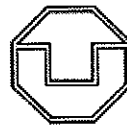


Fakultät Architektur  
Institut für Bauklimatik



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN

Dr.-Ing. Rudolf Plagge  
Leiter des IBK Forschungs- und Entwicklungslabors  
Zellescher Weg 17  
01069 Dresden

Tel.: 0351 / 463-33756  
Fax: 0351 / 463-32627  
Datum: 25.05.2009

e-mail: rudolf.plagge@tu-dresden.de

## PRÜFBERICHT

**Auftraggeber:**

quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG  
Abteilung Forschung und Entwicklung  
Mühlenschweg 6  
49090 Osnabrück

Dr. Martin Kanig  
Telefon: +49 541 601793  
Telefax: +49 541 601769  
E-Mail: m.kanig@quick-mix.de

**Materialbezeichnung:** MKK Klima-Kalkputz

**Probeneingang:** 01.05.2008

**Gegenstand:** Hygrothermische Stoffkennwertbestimmung des feuchteregulierenden MKK Klima-Kalkputzes mit Eignung als "Antischimmelputz"

Gesamtumfang: 22 Seiten

## 1. Beauftragung

mit Datum vom 01.05.2008 wurde das Forschungs- und Entwicklungslabor des Instituts für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden von der quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG, Abteilung Forschung und Entwicklung beauftragt, das Produkt Klimaputz auf seine hygro-thermischen Eigenschaften hin zu untersuchen und zu beurteilen. In diesem Zusammenhang wurden unterschiedliche Untersuchungen erforderlich die in den nachfolgend Arbeitspaketen aufgelistet sind.

## 2. Arbeitsprogramm

**Arbeitspaket 1: Materialauswahl.** Von der Abteilung Forschung und Entwicklung der quick-mix Gruppe GmbH & Co. KG wurden MKK Klima-Kalkputz Proben mit Eignung als "Antischimmelputz" geliefert. Daraus wurden insgesamt 76 Prüfkörper im F&E Labor des Institut für Bauklimatik der Technischen Universität Dresden präpariert:

- 60 Proben in den Dimensionen 36\*36\*12 mm (Wasserspeichervermögen, Trockenraumdichte, Porosität, Wasserleitfähigkeit)
- 10 Proben in den Dimensionen 36\*36\*50 mm (kapillare Wasseraufnahme)
- 6 Proben in den Dimensionen 70\*70\*20 mm (Wasserdampfdiffusion, Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität)

Alle Proben werden metrisch ausgemessen und geeignete Probenkollektive für die unterschiedlichen Messmethoden generiert. An den jeweiligen Kollektiven erfolgt dann die adäquate Vorkonditionierung, Ummantelung, Fixierung in Messzellen und Vorbereitungen für den Einbau in die Messapparaturen.

**Arbeitspaket 2: Messung des Klimaputz.** Die vorkonditionierten Proben werden in den Messablauf des IBK-Labors eingeschleust, um die folgenden relevanten hygro-thermischen Kennwerte zu messen:

- *Basiseigenschaften:* Matrixdichte, Trockenraumdichte, gesamte und offene Porosität
- *thermale Eigenschaften:* Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität
- *hygrische Eigenschaften:* Feuchtespeicherung im hygroskopischen und überhygroskopischen Bereich (Sorptionsisotherme und Wasserretention), Wasserdampfdiffusionswiderstand ( $\mu_{\text{dry-cup}}$  und  $\mu_{\text{wet-cup}}$ ), Wasserleitfähigkeit und Permeabilität, kapillarer Wasseraufnahmekoeffizient
- *Verifizierungsexperimente:* kontinuierliche Wasseraufnahme und kontinuierliche Abtrocknung

**Arbeitspaket 3: Ermittlung charakteristischer Materialfunktionen.** Die gemessenen Materialkennwerte des MKK Klima-Kalkputzes müssen zur unmittelbaren Verwendung in Simulationsmodellen aufbereitet werden. Letztere benötigen kon-

tinuierlich differenzier- und integrierbare Funktionen und keine Zahlenwerte. Über ein physikalisches Materialmodell, das „*Engineering-Modell*“, werden die gemessenen Kenngrößen funktionalisiert. Wasserretentionscharakteristik, Porenvolumenverteilung, Flüssigwasserleitfähigkeit, Wasserdampfdiffusion und Wärmeleitfähigkeit werden funktional gekoppelt abgebildet.

Zur Kontrolle der Materialmessungen im Labor und der Funktionsanpassungen am Computer werden typische Wasseraufnahme- und Verdunstungsexperimente mit dem physikalisch basierten, wissenschaftlichen Simulationsprogramm Delphin5 nachgerechnet und so der Funktionssatz justiert und das Materialmodell für den MKK Klima-Kalkputz verifiziert.

**Arbeitspaket 4: Integration in eine Materialdatenbank.** Die Materialkennwerte und die hygrothermischen Funktionen der untersuchten Materialien werden in einem relationalen Datenbanksystem abgelegt. In der Datenbank werden die Materialfunktionen graphisch, übersichtlich visualisiert. Die Datenstruktur wird dabei so gewählt, daß auch künftige Ergänzungen, Anpassungen und Aktualisierungen möglich sind. Eine Aufnahme weiterer Stoffeigenschaften, die für die Planung von Sanierungsmaßnahmen wichtig sind, als auch deren integrierte Beurteilung, ist damit möglich.

**Arbeitspaket 5: Anwendung der hygro-thermischen Materialfunktionen in der Simulation.** Zusätzlich zu den Materialuntersuchungen werden konkrete Simulationen eines Referenzwandaufbaues durchgeführt, die in einer multifunktionalen Beurteilung des MKK Klima-Kalkputzes münden.

### 3. Allgemeine Anforderungen

**Definitionen.** Baustoffe und Systeme werden dann als tauglich eingestuft, wenn diese ein geeignetes und aufeinander angepaßtes Spektrum an Materialeigenschaften besitzen. Diese sind insbesondere:

#### 3.1 Feuchtespeichereigenschaften

Die Feuchtespeicherung wird abhängig von der zum Einsatz kommenden Messmethode in einen hygroskopischen und einen überhygroskopischen Anteil differenziert.

##### 3.1.1 Wasserretention (*nach ISO 11 274*)

**Bestimmung der überhygroskopischen Feuchtespeicherung.** Nach der kapillaren Wassersättigung der Materialproben werden diese auf keramischen Platten plaziert und über angelegte Kapillardrücke entwässert. Abhängig vom angelegten Kapillarpotential unterscheidet man die Messverfahren in *Hängende Wassersäule (0-30 hPa)*, *Unterdruckapparatur (30-750 hPa)* und *Druckplattenapparatur (30-15000 hPa)*. Zur Messung der Wasserretention werden die zuvor gesättigten Proben stufenweise über steigende Kapillarpotentiale entwässert. Nach dem Erhalt eines kapillaren Gleichgewichtes bei einer Druckstufe wird der Feuchtegehalt der Materialproben gravimetrisch bestimmt. Die Proben werden anschließend wieder auf der Keramik plaziert und eine nächst höhere Druckstufe angelegt. Zum Erhalt statischer Gleichgewichtsbedingungen ist pro Druckstufe ein Zeitrahmen von bis zu 6 Wochen eingehalten.

Zunehmende Kapillarpotentiale führen zu abnehmenden Wassergehalten und liefern eine Desorptionscharakteristik. Umgekehrt führen abnehmende Kapillardrücke zu steigenden Wassergehalten und liefern eine Adsorptionscharakteristik der Feuchtespeicherung im überhygroskopischen Bereich.

