die Permeabilität des Materials sich von Ort zu Ort ändert (sei es weil die Materialeigenschaften ortsabhängig sind, sei es weil die Permeabilität feuchteabhängig ist), so müssen  $\delta/\mu$  und  $d\varphi/dx$  gegenläufig variieren, damit ihr Produkt konstant bleibt.

Im ersten Beispiel wird ein fiktives Material betrachtet, welches im betrachteten Feuchtebereich  $\varphi_0 \dots \varphi_L$  drei verschiedene, jeweils konstante und im Verhältnis 3:2:1 stehende  $\mu$ -Werte aufweist. Jeder der  $\mu$ -Werte erstreckt sich über ein Drittel dieses Feuchtebereichs. Das stationäre Feuchteprofil besteht entsprechend aus drei Geradenstücken, deren Steigungen im Verhältnis 3:2:1 stehen. Jedes Geradenstück erstreckt sich über ein Drittel des in der Probe auftretenden Feuchtegefälles, entsprechend dem Gültigkeitsbereich des zugehörigen  $\mu$ -Werts. Die Anteile  $\Delta x_i$  der Geradenstücke am Probenquerschnitt bestimmen sich aus der Bedingung, dass die Geradenstücke mit den vorgegebenen Steigungsverhältnissen über ihre jeweiligen  $\Delta x_i$  hinweg auch gerade ihre zugehörigen  $\Delta\varphi_i$  überstreichen, und betragen in diesem Beispiel  $(1/3):(1/2):(1/1) = 2:3:6$ . Die Bereiche mit den größten  $\mu$ -Werten nehmen also die kleinsten Anteile am Probenquerschnitt ein.



Das zweite Beispiel zeigt die  $\mu$ -Werte einer feuchteadaptiven Dampfbremse und das zugehörige stationäre Feuchteprofil. Auch hier wird ein überproportionaler Teil des Probenquerschnitts von Feuchtezuständen mit kleinen  $\mu$ -Werten in Anspruch genommen; der größte Teil der Dampfbremswirkung stammt nur aus einem verhältnismäßig kleinen oberflächennahen Bereich.



## Effektive Permeabilität, effektiver $\mu$ -Wert

In einem Cup-Versuch wird die Probe einer Feuchtedifferenz  $\varphi_L - \varphi_0$  ausgesetzt. Entsprechend stellt sich innerhalb der Probe ein Feuchteprofil ein, das den Bereich von  $\varphi_0$  auf der einen Probenseite bis  $\varphi_L$  auf der anderen Probenseite überstreicht.

Ist der  $\mu$ -Wert des Probenmaterials konstant, so liefert ein Cup-Versuch unmittelbar dessen Zahlenwert, wie bereits oben beschrieben.

Ist der  $\mu$ -Wert des Probenmaterials jedoch feuchteabhängig, so variiert er über den Probenquerschnitt, und zwar von  $\mu(\varphi_0)$  bis  $\mu(\varphi_L)$ . Der Cup-Versuch erfasst daher diesen gesamten Bereich von  $\mu$ -Werten gleichzeitig, und der resultierende

Diffusionsstrom wird von dem gesamten Bereich von  $\mu$ -Werten beeinflusst. Da der Diffusionsstrom nur einen einzelnen Messwert darstellt, lässt sich ihm zwar pauschale Information über das allgemeine Niveau der beteiligten  $\mu$ -Werte entnehmen, aber keine nähere Information über den Verlauf dieser  $\mu$ -Werte mit dem Feuchteprofil. Konkret gilt Folgendes:

Trennung der Variablen in der Transportgleichung und Integration über die Probe der Dicke  $L$  liefert

$$\int_0^L g_v dx = - \int_{\varphi_0}^{\varphi_L} \delta_p(\varphi) p_{sat} d\varphi = - \int_{\varphi_0}^{\varphi_L} \frac{\delta}{\mu(\varphi)} p_{sat} d\varphi$$

also

$$- \frac{g_v \cdot L}{p_{sat}} = \int_{\varphi_0}^{\varphi_L} \delta_p(\varphi) d\varphi = \int_{\varphi_0}^{\varphi_L} \frac{\delta}{\mu(\varphi)} d\varphi \quad (*)$$

