



Nachhaltig und zuverlässig bauen mit Lehm

Aktualisierte Bemessung
von Lehm-mauerwerk unter
Feuchteinfluss

Dr.-Ing. Maximilian Brinkmann

Modernes Lehm-
mauerwerk erfüllt alle
Anforderungen an die
Tragwerkszuverlässigkeit

Einfluss der Material-
feuchte auf die Tragfähig-
keit von Lehm-mauerwerk
lässt sich mit neu entwi-
ckeltem Modell unkompli-
ziert berücksichtigen

Kurzfassung

Hinsichtlich des stetig voranschreitenden Klimawandels ist es dringend notwendig, die globalen Treibhausgasemissionen zeitnah zu verringern. Allein der Bau- und Gebäudesektor ist für 37 % der globalen CO₂-Emissionen sowie für 34 % des globalen Energiebedarfs verantwortlich (United Nations Environment Programme 2022). Eine Kompensationsmöglichkeit hierfür besteht in der vermehrten Verwendung des Naturbaustoffs Lehm, welcher auf Grund seiner ökologischen und bauphysikalischen Vorzüge vielfältige Nutzungszwecke aufweist. Moderne Lehmbaumstoffe überzeugen durch ihren geringen Primärenergiebedarf bei der Produktion, vollständige Wiederverwendbarkeit am Ende ihrer Nutzungsdauer sowie ihre nahezu flächendeckende Verfügbarkeit (Schroeder 2019; Röhlen/Ziegert 2020; Lemke et al. 2022).

Zudem bieten Lehmbaumstoffe diverse bauphysikalische Vorzüge wie beispielsweise eine hohe Wärmespeicherkapazität, die Fähigkeit zur effektiven Regulierung der Innenraumluftfeuchte sowie gute Schallschutzeigenschaften, was in Summe zu einem konstanten, gesunden und behaglichen Raumklima führt (Rempel/Rempel 2016). Nicht zuletzt ist die Nutzung von energieeffizient produzierten Lehmbaumstoffen angesichts des steigenden Baustoff- und Energiepreisniveaus unter ökonomischen Gesichtspunkten interessant (Morton et al. 2005).

Semiprobabilistisches Sicherheitskonzept

Nahezu alle Eingangsparameter einer statischen Berechnung unterliegen natürlichen Streuungen. Dementsprechend ist auch die rechnerisch ermittelte Tragfähigkeit eines Bauteils immer mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Aus diesem Grund ist im Rahmen der Nachweisführung ein Sicherheitskonzept erforderlich, welches die statistische Unsicherheit des Berechnungsergebnisses ausgleicht und damit die Einhaltung des festgelegten Zielzuverlässigkeitsniveaus sicherstellt. Ein semiprobabilistisches Sicherheitskonzept erlaubt es dabei, Streuungen sowohl auf der Einwirkungs- als auch auf der Widerstandsseite des nachzuweisenden Bauteils mit Hilfe einzelner Teilsicherheitsbeiwerte detailliert und individuell zu erfassen.

Um die genannten Vorteile der Lehmbaumweise zukünftig in einem erweiterten Anwendungsbereich nutzen zu können, muss sichergestellt sein, dass die errichteten Lehmstrukturen alle üblichen Anforderungen an die Standsicherheit, die Gebrauchstauglichkeit aber auch an die Zuverlässigkeit des Tragwerks erfüllen. Um diesen baupraktischen Anforderungen gerecht zu werden und leistungsfähige Lehmbaumwerke planen und errichten zu können, wurde mit der neuen DIN 18940 eine nationale Konstruktions-, Bemessungs- und Ausführungsnorm für tragendes Lehmmauerwerk erarbeitet. Die Bemessung nach DIN 18940 orientiert sich am vereinfachten Nachweisverfahren für herkömmliches Mauerwerk gemäß Eurocode 6 und basiert analog dazu auf einem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept. Im Hinblick auf die Tragwerkszuverlässigkeit gilt es zu überprüfen, ob die Einhaltung des geforderten Zielzuverlässigkeitsniveaus bei einer Bemessung von tragendem Lehmmauerwerk auf Basis der neuen DIN 18940 sichergestellt ist.

