

## Direkte Messung effektiver Eindringtiefen von Feuchtedämpfung im Lehmputz

Hygroskopische Materialien können auf passive Weise die Luftfeuchte im Innenraum regulieren. Die Nutzung solcher Materialien hat vorteilhafte Auswirkungen auf den Wohlkomfort, den Energiebedarf, die Gesundheitsförderung und das Wohlergehen der Bewohner. Im Vergleich zu anderen Baustoffen zeichnet sich besonders Lehm mit seinen physiochemischen Eigenschaften als hervorragendes Pufferungsmaterial aus. Lehm wird als Baustoff für verschiedenen Anwendungen genutzt, sowohl zum Bauen als Stampflehm oder als Steine im Mauerwerk oder als Lehmputz. Demzufolge kann die dem Innenraumklima ausgesetzte Dicke vom Lehm im Bau von 3 mm für Lehmputz bis 40 cm für eine gebaute Wand variieren. Bis zu welcher Lehmtiefe Feuchte gedämpft werden kann, hängt nicht nur von den Innenraumbedingungen, sondern auch von den Baustoffen ab.

Die relative Feuchtigkeit in Innenräumen ist eng verbunden mit der Luftqualität. Beide beeinflussen die Gesundheit und das Wohlergehen der Bewohner. Wenn RH Werte zwischen 40-60% (nach Rode et al., 2005) eingehalten werden können, beeinflusst das die Gesundheit der Bewohner. So können Risiken durch Bakterien, Viren, chemische Reaktionen, Allergien und Atemwegsinfektionen reduziert werden.

Sobald sich die relative Luftfeuchtigkeit (RH) verändert kann ein Baustoff Feuchte aufnehmen oder abgeben um ein Gleichgewicht zu erreichen. Diese dynamische Eigenschaft wird allgemein als Feuchtedämpfung (Pufferung) bezeichnet und kann in Baustoffen sehr verschieden auftreten (Rode et al., 2005 und Padfield, 1998). Die Wirksamkeit eines Materials bezieht sich auf die vorhandene Oberfläche, Porosität und andere physiochemische Eigenschaften des Baustoffs. Padfield (1998) führte die erhöhte Feuchtepufferung von Lehm-Baustoffen auf im Vergleich zu anderen konventionellen Materialien. McGregor et al.

(2015) kommentierte, dass diese hervorgerufen wird durch die hygroskopische Eigenschaft von Lehm, herrührend von der besonderen physiochemischen Struktur der Tonmineralien. Wie in Abb. 1 gezeigt wird, ist die Gewichtszunahme von Lehmputzen gegenüber Kalk- oder Gipsputzen signifikant größer bei einem identischen Anstieg der relativen Raumfeuchte.

Forschungen haben zugenommen im Bereich der Feuchtedämpfungseigenschaften von Baustoffen, die normalerweise nicht mit dem Mikroklima in Gebäuden verbunden werden. Dazu gehören hygrometrische Isoliermaterialien wie Hanf, Kalk (Collet et al., 2013, Latif et al., 2015) sowie Konstruktionsbauteile wie Lehm-Mauerwerk (McGregor et al., 2014 und Ashour et al., 2015).

In einer schwankenden RH Umgebung, die typisch ist für weltweites Gebäude-internes Mikroklima besagt die Aufnahmekinetik, dass Feuchtigkeit nur bis zu einer bestimmten Tiefe eindringen kann bevor sie wieder abgegeben wird. Verschiedene Tests während einer 24 Stunden Periode zeigten unterschiedliche Schwankungen. Die Werte von Feuchtigkeitsdämpfung in Substratmaterialien unter der freiliegenden Oberfläche haben nur unbedeutenden Einfluss auf die relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum im Vergleich zur verputzten Oberfläche.

