

## Feuchtetransport über Materialgrenzen im Mauerwerk

A. Holm, M. Krus und H.M. Künzel,  
Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen  
(Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c. Dr. E.h.mult. Karl Gertis)

### Zusammenfassung

Zur besseren Erfassung des Feuchtetransports über die Kontaktzone zwischen zwei kapillaraktiven Materialien wurde zuerst der kapillare Flüssigtransport zwischen jeweils zwei, in idealem hygrischen Kontakt miteinander stehenden, Natursteinen untersucht. Dabei zeigt sich, daß das Wasseraufnahmeverhalten der zusammengesetzten Prüfkörper stark abhängig von der Reihenfolge der Materialien ist. Der Grund dafür liegt in den sehr unterschiedlichen Saugspannungskurven der verwendeten Materialien. Die Berechnung des Wasseraufnahmeverhaltens ergibt in allen Fällen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung sowohl für den zeitlichen Verlauf der Wasseraufnahme, als auch für die sich ergebenden Wassergehaltsverteilungen. Untersuchungen beim Feuchteübergang zwischen Putz und Mauerstein zeigen, daß der Flüssigtransport über die Schichtgrenze behindert wird. Vergleiche zwischen experimentell gewonnenen Ergebnissen und Berechnungen zeigen, daß durch Einführung einer dünnen Widerstandsschicht zwischen Putz und Stein auch der Flüssigtransport über die Schichtgrenze zwischen Putz (oder Mörtel) und Mauerstein korrekt berechnet werden kann.

Stichwörter: Kapillarität, kapillares Saugvermögen, Wasseraufnahme, Kontaktzone, Grenzfläche

### *Moisture transport through interfaces in masonry*

#### **Abstract**

In order to get more information about the moisture transport through the interface of two capillary active materials, the capillary liquid transport for two types of

layers of natural sandstone in ideal hygric contact was observed. The results show that the water absorption behaviour of the composite samples is strongly dependent on the sequence of its composition. This can be explained by the different water retention curves of the materials. Calculation shows in all cases good agreement between the measured and calculated values for the water absorption and for the moisture profiles. Examinations of the moisture transport between rendering and brick show that the moisture transport is reduced. Comparisons between measurement and calculation indicate that the introduction of a thin resistance layer between rendering (or mortar) and stone is necessary. With this layer the liquid transport through the interface can be simulated correctly.

Key words: capillarity, capillary suction, water absorption, contact zone, interface



**Dipl.-Phys. Andreas Holm**, Studium der Physik an der Technischen Universität München. Seit 1996 wiss. Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen



**Dr.-Ing. Martin Krus**, 1984 Diplom Chemieingenieurwesen Universität Karlsruhe 9/85 bis 11/86 wiss. Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart. Seit 11/86 wiss. Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen. Seit 2/95 Gruppenleiter in der Abteilung Hygrothermik. 1995 Promotion an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart



**Dr.-Ing. Hartwig M. Künzel**, 1987 Diplom Chemieingenieurwesen Universität Erlangen-Nürnberg. Seit 1987 wiss. Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen. 1994 Promotion an der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart. Seit 1994 Leiter der Abteilung Hygrothermik

## 1 Einleitung

Zur Abschätzung feuchtebedingter Schadensrisiken bzw. zur Beurteilung geeigneter Schutzmaßnahmen von Gebäuden ist eine Analyse des hygrothermischen Verhaltens von Bauteilen unter natürlichen Randbedingungen wesentlich. Da eine Gebäudewand in der Regel aus mehreren kapillaraktiven Baustoffen besteht, muß für die Berechnung des Feuchtehaushaltes auch der Feuchtetransport über deren Materialgrenzen berechnet werden können. Durch genauere Kenntnis der Feuchte-austauschvorgänge wären viele Feuchteschäden, wie sie zum Beispiel häufig bei dem in den 70er und 80er Jahren bevorzugt verbauten Verblendmauerwerk mit Schalenfuge durch ungeeignete Materialwahl auftraten [1], vermeidbar gewesen. Außerdem kann z.B. die Wirksamkeit des Außenputzes als Regenschutz oder der Einfluß von Lagerfugen bei aufsteigender Feuchte besser beurteilt werden, wenn der Feuchtetransport über Materialgrenzen realistisch abschätzbar ist.

In neuerer Zeit wurden nur an monolithischem Material Untersuchungen mit Vergleichen von Messung und Rechnung durchgeführt. Eine Ausnahme bildet dabei Pel [2] mit ersten qualitativen Berechnungen und Freitas [3], der für den Feuchtetransport zwischen zwei unvermörtelten Vollziegeln mit seinem Modell eine recht gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung erreicht. Für eine genauere Klärung der in der Kontaktzone auftretenden Transportvorgänge wurden Messungen der Wasseraufnahme über die Schichtgrenze zweier ideal miteinander verbundener kapillarporöser Materialien hinweg durchgeführt und mit Rechenergebnissen verglichen. Diese Untersuchungen bilden die Grundlage für die im zweiten Teil dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen des Feuchtetransports über die Kontaktzone zwischen Putz und Mauerwerk. Da hierbei, wie allgemein beobachtet [z.B. 4 - 7], kein idealer hydrischer Kontakt vorliegt, muß ein Modell entwickelt werden, welches die Berechnung dieser Transportvorgänge erlaubt.

## 2 Kapillarer Feuchteausaustausch zwischen kapillarporösen Materialien bei idealem hydrischen Kontakt

Die Untersuchungen, welche detaillierter in [8] beschrieben sind, wurden mit drei verschiedenen Natursandsteinsorten durchgeführt: Rühthener, Baumberger und Obernkirchner Sandstein. Die feuchtetechnischen Kennwerte der verschiedenen Natursteinsorten sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die aus Sorptions- und Saugspannungsmessungen ermittelten Speicherfunktionen der drei Natursteine zeigt Abb. 1. Von jeder Kombination aus je zwei Materialien wurden Proben mit einer Querschnittsfläche von  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  und verschiedenen Längen geschnitten. Die Seiten aller Proben wurden mit Epoxidharz versiegelt, um eindimensionale Verhältnisse

---

Tabelle 1: Zusammenstellung feuchtetechnischer Stoffkennwerte. Der exponentiellen Näherung für die Flüssigtransportkoeffizienten liegt die folgende Gleichung zugrunde:  $D_w = D_{wo} \exp \left[ \frac{w}{w_f} D_{wex} \right]$

Table 1: Summary of the material properties concerning moisture behaviour. The liquid transport coefficients are calculated with the following exponential approximation:  $D_w = D_{wo} \exp \left[ \frac{w}{w_f} D_{wex} \right]$

Baustoff	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosität [Vol.-%]	freie Sättigung [Vol.-%]	w-Wert [kg/m <sup>2</sup> ÷h]	Sorptionsfeuchtegehalt in [Vol.-%] bei			Flüssigtransportkoeffizient (Exponentielle Näherung)	
					65 % r.F.	80 % r.F.	90 % r.F.	D <sub>wo</sub> [m <sup>2</sup> /s]	D <sub>wex</sub>
Baumberger Sandstein	1980	23	20	1,5-2,2	2,8	3,6	4,3	1,7·10 <sup>-10</sup> - 3,4·10 <sup>-10</sup>	2,5
Obernkirchner Sandstein	2150	14	9	1,5-2,0	0,26	0,34	0,43	8,6·10 <sup>-10</sup> - 1,6·10 <sup>-09</sup>	2,25
Rüthener Sandstein	1950	24	15	12,6-15,3	0,8	1,2	1,7	3,3·10 <sup>-10</sup> - 5·10 <sup>-10</sup>	4,5
Cottaer Sandstein	1920	26	20	2,9	0,52	0,96	4,0	1,6·10 <sup>-9</sup>	2,0
Klinker	1950	28	26	3,7	1,9	2,6	4,0	1·10 <sup>-9</sup>	2,2
Ziegel	1690	36	34	13	0,13	0,31	1,3	8·10 <sup>-9</sup>	2,1
Gipsputz	1260	52	35	3,8	0,49	0,79	1,5	3·10 <sup>-9</sup>	1,4
Kalkzementputz	1910	20	19	2,3-5,4	2,1	2,8	4,4	7·10 <sup>-9</sup>	0,9
Zementputz	2190	16	15	1,9-3,1	0,55	--	0,85	--	--