Versteht man unter der "effektiven Permeabilität" der Probe jene fiktive *konstante* Permeabilität, welche unter denselben Versuchsbedingungen denselben Diffusionsstrom liefern würde, so kommt dieselbe Formel zur Anwendung, welche weiter oben für die Auswertung einer konstanten Permeabilität genannt wurde (Analoges gilt für den "effektiven  $\mu$ -Wert" der Probe):

$$g_v = - \delta_{p,eff} \cdot p_{sat} \frac{\Delta\varphi}{L} = - \frac{\delta}{\mu_{eff}} \cdot p_{sat} \frac{\Delta\varphi}{L}$$

also

$$- \frac{g_v \cdot L}{p_{sat}} = \delta_{p,eff} \cdot \Delta\varphi = \frac{\delta}{\mu_{eff}} \cdot \Delta\varphi \quad (*)$$

Vergleich der Formeln (\*) zeigt den Zusammenhang zwischen der effektiven Permeabilität der Probe und dem Verlauf der variablen Permeabilitäten im Probenquerschnitt, bzw. zwischen dem effektiven  $\mu$ -Wert der Probe und dem Verlauf der variablen  $\mu$ -Werte im Probenquerschnitt:

$$\delta_{p,eff} = \frac{1}{\Delta\varphi} \int_{\varphi_0}^{\varphi_L} \delta_p(\varphi) d\varphi$$

Die effektive Permeabilität ist also nichts anderes als das arithmetische Mittel der variablen Permeabilitäten über den vorliegenden Feuchtebereich.

$$\frac{1}{\mu_{eff}} = \frac{1}{\Delta\varphi} \int_{\varphi_0}^{\varphi_L} \frac{1}{\mu(\varphi)} d\varphi$$

Der Kehrwert des effektiven  $\mu$ -Werts ist also das arithmetische Mittel der Kehrwerte der variablen  $\mu$ -Werte, ermittelt über den vorliegenden Feuchtebereich.

Das Ergebnis einer Cup-Messung ist immer der effektive  $\mu$ -Wert im angelegten Feuchtebereich. Wenn also als Ergebnis einer zwischen den Feuchten  $\varphi_0$  und  $\varphi_L$  ausgeführten Cup-Messung ein  $\mu$ -Wert von beispielsweise 38 genannt wird, so ist damit bekannt, dass der Mittelwert von  $1/\mu$  im Bereich von  $\varphi_0$  bis  $\varphi_L$  gleich  $1/38$  ist, über den genauen Verlauf der Feuchteabhängigkeit von  $\mu$  ist damit jedoch noch nichts bekannt.

### Vereinfachtes Beispiel:

Ein vereinfachtes Beispiel soll die effektive Permeabilität in einem Fall betrachten, der ohne Integralrechnung auskommt:

Die in der Probe auftretende Feuchtespanne  $\Delta\varphi$  bestehe aus drei Teilbereichen  $\Delta\varphi_1$ ,  $\Delta\varphi_2$  und  $\Delta\varphi_3$ , in denen das Material jeweils konstant die Permeabilitäten  $\delta_{p1}$ ,  $\delta_{p2}$  und  $\delta_{p3}$  aufweise. Der Dampfstrom  $g_v$  ist im stationären Zustand überall in der Probe derselbe und lässt sich jeweils schreiben als

$$g_v = -\delta_{p1} \cdot p_{sat} \frac{\Delta\varphi_1}{\Delta x_1}$$

$$g_v = -\delta_{p2} \cdot p_{sat} \frac{\Delta\varphi_2}{\Delta x_2}$$

$$g_v = -\delta_{p3} \cdot p_{sat} \frac{\Delta\varphi_3}{\Delta x_3}$$

Umstellen der Gleichungen liefert

$$g_v \cdot \Delta x_1 = -\delta_{p1} \cdot p_{sat} \Delta\varphi_1$$

$$g_v \cdot \Delta x_2 = -\delta_{p2} \cdot p_{sat} \Delta\varphi_2$$

$$g_v \cdot \Delta x_3 = -\delta_{p3} \cdot p_{sat} \Delta\varphi_3$$

Die Summe aller drei Gleichungen ist

$$g_v \cdot (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3) = g_v \cdot \Delta x = -(\delta_{p1} \Delta\varphi_1 + \delta_{p2} \Delta\varphi_2 + \delta_{p3} \Delta\varphi_3) \cdot p_{sat}$$