##### 3.1.2 Hygrische Sorptionsisotherme (*nach DIN EN ISO 12 571*)

**Bestimmung der hygroskopischen Feuchtespeicherung.** Nach dem Abschluß der Desorption bei einer Druckstufe von 15 bar Kapillardruck werden die Proben in einem Exsikkator mit  $K_2SO_4$  bei 96.7% relativer Feuchte über einen Zeitraum von 2 Monaten gelagert. Nach dem Erhalt statischer Gleichgewichtsbedingungen wird der Wassergehalt gravimetrisch bestimmt und die Proben werden in einer weiteren Luftfeuchtestufe konditioniert.

Durch eine stufenweise Konditionierung mit jeweils niedrigeren relativen Luftfeuchten werden die Putzproben sukzessive entwässert. Abnehmende Luftfeuchten mit immer trockner werdenden Proben liefern die Desorptionscharakteristik, steigende Luftfeuchten mit wachsenden Feuchtegehalten liefern eine Adsorptionscharakteristik. Eine Differenzierung in eine Ad- und Desorption ist besonders für die Beurteilung der Feuchtepuffernden Eigenschaften des MKK Klima-Kalkputzes relevant.

Die Verknüpfung der Wasserretention und die hygrische Sorptionsisotherme liefert die

gesamte Feuchtespeichercharakteristik. Deren Verknüpfung erfolgt über die Kelvin-Gleichung unter Verwendung von Gleichung 1 nach:

$$\varphi = e^{-\frac{2\sigma}{r\rho_w R_v T}} \quad (1)$$

wobei  $R_v$  der allgemeinen Gaskonstanten [ $\text{Wskg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ] und  $T$  der Temperatur in [K] entspricht. Die Parameter  $\sigma$  und  $\omega$  korrespondieren mit der Oberflächenspannung [ $\text{Pa}\cdot\text{m}^{-1}$ ] und dem Kontaktwinkel an der Grenzfläche zwischen Wasser und Festphase.  $\rho_w$  ist die Dichte des Wassers [ $\text{kgm}^{-3}$ ] und  $\varphi$  die relative Luftfeuchte [-]. Die Konvertierung von relativer Luftfeuchte in Kapillardruck erfolgt über den Porenradius mit:

$$\psi = \frac{c}{r} \quad \text{mit} \quad c = 2\sigma \cos\omega / g\rho_w \quad (2)$$

wobei  $\psi$  dem Kapillardruck [Pa] entspricht.  $c$  ist äquivalent der kapillaren Steighöhe,  $r$  multipliziert mit der Konstanten von  $\sim 9.81 \cdot 10^{-3}$  repräsentiert einen Äquivalentporenradius [cm] und  $g$  ist die Gravitation [ $\text{ms}^{-2}$ ].

### 3.2 Feuchtetransporteigenschaften

Die Feuchtebewegungen in einem kapillarporösen Baustoff sind eine Kombination von dampfförmigen und flüssigen Feuchteströmen. Diese Feuchteströme stehen mit Temperatur- Dampfdruck- und Kapillardruckgradienten sowie anderen Eigenschaften der unterschiedlichen Baustoffe in einer komplexen Wechselbeziehung. Zur Bestimmung dieser Transporteigenschaften kommen experimentell drei Messmethoden zum Einsatz.

#### 3.2.1 Wasseraufnahmekoeffizient (nach EN ISO 15148)

Bei hohen Feuchtegehalten erfolgt der gesamte Feuchtetransport dominant in der Flüssigphase. Dieser Fall liegt vor, wenn ein Baustoff in Wasser getaucht oder auch Schlagregen stärker befeuchtet wird. Der Wasseraufnahmekoeffizient charakterisiert dabei die Eigenschaft eines weitgehend trockenen Baustoffes Wasser von der Oberfläche her aufzusaugen und flüssiges Wasser in tiefer liegenden Porenraum zu transportieren. Während der Messung durchläuft die Materialprobe unterschiedliche Feuchtezustände. Folglich ändern sich die Transportgradienten, was zu kontinuierlich abnehmenden Flüssen führt.

Der Wasseraufnahmekoeffizient entspricht daher der Steigung der Wasseraufnahmekurve bezogen auf die Quadratwurzel der Zeit und wird üblicherweise in  $\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-0.5}$ , bzw.  $\text{kg m}^{-2}\text{h}^{-0.5}$  angegeben. Am Ende des Wasseraufnahmeexperimentes stellt sich in einer Probe ein typischer Feuchtegehalt ein, der als kapillarer Wassergehalt,  $\theta_{\text{cap}}$ , [ $\text{m}^3/\text{m}^3$ ] bezeichnet wird.

#### 3.2.2 Flüssigkeitsleitfähigkeit (Wasserpermeabilität oder Wasserleitfähigkeit nach ISO/CD 17312 und 17313)

Die Flüssigkeitsleitfähigkeit ist ein direktes Maß für die Fähigkeit eines Porenraumes

Wasser zu leiten. Dabei liefert die Wasserleitfähigkeit als Maß die Geschwindigkeit mit der Wasser im beteiligten Porensystem transportiert werden kann. Sie verknüpft den Kapillardruck, als antreibende Kraft, mit der Menge Wasser, welches in dem betrachteten Zeitintervall durch die Poren transportiert wird.

Während der Messungen weist die Materialprobe einen definierten Feuchtegehalt auf. Bei vollständiger Sättigung nehmen sämtliche Poren am Feuchte-transport teil, womit die Flüssigwasserleitfähigkeit maximal ist. In diesem Fall spricht man von der gesättigten Wasserleitfähigkeit,  $k_s$ . Bei abnehmenden Sättigungsgraden werden die jeweils größeren Poren zuerst entwässern und sind mit Luft gefüllt. Folglich sinkt mit abnehmendem Sättigungsgrad die Wasserleitfähigkeit und wird je nach Bezug mit  $k_\theta$  (Bezug zum Wassergehalt),  $k_\psi$  (Bezug zum Kapillardruck) oder  $k_\phi$  (Bezug zur relativen Luftfeuchte) bezeichnet. Die Einheit der Wasserleitfähigkeit ist eine Geschwindigkeit und wird in  $[\text{cm s}^{-1}]$ ,  $[\text{md}^{-1}]$ , bzw. nach dividieren durch die Gravitation in  $[\text{s}]$  angegeben.

### 3.2.3 Wasserdampfdiffusionswiderstand (nach EN ISO 12572)

Im Bereich geringer relativen Luftfeuchten erfolgt der Feuchte-transport dominant durch die Wasserdampfdiffusion. Mit Hilfe des sogenannten „Dry-Cup-Verfahrens“ kann diese Diffusion gemessen werden. Bei höheren Luftfeuchten bis etwa 95 % treten gleichzeitig dampfförmige und flüssige Feuchteströme auf. Dieser zunehmende Flüssigtransport bewirkt einen exponentiellen Anstieg der Diffusion und kann über das „Wet-Cup-Verfahrens“ (als auch noch weiteren Zwischenstufen) unter isothermen Bedingungen gemessen werden.

Der Wasserdampfdiffusionswiderstand liefert ein Maß wieviel Wasserdampf bei Vorliegen eines Dampfdruckgefälles durch ein poröse Material transportiert wird. Der Koeffizient wird üblicherweise als  $\mu$ -Wert bezeichnet und kennzeichnet, wieviel mal dampfdichter der Baustoff im Vergleich zu einer 1 m mächtigen und stehenden Luftschicht ist.