Die Vorgabe für die Studie ist die effektive Lehmputzstärke mengenmäßig zu bestimmen. Das wurde durch experimentelle Feuchtigkeitspufferungstests mit unterschiedlichen Putzstärken erreicht. Ergänzend zur Feststellung der effektiven Eindringtiefe des Prüfmaterials kann diese Methode auch bei anderen Materialien verwendet werden. Von Bedeutung ist so die Fähigkeit das Minimum der erforderlichen Putzstärke zu bestimmen, um eine maximale Wirksamkeit der Feuchtigkeitsregulierung zu erreichen.

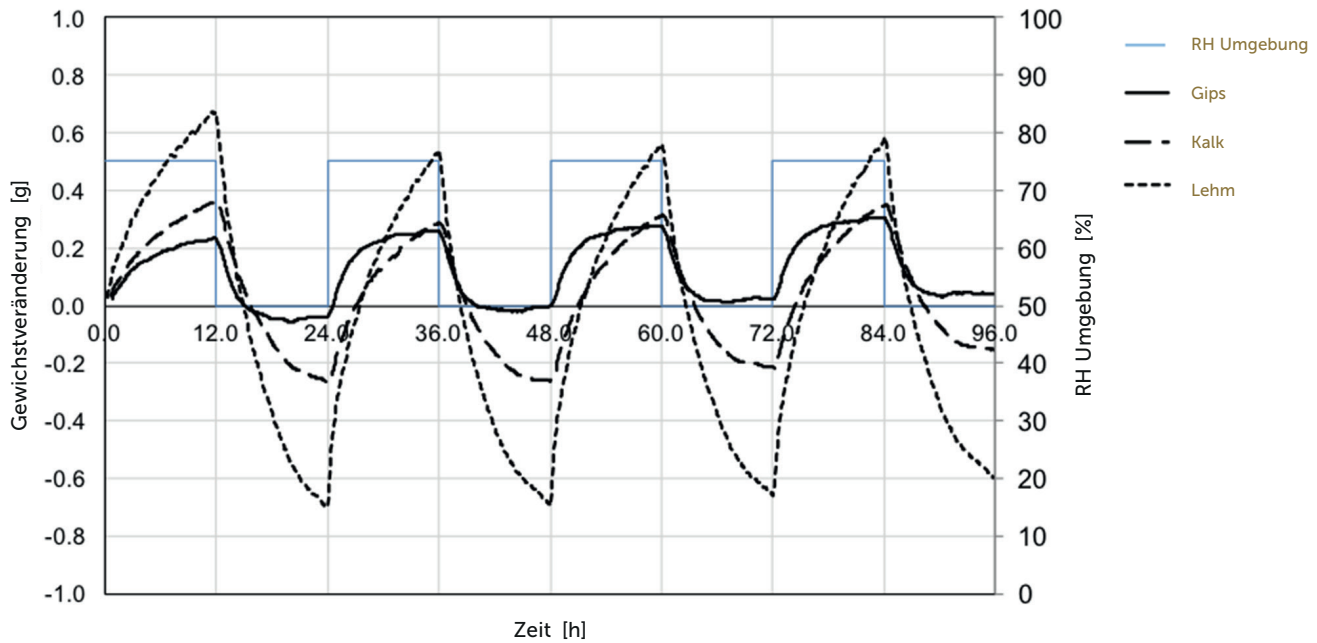


Abb. 1 Gewichtsveränderungen unter dem Einfluss sich verändernder relativer Raumfeuchte

### Theoretische Eindringungstiefe

Während die experimentelle Untersuchung der effektiven Eindringungstiefe in den Lehmputz der Hauptfokus der Forschung ist, bietet der NORD Test (Rode et al., 2005) eine numerische Methode der Annäherung. Es gibt verschiedene Kalkulationsmöglichkeiten für die theoretische Eindringungstiefe. McGregor et al., 2015 mit Woods et al., 2013, bemerken, dass es unterschiedliche Verfahren gibt für die Feststellung von Kurzzeit- und Langzeit Pufferungswirkungen.