Tragwerkszuverlässigkeit

Im baupraktischen Kontext beschreibt der Begriff „Zuverlässigkeit“ die Einhaltung der gesellschaftlich und politisch akzeptierten Versagenswahrscheinlichkeit von tragenden Bauteilen innerhalb von Gebäuden. Das angestrebte Zuverlässigkeitsniveau stellt dabei immer einen Kompromiss aus Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Tragwerks dar. Die Tragwerkszuverlässigkeit wird im Allgemeinen von vielzähligen Randbedingungen sowie unterschiedlichsten Berechnungsparametern und deren Streuungen beeinflusst. Hierzu gehören beispielsweise die mechanischen Eigenschaften der verwendeten Baustoffe, die äußeren Einwirkungen auf das Tragwerk, die zugrunde liegenden Berechnungsmodelle oder weitere systembedingte Einflussgrößen. Die einzuhaltende Zielzuverlässigkeit von tragenden Bauteilen ist normativ geregelt und damit ein wesentlicher Bestandteil des sicheren und wirtschaftlichen Bauens.

Hierfür wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens zunächst untersucht, welche Parameter die Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehmmauerwerks maßgeblich beeinflussen, und wie sich diese Einflussgrößen auf die Versagenswahrscheinlichkeit und damit auch auf die Zuverlässigkeit des Tragwerks auswirken. Dabei wurden die materialspezifischen Besonderheiten von Lehmbaustoffen explizit mitberücksichtigt. Wie bei diversen Untersuchungen zuvor lag auch hier ein besonderes Augenmerk auf dem Feuchteinfluss (Brinkmann et al. 2023; Wiehle et al. 2022).

Maßgebend für die Untersuchungen waren folgende Forschungsfragen:

- Wie wirken sich unterschiedliche Materialfeuchten auf die bemessungsrelevanten Materialeigenschaften von Lehmmauerwerk aus?
- Wie lässt sich der Feuchteinfluss bei der Berechnung der Tragfähigkeit von druckbeanspruchten Lehmmauerwerkswänden wirklichkeitsnah berücksichtigen?
- Welcher Feuchtegehalt ist innerhalb von Lehmmauerwerkswänden in unterschiedlichen Anwendungsfällen zu erwarten und wie hoch ist dessen Streuung?

→ Wie hoch ist die Zuverlässigkeit von druckbeanspruchten Lehmmauerwerkswänden unter Einbezug der materialspezifischen Besonderheiten von Lehmbaustoffen?

→ Wird das normativ festgelegte Zielzuverlässigkeitsniveau bei einer Bemessung von druckbeanspruchten Lehmmauerwerkswänden auf Grundlage der neuen DIN 18940 erreicht?

Praktische Relevanz

Der Einsatz von tragendem Lehmsteinmauerwerk bietet großes Potential für das nachhaltige und kostengünstige Bauen. Lehmmauerwerk kann analog zu herkömmlichem Mauerwerk verarbeitet werden und gewährleistet somit eine unkomplizierte Planung und Bauausführung. Mögliche Anwendungsbereiche sind der nachhaltige Wohnungsbau, die Errichtung von Büro- und Verwaltungsgebäuden oder der Bau von öffentlichen Gebäuden wie Schulen oder Kindergärten.

Abb. 1: Doppelhäuser aus tragendem Lehmmauerwerk, Wangen/Starnberg, Entwurf: Dall'Armi Ingenieure GmbH, München; Bauherr: DA Planungs-/ Projektentwicklung GmbH
Bildquelle: Dall'Armi Ingenieure GmbH



Ergebnisse

1.1 Feuchteabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen an den in Abbildung 2 dargestellten Lehmsteinen, Lehmmauermörtel und Lehmmauerwerk unter Druckbeanspruchung durchgeführt. Die verwendeten Lehmbaumaterialien enthielten dabei keinerlei hydraulische Stabilisatoren, wie zum Beispiel Zement oder Kalkstein. Um den Einfluss der Materialfeuchte auf die mechanischen Baustoffeigenschaften analysieren zu können, wurden die Probekörper vor der Durchführung der Druckprüfungen bei verschiedenen relativen Luftfeuchten φ bis zum Erreichen ihrer Massekonstanz innerhalb eines Klimaschranks konditioniert.