### 3.3 Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmekapazität  $[\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}]$  repräsentiert das Wärmespeichervermögen eines Baustoffes und zeigt an, wieviel Wärmeenergie pro kg Baustoff und Grad Kelvin gespeichert werden können.

Die Wärmeleitfähigkeit liefert die Energiemenge, die durch eine definierte Materialdicke bei einem definierten Temperaturgradienten transportiert werden kann  $[\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}]$ . Zur Messung kommt die Wärme-Puls-Technologie zum Einsatz. Dazu wird ein definierter Wärmepuls über einen elektrischen Heizwiderstand in einer Sonde erzeugt und in den Probenkörper geleitet. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und der volumetrischen Wärmekapazität basiert auf periodischen Temperaturmessungen als Funktion der Zeit einer 10 bis 15 mm mächtigen Materialprobe.

#### 4. Allgemeine hygrothermische Charakterisierung von MKK Klima-Kalkputz

##### 4.1 Basisdaten

Die Bestimmung der Trockenraumdichte und der Gesamtporosität erfolgt im Labor an den Einzelproben, an denen zuvor die Probengeometrie an 4 verschiedenen Positionen je Probe bestimmt wird.

**Tabelle 1: Trockenraumdichte und Gesamtporosität des MKK Klima-Kalkputzes**

Parameter	Symbol	Einheit	Mittel-Wert	Standard-abweichung	Minimal-Wert	Maximal-Wert
Trockenraum-dichte	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	844,1	13,5	816,4	870,2
Gesamt-porosität	$\theta_{por}$	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,6815	0,0051	0,6716	0,6919

Mit einer Porosität von 68% ist der MKK Klima-Kalkputz ein sehr ergiebiger und leichter Putz. Die Ergebnisse an einem Kollektiv von 65 Einzelproben weisen eine sehr niedrige Streuung auf und belegen eine ausgewogene Komposition mit einer homogenen Verarbeitbarkeit.

## 5. Bestimmung der relevanten hygrischen Eigenschaften von MKK Klima-Kalkputz

### 5.1 Ergebnisse der hygrischen- und der überhygrischen Feuchtespeicherung

Die Bestimmung der Feuchtespeicherung erfolgte an einem Probenkollektiv von insgesamt 65 Einzelproben. Die Messergebnisse repräsentieren die mögliche Streubreite der Feuchtespeicherung. Zur Messung in den Apparaturen werden die Proben randomisiert in Unterkollektive differenziert und anschließend in den Laborzyklus eingeschleust. Im hygroskopischen Bereich werden sowohl Adsorptions-, als auch Desorptionsmessungen durchgeführt. Zum einen ist die Beladung des feuchteregulierenden Putzes, als auch die Feuchteabgabe zu beurteilen. In den nachfolgenden Tabellen 2, 3 und 4 sind die Feuchtespeichereigenschaften im hygroskopischen- und im überhygroskopischen Bereich aufgelistet.

**Tabelle 2: Hygrische Sorptionsisotherme, Adsorptionscharakteristik des MKK Klima-Kalkputzes**

relative Luftfeuchte	Temperatur	Wassergehalt			
		Mittel-Wert	Standard-abweichung	Minimal-Wert	Maximal-Wert
%	°C	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>			
43,2	25,9	0,00284	0,00041	0,00235	0,00358
57,6	21,7	0,00297	0,00029	0,00231	0,00328
75,2	25,9	0,00400	0,00026	0,00332	0,00420
84,3	21,7	0,00860	0,00094	0,00709	0,01190
90,0	25,9	0,00995	0,00118	0,00765	0,01190
96,0	21,8	0,01542	0,00172	0,01307	0,01751
96,7	23,4	0,02168	0,00150	0,01933	0,02410

**Tabelle 3: Hygrische Sorptionsisotherme, Desorptionscharakteristik des MKK Klima-Kalkputzes**

relative Luftfeuchte	Temperatur	Wassergehalt			
		Mittel-Wert	Standard-abweichung	Minimal-Wert	Maximal-Wert
%	°C	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>			
96,7	21,3	0,11779	0,00419	0,11101	0,12294
96,0	19,3	0,09297	0,00483	0,08899	0,10165

**Tabelle 3: Hygrische Sorptionsisotherme, Desorptionscharakteristik des MKK Klima-Kalkputzes**

relative Luftfeuchte	Temperatur	Wassergehalt			
		Mittel-Wert	Standard-abweichung	Minimal-Wert	Maximal-Wert
%	°C	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>			
84,7	21,3	0,05066	0,00466	0,04435	0,05670
75,4	20,6	0,03757	0,00404	0,03266	0,04342
57,6	21,3	0,02568	0,00373	0,02113	0,03096
32,9	20,6	0,01354	0,00399	0,00841	0,01954

**Tabelle 4: Wasserretention im überhygroskopischen Bereich, Desorptionscharakteristik des MKK Klima-Kalkputzes**

Kapillar-druck	Temperatur	Wassergehalt			
		Mittel-Wert	Standard-abweichung	Minimal-Wert	Maximal-Wert
hPa	°C	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>			
00	22,6	0,37518	0,01211	0,35591	0,40143
30	24,9	0,37453	0,00922	0,35937	0,38434
400	22,2	0,27989	0,01042	0,26296	0,29198
2000	24,9	0,21387	0,00961	0,19789	0,22715
4000	22,2	0,15555	0,03418	0,08388	0,18282
8000	22,8	0,14809	0,01616	0,12315	0,16906

Bei einer Porosität von 68% können 37.5% hygrisch erschlossen werden. Damit bleiben rund 30% immer mit Luft gefüllt. Der kapillare Bereich umfaßt dabei 30%, der hygroskopische Bereich etwa 7%. Die Ergebnisse bei  $\geq 96\%$  relativer Feuchte werden dem überhygroskopischen Bereich zugewiesen. Mit einer Standardabweichung von  $< 0.005$  weisen die Ergebnisse der Sorptionsisotherme eine geringe Variation auf. Die kapillaren Porenbereiche zeigen mit einer Standardabweichung von  $< 0.015$  eine 3fach größere Streuung, was jedoch in einem erwarteten Streubereich liegt. Die kapillaren Poren werden maßgeblich vom Durchmischungsprozess bei der Herstellung gesteuert. Eine Reduzierung der Streuung kann über eine länger dauernde Durchmischung beeinflusst werden.

## 5.2 Feuchtetransporteigenschaften

### 5.2.1 Wasseraufnahmekoeffizient und kapillare Sättigung

Die Bestimmung erfolgt in Anlehnung an EN ISO 15148, wobei die Feuchteaufnahme kontinuierlich und automatisch durch eine Überkopfwage und einen Datenlogger aufgezeichnet werden.

**Tabelle 5: Kapillarer Wassergehalt und Wasseraufnahmekoeffizient des MKK Klima-Kalkputzes**

Parameter	Symbol	Einheit	Mittel-Wert	Standard-abweichung	Minimal-Wert	Maximal-Wert
kapillarer Wassergehalt	$\theta_{cap}$	$m^3/m^3$	0,2714	0,0049	0,2671	0,2758
Wasser-aufnahme-koeffizient	$A_w$	$kg/m^2s^{0.5}$	0,1722	0,0037	0,1698	0,1765
Wasser-aufnahme-koeffizient	w	$kg/m^2h^{0.5}$	10,3	0,22	10,2	10,59

Der MKK Klima-Kalkputz besitzt eine hohe Kapillarität und kann Feuchtigkeit sehr gut leiten. Dabei werden  $0.27 m^3/m^3$  der Poren unmittelbar erschlossen und eine herausragende Porenkontinuität repräsentiert.