Die theoretische Tiefenmessung einer Probe kann mit dem Kitchoff Potenzial berechnet werden, der den Feuchtigkeitstransport beschreibt. Die NORD Test Methode schlägt eine Vereinfachung der Annäherung vor, basierend auf der sinusförmigen Variation des Feuchtigkeitsgehalts  $u$ , in Anbetracht des exponentiellen Abfalls der Amplitude der Oberfläche  $\Delta u_s$  bis zu einer Tiefe von  $dp$ , wie in Formel 1 angegeben. Die errechnete „Eindringungstiefe“ wird üblicherweise benannt für eine Feuchtigkeitsvariation von  $<1/e\%$  oder 1% entsprechende der Oberflächenvariation (nach McGregor et al., 2015)

$$\frac{\Delta u_x}{\Delta u_s} = e^{-dp \sqrt{\frac{\pi}{D_w t_p}}} \quad (1)$$

wo

$\Delta u_x$  = die Amplituden,

$t_p$  = Periode der Ablaufzeit (s), und

$D_w$  = Diffusionsvermögen der Feuchtigkeit ( $m^2/s$ )

Das Diffusionsvermögen der Feuchtigkeit hängt vom spezifischen Feuchtigkeitswert und der Wasserdampfdurchdringbarkeit ab, die in zwei separaten Tests untersucht werden können. Der spezifische Feuchtigkeitswert wird nach der dynamischen Wasserdampfabsorption berechnet, die Wasserdampfdurchdringbarkeit wird als Teil der Bestimmung des Widerstandes gegen die Wasserdampfausbreitung errechnet. Zusätzliche Berechnungen folgen um alle notwendigen Variablen für Formel 1 zu errechnen. Deshalb ist eine direkte Methode zum Messen der effektiven Eindringungstiefe einer zu errechnenden Einschätzung vorzuziehen.

### Baustoffe und Methoden

#### Materialien

Zwei kommerziell verfügbare Lehmputze wurden für die Untersuchungen ausgewählt. Diese Putze bestehen aus Mischungen für Unterputz und Deckauflage und sind konform mit dem einzigen europäischen Standard für Lehmputze nach DIN 18947. Sie besitzen nur feine physikalische und chemische Unterschiede, die veränderliche Feuchtigkeitspufferungswerte hervorrufen.

Abb. 2 zeigt die beiden für die Tests untersuchten Lehmputze. Beide Standard Mischungen werden hier mit „Deckschicht“ und „Unterschicht“ bezeichnet. Der Deckschichtputz ist eine Mischung, die aus Lehm, Sand und Flachsfasern besteht. Der Unterschichtputz

ist ein Lehmsandgemisch. Beide Putze können beschrieben werden als rot-braun-sandiges Schluffgemisch mit einem Plastizitätswert ähnlich dem von Schlick mit niedriger Plastizität und den in Tabelle 1 beschriebenen Eigenschaften.

#### Versuchsmethode

Das Hauptziel der Studie ist eine Versuchsmethode zu entwickeln für die Feststellung der effektiven Eindringungstiefe der Feuchtigkeitspufferung. Zusätzlich zu der Messung der Werte der Feuchtigkeitsdämpfung werden auch mechanische Eigenschaften bestimmt. Alle Tests wurden dreifach durchgeführt, 28 Tage nach dem Fertigstellen der Proben, die bei 23 Grad Celsius und 50% relativer Luftfeuchtigkeit (RH) gelagert wurden.

#### Physikalische und mechanische Eigenschaften

Die Massendichte der abgebundenen Mischungen wurden unter Umgebungsbedingungen nach EN 1015-10 (1999) bestimmt, die Zug- und Druckfestigkeiten nach EN 1015-11 (1999).

Die Proben wurden einer Belastungskontrolle unterzogen von 0,2 mm pro Minute und 0,5 mm pro Minute zur Bestimmung der Zug- und Druckfestigkeit, siehe Tabelle 1.