Abb. 2: Probekörper der untersuchten Lehmsteine (links), des Lehmmauermörtels (Mitte) und des Lehmmauerwerks (rechts). Quelle: Maximilian Brinkmann

Basierend auf den Versuchsergebnissen aller im Rahmen des Projekts untersuchten Lehmbaumaterialien konnte ein analytischer Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit bzw. dem Elastizitätsmodul und der relativen Luftfeuchte φ nach Gleichung (1) hergeleitet werden.

$$\frac{f}{f_{50\%}} = \frac{E}{E_{50\%}} = 1,5 - \frac{\varphi [\%]}{100} \quad (1)$$

Der sich daraus ergebende Modifikationsfaktor kann verwendet werden, die bei normativen Referenzklimabedingungen ($\varphi = 50 \% / \theta = 23^\circ\text{C}$) ermittelte Druckfestigkeit bzw. das zugehörige Elastizitätsmodul für davon abweichende Materialfeuchten zu berechnen. Mit Hilfe dieses Vorgehens kann der Feuchteinfluss auf die genannten Festigkeits- und Verformungseigenschaften im Zuge der Traglastberechnung unkompliziert berücksichtigt werden.

Um die Allgemeingültigkeit des Zusammenhangs gemäß Gleichung (1) zu überprüfen, wurde zusätzlich eine umfangreiche Literaturliteraturdatenbank mit weiteren Versuchsergebnissen in Bezug auf die Feuchteabhängigkeit der mechanischen Materialeigenschaften unstabilisierter Lehmbaumaterialien erstellt und mit den Versuchsdaten des Forschungsprojekts gegenübergestellt. Die Daten wurden hierfür aus (El Fgaier et al. 2016; Hansen/Hansen 2002; Hartmann 2019; Heath et al. 2009; Müller et al. 2012; Wiehle/Brinkmann 2020) entnommen. Wie in Abbildung 3 für die bezogene Druckfestigkeit $f/f_{50\%}$ zu erkennen ist, kann der analytisch hergeleitete lineare Zusammenhang gemäß Gl. (1) in guter Näherung für beliebige unstabilisierte Lehmbaumaterialien angewendet werden.

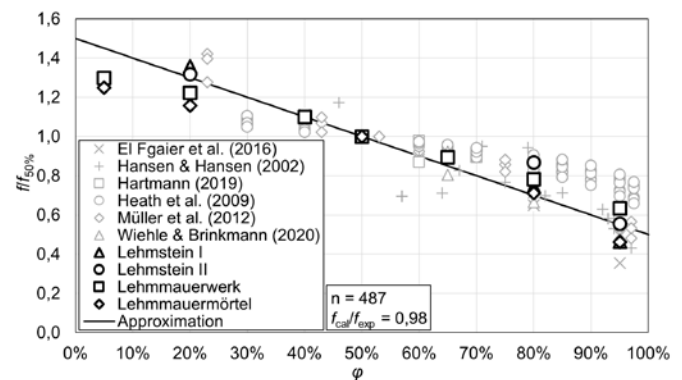


Abb. 3: Lineare Näherung der bezogenen Druckfestigkeit $f/f_{50\%}$ für unstabilisierte Lehmbaumaterialien. Quelle: Maximilian Brinkmann

Neben den experimentellen Untersuchungen zur Feuchteabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften wurde zudem eine ergänzende Versuchsreihe zur Temperaturabhängigkeit der mechanischen Materialparameter durchgeführt. Dabei konnte innerhalb eines praxisrelevanten Temperaturbereichs von $10^\circ\text{C} \leq \theta \leq 40^\circ\text{C}$ in Kombination mit einer konstanten relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50 \%$ keine nennenswerte Beeinflussung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften durch Änderungen der Temperatur festgestellt werden. Es lässt sich somit schlussfolgern, dass die Bauteil- bzw. Umgebungstemperatur innerhalb baupraktischer Grenzen auf Grund des fehlenden Einflusses auf bemessungsrelevante Materialeigenschaften nicht als Einflussparameter bei der Berechnung der Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk berücksichtigt werden muss.