Umstellen und Erweitern mit  $\Delta\varphi/\Delta\varphi$  ergibt:

$$g_v = -\frac{\delta_{p1} \Delta\varphi_1 + \delta_{p2} \Delta\varphi_2 + \delta_{p3} \Delta\varphi_3}{\Delta\varphi} \cdot p_{sat} \frac{\Delta\varphi}{\Delta x} =: -\delta_{p,\text{eff}} \cdot p_{sat} \frac{\Delta\varphi}{\Delta x}$$

In diesem Fall ist also

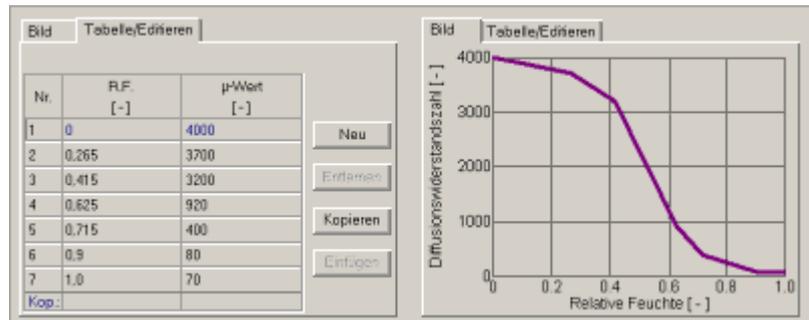
$$\delta_{p,\text{eff}} = \frac{\delta_{p1}\Delta\varphi_1 + \delta_{p2}\Delta\varphi_2 + \delta_{p3}\Delta\varphi_3}{\Delta\varphi}$$

beziehungsweise

$$\frac{1}{\mu_{\text{eff}}} = \frac{\frac{1}{\mu_1}\Delta\varphi_1 + \frac{1}{\mu_2}\Delta\varphi_2 + \frac{1}{\mu_3}\Delta\varphi_3}{\Delta\varphi}$$

## μ-Werte in WUFI

Bei Materialien mit feuchteabhängig veränderlichem μ-Wert benötigt WUFI Information darüber, welcher μ-Wert bei gegebenem Feuchtegehalt auftritt. Ist ein bestimmter Feuchtegehalt eines



Materials gegeben, so konsultiert WUFI die μ-Wert-Tabelle dieses Materials, um den μ-Wert auszulesen, der diesem Feuchtegehalt entspricht.

Die μ-Werte für eine solche Tabelle werden in der Regel durch Cup-Messungen ermittelt. Wie oben erläutert, liefern Cup-Messungen bei feuchteabhängigen μ-Werten jedoch nur "Mittelwerte" über den bei der Messung angelegten Feuchtebereich und keine Information über den Verlauf in diesem Bereich.

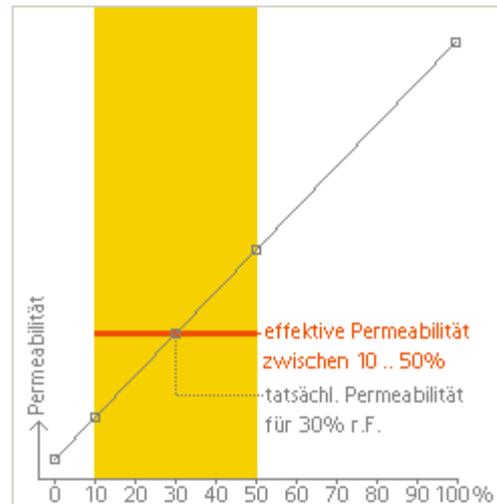
Die übliche Praxis, die so ermittelten effektiven μ-Werte für die Tabellierung in WUFI zu benutzen, indem sie unverändert in die Tabelle übernommen und dem Mittelwert des jeweils angelegten Luftfeuchtebereiches zugeordnet werden, ist nur für gering veränderliche μ-Werte statthaft. Das hat mehrere Gründe:

### Linear verlaufende Permeabilitäten

Dieses Vorgehen wäre korrekt, wenn die feuchteabhängigen *Permeabilitäten* (anstelle der μ-Werte) betrachtet würden und diese einen *linearen Verlauf* der Feuchteabhängigkeit aufweisen würden. Dann wäre der Permeabilitätswert in der Mitte des angelegten Feuchtebereiches identisch mit dem Mittelwert aller Permeabilitäten im angelegten Feuchtebereich und damit auch identisch mit der von der Cup-Messung gelieferten effektiven Permeabilität. Das Ergebnis der Cup-Messung könnte dann als Bestimmung der Permeabilität für den Feuchtezustand in der Mitte des angelegten Feuchtebereiches interpretiert und entsprechend tabelliert werden.