#### Theoretische Eindringungstiefe

Diese hängt von zwei eigenständigen Bemessungen von Isothermen und Diffusionsversuchen ab. DVS wurde angewendet, um die Isotherme bei 23°C und einem RH von 0% bis 95% bestimmen zu können. Die

Abb. 2 Unterputzschicht (links) und Deckputzschicht (rechts)

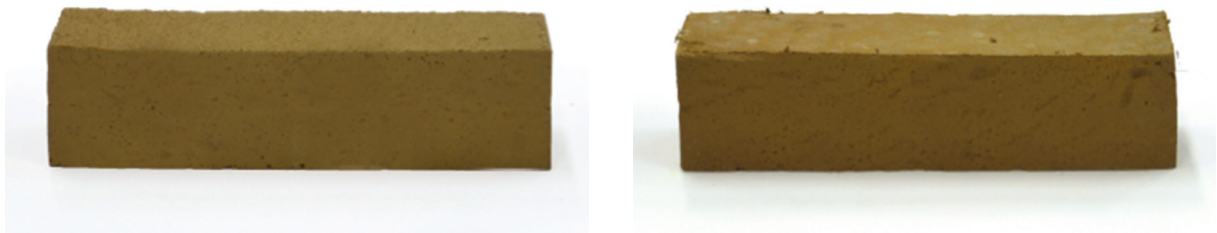


Tabelle 1 Materialeigenschaften

| Eigenschaften                      |                   | Unterputz | Deckputz |
|------------------------------------|-------------------|-----------|----------|
| <b>Physikalische Eigenschaften</b> |                   |           |          |
| Fließgrenze                        | %                 | 14,9      | 22,1     |
| Plastizitätswert                   | %                 | 1,8       | 5,7      |
| Lineare Schrumpfung                | %                 | 2,0       | 4,0      |
| <b>Körnergröße</b>                 |                   |           |          |
| Sand                               | %                 | 69        | 57       |
| Schluff                            | %                 | 25        | 37       |
| Lehm                               | %                 | 5         | 6        |
| <b>Physikalische Eigenschaften</b> |                   |           |          |
| Rohdichte                          | kg/m <sup>3</sup> | 1870      | 1700     |
| Porosität                          | %                 | 24,8      | 30,42    |
| <b>Mechanische Festigkeit</b>      |                   |           |          |
| Druckfestigkeit                    | N/mm <sup>2</sup> | 2,60      | 2,86     |
| Biegefestigkeit                    | N/mm <sup>2</sup> | 0,97      | 1,19     |



Abb. 3 Lehmprobe mit Feuchtigkeitspufferung

Eigenschaften der Feuchtigkeitsdiffusion wurden nach ISO 12572:2007 bestimmt mit nassen und trockenen Dichtmanschetten in der Klimakammer.

#### Testmethode für die Feuchtigkeitsdämpfung

Es gibt mehrere Methoden für die Kennzeichnung der Feuchtigkeitspufferungs Wirkung eines Baustoffs. In Deutschland gibt es dafür die DIN 18947. Eine europäische Norm gibt es noch nicht. Der NORD Test (Rode et al., 2005) ist weit verbreitet, ähnliche Versuchsmethoden liegen dem japanischen Standard (JIS A 1470-1, 2002 und auch der ISO Methode (ISO 24353:2008) zugrunde. Roels & Janssen (2006) sind der Auffassung, dass, obgleich sich die Versuchsmethoden ähneln, die Unterschiede zu unvergleichbaren Ergebnissen führen würden. Von den drei genannten Standards ist die ISO Versuchsmethode besonders für Bedingungen in Innenräumen geeignet und wurde daher bei den Versuchen für diese Studie angewendet.

Für eine mittlere Raumfeuchtigkeit wurden zyklische Versuche vorgenommen. Dazu wurden die Proben bei einer RH von 63% und bei einer Temperatur von 23°C vorkonditioniert, bevor mit zyklischen Klimavariationen begonnen wurde. Vier Zyklen wurden unter folgenden Bedingungen durchgeführt und dabei die Probenmasse protokolliert:

- Schritt 1: 12 h  
relative Luftfeuchtigkeit 75%, Temperatur 23°C,
- Schritt 2: 12 h  
relative Luftfeuchtigkeit 50%, Temperatur 23°C.