Im Hinblick auf die Tragwerkszuverlässigkeit von Lehm-mauerwerk lässt sich zudem festhalten, dass die unter Laborbedingungen ermittelten mechanischen Materialeigenschaften der analysierten Lehmabstoffe nur geringe Streuungen aufwiesen. Für das untersuchte Lehm-mauerwerk ergab sich bei Betrachtung der Druckfestigkeit ein über alle Versuchsreihen gemittelter Variationskoeffizient von $v_f = 5,9 \%$ und für den Elastizitätsmodul ein mittlerer Variationskoeffizient von $v_E = 9,1 \%$. Demzufolge ist nicht davon auszugehen, dass die Zuverlässigkeit von tragendem Lehm-mauerwerk gegenüber herkömmlichen Mauerwerksbaustoffen durch produktionsbedingte Einflüsse negativ beeinträchtigt wird. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sind in (Brinkmann/Wiehle 2023) nochmals in ausführlicherer Form dargelegt.

1.2 Berechnungsmodell zur Ermittlung der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der Materialfeuchte

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks unter Berücksichtigung des Feuchteinflusses wurde ein analytischer Berechnungsansatz entwickelt. Die Methode ermöglicht den Einbezug beliebiger Materialfeuchten. Hierbei wird vereinfachend angenommen, dass die vorherrschende Materialfeuchte innerhalb des Wandquerschnitts gleichmäßig verteilt ist. Das gewählte Vorgehen sieht zunächst die Ermittlung der Querschnitts- bzw. Systemtragfähigkeit mit Hilfe eines wirklichkeitsnahen Traglastmodells für überwiegend druckbeanspruchte Mauerwerkswände vor. Hierbei erfolgt noch kein Einbezug der tatsächlich vorherrschenden Materialfeuchte, sondern es wird in Anlehnung an das normative Referenzklima für Lehmabstoffe eine Materialfeuchte von $\varphi = 50 \%$ unterstellt. Für die Berechnung des Ausgangswerts der Querschnitts- bzw. Systemtragfähigkeit des Lehm-mauerwerks kann ein beliebiges wissenschaftliches oder normatives Traglastmodell verwendet werden, welches zutreffende Ergebnisse für druckbeanspruchte Mauerwerkswände liefert. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein Approximationsverfahren herangezogen, welches es erlaubt, die Materialeigenschaften von Lehm-mauerwerk detailliert in die Traglastermittlung einzubeziehen (Glock 2004). Zur anschließenden Berücksichtigung abweichender Materialfeuchten erfolgt eine Modifizierung des Ausgangswerts der Querschnitts- oder Systemtragfähigkeit mit Hilfe des in Kapitel 1.1 dargestellten Zusammenhangs zwischen der Materialfeuchte und den Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehm-mauerwerk.

Die aufnehmbare Normalkraft einer Lehm-mauerwerks-wand unter Berücksichtigung der Materialfeuchte $N_{R,\varphi}$ ermittelt sich dementsprechend durch Multiplikation des feuchteabhängigen Anpassungsfaktors $f/f_{50\%}$ mit dem Ausgangswert der Querschnitts- oder Systemtragfähigkeit $\Phi_{I,II}$, der Querschnittsfläche A sowie der Druckfestigkeit des Lehm-mauerwerks bei normativen Referenzklimabedingungen $f_{50\%}$:

$$N_{R,\varphi} = \frac{f}{f_{50\%}} \cdot \Phi_{I,II} \cdot A \cdot f_{50\%} = \left(1,5 - \frac{\varphi [\%]}{100}\right) \cdot \Phi_{I,II} \cdot A \cdot f_{50\%} \quad (2)$$

Der feuchteabhängige Anpassungsfaktor $f/f_{50\%}$ modifiziert dabei die bei einer relativen Luftfeuchte von $\varphi = 50 \%$ ermittelte Mauerwerksdruckfestigkeit und ermöglicht somit die rechnerische Berücksichtigung des Feuchteinflusses auf die resultierende Tragfähigkeit des Lehm-mauerwerks.