### 5.2.2 Wasserleitfähigkeit (Wasserpermeabilität)

Die Bestimmung erfolgt in Anlehnung an ISO/CD 17312 und 17313, wobei sogenannte Tensionsinfiltrimeter zum Einsatz kommen. Die hydraulischen Gradienten werden mittels Unterdruck über eine basale Keramik erzeugt und für 2 verschiedene Druckstufen ermittelt. Die dazugehörigen Wassergehalte werden gravimetrisch per Wägung ermittelt. Die Ergebnisse der kapillaren Wasserleitfähigkeitsmessung sind in Tabelle 48 dargestellt.

**Tabelle 6: Kapillare Wasserleitfähigkeit bei einer effektiven Sättigung von  $0.28 m^3/m^3$  des MKK Klima-Kalkputzes**

Parameter	Symbol	Einheit	Mittel-Wert	Standard-abweichung	Minimal-Wert	Maximal-Wert
kapillare Wasser-leitfähigkeit	$K_\theta$	s	1,55E-09	3,39E-10	1,16E-09	1,93E-09
kapillare Wasser-leitfähigkeit	$K_\theta$	cm/d	1,31E-01	2,88E-02	9,85E-02	1,63E-01

Die Ergebnisse der kapillaren Wasserleitfähigkeit zeigen, dass flüssiges Wasser bei einem Einheitsgradienten über 0.13mm weit transportiert werden kann. Damit besitzt der MKK Klima-Kalkputz eine große Feuchtetransportleistung und kann flüssiges Wasser aus belasteten Bereichen abtransportieren, umverteilen und damit ein bestehendes Feuchteproblem entschärfen.

### 5.2.3 Bestimmung der Diffusionsfähigkeit (Wasserdampfdiffusionswiderstand)

Diese erfolgt in Anlehnung an EN ISO 12572 mit Hilfe spezieller  $\mu$ -Wert Gefäße und Deckelringen für die Probeaufnahme. Die Proben werden in den Deckeln mit Okozerit ähnlichem Paraffin fixiert und randlich abgedichtet und anschließend bei definierten relativen Luftfeuchten vorkonditioniert. Danach werden die Gefäße mit einem Trockenmittel befüllt und die Probendeckel auf den Gefäßen luftdicht fixiert. Die eigentliche Messung erfolgt in einer Klimakammer mit einer definierten relativen Luftfeuchte bei einer Temperatur von 23°C. In der Regel werden die Experimente bei den folgenden Luftfeuchtedifferenzen realisiert, dry-cup mit 05/35% relativer Feuchte und wet-cup mit 96/78% relativer Feuchte.

Um den Einfluß von Ungleichgewichtsbedingungen auf die Dampfdiffusionsmessung zu reduzieren, werden die Proben zuvor bei definierten relativen Luftfeuchten für 30 Tage vorkonditioniert, dry-cup bei 22% relativer Feuchte und wet-cup bei 84.7% rH. Die Ergebnisse für den Feuchte regulierenden Innenputz können Tabelle 7 entnommen werden.

**Tabelle 7: Wasserdampfdiffusionskoeffizienten des MKK Klima-Kalkputzes**

Parameter bei	Symbol	Einheit	Mittel-Wert	Standard-abweichung	Minimal-Wert	Maximal-Wert
dry-cup 05/35 % rH	$\mu_{dry}$	-	8,84	0,29	8,51	9,05
wet-cup 96/78 % rH	$\mu_{wet}$	-	4,51	1,37	2,95	5,53

### 5.3 Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität

Die Wärmekapazität wird im Labor mittels einer ISOMET-Heat-Puls-Apparatur und entsprechenden Plattensensoren (Messbereich 0,4 - 2,0 W/mK) bestimmt. Die Ergebnisse sind in der Tabelle für den Feuchte regulierenden Innenputz mit und ohne Oberflächenfinish aufgelistet. Die Messergebnisse beziehen sich jeweils auf den trockenen Zustand des gemessenen Materials.

**Tabelle 8: Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des MKK Klima-Kalkputzes**

Parameter	Symbol	Einheit	Mittel-Wert	Standard-abweichung	Minimal-Wert	Maximal-Wert
Wärme-leitfähigkeit	$\lambda$	W/mK	0,1685	0,0034	0,1610	0,1740
Wärme-kapazität	c	J/kgK	956	35,8	918	1042

## 6. Ermittlung charakteristischer, hygrothermischer Materialfunktionen

Die hygrothermische Bauteilsimulation bzw. Feuchte- und Wärmetransportberechnungen basieren auf der numerischen Lösung von gekoppelten Differentialgleichungen mit feuchte- und temperaturabhängigen Transport- und Speicherkoeffizienten. Die Laborexperimente hingegen liefern Basiskennwerte (oder -parameter), die einer Interpretation bedürfen, um als Parameter der Transport- und Speicherkoeffizienten verwendet werden zu können. Die Interpretation der Laborkennwerte zur Generierung von Materialfunktionen, welche die Materialeigenschaften adäquat beschreiben, ist die wesentliche Aufgabe der Materialmodellierung. Das hier verwendete Materialmodell umfasst ein Set von Materialfunktionen einschließlich der Material- und Modellparameter. Die Entwicklung des Materialmodells erfolgt notwendigerweise in drei Stufen: Modellierung, Kalibrierung und Validierung.

1. **Modellierung** - Auswahl geeigneter Materialfunktion mit ausreichender Flexibilität zur Beschreibung der hochgradig nichtlinearen Abhängigkeiten der Materialeigenschaften
2. **Kalibrierung** - Bestimmung interner „nicht sichtbarer“ Funktionsparameter durch Simulation von Laborexperimenten und Optimierung
3. **Validierung** - Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Materialverhalten anhand von Experimenten, die nicht zur Kalibrierung herangezogen wurden

Das Ingenieurmodell zur hygrothermischen Materialcharakterisierung besitzt eine Reihe interner Funktions- und Materialparameter. Die internen Funktionsparameter werden durch Kalibrierung bestimmt. Die Ausgangsdaten stellen eine Mindestanforderung an die durchzuführenden Laborexperimente dar. Zusätzliche Messungen erhöhen die Genauigkeit der Materialcharakterisierung und lassen daher auch genauere Simulationsergebnisse erwarten. Die zusätzlichen Messpunkte fließen, als weitere Daten in das Modell ein und präzisieren damit die durch die zugrundeliegenden physikalischen Modellvorstellungen entwickelten Funktionsverläufe. Nachfolgend sind die gefundenen Materialfunktionen abgebildet: hygri-sche Sorptionsisotherme, Wasserretentionscharakteristik, Porenvolumenverteilung, kapillare Flüssigwasserleitfähigkeit, Wasserdampfdiffusion und die Wärmeleitfähigkeit funktional über den gesamten Feuchtebereich.