Die Proben wurden in besonderen Kammern getestet, um die unterschiedlichen (oben beschriebenen) Bedingungen erfüllen zu können. Waagen wurden in den Kammern installiert zum Messen der Probegegewichte im Abstand von 5 Minuten. Die Waagen wurden abgeschirmt, um den Einfluss von Luftbewegung auf die Proben während des Tests zu minimieren. Ein Windmesser wurde zum Messen der Luftbewegung benutzt und stellte fest, dass diese 0,1 m pro Sekunde betrug. Die vier zyklischen Werte und Raten der Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe wurden nach Sektion 8.3 der ISO 24353:2008 berechnet.

Die drei dünnsten Proben für die Tests wurden in 150 x 150 mm Plastikformen in unterschiedlichen Stärken hergestellt von 2, 4 und 10 mm. Die Formen wurden mit Aluminiumstreifen umwickelt und so als permanente Schalung verwendet. So konnte man den dünnen Putzbelag herstellen, ohne die Gefahr die Probe dabei zu zerbrechen. Die 20 mm und 40 mm Proben wurden in mit Karbolium behandelten Sperrholzformen hergestellt und drei Tage lang getrocknet. Aluminiumstreifen versiegelten die Hinterseite und Seiten der Probe, damit die Feuchtigkeit nur durch die Vorderseite eindringen konnte (Abb. 3).

Die Feuchtigkeitspufferungsuntersuchungen resultierten im Bemessen spezifischer Szenarien der Feuchtigkeitsveränderung bei unterschiedlichen Probendicken. Es wurde erwartet, dass mit zunehmender Dicke der Proben auch die Menge der absorbierten Feuchtigkeit zunehmen würde. Aber die Zunahme

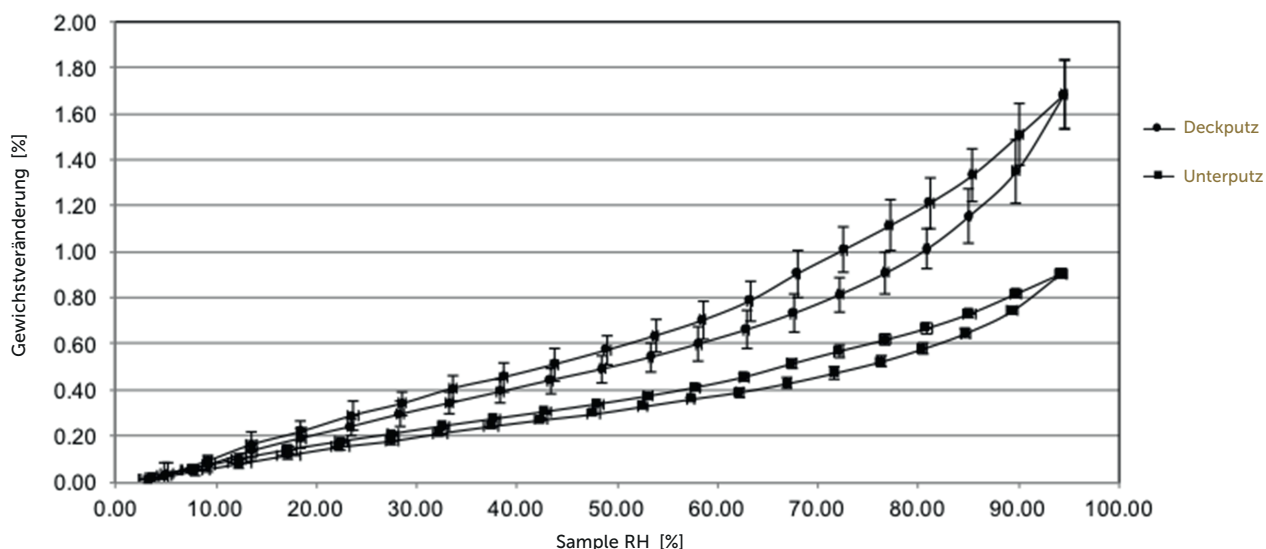


Abb. 4 Isothermen für Deck- und Unterputz

trat bis zu einer gewissen Tiefe des Materials ein, danach gab es keinen besonderen Anstieg der Feuchtigkeit mehr.