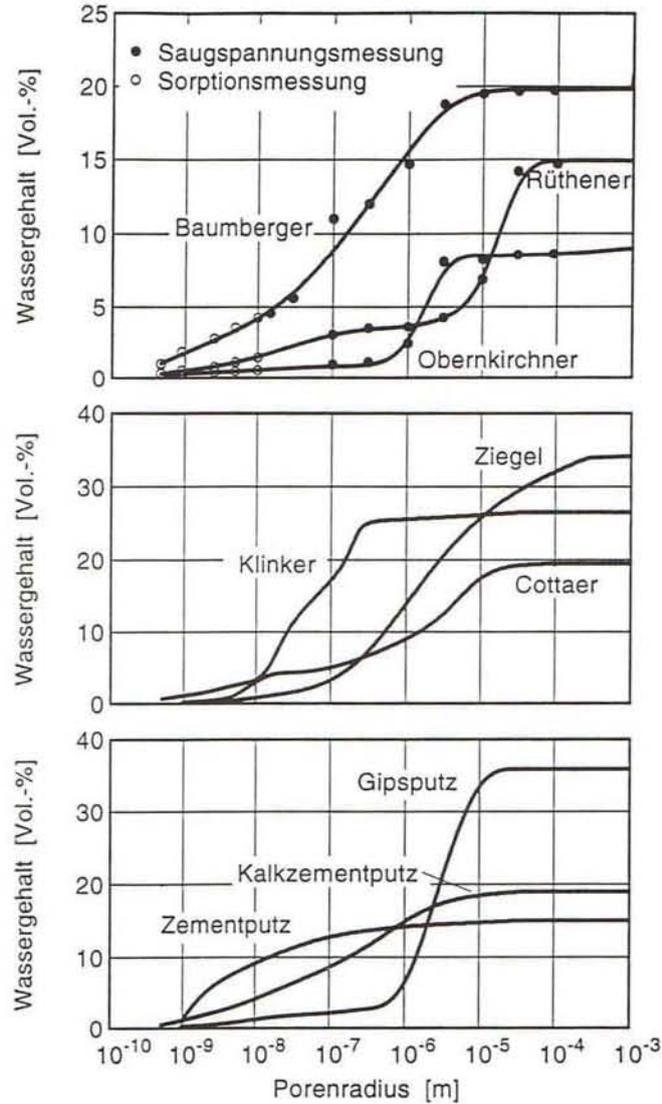


Abb. 1: Feuchtespeicherfunktion der untersuchten Baustoffe. In der oberen Abbildung sind die Meßwerte mit eingezeichnet, um zu zeigen, wie sich die Speicherfunktion aus Saugspannungsmessung und Sorptionsmessung zusammensetzt.

Fig. 1: Moisture storage functions of the studied materials. In order to demonstrate their development, the values from the sorption and the pressure plate measurements are shown as dots in the top figure.

zu erhalten. Für eine gute hygrische Verbindung wurden je zwei unterschiedliche Proben mit befeuchtem Kaolinpulver kapillar verbunden und getrocknet. Anschließend wurde ein Wasseraufnahmeversuch durchgeführt, wobei die offene Seite des kürzeren Probenteils mit Wasser in Kontakt gebracht wurde (siehe Abb. 2). Die zeitabhängige Wasseraufnahme wurde durch Wägung bestimmt. Wie Vorversuche mit einer Kombination zweier Proben aus Rühthener Sandstein ergaben, hat die dünne Kaolinschicht keinen nennenswerten Einfluß auf den Wasseraufnahmeprozess (siehe Abb. 3). An auf dieselbe Weise präparierten Proben mit einer Querschnittsabmessung von  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  wurden für eine Auswahl an Materialkombinationen mit Hilfe einer NMR-Meßanlage [9] die sich zu verschiedenen Zeitpunkten des Saugvorganges dabei ergebenden Wassergehaltsverteilungen bestimmt.

### 2.1 Meßergebnisse

In Abb. 4 sind die durch wiederholte Wägungen erhaltenen Verläufe für die Wasseraufnahme als Meßpunkte dargestellt. Abb. 4 links zeigt die Wasseraufnahme der Kombination aus 2 cm Rühthener Sandstein und 18 cm Baumberger Sandstein. Nach einer kurzen Aufnahmezeit von seiten des Rühthener Sandsteins mit seinem hohen Wasseraufnahmekoeffizienten erreicht das Wasser den Baumberger Sandstein, wie aus dem Knick der Kurve zu ersehen ist. Von da an nimmt der Baumberger Sandstein durch den Rühthener Sandstein fast völlig unbeeinflusst das Wasser auf.

Die Kombination Baumberger/Rühthener Sandstein zeigt ein anderes Verhalten. In diesem Fall hat der Baumberger Sandstein einen sehr großen Einfluß auf das Aufnahmeverhalten des Rühthener Sandsteins. Trotz seines großen Wasseraufnahmekoeffizienten nimmt der Rühthener Sandstein das Wasser sogar langsamer als der Baumberger Sandstein auf. Mit steigender Saugzeit bzw. mit steigender Wassereindringtiefe steigt die auf die Wurzel der Zeit bezogene Wasseraufnahmegeschwindigkeit des Rühthener Sandsteins. Dieser Effekt ist zu erwarten, da mit steigender Eindringtiefe der Einfluß des im Vergleich zum Rühthener Sandstein deutlich höhere Strömungswiderstand des Baumberger Sandsteins auf den Saugvorgang abnimmt.

Bei der Kombination 4 cm Obernkirchner und 16 cm Baumberger, zwei Materialien mit fast gleichem Wasseraufnahmekoeffizienten aber unterschiedlicher Saugspannung, ist das Aufnahmeverhalten wie das eines homogenen Materials (siehe Abb. 4 rechts). Bei umgekehrter Kombination erhält man dagegen ein Verhalten vergleichbar dem der Kombination Baumberger/Rühthener. Der Grund hierfür liegt darin, daß auch hier ein Material mit niedriger Saugkraft das Wasser durch ein Material mit hohem Strömungswiderstand saugen muß. In den Abb. 5 und 6 sind

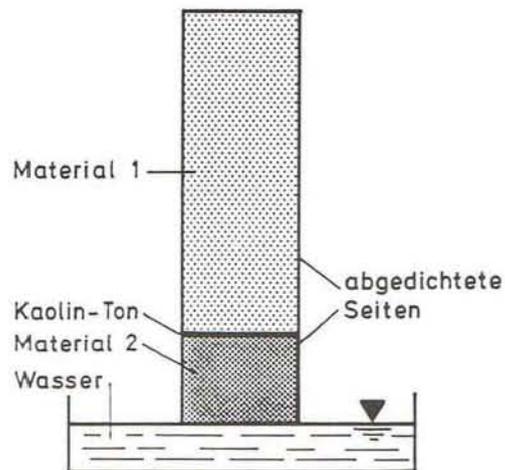


Abb. 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Wasseraufnahme über die Schichtgrenze von zwei unterschiedlichen Materialien.

*Fig. 2: Schematic representation of the test set-up for determining water absorption through the boundary layer of two different materials. The china clay provides a good hygric contact between the two specimens.*

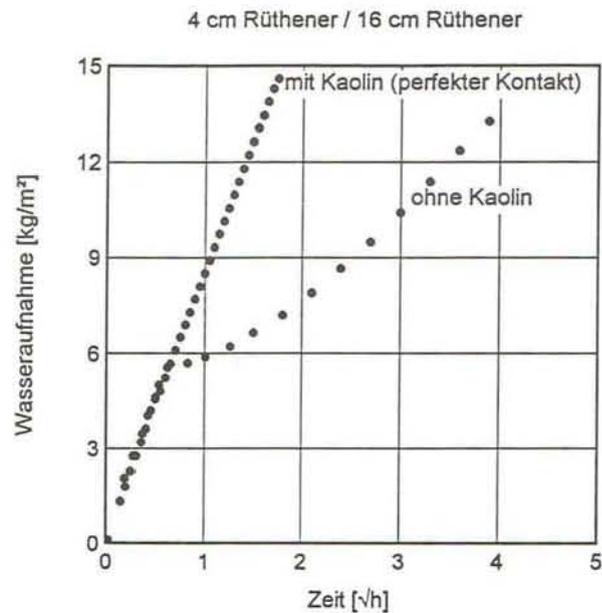


Abb. 3: Wasseraufnahme von aus Rühthener Sandstein zusammengesetzten Proben. Durch Verwendung von Kaolin läßt sich ein idealer hygrischer Kontakt erzeugen.