## 6.1 Hygrische Sorptionsisotherme und Wasserretentionsfunktion

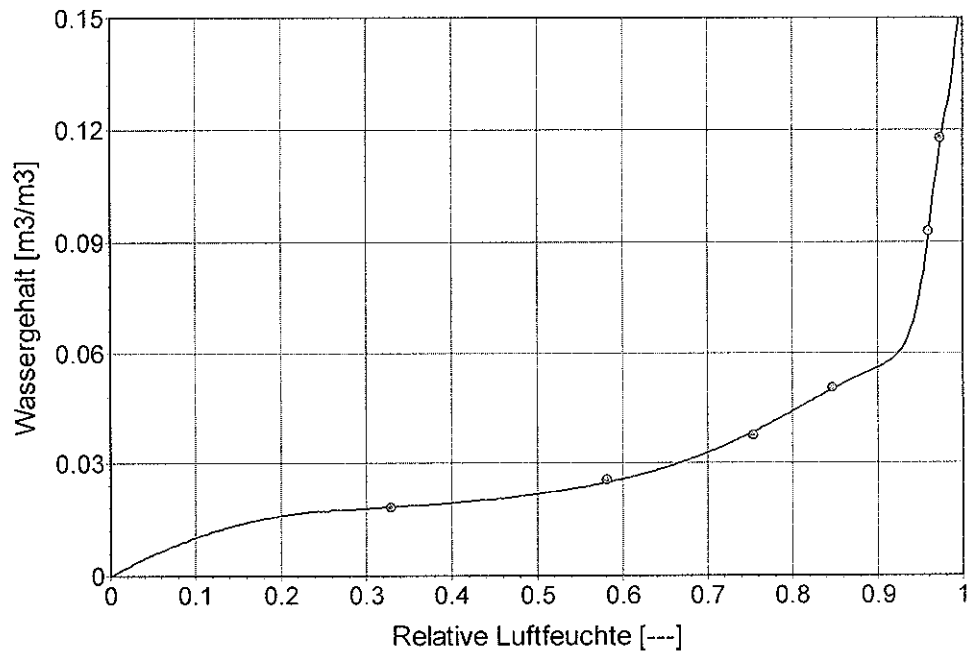


Abbildung 1: Hygrische Sorptionsisotherme (Desorption) für den feuchteregulierenden Innenputz MKK Klima-Kalkputz als Funktion der relativen Luftfeuchte.

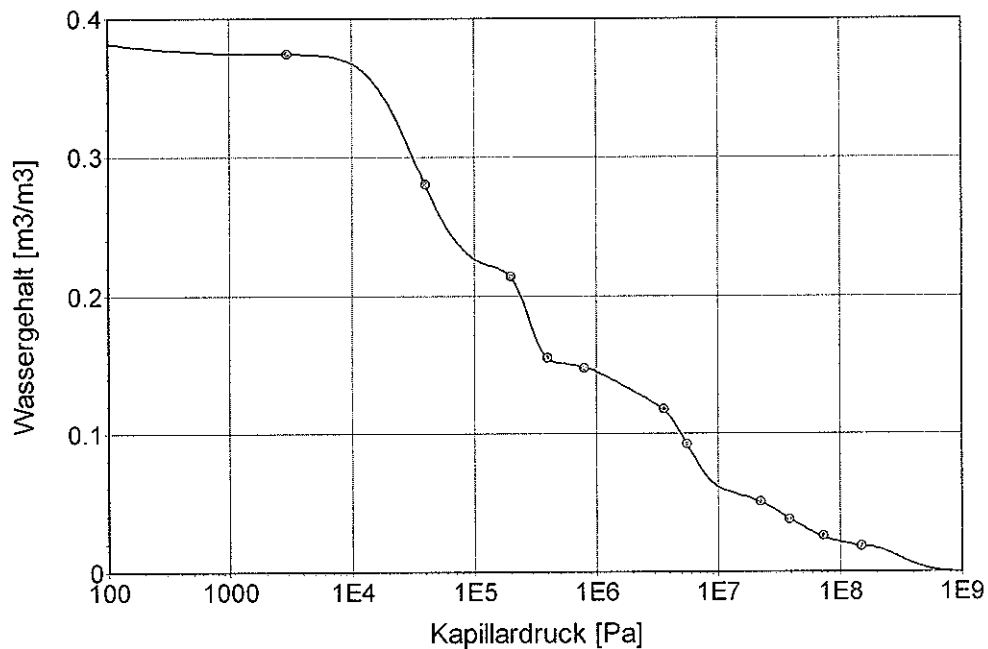


Abbildung 2: Funktion der Wasserspeicherung (Desorption) für den feuchteregulierenden Innenputz MKK Klima-Kalkputz im hygroscopischen und überhygroscopischen Bereich, aufgetragen gegen den Kapillardruck.

In einem der ersten Schritte ist dabei die Feuchtespeicherfunktion an die Messwerte der Wasserretention und der hygrischen Sorptionsisotherme anzupassen, wie in Abbildung 1 und 2 dargestellt. Der Flüssigtransport leitet sich über ein Porenmodell aus der Feuchtespeicherfunktion ab. Dazu wird aus der angepassten Feuchtespeicherfunktion die sogenannte Porenvolumenverteilung generiert. Unter der Annahme von Äquivalenzporenradien leitet sich die Porengrößenverteilung ab Abbildung 3.

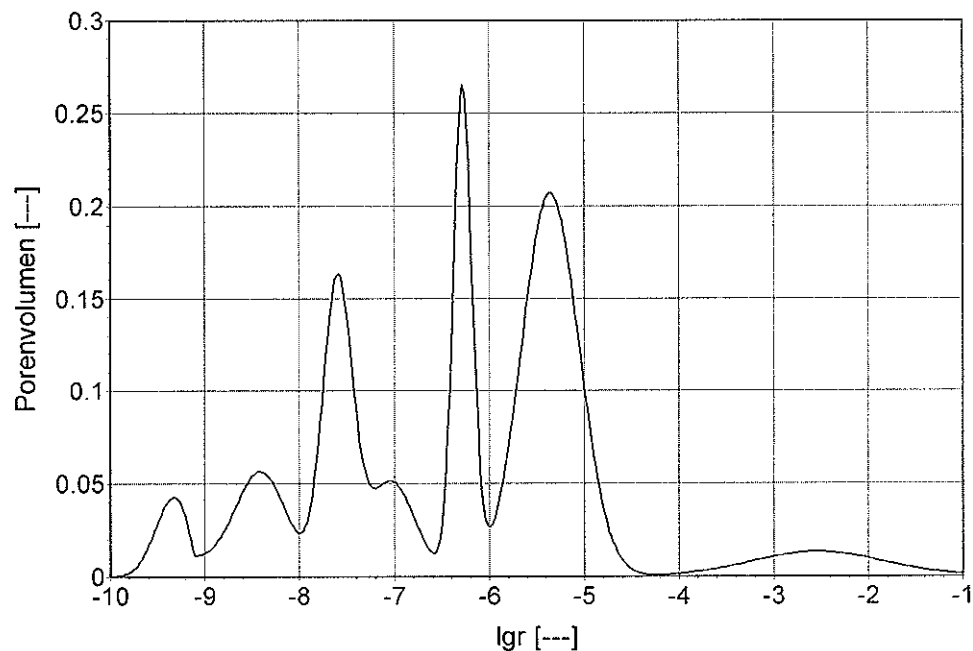


Abbildung 3: Porenvolumenverteilungsfunktion für den feuchteregulierenden Innenputz MKK Klima-Kalkputz, aufgetragen gegen den Logarithmus des Porenradius.

