

Vergleich experimenteller und rechnerischer Ergebnisse anhand des Austrocknungsverhaltens von Ziegelwänden.

M. Krus
H.M. Künzel

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR BAUPHYSIK
(Leiter: Prof. Dr. Dr. h.c. Dr. E.h.mult. Karl Gertis)

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Dämmwirkung eines Leichtziegelmauerwerks besteht in der Verwendung von Wärmedämmputzen. Im Rahmen eines Untersuchungsvorhabens wurde der Einfluß der zum Teil wasserabweisend eingestellten Dämmputzsysteme auf das Trocknungsverhalten des baufeuchten Mauerwerks durch Vergleich mit Messungen an konventionell verputztem Mauerwerk untersucht. Außerdem wurden die unter praktischen Klimaeinwirkungen erreichbaren realen Wärmedurchgangskoeffizienten ermittelt. Mit dem PC-Programm WUFI wurden Simulationsrechnungen durchgeführt und die Rechenergebnisse mit den experimentell gewonnenen Ergebnissen verglichen. Dabei ergab sich erstmals die Möglichkeit, neben den Feuchte- und Temperaturverteilungen auch gemessene Wärmestromdichten miteinzubeziehen. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung der berechneten Feuchteprofile und Wärmestromdichten mit den experimentell ermittelten Werten. Damit ist es gerechtfertigt, durch Berechnungen Aussagen über das langfristige Austrocknungsverhalten und den damit verbundenen Verlauf der Wärmedurchgangskoeffizienten zu treffen.

Durchführung der Untersuchungen

Meßaufbau

Die Prüfwände des Versuchshauses bestehen von innen nach außen aus einem ca. 1,5 cm dicken Kalk-Gips-Innenputz, Leichtziegelmauerwerk und unterschiedlichen Außen- bzw. Dämmputzen. Es werden für die folgende Auswahl an Varianten Ergebnisse vorgestellt und Vergleichsrechnungen durchgeführt (die Untersuchungsergebnisse der hier nicht aufgeführten Ziegelwände sind in [1] ausführlich beschrieben):

- Referenz-Wände aus 36,5 cm dickem Leichtziegelmauerwerk mit 2 cm mineralischem Außenputz (PII), mit N-Orientierung und mit S-Orientierung,
- 30 cm Leichtziegelmauerwerk mit Wärmedämmputz mit mineralischem Zuschlag, 6 cm dick, mit S-Orientierung.

Die thermischen Untersuchungen über die Winterperiode von November 1994 bis März 1995 zur Bestimmung von Wärmeströmen wurden wie folgt durchgeführt: Bei den Wänden mit Dämmputz ist im Wandinneren, d.h. zwischen Mauerwerk und Dämmputz, ein Wärmeflußmesser etwas über halber Wandhöhe eingebaut, bei den Wänden mit normalem Außenputz ist dieser auf der

raumseitigen Wandoberfläche angebracht. Die Innenlufttemperatur wird auf 20 °C konstant gehalten.

Die Bohrkernentnahmestellen zur Bestimmung der Feuchteverteilungen zu verschiedenen Zeitpunkten sind je Prüfwand oberhalb des Sockelbereiches in ca. 90 cm Höhe angeordnet. Mit einem Trockenkernbohrer (Durchmesser 60 mm) werden Bohrkern entnommen und in mehrere Scheiben geteilt. Die Bohrlöcher werden mit abgedichteten Bohrkernen wieder verschlossen. Die Feuchtebestimmung erfolgt massebezogen durch Lagerung der Bohrkernscheiben bis zur Massekonstanz im Trockenschrank bei 40 °C und trockener Luft.

Das Untersuchungsmaterial für die Bestimmung von Stoffeigenschaften an Putz-Laborproben wurde im Zuge des Putzauftrages unter anwendungstechnischen Bedingungen (Mischer: Quirl bzw. Putzmaschine) in die entsprechenden Probenformen gefüllt. An den Putz-Laborproben wurden die Diffusionswiderstandszahl μ , der kapillare Wasseraufnahmekoeffizient w , die Sorptionsfeuchte und der Trockenwert der Wärmeleitfähigkeit ermittelt. Die feuchtetechnischen Kennwerte der Leichtziegel, die aus Messungen an Ziegelscheiben abgeschätzt wurden, sind zusammen mit denen der Putze in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1 Feuchtetechnische Materialkennwerte