*Fig. 3: Water absorption of two samples composed of "Rühthener" sandstone. China clay provides an ideal hygric contact.*

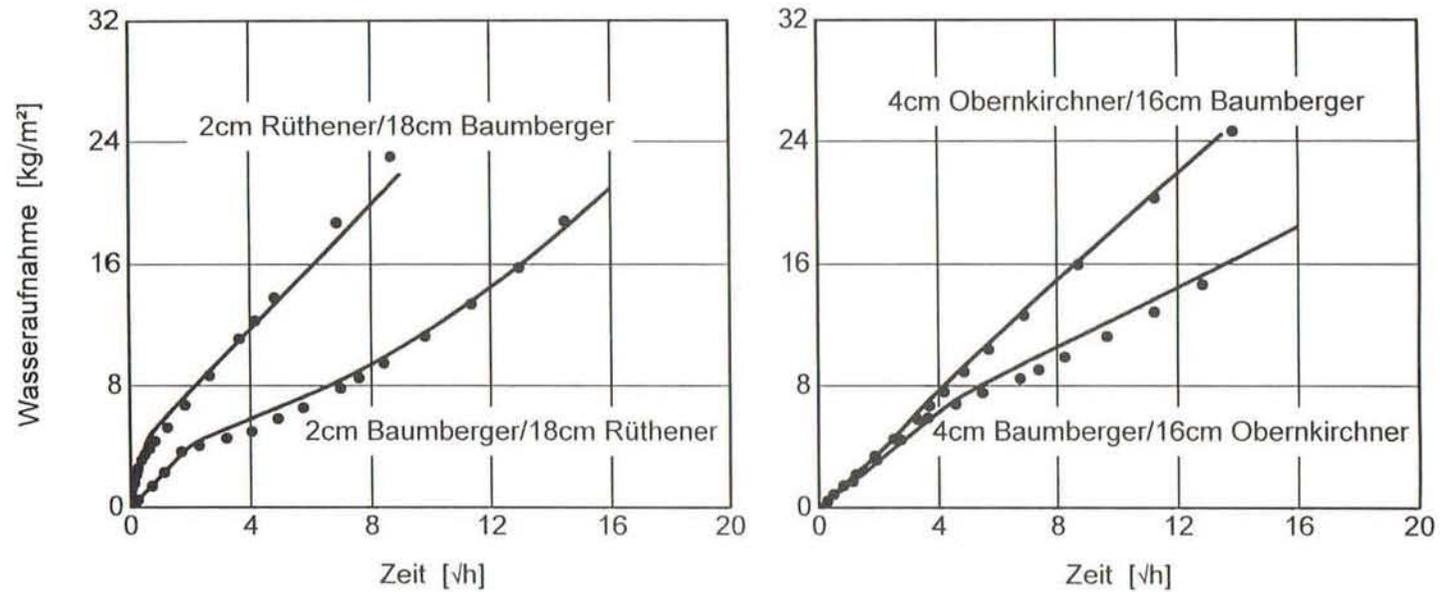


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf (Wurzel-Maßstab) der Wasseraufnahme über die Schichtgrenze von zwei in hygriem Kontakt stehenden Sandsteinproben. Links: Sandsteinproben aus Rütthener und Baumberger Sandstein. Während der Verlauf der Wasseraufnahme des Baumberger Sandsteins durch den Rütthener Sandstein nicht beeinflusst wird (linke Kurve), wird die Wasseraufnahme des Rütthener Sandsteins durch den Baumberger Sandstein stark behindert (rechte Kurve). Rechts: Sandsteinproben aus Obernkirchner und Baumberger Sandstein. Die Saugspannung des Obernkirchner Sandsteins ist aber deutlich niedriger als die des Baumberger Sandsteins. Beim Saugen des Baumberger Sandsteins aus dem Obernkirchner Sandstein heraus zeigt sich ein Verhalten wie bei einer monolithischen Probe. Bei umgekehrter Saugrichtung (rechte Kurve) zeigt sich der Einfluß der unterschiedlichen Saugspannung beider Proben.

Fig. 4: Chronological profile (root scale) of water absorption beyond the boundary layer of two sandstone specimens in hygriem contact. Left: Sandstone specimens from Rütthener and Baumberger. While the water absorption profile of the "Baumberger" sandstone is not affected by the "Rütthener" sandstone (left curve), the water absorption of the "Rütthener" is strongly retarded by the "Baumberger" sandstone (right curve). Right: Sandstone specimens from Obernkirchen and Baumberger. The suction pressure curve of the "Obernkirchner" sandstone is markedly lower than that of the "Baumberger" sandstone, however. The suction behaviour of the "Baumberger" sandstone via the "Obernkirchner" sandstone is similar to that of a monolithic specimen. Suction in reverse order (right curve) reveals the differences in suction pressure of the two specimens.

die mit Hilfe der NMR-Anlage ermittelten Wassergehaltsprofile dargestellt. Anhand der in Abb. 5 links aufgeführten Verteilungen der Kombination Rüthener/Baumberger läßt sich erkennen, daß sich der sehr schnell saugende Rüthener innerhalb kurzer Zeit vollständig bis zur freien Sättigung mit Wasser vollsaugt. Der daran anschließende Baumberger Sandstein nimmt durch den Rüthener hindurch Feuchte auf und erreicht dabei hinter der Kontaktzone zum Rüthener seine im Vergleich dazu deutlich höhere freie Sättigung. Bei der Kombination Baumberger/Rüthener erreicht der mit Wasser beaufschlagte Baumberger ebenfalls die freie Sättigung. Im Gegensatz zur umgekehrten Kombination erreicht das darauf folgende Material, also der Rüthener Sandstein, selbst nach einer Saugzeit von etwa 5 Tagen nur einen maximalen Wassergehalt, der etwa der halben freien Sättigung entspricht (siehe Abb. 5 rechts). Bei der Kombination Obernkirchner/Baumberger (Abb. 6 links) ergibt sich, wie zu erwarten, ein der Kombination Rüthener/Baumberger vergleichbares Bild, beide Materialien erreichen während des Saugvorganges ihre freie Sättigung. Bei umgekehrter Reihenfolge erreicht auch hier der schwächer saugende Obernkirchner seine freie Sättigung nicht vollständig. Wie von den gezeigten Aufnahmeverläufen her zu erwarten, ist dieser Effekt aber deutlich geringer als bei der Kombination Baumberger/Rüthener.

## 2.2 Rechenergebnisse und Vergleich mit Messungen

Die Rechnungen wurden mit dem Feuchtetransportprogramm WUFI [10] durchgeführt. Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, variiert der Wasseraufnahmekoeffizient jeder Sandsteinsorte in einem gewissen Bereich. Um die Genauigkeit zu erhöhen, wurde für die Berechnungen der an jeder einzelnen Probe gemessene Wasseraufnahmekoeffizient verwendet. Aus diesem Koeffizienten wurden gemäß [11] die exponentiellen Näherungen für die Flüssigtransportkoeffizienten berechnet; die Variationsbreiten der Koeffizienten sind in Tabelle 1 mit aufgeführt. Die berechneten Verläufe der Wasseraufnahme sind in Abb. 4 als durchgezogene Linien dargestellt. In allen Fällen ergibt sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung, die Charakteristik und die Aufnahmemenge wird (mit nur sehr geringen Abweichungen) korrekt wiedergegeben. Auch die berechneten Feuchteprofile, die ebenfalls in den Abbildungen 5 und 6 als durchgezogene Linien mit eingezeichnet sind, stimmen gut mit den gemessenen Profilen überein. Dabei ist zu bedenken, daß sich geringfügige Differenzen der Aufnahmemenge als Feuchteprofile wesentlich deutlicher bemerkbar machen als bei der Darstellung des Verlaufs der Wasseraufnahme.