## 6.2 Wasserleitfähigkeit, Wasserdiffusivität und Wasserdampfdiffusivität

Zur Ableitung der Transportfunktionen für Flüssigwasser und Wasserdampf aus der Porenstruktur werden zwei Modelle miteinander kombiniert: Die Flüssigwasserleitfähigkeit wird über ein komplexes Porenmodell nach Burdine [1] aus der Porenstruktur beschrieben. Die erhaltene Funktion wird anschließend normiert und mit der gemessenen Leitfähigkeit bei kapillarer Sättigung skaliert. Die Leitfunktion knüpft im überhygroskopischen Bereich an die Dampfdiffusionsmessungen (Wet cup) an.

Da Flüssig- und Dampftransport gemeinsam zu betrachten sind, findet eine Kopplung zu einem Modell statt, serieller und paralleler Flüssigwasser- und Dampftransport, welches die Einflüsse der über die Gasphase kommunizierenden Flüssigkeitsinseln beschreibt. Es erlaubt die Modellierung der Feuchteabhängigkeit des Dampftransportes und liefert zusätzlich eine Skalierungsfunktion für die Flüssigwasserleitfähigkeit im überhygroskopischen Bereich, deren physikalische Ursache in der Unterbrechung des kapillaren Flüssigwassertransportes bei Vorhandensein von Flüssigkeitsinseln besteht.

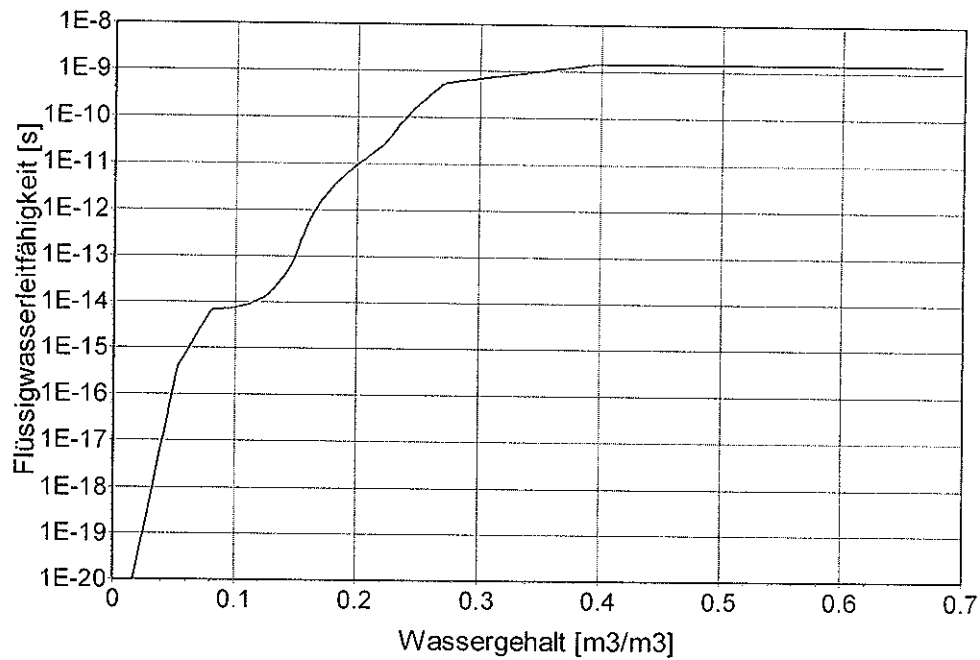


Abbildung 4: Funktion der kapillaren Flüssigwasserleitfähigkeit für den feuchteregulierenden Innenputz MKK Klima-Kalkputz, aufgetragen gegen den volumetrischen Wassergehalt.

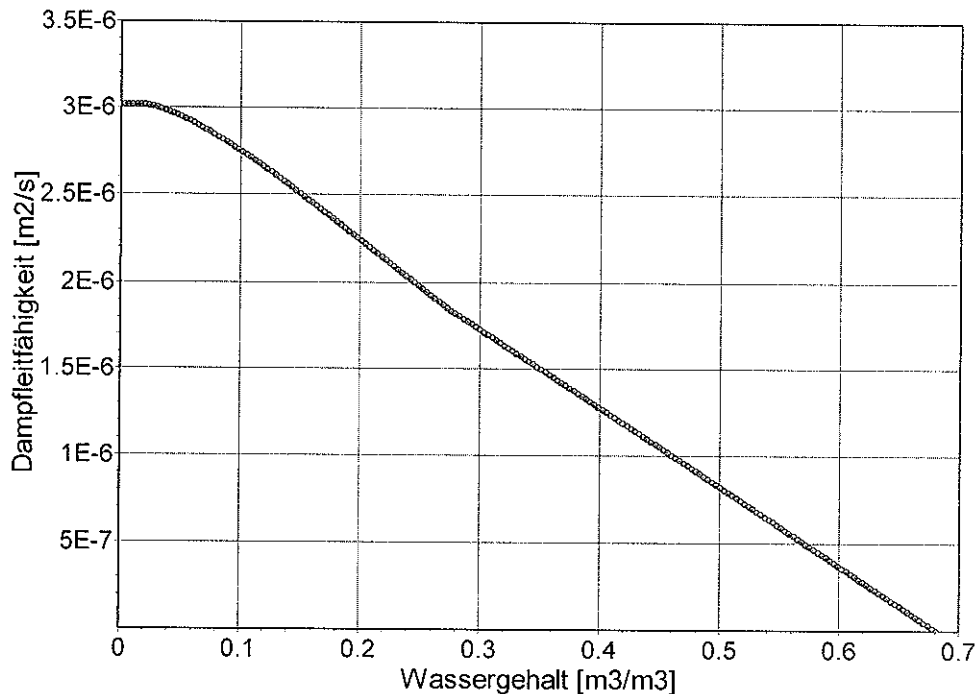


Abbildung 6: Funktion der Wasserdampfdiffusivität für den feuchteregulierenden Innenputz MKK Klima-Kalkputz, aufgetragen gegen den volumetrischen Wassergehalt.

Aus den Abbildungen 1 und 2 wird deutlich, dass eine größere Anzahl an Messwerten bei der Anpassung der Feuchtespeicherfunktion auch einen Zuwachs an Genauigkeit bedeutet. Da aus dieser Funktion auch die Transportfunktion justiert wird, ist dieser Aspekt durchaus beachtenswert. In der weiteren Anpassung werden die Leitfähigkeitsfunktionen für flüssiges Wasser und für Wasserdampf entwickelt und angepasst. Anschließend werden diese Funktionen mit Hilfe der numerischen Simulation kalibriert.

Die Leitfunktionen enthalten zwei Parameter,  $k_{corr}$  und  $h$  die der Kalibrierung des Materialmodells an den Laborexperimenten dienen. In beiden Fällen der Kalibrierung werden die Parameter in der numerischen Simulation variiert bis eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment gegeben ist.

Der Parameter  $k_{corr}$  dient der Skalierung der Flüssigwasserleitfähigkeit im kapillaren Feuchtebereich und wird aus dem Wasseraufnahmeexperiment bestimmt. Mit dem Parameter  $h$  können beide Funktionen, die Flüssigwasserleitfähigkeit und der Dampfdiffusionskoeffizient, im überhygroskopischen Feuchtebereich skaliert werden. Dies geschieht anhand des Trocknungsexperimentes.