Beispiel: ein Material weise folgenden linearen Verlauf der Permeabilität auf:

0% :  $1.0 \cdot 10^{-12}$  kg/m s Pa  
 10% :  $1.9 \cdot 10^{-12}$   
 30% :  $3.7 \cdot 10^{-12}$   
 50% :  $5.5 \cdot 10^{-12}$   
 100% :  $10.0 \cdot 10^{-12}$



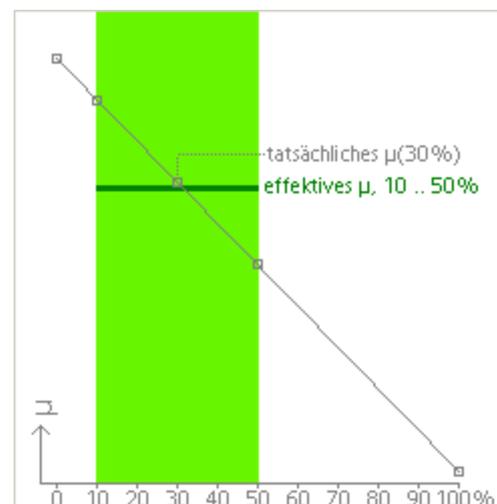
Der Benutzer kennt diese Werte noch nicht und bestimmt sie in Cup-Versuchen. Insbesondere führt er einen Cup-Versuch durch, in dem die Feuchten 10% und 50% an die Probe angelegt werden (Feuchtemittelwert: 30%). Der Versuch liefert als Ergebnis die effektive Permeabilität  $3.7 \cdot 10^{-12}$  kg/msPa, welche sich als Mittelwert über alle Permeabilitäten zwischen 10% und 50% ergibt. Diese Zahl ist in der Tat identisch mit der Permeabilität bei der Feuchte 30%.

### Linear verlaufende $\mu$ -Werte

In der Praxis werden jedoch  $\mu$ -Werte (anstelle der Permeabilitäten) betrachtet, und selbst wenn die  $\mu$ -Werte einen linearen Verlauf hätten, würde die obige Überlegung nicht mehr zutreffen, da der von der Cup-Messung gelieferte effektive  $\mu$ -Wert nicht das Mittel über die im angelegten Feuchtebereich liegenden  $\mu$ -Werte ist, sondern der Kehrwert des Mittels der Kehrwerte der  $\mu$ -Werte.

Beispiel: ein Material weise folgenden linearen Verlauf des  $\mu$ -Werts auf:

0% : 200  
 10% : 182  
 30% : 146  
 50% : 110  
 100% : 20



Ein Cup-Versuch zwischen 10% und 50% (Feuchtemittelwert: 30%) liefert nun den effektiven  $\mu$ -Wert 143, was aber nicht identisch ist mit dem  $\mu$ -Wert bei 30% (nämlich 146). Die Cup-Messung unterschätzt den tatsächlichen  $\mu$ -Wert bei 30% r.F. um 2 Prozent.

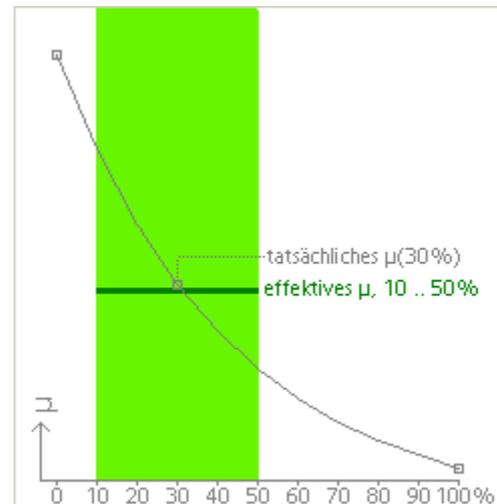
Diese Diskrepanz zwischen dem effektiven  $\mu$ -Wert aus der Cup-Messung und dem tatsächlichen  $\mu$ -Wert in der Mitte des angelegten Feuchtebereiches wird um so größer, je stärker  $\mu$  mit der Feuchte variiert.

## Logarithmisch interpolierte $\mu$ -Werte

Darüber hinaus wird in WUFI zwischen den Tabelleneinträgen nicht linear sondern logarithmisch interpoliert. Die logarithmisch interpolierte Kurve verläuft teilweise steiler als eine linear interpolierte Kurve, in diesem Kurvenabschnitt ist der Unterschied zwischen effektivem und tatsächlichem  $\mu$ -Wert also noch ausgeprägter.