---

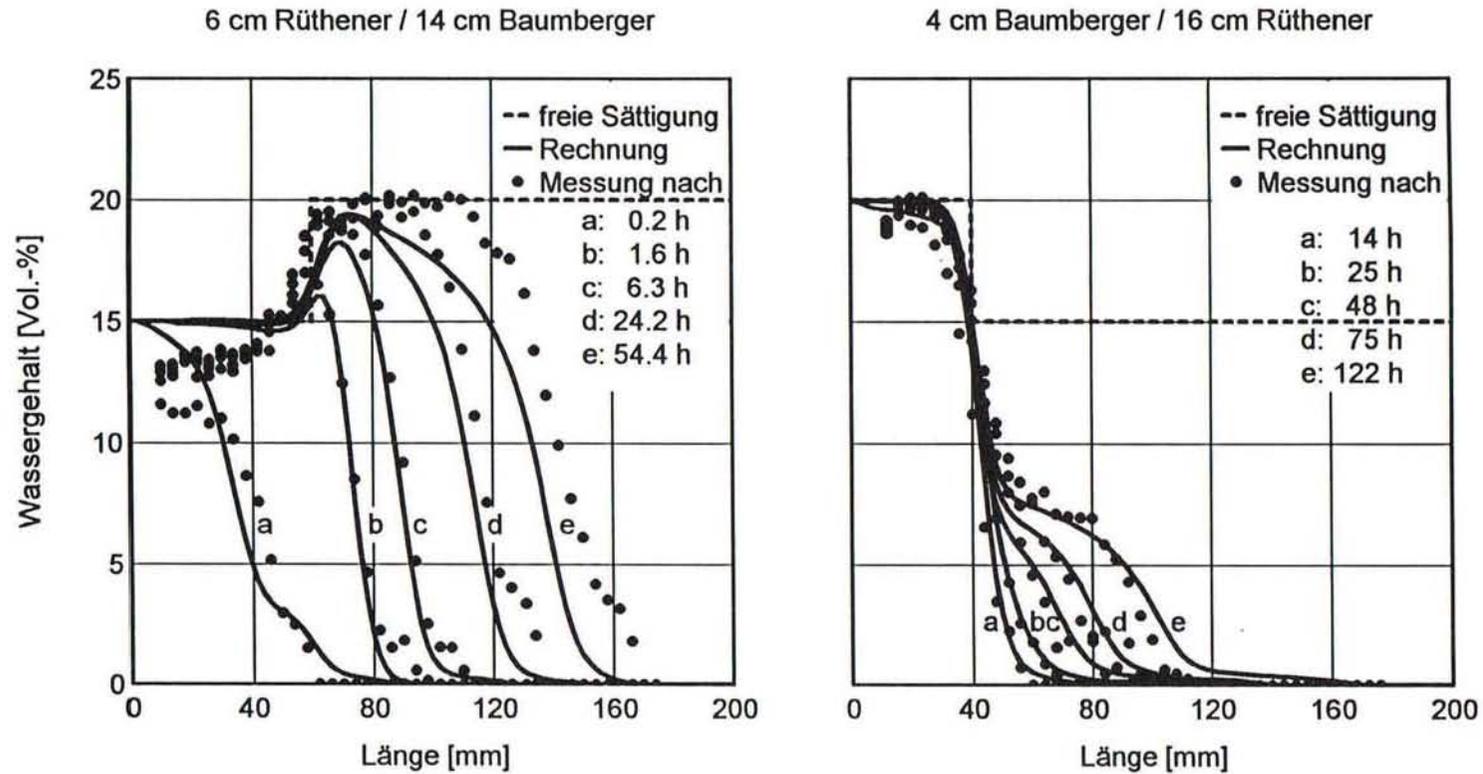


Abb. 5: Feuchtestrukturen zu verschiedenen Zeitpunkten der Wasseraufnahme von Proben aus Rüthener und Baumberger Sandstein. Während bei der Kombination Rüthener/Baumberger beide Materialien ihre freie Sättigung erreichen (linkes Bild), erreicht der Rüthener Sandstein bei umgekehrter Reihenfolge (rechtes Bild) selbst nach einer Saugzeit von über 5 Tagen nur die halbe freie Wassersättigung.

Fig. 5: Water content distributions over the depth of the specimens at different points in time during the suction of specimens composed of "Rüthener" and "Baumberger" sandstone. While in the combination of "Rüthener/Baumberger" sandstone (left) both materials reach natural saturation, the "Rüthener" in the reversed specimen (right) reaches only half the natural saturation, even after 5 days of suction.

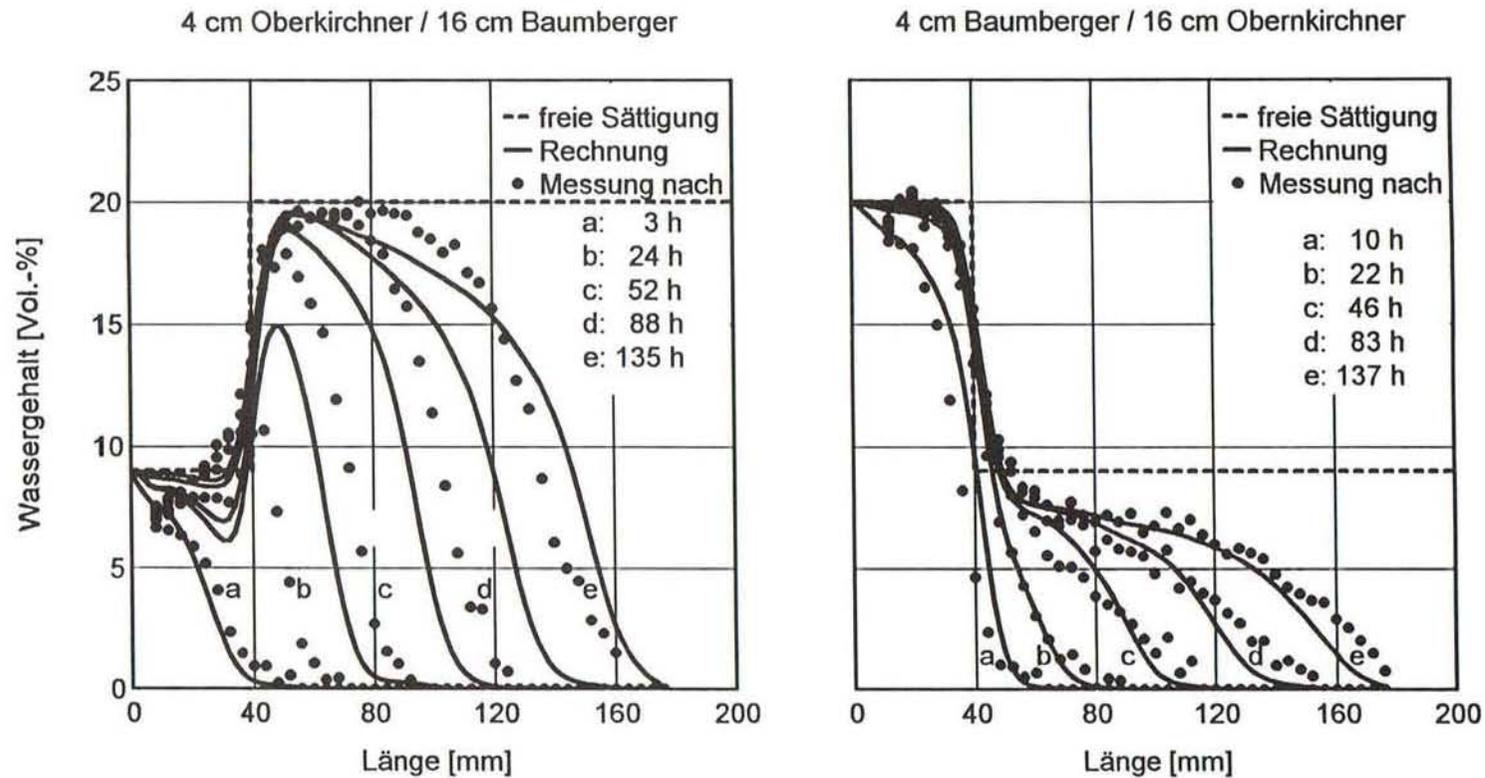


Abb. 6: Feuchteprofile zu verschiedenen Zeitpunkten der Wasseraufnahme von Proben aus Oberkirchner und Baumberger Sandstein. Während bei der Kombination Oberkirchner/Baumberger (linkes Bild) beide Materialien ihre freie Sättigung erreichen, erreicht der Oberkirchner Sandstein bei umgekehrter Reihenfolge (rechtes Bild) selbst nach einer Saugzeit von fast 6 Tagen nur etwa drei Viertel seiner freien Sättigung.