Zur Kontrolle des überhygroskopischen Feuchtebereiches dient die Simulation des Aufsaugversuches. Dazu wird ein in seinen Abmessungen den Proben im Labor entsprechender Körper modelliert und an seiner Unterseite mit Wasser beaufschlagt. Die Wasseraufnahme wird über die Zeit ausgegeben und mit den Messdaten aus dem Labor verglichen. Eine gute Übereinstimmung ist gegeben, wenn gemessene und simulierte Wasseraufnahmerate (Anstieg der Kurve) übereinstimmen.

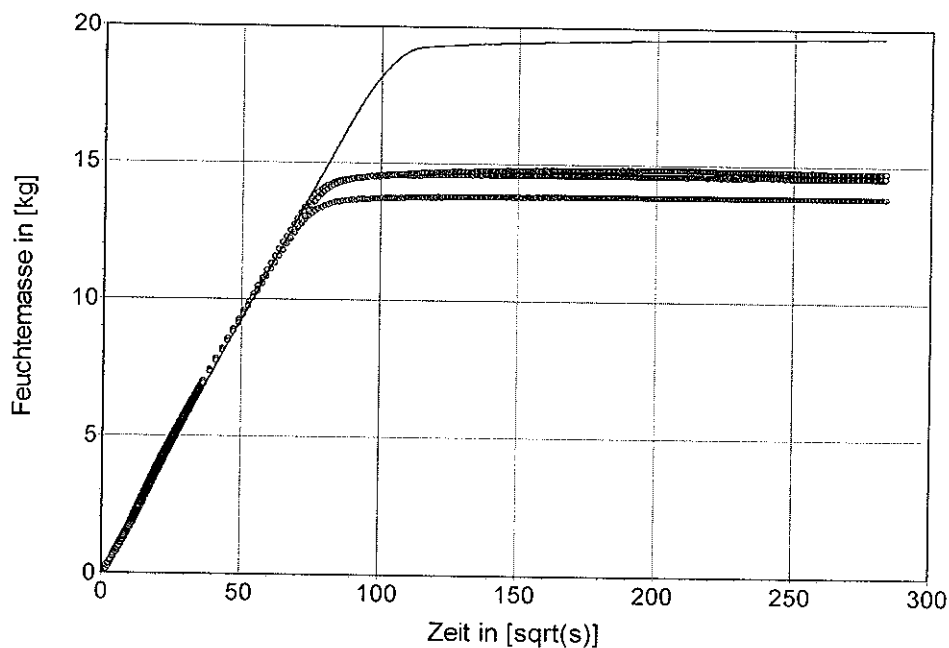


Abbildung 7: Verifizierung der Materialfunktionen anhand dreier Aufsaugexperimente für den feuchteregulierenden Innenputz MKK Klima-Kalkputz. Abgebildet sind die Massenzunahmen der Materialproben in ihrem zeitlichen Verlauf, Datenpunkte (rot) Simulationsrechnung (schwarz).

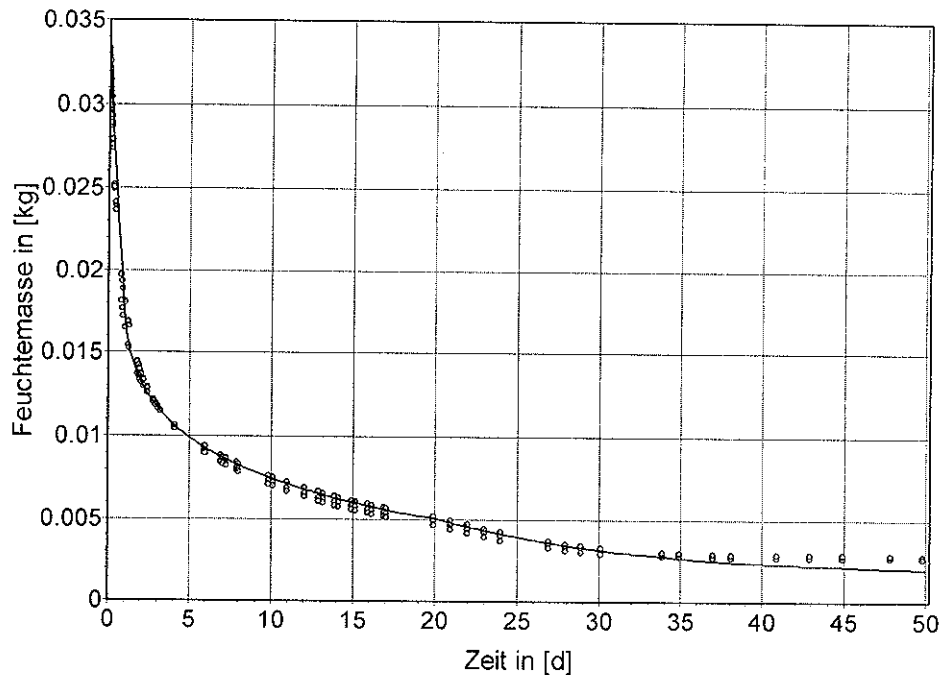


Abbildung 8: Verifizierung der Materialfunktionen anhand dreier Verdunstungsexperimente für den feuchteregulierenden Innenputz MKK Klima-Kalkputz. Abgebildet sind die Massenabnahmen der Materialproben in ihrem zeitlichen Verlauf, Datenpunkte (rot) Simulationsrechnung (schwarz).

Der Grenzbereich zwischen hygroskopischem und überhygrokopischem Feuchtebereich wird durch die Simulation des Trocknungsverhaltens kalibriert. Bei Kenntnis der genauen Umgebungsbedingungen und der Möglichkeit der radialsymmetrisch- dreidimensionalen Simulation, kann neben den Anfangs- und Übergangsbedingungen auch der Temperatureinfluss auf das Trocknungsverhalten berücksichtigt werden.

Im Ergebnis steht ein im gesamten Feuchtebereich kalibriertes, auf thermodynamischen Grundlagen basierendes Transportmodell für gekoppelten Flüssigwasser-, Wasserdampf- und Wärmetransport. Das Modell ist für die wissenschaftliche Weiterentwicklung offen, z.B. auf den Salztransport und Salzkristallisationsprozesse, Hysterisis, etc. erweiterbar.

### 6.3 Wärmeleitfähigkeit

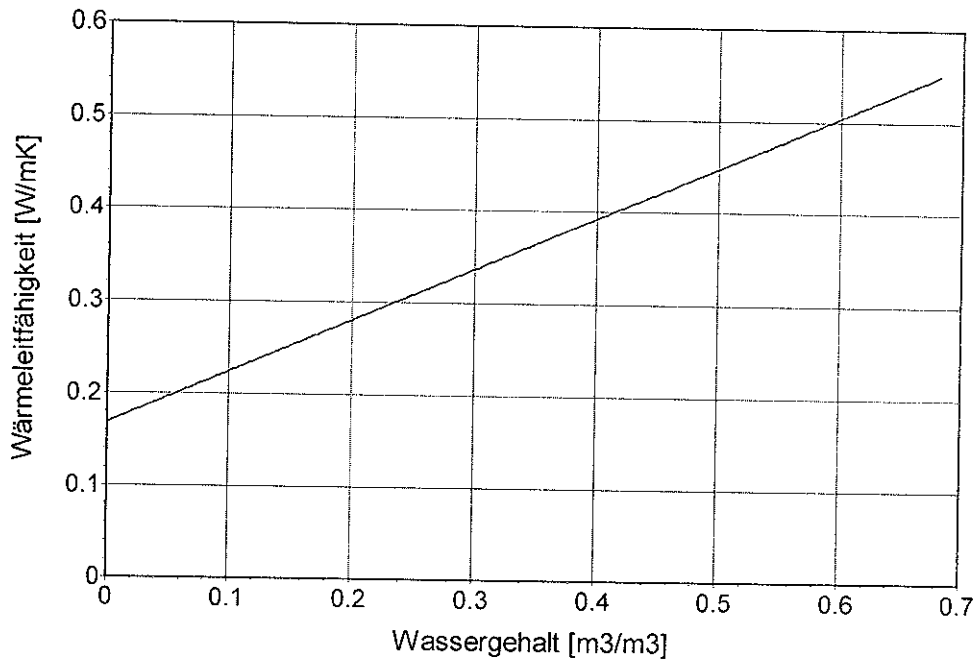


Abbildung 9: Wärmeleitfähigkeit für den feuchteregulierenden Innenputz MKK Klima-Kalkputz als Funktion des volumetrischen Wassergehaltes.