Beispiel: ein Material weise folgenden logarithmischen Verlauf des  $\mu$ -Werts auf:

0%	: 200
10%	: 159
30%	: 100
50%	: 63
100%	: 20



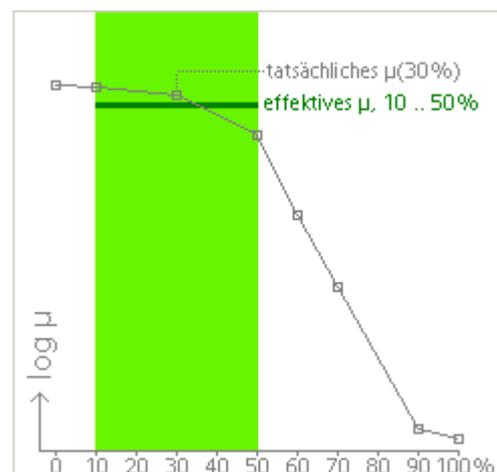
Ein Cup-Versuch zwischen 10% und 50% (Feuchtemittelwert: 30%) liefert hier den effektiven  $\mu$ -Wert 96, was aber nicht identisch ist mit dem  $\mu$ -Wert bei 30% (nämlich 100). Die Cup-Messung unterschätzt den tatsächlichen  $\mu$ -Wert bei 30% r.F. um 4 Prozent.

## Knicke in der $\mu$ -Wert-Kurve

Manche Materialien mit stark variablem  $\mu$ -Wert (z.B. feuchtevariable Dampfbremsen) weisen in bestimmten Feuchtebereichen ausgeprägte Krümmungen in den  $\mu$ -Wert-Kurven auf. Liegt eine solche Krümmung innerhalb des von der Cup-Messung erfassten Feuchtebereiches, so weichen die auftretenden  $\mu$ -Werte besonders stark von einem linearen Verlauf ab.

Beispiel: ein Material weise folgenden Verlauf des  $\mu$ -Werts auf:

0%	: 4000
10%	: 3900
30%	: 3600
50%	: 2300
60%	: 920
70%	: 400
90%	: 80
100%	: 70

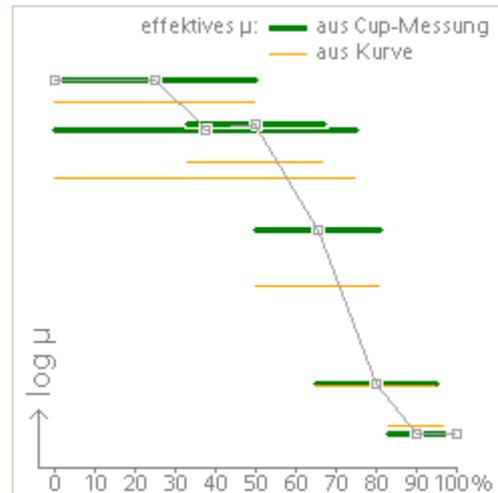


Ein Cup-Versuch zwischen 10% und 50% (Feuchtemittelwert: 30%) liefert hier den effektiven  $\mu$ -Wert 3240, was aber nicht identisch ist mit dem  $\mu$ -Wert bei 30% (nämlich 3600). Die Cup-Messung unterschätzt den tatsächlichen  $\mu$ -Wert bei 30% r.F. um 10 Prozent.

# Empfohlene Vorgehensweise

Wie oben gezeigt, ist in der Regel damit zu rechnen, dass die von Cup-Messungen für die angelegten Feuchtebereiche gelieferten effektiven  $\mu$ -Werte nicht identisch sind mit den gesuchten tatsächlichen  $\mu$ -Werten an den Mittelpunkten der Feuchtebereiche.