Fig. 6: Water content distributions over the depth of the specimens at different points in time during the suction of specimens composed of "Oberkirchner" and "Baumberger" sandstone. While in the combination of "Oberkirchner/Baumberger" sandstone (left) both materials reach natural saturation, the "Oberkirchner" in the reversed specimen (right) reaches only about three quarters of his natural saturation, even after nearly 6 days of suction.

### 3 Feuchte Austausch zwischen Putz und Mauerwerk

#### 3.1 Durchführung der Untersuchungen

Nachdem der kapillare Feuchte Austausch zweier hygrisch ideal verbundener poröser Materialien hinreichend erfaßt ist, wird im folgenden Kapitel der Feuchte-Transport über eine unter baupraktischen Bedingungen vorkommende "reale" Schichtgrenze zwischen Putz und Mauerwerk ausführlich untersucht. Dazu wird der Verlauf der Wasseraufnahme sowie die Ausbreitung von Feuchteprofilen im Inneren bestimmt. Zur Entwicklung eines Modells für den Feuchteübergang über die Kontaktzone werden zusätzlich Rasterelektronenmikroskopaufnahmen durchgeführt. Vergleiche zwischen den experimentell und rechnerisch gewonnen Ergebnissen sollen dieses Modell validieren.

Zur Analyse des Feuchte Austauschs zwischen kapillaraktiven Baustoffen dienen einfache Wasseraufnahmeversuche und Profilmessungen. Für beide Messungen müssen spezielle Proben hergestellt werden. Untersucht werden verschiedene Stein/Putz-Kombinationen. In Tabelle 1 sind die bauphysikalischen Grundkennwerte der untersuchten Materialien aufgeführt.

Für einige Putz/Stein-Kombinationen werden zwei unterschiedliche Kontaktarten, idealer hygrischer Kontakt und realer Kontakt untersucht. Die Herstellung der Proben für Untersuchungen zum Feuchte Austausch zwischen zwei ideal hygrisch verbundenen Materialien erfolgt analog Ziffer 2. Der Putz wird in Stahlformen hergestellt. Nach 24 Stunden Lagerung im Herstellungsraum wird der Putz weitere 4 Wochen im Feuchtkasten gelagert. Bei der Probenherstellung der natürlich verbundenen Materialien wird möglichst realitätsnah gearbeitet. Zuerst werden die Steine kurz bewässert, dann wird eine dünne Putzschicht als Haftuntergrund aufgetragen. Nach 24 Stunden Laborlagerung (20 °C und 55 % rel. Feuchte) wird dann die ca. 2 cm dicke Putzschicht aufgetragen. Zur Aushärtung des Putzes ruhen die Proben weitere 4 Wochen im Labor. Anschließend werden die Proben auf eine Grundfläche von 5 x 5 cm<sup>2</sup> formatiert und längsseitig mit Epoxidharz versiegelt. In Abb. 7 ist eine auseinandergebrochene Ziegel/Gipsputz-Kombination abgebildet. Man erkennt deutlich den sehr dünn (ca. 2 mm) aufgetragenen "Vorspritzer" und dessen Riffelung.

Die zeitabhängige Wasseraufnahme wird auch hier durch Wägung bestimmt. Für Profilmessungen ist aufgrund der zu geringen Ortsauflösung die in Ziffer 2 verwendete NMR-Anlage nicht geeignet. Die Ausbreitung der Feuchteprofile über eine Putz/Stein-Grenze wird deshalb hier mit Hilfe der Gammadurchstrahlungstechnik sichtbar gemacht [12]. Zusätzlich zu den Wasseraufnahmeversuchen und den Profilmessungen werden Rasterelektronenaufnahmen durchgeführt, die wertvolle Erkenntnisse über die Art und Qualität des Kontakts liefern.

---

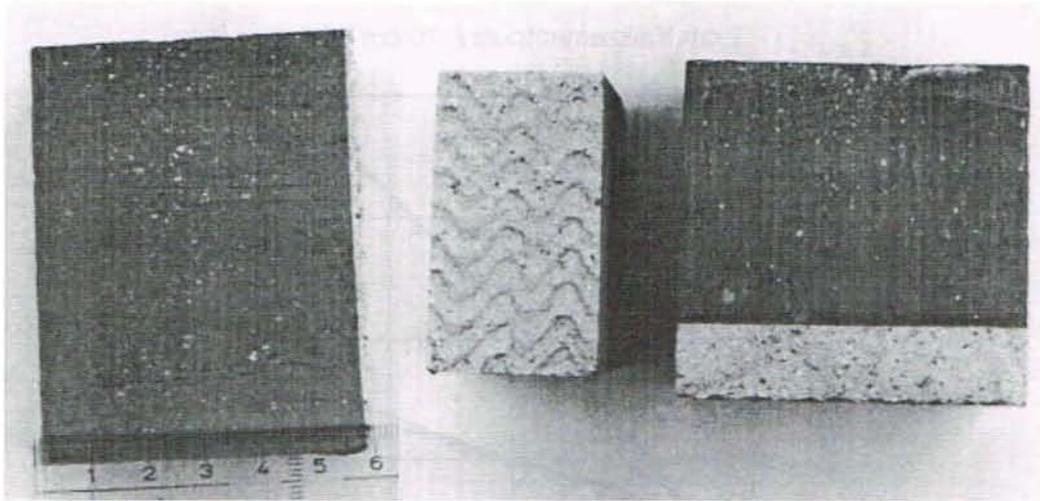


Abb. 7: Photographische Aufnahme der aus Ziegel und Gipsputz zusammengesetzten Probe. Deutlich zu erkennen ist der dünn aufgetragene "Vorspritzer" und die "Riffelung" zur besseren Haftung der zweiten Putzschicht.

*Fig. 7: Picture of a sample composed of clay brick and gypsum plaster. The thin undercoat plaster and its corrugation for a better contact can be seen clearly.*

### 3.2 Meßergebnisse

In Abb. 8 ist die kapillare Wasseraufnahme des Systems Kalkzementputz/Klinker für den idealen hygrischen Kontakt und den realen Kontakt aufgeführt. Die Meßergebnisse sind für den idealen hygrischen Kontakt als Kreise und für den realen Kontakt als gefüllte Kreise dargestellt. Die Wasseraufnahme erfolgt durch den ca. 2 cm dicken Kalkzementputz. Bis zum Erreichen der Kontaktzone verhalten sich beide Proben ähnlich. Bei beiden Proben zeigt sich ein etwas unterschiedliches Anfangssaugverhalten, das darin begründet ist, daß sich der Kalkzementputz auf dem Stein in seinen Eigenschaften anders entwickelt als in der Stahlform. Außerdem ergibt sich bei zementgebundenen Stoffen eine hohe Schwankungsbreite der Stoffkennwerte. Nach Erreichen der Kontaktzone ist das Saugvermögen bei der Probe mit realem Kontakt im Vergleich zur Probe mit idealem Kontakt deutlich reduziert. Dies bedeutet, daß bei identischer Probenzusammensetzung der Feuchte-transport über die Schichtgrenze maßgeblich durch die Art des Kontakts beeinflusst wird. Bei Versuchen mit Zementputzproben zeigt sich ein besonderes Phänomen: In Abb. 9 ist die Wasseraufnahme für das System Zementputz und Ziegel zu sehen. Die Wasseraufnahme erfolgt über den 2 cm dicken Zementputz. Bemerkenswert ist,

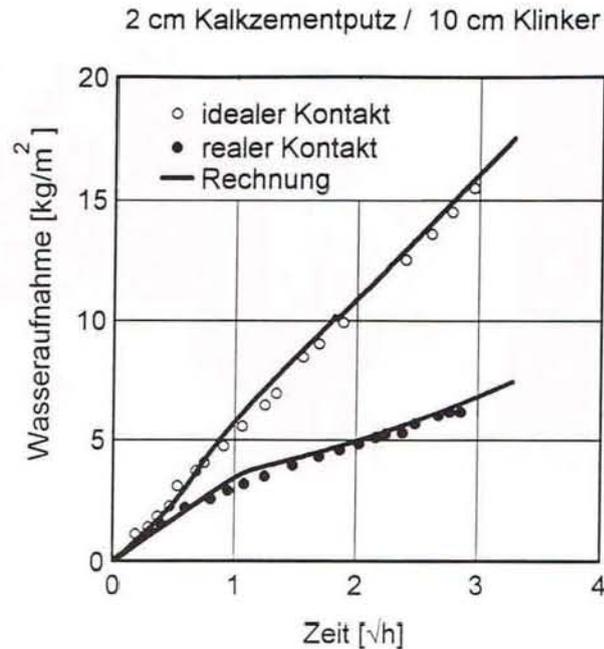


Abb. 8: Wasseraufnahme für das System Kalkzementputz/Klinker über der Zeit. Zwischen beiden Materialien liegt ein idealer hygrischer Kontakt (Kreise) oder ein realer Kontakt (gefüllte Kreise) vor. Die Wasseraufnahme erfolgt nur durch den ca. 2 cm dicken Kalkzementputz. Die berechneten Ergebnisse sind als durchgezogene Linie dargestellt.