Die Anpassungsgenauigkeit kann durch eine erweiterte, über die Mindestanforderungen hinausgehende Bestimmung von Messdaten erhöht werden.

Datum: 02.06.2010

*R. Plagge*

Dr.-Ing. Rudolf Plagge

Leiter des IBK Forschungs- und Entwicklungslabors



Technische Universität Dresden  
 Institut für Bauklimatik  
 Bauphysikalisches Labor  
 Dr.-Ing. Rudolf Plagge  
 Laborleiter

## 7. Referenzen

- [1] BURDINDE, N.T.: „Relative permeability calculations from pore-size distribution data“ Trans. AIME 198, 71-78, 1953.
- [2] GRUNEWALD, J.: „Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energietransport in kapillarporösen Baustoffen“, Dissertation, TU Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik, 1997.
- [3] GRUNEWALD, BOMBERG: „An Engineering Approximation of Material Characteristics for Input to Heat, Air and Moisture Transport Simulations“, Journal of Thermal Envelope & Building Science, Vol. 26 No. 4, April 2003, Sage Publications London, Thousand Oaks, New Delhi 2003.
- [4] GRUNEWALD, HÄUPL: „Gekoppelter Feuchte-, Luft-, Salz- und Wärmetransport in porösen Baustoffen“, Artikel im Bauphysik Kalender 2003 (S. 377 - 434), Ernst & Sohn Berlin 2003.
- [5] GRUNEWALD, HÄUPL: „Ein Modell zur Beschreibung der feuchteabhängigen Dampfleitfähigkeit kapillarporöser Materialien“, 11. Bauklimatischen Symposium, Band 1 (S.286-294), TU Dresden, Fakultät Architektur, Institut für Bauklimatik, Eigenverlag September 2002.
- [6] Nicolai A., J. Grunewald, R. Plagge & Scheffler G., 2008: Development of a Combined Heat, Moisture, and Salt Transport Model for Unsaturated Porous Building Materials, in Simulation of Time Dependent Degradation of Porous Materials, Research Report on Priority Program DFG SPP 1122, eds. L. Franke, G Deckelmann & R. Espinosa- Marzal, Cuilliver Verlag, ISBN 978-3-86727-902-4, S. 67-84.
- [7] Nicolai A., J. Grunewald, R. Plagge & Scheffler G., 2008: An Efficient Numerical Solution Method and Implementation for Coupled Heat, Moisture and Salt Transport: The Delphin Program, Research Report on Priority Program DFG SPP 1122, eds. L. Franke, G Dekkelmann & R. Espinosa-Marzal, Cuilliver Verlag, ISBN 978-3-86727-902-4, S. 85-100. 11
- [8] Plagge, R., R. Cerny & P. Matiasovsky: *Laboratory measurements*. In: Development of insulation materials with specially designed properties for building renovation. EU-Project publication: Workpackage 3 report of the EU Project GRD1-1999-11149 INSUMAT ISBN 3-86005-406-6, 65p, 2004.
- [9] PLAGGE, R.; MEISSNER, F.; GRUNEWALD, J.; BOMBERG, M.: „Analysis of water uptake experiments for building materials: methods, functions and parameters“, contribution to the CIB W40 conference held in Glasgow, 1st-3rd September 2004.
- [10] Plagge, R.: *Experimental technique to measure material parameters related to moisture flow*. Symposium on: Study of moisture problems related to the conservation of historical stone monuments and buildings, National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo, Japan, 19-32, 2004.
- [11] Plagge, R., G. Scheffler & J. Grunewald: *Automatische Messung des Wasseraufnahmekoeffizienten und des kapillaren Wassergehaltes von porösen Baustoffen*. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Bauphysik 27 (2005), Heft 6, 315-323, 2005.
- [12] ROELS, S.; CARMELIET, J.; HENS, H.; BROCKEN, H.; HALL, C.; PLAGGE, R.; CERNY, R.; PAVLIK, Z.; KUMARAN, K.: „Interlaboratory comparison of the measurement of basic hygric properties of porous building materials“, Journal of Thermal Envelope &

- Building Science, Vol. 27 No. 4, April 2004, Sage Publications London, Thousand Oaks, New Delhi 2004.
- [13] ROELS, S.; CARMELIET, J.; HENS, H.; PEL, L.; HALL, C.; PLAGGE, R.; PAVLIK, Z.; CERNY, R.; KUMARAN, K.: „A comparison of different techniques to quantify moisture content profiles in porous building materials“, Journal of Thermal Envelope & Building Science, Vol. 27 No. 4, April 2004, Sage Publications London, Thousand Oaks, New Delhi 2004.
- [14] Scheffler, G. & R. Plagge 2009: *A whole range hygric material model: Modelling liquid and vapour transport properties in porous media*, Int. J. Heat Mass Transfer (2009), doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer. 2009.09.030.
- [15] Scheffler, G. & R. Plagge: *Bestimmung des Trocknungsverhaltens von Baustoffen unter definierten Randbedingungen*. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Bauphysik 27 (2005), Heft 6, 323-330, 2005.
- [16] Scheffler, G., Plagge, R., Grunewald, J. & Häupl, P. 2006. *Evaluation of instantaneous profile measurements indicating dependencies of moisture transport on hysteresis and dynamics*. 3rd International Building Physics/Science Conference, Montreal 2006.
- [17] Plagge, R.: *Hygrothermal Characterization of Building Materials*. In: *Study of moisture movement in building material and its simulation analysis*. Seminar Book of Kyoto University, Katsura Campus, Japan, 20-41, 2005.
- [18] MASEA-Projekt - „Materialdatensammlung für die energetische Altbausanierung“, gefördert vom BMBF unter BEBF ZE 98

## 8. Normen

- [19] DIN ISO 11272 *Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohichte*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Januar 2001
- [20] DIN ISO 11274 *Bodenbeschaffenheit - Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens - Laborverfahren*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Januar 2001
- [21] DIN EN ISO 12571 *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, April 2000
- [22] DIN EN ISO 12572 *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, September 2001
- [23] DIN EN ISO 12664 *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Mai 2001
- [24] DIN EN ISO 15148 *Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen*, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, März 2003
- [25] *WärmeleitRechenWRL Verfahren zur Festlegung eines alternativen Rechenwertes der Wärmeleitfähigkeit für Mauerwerk im Rahmen des Übereinstimmungsnachweises*, Deutsches Institut für Bautechnik Berlin, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 1999