Material	Rohdichte [kg/m ³]	Sorption $u_{v,80}$ [Vol.-%]	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda_{10,tr}$ [W/mK]	w-Wert ¹⁾ w ₂₄ -Wert ²⁾ [kg/m ² √h]	μ -Wert [-]
Leichtziegel	800	0,9	0,2	3,4 ¹⁾	15
Normalputz	1800	1,5	0,8	1,5 ¹⁾	19
Dämmputz	650	1,4	0,118	0,1 ²⁾	6

Rechnerische Untersuchungen

Für die Berechnung der am Versuchshaus aufgetretenen Wärme- und Feuchtetransportvorgänge wurde ein am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickeltes Rechenverfahren [2] eingesetzt, mit dem bei Verwendung einfacher Stoffkennwerte eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Feuchteverteilungen erreichbar ist (z.B. [3,4,5]). Die Berechnungen beginnen mit dem Zeitpunkt der ersten Probennahme im März 1994 (die ermittelten Feuchteverteilungen wurden als Ausgangswerte eingesetzt) und enden mit der 3. Probennahme im April 1995. Es wurden für die klimatischen Randbedingungen die am Institut gemessenen Stundenmittelwerte von Temperatur, Strahlung, relativer Luftfeuchte und Regen verwendet. Dabei wurden die auf die Oberfläche auftreffende Strahlung für die jeweilige Ausrichtung der Wand aus Direkt- und Diffusstrahlung und der Schlagregen aus Normalregen, Windrichtung und -geschwindigkeit berechnet. Als

Stoffkennwerte werden, soweit verfügbar, die jeweils gemessenen (siehe Tabelle 1) oder Werte aus der Materialdatenbank des Rechenprogramms eingesetzt.

Zusätzlich zu den Vergleichsrechnungen wurden zur Bestimmung des Einflusses verschiedener Wandaufbauten (normal verputzt, mit Wärmedämmputz und mit Wärmedämmverbundsystem) auf das Austrocknungsverhalten des Ziegelmauerwerks und damit auf den zeitlichen Verlauf des Wärmedurchgangskoeffizienten weitere Rechnungen über einen Zeitraum von 5 Jahren durchgeführt. Die bereits verwendeten Klimajahresdaten wurden dazu mehrmals hintereinander durchlaufen. Für die Berechnungen wurde davon ausgegangen, daß im Ende Oktober fertiggestellten Mauerwerk ein durch Regenbelastung hervorgerufener, relativ hoher, aber realistischer Wassergehalt entsprechend der halben freien Sättigung (7,5 Vol.-%) vorliegt. Alle drei Wände sind nach Süden ausgerichtet.

Ergebnisse der Messungen und Vergleich mit Berechnungen

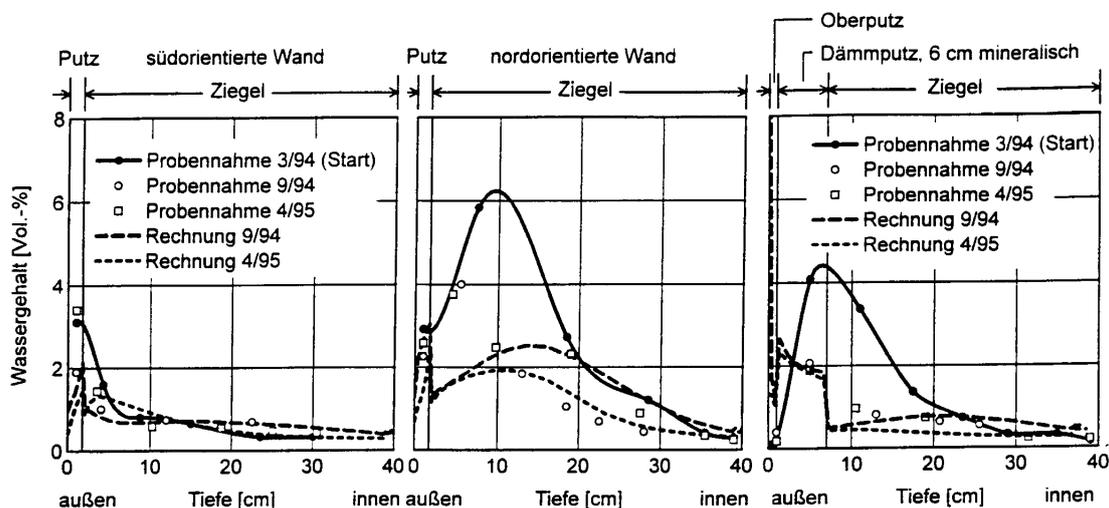


Bild 1 Gemessene und berechnete Wassergehaltsprofile der untersuchten Ziegelwände