Fig. 8: Water absorption for a system of lime cement plaster and clinker as a function of the square root of time. Between both materials there is either an ideal perfect contact (circles) or a real contact (dots). The water absorption takes place through the 2 cm thick lime cement plaster. The line represents the calculated results.

daß der Gesamtwassergehalt der Probe mit der offenen oberen Stirnseite (Kreise) nach ca. 12 "Wurzelstunden" wieder abnimmt. Bei oben abgedichteten Proben (gefüllte Kreise) strebt hingegen der Wassergehalt einem Maximalwert an. Dies bedeutet, daß bei der oben offenen Probe nach diesen 12 Wurzelstunden eine größere Menge an Wasser über die Stirnfläche verdunstet als über den Saugvorgang nachgeführt werden kann; ein mit der Zeit abnehmender Gesamtwassergehalt ist die Folge. Der Wasseraufnahmekoeffizient des Zementputzes hat somit mit der Zeit - wahrscheinlich durch Quellung des Zementsteins [13] - abgenommen.

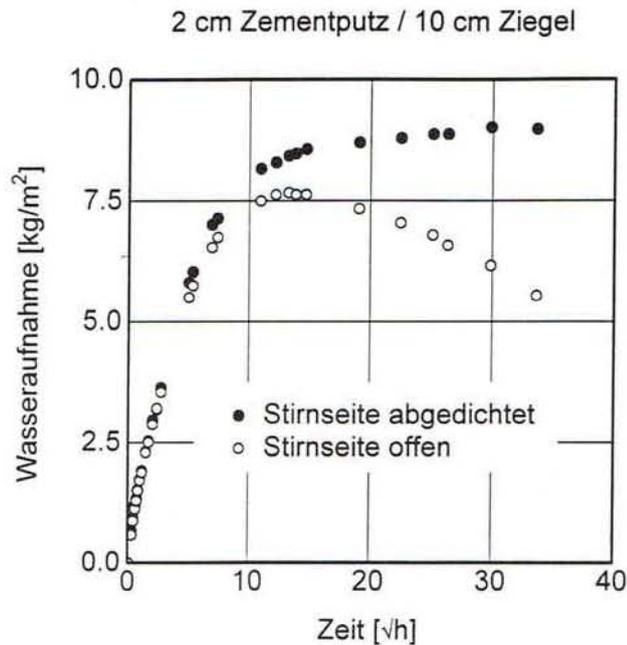


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf der kapillaren Wasseraufnahme für Kombinationen aus Zementputz und Ziegel mit und ohne Abdichtung der oberen Stirnseite. Die Wasseraufnahme erfolgt jeweils über den Zementputz.

Fig. 9: Chronological profile (root scale) of water absorption for a combination of cement plaster and clay brick with and without sealed top. The water absorption takes place through the cement plaster.

In Abb. 10 ist für die Probe, bestehend aus 2 cm Kalkzementputz und 8 cm Klinker, die Ausbreitung der Feuchteprofile, gemessen mit der Gammadurchstrahlung, dargestellt (Meßpunkte). Zwischen dem Putz und dem Stein liegt ein realer Kontakt vor. Sobald das Wasser die Schichtgrenze erreicht hat, zeigt die Wassergehaltsverteilung einen Sprung. Die Wasserausbreitung wird in der Kontaktzone eindeutig behindert. Obwohl beide Materialien einen hohen  $w$ -Wert haben, erreicht das Gesamtsystem selbst nach 80 Stunden nicht die freie Wassersättigung (Ursache für die starke Streuung der Meßwerte ist die Inhomogenität der Materialdichte).

Die beobachtete Behinderung des Feuchtetransports in der Kontaktzone zwischen beiden Materialien kann entweder mit einem mangelhaften hygrischen Kontakt aufgrund von kapillarbrechenden Mikrorissen oder mit Verstopfung von

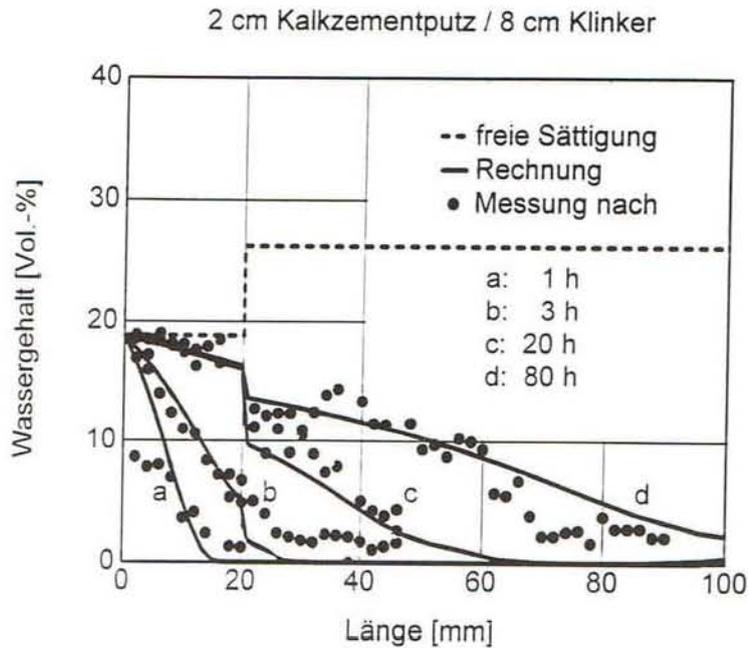


Abb. 10: Ausbreitung der Feuchteprofile in einer Probe aus Kalkzementputz und Klinker. Gemessen wird die Wasseraufnahme durch den Kalkzementputz. Die Profile (Kreise) werden mit Hilfe der Gammadurchstrahlungstechnik ermittelt. Zwischen beiden Materialien herrscht ein realer Kontakt. Die Ursache für die starke Schwankung der Meßwerte ist die Inhomogenität der Materialdichte.

Fig. 10: Time series of water content distributions in a sample of lime cement plaster and clinker. The water was absorbed through the cement plaster. The profiles were measured (dots) with the gamma-ray-attenuation method. The contact between both materials was real. The large scatter of the measured values is due to the inhomogeneous material density.

kapillaraktiven Poren begründet werden. Rasterelektronenmikroskopaufnahmen können Aufschluß darüber geben. In Abb. 11 ist die Kontaktzone zwischen Ziegel und Gipsputz in drei verschiedenen Vergrößerungen zu sehen. Im unteren Abbildungsteil ist jeweils der Ziegel, im oberen der Gipsputz abgebildet. Kapillarrisse sind nicht zu erkennen. Im Gegenteil, die beiden Materialien sind anscheinend perfekt miteinander verzahnt. Im unteren Bild ist eine Ziegelpore in unmittelbarer Nähe der Grenzschicht abgebildet. Hier kann man erkennen, daß sich in den größeren Poren des Ziegels Kristalle ausgebildet haben. Eine genauere Analyse zeigt, daß es sich um Bestandteile des Gipsputzes handeln muß. Diese

Kristalle führen zu einer Verengung der Poren in unmittelbarer Nähe der Grenzschicht. Weitere Aufnahmen zeigen, daß diese "Verstopfung" nur in unmittelbarer Nähe der Grenzschicht zu finden ist. Zu ähnlichen Aussagen führen auch Aufnahmen für Zementputz und Ziegel [12].