### Ergebnisse und Auswertung

Mit den Ergebnissen der DVS und den Werten der Feuchtigkeitspermeabilität konnte eine theoretische Eindringungstiefe berechnet werden. Die bei den Feuchtigkeitsdämpfungsversuchen gemessene Feuchteabsorption in verschiedenen dicken Proben auf empirischem Weg kann aber bei der Bestimmung der experimentellen Eindringungstiefe genutzt werden.

### Berechnung der theoretischen Eindringungstiefe

Die theoretische, auf Isothermen basierende Eindringungstiefe (Abb. 4) und der Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion bei den zwei Putzproben können mit Formel 1 berechnet werden. Eine Massenveränderung folgte der Adsorption nach DIN 18947 und wurde eingestuft als Klasse III mit bis zu  $65 \text{ g/m}^2$  Adsorption. Die für das Diffusionsvermögen berechneten Werte für den Unter- und Deckputz sind  $3.024 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  und  $4.717 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . Abhängig davon, welche zahlenmäßige Approximation für die Eindringungstiefe verwendet wird (1% oder  $1/e$ ) kann die

theoretisch effektive Tiefe der Feuchtigkeitsdämpfung wie auf Tabelle 2 gezeigt, berechnet werden.

### Experimentelle Eindringungstiefe

Insgesamt wurden 30 Proben auf die Eigenschaften ihrer Feuchtigkeitspufferung untersucht, davon zwei 5mm dicke Lehmputze dreifach. Von der Unterputzprobe wird das typische Profil der Mengenänderung in Abb. 5 gezeigt. Nach ISO Standard wird ein vierter Zyklus berücksichtigt. Adsorptions- und Desorptionsmengenänderungen werden per Einheit der exponierten Flächen berechnet.

Aus Abb. 5 ist ersichtlich, dass die Kapazität der Feuchtigkeitspufferung gedeckelt wird, da schon früh keine weitere Masseveränderung mehr zu beobachten ist im Feuchtigkeits-Kreislauf. Beim Vergleich der Profile von 40mm und 20mm dicken Proben wurden nur geringfügige Unterschiede festgestellt. Was bedeutet, dass in besonders dicken Putzschichten keine erhöhte Dämpfung erfolgt. Die Adsorption im vierten Kreislauf der 30 Proben wird in Abb. 6 gezeigt. Die im Diagramm eingezeichneten Fehlerbalken zeigen ein 95%iges Konfidenzintervall, basierend auf 3 Proben.

Zusätzliche Vorteile bei den täglichen Schwankungen der Feuchtigkeitspufferung gibt es keine durch mehr als 10 mm dicken Putzen aller Arten (Abb. 6). Die beste Regressionsgerade zeigt einen bi-linearen Trend und basiert auf einer linearen Zunahme von Feuchtigkeit Adsorption gemessen bei 2 und 4 mm und einem Durchschnittswert bei 10 mm und mehr. Das Bestimmtheitsmaß für beide Beschichtungen

Tabelle 2 Theoretisch effektive Feuchtigkeitspufferungstiefe

| Eigenschaften | Unterputz<br>mm | Deckputz<br>mm |
|---------------|-----------------|----------------|
| $dp_{1\%}$    | 53              | 42             |
| $dp_{1/e\%}$  | 11              | 9              |