In Bild 1 sind für die südorientierte (linkes Bild) und die nordorientierte (mittleres Bild) normal verputzte Ziegelwand die durch Bohrkernentnahme ermittelten Feuchteprofile für drei Zeitpunkte (3/94, 9/94 und 4/95) dargestellt. Zum Zeitpunkt der Probennahme im März 1994 war der Rohbau bereits etwas über ein Jahr fertiggestellt. Dies führt dazu, daß in der südorientierten Wand nur noch in der oberflächennahen Zone erhöhte Feuchtegehalte vorzufinden sind. In der nordorientierten Wand liegen wegen der fehlenden solaren Erwärmung der Wand zu diesem Zeitpunkt noch deutlich höhere Wassergehalte vor. Im darauffolgenden halben bzw. ganzen Jahr trocknet die Südwand mit ihrem niedrigen Anfangswassergehalt nur noch unwesentlich weiter aus, während in der Nordwand eine deutliche Abnahme des Wassergehaltes zu beobachten ist. Die Ergebnisse der Berechnungen sind als gestrichelte Linien mit eingezeichnet. Bei der Südwand ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten Feuchteprofile in der Ziegelwand mit den gemessenen. Im Putz sind die Abweichungen allerdings etwas größer. Dabei ist jedoch zu bedenken, daß der

Feuchtegehalt des Putzes stark abhängig ist von kurzfristigen Regenereignissen kurz vor der Probennahme. Bei der nordorientierten Wand weichen die berechneten Feuchteverteilungen etwas deutlicher von den gemessenen ab. Berücksichtigt man, daß für die Bestimmung der Feuchteverteilung jeweils nur eine Probe an verschiedenen Stellen der Wand genommen wurde, dann können diese Abweichungen mit örtlichen Unterschieden der Wassergehalte aufgrund von Inhomogenitäten im Material oder örtlich unterschiedlichen Mengen beim Bau eingetragener Feuchten begründet werden. Für die Ziegelwand mit Dämmputz sind die gemessenen Feuchteverteilungen in Bild 1 rechts dargestellt. Bei der Probennahme im März 1994 liegen nur im äußeren Drittel der Wand hohe Feuchtegehalte vor. Die Ziegel trocknen bis zur nächsten Probennahme im September 1994 bis auf knapp oberhalb des praktischen Feuchtegehaltes von etwa 0,5 Vol.-% aus. Der Wassergehalt des Dämmputzes halbiert sich im gleichen Zeitraum von 4 Vol.-% auf 2 Vol.-% (praktischer Feuchtegehalt der Laborproben 1,4 Vol.-%). Die als gestrichelte Linien mit eingezeichneten Rechenergebnisse zeigen, daß die Berechnungen das Austrocknungsverhalten der Wände gut wiedergeben.

Wärmeströme

Die an der süd- und nordorientierten normal verputzten Ziegelwand mit Hilfe von Wärmeflußmessern ermittelten Wärmeströme sind als Wochenmittelwerte in Bild 2 für den Zeitraum von November 1994 bis März 1995 eingezeichnet (Punkte). Die südorientierte Wand (Bild 2 oben) zeigt wegen der solaren Strahlungsgewinne über die Meßzeit gemittelt um mehr als 15 % niedrigere Wärmeverluste als die nordorientierte Wand (Bild 2 Mitte). Die Rechenergebnisse (Linien) stimmen für beide Wände gut mit den Messungen überein, auch der Einfluß der geographischen Ausrichtung der Wand auf die Wärmeverluste wird korrekt wiedergegeben. Bei der mit Dämmputz versehenen Wand ist der Wärmestrom durch die im Vergleich zum Ziegel niedrigere Wärmeleitfähigkeit des Dämmputzes weiter reduziert. Auch hier ergibt die Rechnung eine recht gute Übereinstimmung mit den meßtechnisch gewonnenen Ergebnissen.