### 3.3 Entwicklung eines Modells

Vor allem die Rasterelektronenaufnahmen zeigen, daß es bei der Bindung des Putzes mit dem Stein zu einem perfekt verzahnten Kontakt kommt. Sie zeigen aber auch, daß in unmittelbarer Nähe der Grenzschicht in den Poren Kristalle zu finden sind, wahrscheinlich dadurch, daß beim Aufbringen des nassen Putzes auf den Stein, der Stein Wasser mit gelösten Putzbestandteilen aufsaugen kann. Die REM-Aufnahmen zeigen ferner, daß diese Kristalle nur in unmittelbarer Nähe der Grenzschicht zu finden sind. Für Berechnungen muß diese Zone also mit veränderten Materialeigenschaften mitberücksichtigt werden, indem die "Verstopfung" der Poren durch verkleinerte Transportkoeffizienten berücksichtigt wird. Alle anderen Stoffeigenschaften bleiben unverändert. Da die REM-Aufnahmen zeigen, daß diese Schicht nicht allzu groß ist, scheint eine Schichtdicke von 1 mm sinnvoll.

### 3.4 Vergleich zwischen Rechnung und Messung:

Die Berechnungen wurden ebenfalls mit dem am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelten Programm WUFI [10] durchgeführt. Die Kontaktzone zwischen Putz und Stein wird durch die oben beschriebene künstliche Widerstandsschicht berücksichtigt.

Um den Einfluß des eingeführten Widerstandes zu erläutern, sind in Abb. 12 für die Kombinationen Gipsputz/Cottaer Sandstein und Gipsputz/Ziegel die gemessenen (Meßpunkte) und die berechneten Verläufe (durchgezogene Linien) dargestellt. Der Einfluß des realen Kontaktes zwischen Putz und Stein auf den Feuchttransport wird durch die Variation der Widerstandsfaktoren nachgebildet. Deutlich zu erkennen ist, daß ohne Einführung einer Widerstandsschicht die Rechnung stark von den Meßergebnissen abweicht. Für das System Gipsputz/Cottaer (links) ist mit einem um den Faktor 500 verkleinerten Flüssigtransportkoeffizienten in der Widerstandsschicht eine gute Übereinstimmung mit der Messung zu erreichen. Bei der Kombination Gipsputz/Ziegel (rechts) muß ein Widerstandsfaktor von etwa 2000 verwendet werden.

In Abb. 8 sind zusammen mit den bereits beschriebenen Meßverläufen der Wasseraufnahme für das System Kalkzementputz/Klinker die Ergebnisse der Rechnung ebenfalls als Linie mit eingezeichnet. Für die Probe mit idealem hygrischen Kontakt ergibt sich bei der Berechnung ohne Widerstand eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung. Bei der anderen Probe erreicht

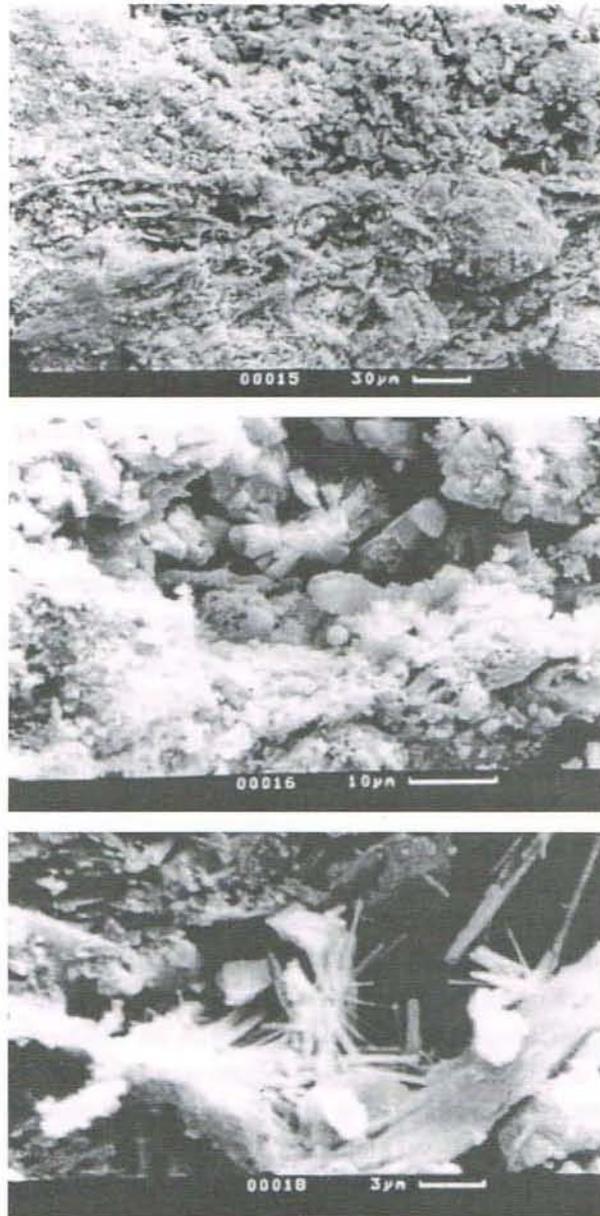


Abb. 11: Kontaktzone zwischen Ziegel und Gipsputz betrachtet in drei verschiedenen Vergrößerungen. Im unteren Bildteil ist jeweils der Ziegel, im oberen der Gipsputz abgebildet. Das untere Bild stellt eine Ziegelpore in unmittelbarer Nähe der Grenzschicht dar.

*Fig. 11: Contact zone between gypsum plaster and clay brick in three different magnifications. In the lower part of each picture is the clay brick and in the upper part the gypsum plaster. The bottom picture represents a pore of the clay brick close to the boundary.*

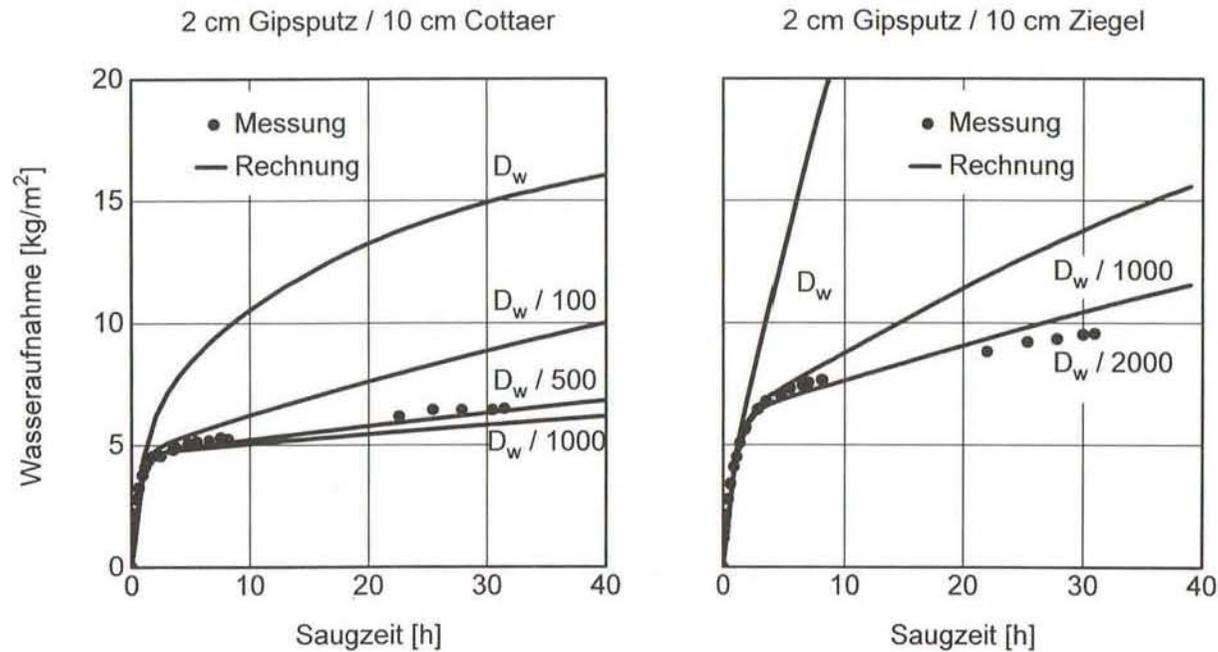


Abb. 12: Zeitverlauf der Wasseraufnahme zwischen Gipsputz und Stein. Der reale Kontakt wird durch unterschiedliche Widerstände simuliert. Links ist das System Gipsputz/Cottaer, rechts das System Gipsputz/Ziegel abgebildet. Die berechneten Profile sind als durchgezogene Linie eingezeichnet.