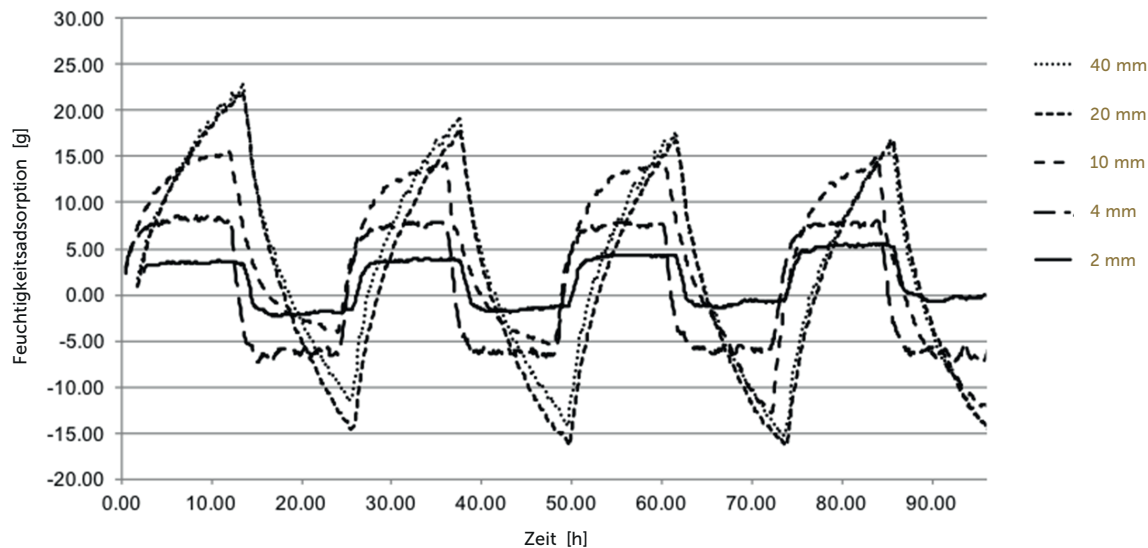


Abb. 5 Typische Profile der Feuchtepufferung

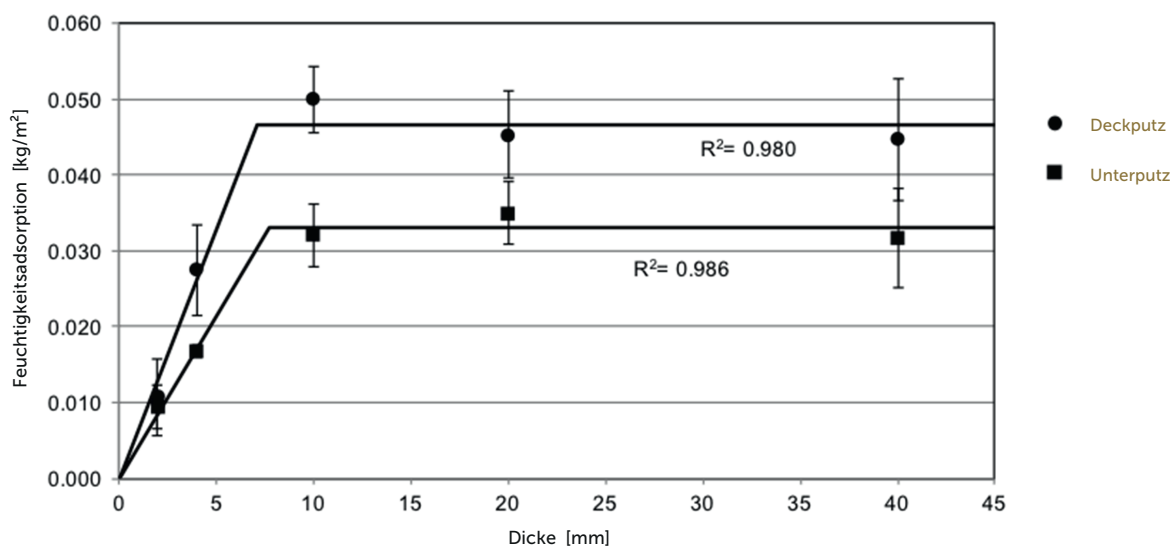
liegt bei 0,98, was bedeutet, dass die Regression zweckdienlich ist als Modell für die experimentelle Eindringungstiefe. Die Regression berechnet die effektive Eindringungstiefe für Ober- und Unterputz auf 7,1 mm, respektive 7,7 mm bei spezifischer Feuchtigkeitsveränderung. Das zeigt, dass theoretische Methoden zur Berechnung der Eindringungstiefe den benötigten Baustoff für eine menschliche Nutzung der Gebäude überschätzen.