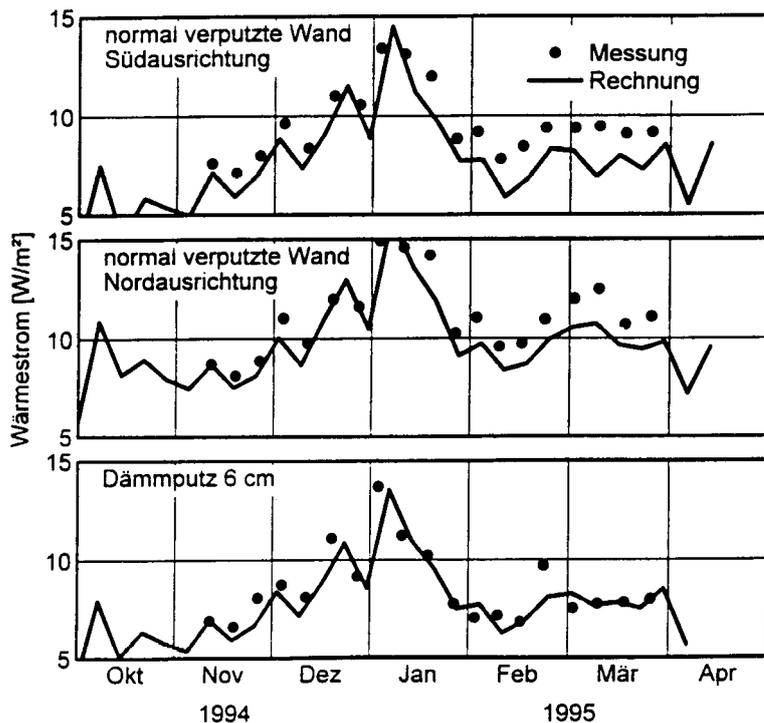


Bild 2 Verlauf der gemessenen und berechneten Wärmeströme
Austrocknungsverhalten und Einfluß auf Dämmwirkung

Nachdem die Vergleiche zwischen rechnerischen Untersuchungen und Messungen der instationären Feuchteverteilungen sowie der Wärmeströme über einen längeren Zeitraum eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse zeigen, können bei ähnlichen Fragestellungen Rechnungen genauso gesicherte Ergebnisse bringen wie Messungen. Sie haben jedoch den Vorteil, daß das langfristige Verhalten durch solche Berechnungen sehr rasch abgeschätzt werden kann. Hinzu kommt natürlich als weiterer Vorteil, daß die Berechnungen wesentlich kostengünstiger durchgeführt werden können als meßtechnische Untersuchungen.

Das Austrocknungsverhalten von folgenden drei unterschiedlichen Wandaufbauten wurde berechnet:

- Normal verputzte Wand aus 36,5 cm dickem Leichtziegelmauerwerk
- 30 cm Leichtziegelmauerwerk mit 6 cm dickem Wärmedämmputz
- 24 cm Leichtziegelmauerwerk mit 6 cm Wärmedämmverbundsystem mit Mineralwolle (040) als Dämmstoff

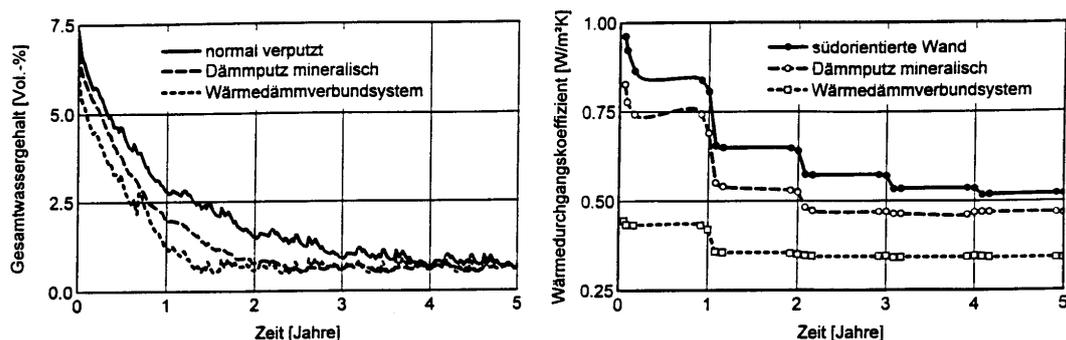


Bild 3 Berechneter Verlauf des mittleren Wassergehaltes (links) und des Wärmedurchgangskoeffizienten (rechts) für einen Zeitraum von 5 Jahren nach Erstellung der Wände