Fig. 12: Chronological profile of the water absorption for a combination of gypsum plaster and stone. The real contact is simulated by different resistance values. On the left, the system gypsum plaster/"Cottaer" sandstone, on the right, the system gypsum plaster/clay brick is plotted. The calculated profiles are plotted as a line.

man eine gute Übereinstimmung mit einer Widerstandsschicht mit um den Faktor 200 verkleinerten Flüssigtransportkoeffizienten.

Neben der zeitabhängigen Wasseraufnahme kann auch die Ausbreitung der Feuchteprofile mit Hilfe der "künstlichen" Widerstandsschicht mit guter Übereinstimmung zur Messung berechnet werden. In Abb. 10 sind die gemessenen und die berechneten Wassergehaltsverteilungen nach 1, 3, 20 und 80 Stunden für eine Probe, bestehend aus 2 cm Kalkzementputz und 8 cm Klinker, dargestellt. Für die Berechnung wurden die Transportkoeffizienten des Klinkers in der Kontaktzone um den Faktor 250 reduziert.

#### 4 Zusammenfassung

Das Ziel der Untersuchungen bestand darin, den Feuchtetransport über die Kontaktzone zwischen zwei kapillaraktiven Materialien mit heute bekannten Transportmodellen besser zu erfassen. Dazu wurde zuerst der kapillare Flüssigtransport zwischen zwei in idealem hygri-schen Kontakt stehenden Natursandsteinen untersucht. Die an verschiedenen Natursandsteinvarietäten durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß das Wasseraufnahmeverhalten der zusammengesetzten Prüfkörper stark abhängig von der Reihenfolge der Materialien ist. So verhält sich zum Beispiel ein aus zwei unterschiedlichen Sandsteinvarietäten mit annähernd gleichen Wasseraufnahmekoeffizienten zusammengesetzter Prüfkörper bezüglich des Wasseraufnahmeverhaltens in einer Richtung wie ein monolithisches Material. Bei umgekehrter Reihenfolge ergibt sich dagegen ein völlig anderes Verhalten.

Die Berechnung des Wasseraufnahmeverhaltens ergibt eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung; die Charakteristik und Aufnahmemengen sowie die Feuchteprofile werden mit nur sehr geringen Abweichungen korrekt wiedergegeben. Berechnungen, bei denen die Transportkoeffizienten und die Saugspannungskurve variiert wurden, zeigen einen dominanten Einfluß der Saugspannungskurve auf die berechnete Charakteristik des Wasseraufnahmeverlaufes. Dies verdeutlicht, daß eine korrekte Bestimmung der Speicherfunktion für den überhygroskopischen Feuchtebereich, z.B. mit Hilfe einer Saugspannungsmeßanlage, von entscheidender Bedeutung ist, wenn bei zwei miteinander in Kontakt stehenden kapillaraktiven Baustoffen der Feuchtetransport berechnet werden soll.

Die Untersuchungen der Transportvorgänge beim Feuchteübergang zwischen Putz und Mauerstein zeigen, daß der kapillare Feuchtetransport über die Schichtgrenze, sofern nicht künstlich ein idealer hygri-scher Kontakt hergestellt wird, behindert wird. Rasterelektronenmikroskopaufnahmen lassen vermuten, daß die Poren des Mauersteins in einer schmalen Schichtgrenze durch Kristallbildung von Salzen aus dem Putz "verstopfen". Vergleiche zwischen den experimentell gewon-

---

nenen Ergebnissen und Berechnungen mit dem PC-Programm WUFI zeigen, daß im Gegensatz zum idealen hygrischen Kontakt bei der Simulation erst durch Einführung einer Widerstandsschicht zwischen Putz und Stein eine sehr gute Übereinstimmung zu erzielen ist. Diese Schicht besitzt, bis auf verkleinerte Flüssigtransportkoeffizienten, die gleichen bauphysikalischen Eigenschaften wie der daran angrenzende Stein. Dabei zeigt sich, daß bei Annahme einer Widerstandsschichtdicke von 1 mm je nach Materialkombination eine Verringerung der Flüssigtransportkoeffizienten um einen Faktor von 200 bis 2000 anzusetzen ist. Durch die Einführung dieser Widerstandsschicht ist es nun möglich, auch den Flüssigtransport über die Schichtgrenzen zwischen Putz (oder auch Mörtel) und Mauerstein korrekt zu berechnen.

Hinsichtlich des Feuchtetransportwiderstandes zwischen Putz bzw. Mörtel und Mauerstein besteht noch Untersuchungsbedarf. Trotz der bei Laborversuchen beobachteten hohen Transportwiderstände ist bei einigen älteren Gebäuden aufsteigende Feuchte bis zu einer beträchtlichen Höhe zu beobachten. Dies könnte neben der Wahl der verwendeten Mörtel auch in der Zeitabhängigkeit des Transportwiderstandes begründet sein. Außerdem könnte die häufig mit aufsteigender Feuchte anzutreffende Salzbelastung einen großen Einfluß auf diesen Widerstand besitzen. Beim Putz ist zudem eine starke Beeinflussung durch die natürliche Bewitterung zu erwarten. Für die Untersuchungen ist es wünschenswert, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem schnell und mit einfacher Meßtechnik die Eigenschaften dieser Widerstandsschicht bestimmt werden können.

Bei Kenntnis der in der Grenzschicht ablaufenden Vorgänge ist eine genauere Bestimmung des Einflusses von Sanierungsmaßnahmen auf den Feuchtehaushalt möglich. Ein Anwendungsbeispiel wäre die Berechnung, in welchem Maße ein Sanierputz bei aufsteigender Feuchte die Durchfeuchtungshöhe vergrößern kann. Außerdem würde sich die Möglichkeit ergeben, die Effizienz von Injektionsmaßnahmen zur Vermeidung von aufsteigender Mauerwerksfeuchte vorherzusagen. Rechnungen können wertvolle Hilfestellungen zur geometrischen Anordnung der Injektionsstellen geben. Unter anderem kann geklärt werden, ob das Injektionsmittel über eine Fuge von einem Stein zum nächsten in ausreichender Menge transportiert werden kann.

## 5 Literatur

- 1 Klaas, H. und Schulz, E., *Schäden an Außenwänden aus Ziegel- und Kalksandstein-Verblendmauerwerk*, Schadenfreies Bauen; Bd. 13, IRB-Verlag 1995

- 2 Pel, L., *Moisture transport in porous building materials*. Dissertation Technische Universität Eindhoven, 1995.
- 3 Freitas, V.P., *Transferencia de humidade em paredes de edificios*. Dissertation Universidade do Porto, 1992.
- 4 Rooss, H., Niesel, K. und Hoffmann, D., *Über Phänomene des Feuchtigkeitstransports in Ziegeln und Mauerwerk*. GIT Fachzeitschrift für das Labor **32**, H. 5, 16-21 (1988)
- 5 Künzel, H., und Schwarz, B., *Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Berechnung*. Berichte aus der Bauforschung, H. 51, 99-113. Verlag Ernst & Sohn, 1968.
- 6 Witsch, C., und Waubke, N.V., *Versuche zur effektiven Steighöhe in Mauerwerkskörpern*. Mitteilungen aus dem Institut für Baustofflehre und Materialprüfung , 45-51 (1990)
- 7 Prim, P., *Kapillares Saugen durch eine Grenzfläche*. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen **2**, 259-265 (1996)
- 8 Klier, M., *Kapillarer Feuchteausaustausch in verschiedenen Baustoffen. Feuchteprofilmessungen im Kontaktbereich der Baustoffe und Erweiterung vorhandener Modellansätze*. Diplomarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München, Sektion Physik, 1995.
- 9 Krus, M., *Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken*. Dissertation Universität Stuttgart, 1995.
- 10 Künzel, H.M., *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*. Dissertation Universität Stuttgart, 1994.
- 11 Krus, M., *Determination of  $D_w$  from A-value*. IEA-Annex 24 Project Report T3-D3/01.
- 12 Holm, A., *Bestimmung des Feuchteausaustausches zwischen Putz und Mauerwerk*. Diplomarbeit, Technische Universität München, Physik Department, 1996.
- 13 Krus, M., Hansen, K.K., Künzel, H.M.: *Porosity and liquid absorption of cement paste*. (Erscheint demnächst in 'Materials and Structures').

#### Danksagung

Diese Untersuchungen wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unterstützt. Die Rasterelektronenmikroskopieaufnahme wurde dankenswerterweise von der Zentralen Objektteilung der Firma Remmers in Münster durchgeführt.