### Zusammenfassung

Eine experimentelle Methode für ausschlaggebende Feststellungen effektiver Eigenschaften der Feuchtepufferungstiefen von Materialien wurde in der Studie vorgestellt. Das Verfahren wurde nach

der ISO Methode entwickelt und ist übertragbar auf andere Methoden. Zwei Lehmputzproben wurden untersucht mit unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften und verschiedenen Feuchtedämpfungen. Ein Regressionsmodell wurde verwendet, um die experimentelle Feuchtepufferungstiefe zu bestimmen, was zu einer Verminderung beider Putzdicken führte. Die Bedeutung einer direkten Messmethode für die Eindringungstiefe der Feuchtepufferung bedeutet so auch eine optimale Baustoffnutzung für die Verbesserung des Innenraum Mikroklimas. Bestehende Untersuchungsmethoden sind im Vergleich dazu sehr konservativ für eine typische Hausbewohnung.

Abb. 6 Unterschiedliche Feuchtigkeitsadsorption





## Danksagung

Die Forschung mit den erzielten und vorgestellten Ergebnissen, konnte dankenswerterweise mit Hilfe des EU-„Seventh Framework“ Programmes (FP7/2007-2013), Förderbeitrag Nr. 609234 durchgeführt werden.

Woods, J., Winkler, J., & Christensen, D. (2013). Evaluation of the effective moisture penetration depth model for estimating moisture buffering in buildings. Technical Report NREL/TP-5500-57441

## Referenzen

- Ashour, T., Korjenic, A., & Korjenic, S. (2015). Equilibrium moisture content of earth bricks biocomposites stabilized with cement and gypsum. *Cement and Concrete Composites*, 59, 18-25.
- Collet, F., Chamoin, J., Pretot, S., & Lanos, C. (2013). Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes. *Energy and Buildings*, 62, 294-303.
- EN 1015-10:1999 Methods of test for mortar for masonry. *Determination of dry bulk density of hardened mortar*. London: BSI.
- EN 1015-11:1999 Methods of test for mortar for masonry. *Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. London: BSI
- JIS A 1470-1 (2002). Test method of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate an indoor humidity-Part 1: Response method of humidity.
- ISO 8301:1991. Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of moisture adsorption/desorption properties in response to humidity variation. International Standardization Organization (ISO).
- ISO 12572:2001. Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of water vapour transmission properties. International Standardization Organization (ISO).
- Latif, E., Lawrence, M., Shea, A., & Walker, P. (2015). Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. *Building and Environment*, 93, 199-209.
- McGregor, F., Heath, A., Shea, A., & Lawrence, M. (2014). The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Building and Environment*, 82, 599-607.
- McGregor, F., Heath, A., Maskell, D., Fabbri, A., & Morel, J. C. (2015). A review on the buffering capacity of earth building materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 1-11.
- Padfield, T. (1998). The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity. *Department of Structural Engineering and Materials, Lyngby, Technical University of Denmark*, 150.
- Rode, C., Peuhkuri, R. H., Mortensen, L. H., Hansen, K. K., Time, B., Gustavsen, A., & Harderup, L. E. (2005). *Moisture buffering of building materials*. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering.
- Roels, S., & Janssen, H. (2006). A comparison of the Nordtest and Japanese test methods for the moisture buffering performance of building materials. *Journal of Building Physics*, 30(2), 137-161.