Austrocknung der Wände

In Bild 3 links ist für alle drei Wandkonstruktionen der Verlauf des mittleren Wassergehaltes über einen Zeitraum von fünf Jahren dargestellt. Die normal verputzte Wand trocknet stetig aus, bis sie etwa Ende des vierten Jahres einen zeitlich konstanten mittleren Wassergehalt erreicht, der etwa dem Sorptionsfeuchtegehalt u_{80} des Ziegels von 0,5 Vol.-% entspricht. Die mit Dämmputz versehene Wand trocknet im Vergleich dazu wesentlich schneller aus. Bereits nach etwas mehr als zwei Jahren ist die Wand bis auf diesen Sorptionswassergehalt ausgetrocknet. Ausgehend von etwas niedrigerer Ausgangsfeuchte erreicht die Wand mit Wärmedämmverbundsystem diesen Zustand noch etwa ein halbes Jahr früher.

Verlauf der Wärmedurchgangskoeffizienten

Für die in Abhängigkeit von der Zeit vorliegenden Feuchteverteilungen lassen sich mit Hilfe des Programms WUFI auch die Wärmedurchgangskoeffizienten berechnen. Für verschiedene Zeitpunkte der dem Aufbau der Wand folgenden Heizperioden (in den Sommerperioden ist der Wärmedurchgangskoeffizient von untergeordneter Bedeutung) ist der Wärmedurchgangskoeffizient mit der jeweiligen Feuchteverteilung unter quasistationären Bedingungen berechnet worden.

Bei der normal verputzten Wand sinkt der Wärmedurchgangskoeffizient, ausgehend von einem sehr hohen Wert von über $0,97 \text{ W/m}^2\text{K}$, stufenweise innerhalb der nächsten drei Heizperioden auf etwa $0,51 \text{ W/m}^2\text{K}$. Dies bedeutet, daß in der ersten Heizperiode aufgrund der Baufeuchte annähernd doppelt so hohe Heizwärmeverluste auftreten wie nach mehreren Jahren, wenn die Wand auf den Endfeuchtegehalt ausgetrocknet ist. Die mit Dämmputz versehene Wand zeigt bezüglich des Wärmedurchgangskoeffizienten einen ähnlichen Verlauf. Allerdings beträgt bei ihr der Anfangswert $0,82 \text{ W/m}^2\text{k}$ und bereits nach etwa

zwei Jahren ist bei ihr der Endwert von $0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht. Deutlich anders sieht der Verlauf der Wand mit Wärmedämmverbundsystem aus. Bereits von Anfang an liegt ihr Wärmedurchgangskoeffizient ($0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$) unterhalb des Endwertes beider anderen Wände. Nach nur einem Jahr ist mit $0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei dieser Wandkonstruktion ein Endwert erreicht. Der langfristige Wärmedurchgangskoeffizient der normal verputzten Wand liegt damit immerhin um fast 50 % und der mit Dämmputz versehenen Wand um über 30 % höher als bei dieser Wandkonstruktion.

Literatur

- [1] Riedl, G., Holz, D. und Kießl, K.: Wärmedämmputz auf Leichtziegelmauerwerk. Wärme- und feuchtetechnische Untersuchungen an Versuchswänden. IBP-Bericht FtB-47/1995.
- [2] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Diss. Universität Stuttgart 1994.
- [3] Künzel, H.M.: Untersuchung des Austrocknungsverhaltens von im CSO-Verfahren applizierten Wärmedämmschichten aus Isofloc. IBP-Bericht FtB-18/1992.
- [4] Künzel, H.M.: Rechnerische Untersuchungen des Langzeit-Feuchteverhaltens von Wärmedämmschichten in Umkehrdächern mit Begrünung. IBP-Bericht FtB-23/1993.
- [5] Krus, M., Künzel, H.M. und Klier, M.: Liquid transport over the boundary layer of two different hygroscopic capillary active materials. Beitrag zur Tagung des IEA-Projektes Annex 24, Holzkirchen 1993.