Die oft übliche Vorgehensweise, eine auf Cup-Messungen beruhende Tabelle von feuchteabhängigen  $\mu$ -Werten dadurch zu erstellen, dass das Ergebnis jeder Messung dem Mittelwert des jeweiligen Feuchtebereiches zugeordnet wird, ist daher in der Regel unzulässig. Das nebenstehende Diagramm zeigt



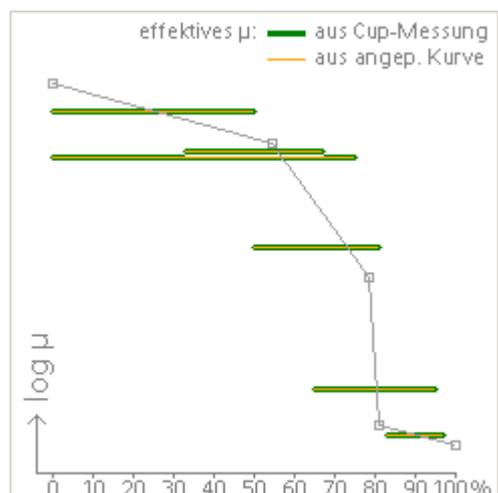
die Ergebnisse von sechs Cup-Messungen an einer feuchteadaptiven Dampfbremse als grüne Balken, die sich in horizontaler Richtung über den jeweils gemessenen Feuchtebereich erstrecken und deren Lage in y-Richtung den jeweils ermittelten effektiven  $\mu$ -Wert angibt. Die eingezeichnete Kurve verbindet die Mittelpunkte dieser Balken und beschreibt den Verlauf des feuchteabhängigen  $\mu$ -Wertes, wie WUFI ihn bei Eingabe einer wie oben beschrieben erstellten Tabelle verwenden würde.

Die orangen Balken zeigen die über die jeweiligen Feuchtebereiche *aus dieser Kurve* ermittelten effektiven  $\mu$ -Werte. Wie ersichtlich, stimmen sie in der Regel nicht mit den gemessenen effektiven  $\mu$ -Werten überein, die Ausgangspunkt für die Kurve waren. Mit dem dieser Kurve entsprechenden Verlauf des feuchteabhängigen  $\mu$ -Wertes ist es also nicht einmal möglich, die Messungen zu reproduzieren.

Darüber hinaus weist die Kurve in diesem Beispiel an einer Stelle sogar ein mit der Feuchte *ansteigendes* Segment auf - eine in der Regel sicherlich wenig plausible Eigenschaft.

Um die tatsächlichen  $\mu$ -Werte aus der von den Cup-Messungen gelieferten Information zu rekonstruieren, bietet es sich an, die zu tabellierenden  $\mu$ -Werte so lange zu variieren, bis die daraus - unter Berücksichtigung des gesamten Kurvenverlaufs - jeweils berechneten effektiven  $\mu$ -Werte so gut wie möglich mit dem Satz der gemessenen effektiven  $\mu$ -Werte übereinstimmen, z.B. im Sinne kleinster Fehlerquadrate. Auf diese Weise ist die beste Annäherung an die realen  $\mu$ -Werte zu erreichen, die auf Grundlage der Messdaten möglich ist.

Darüber hinaus müssen für eine solche Anpassung keineswegs die Mittelpunkte der vermessenen Feuchtebereiche auch als Stützpunkte für die Tabellierung verwendet werden. Gerade bei stark variablen Kurvenverläufen wäre nicht gewährleistet, dass die meist aus labortechnischen Gründen gewählten Feuchtebereiche in den variablen



Kurvenbereichen eine hinreichende Dichte von Stützpunkten ergeben.

Es steht dem Bearbeiter frei, bei ungefährender Kenntnis des Kurvenverlaufs einen nach Anzahl und Lage geeigneteren Satz von Stützpunkten für die Tabellierung zu wählen oder gar die Lage der Stützpunkte gemeinsam mit den Funktionswerten im Zuge einer Optimierungsrechnung an die vorliegenden Messdaten anzupassen. Voraussetzung ist eine hinreichende Anzahl von Cup-Messungen, welche den gesamten Feuchtebereich möglichst vollständig und in verschiedenen Kombinationen abdecken, so dass genügend Information für eine Anpassungsrechnung vorliegt.

Das zweite Diagramm zeigt das Ergebnis einer solchen Anpassung. Der feuchteabhängige  $\mu$ -Wert wird hier dargestellt durch einen Polygonzug mit fünf geeignet gewählten Stützpunkten, für welche in einer Anpassungsrechnung optimale Funktionswerte bestimmt wurden. Die aus dieser Kurve berechneten effektiven  $\mu$ -Werte für die vermessenen Feuchtebereiche sind wieder als orange Balken dargestellt. Sie decken sich jetzt vollständig mit den gemessenen grünen Balken, so dass die auf diese Weise erstellte Funktion erlaubt, alle Cup-Messungen nachzuvollziehen.