Zur Veranschaulichung des Feuchteinflusses ist die bezogene Systemtragfähigkeit $\Phi_{II,\varphi}$ von feuchtebeeinflusstem Lehm-mauerwerk in Abbildung 4 exemplarisch für verschiedene Materialfeuchten φ sowie unterschiedliche bezogene Lastexzentrizitäten e/t in Abhängigkeit der Wandschlankheit h_{ef}/t dargestellt.

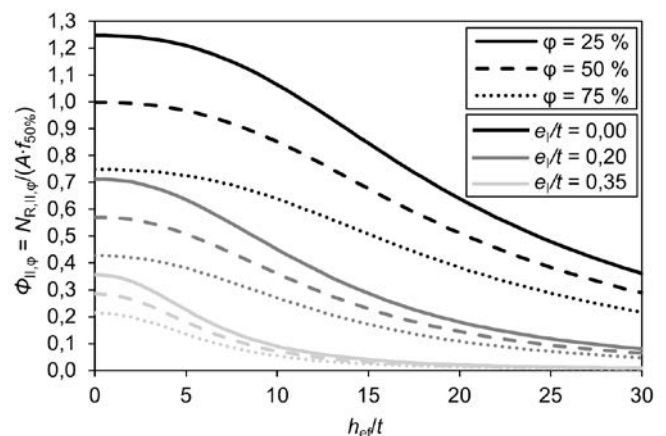


Abb. 4: Bezogene Systemtragfähigkeit $\Phi_{II,\varphi}$ von Lehm-mauerwerk für verschiedene Materialfeuchten φ sowie unterschiedliche bezogene Lastexzentrizitäten e/t in Abhängigkeit der Wandschlankheit h_{ef}/t . Quelle: Maximilian Brinkmann

Aus (Brinkmann 2023) können weiterführende Informationen zur Traglastberechnung von druckbeanspruchten Lehm-mauerwerkswänden mit inkonstanter Verteilung der Materialfeuchte über den Wandquerschnitt entnommen werden.

1.3 Feuchtegehalt von praxisüblichen Lehm-mauerwerkswänden

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden instationäre hygrothermische Simulationen durchgeführt, um den Feuchtegehalt innerhalb praxisüblicher Lehm-mauerwerkswände sowie dessen Streuung über einen Simulationszeitraum von einem Jahr abzuschätzen. Die erforderlichen bauphysikalischen Eingangsparameter zur Materialmodellierung von Lehm-mauerwerk wurden vorab durch experimentelle Untersuchungen ermittelt und in ein valides Materialmodell überführt. Wie in Abbildung 5 dargestellt, wurden im Zuge der numerischen Simulationen insgesamt fünf praxisrelevante Anwendungsfälle von Lehm-mauerwerkswänden analysiert.

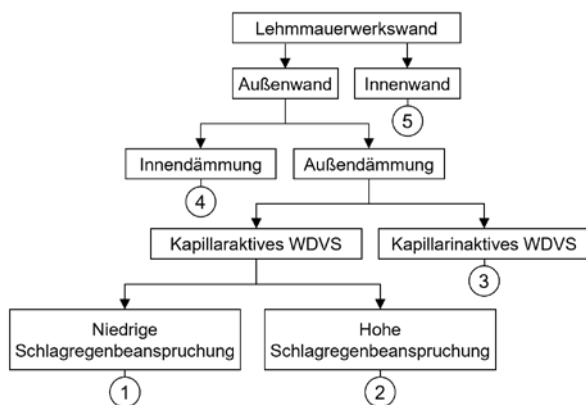


Abb. 5: Untersuchte Anwendungsfälle von Lehm-mauerwerkswänden. Quelle: Maximilian Brinkmann

Die mit Hilfe von hygrothermischen Simulationen ermittelte Materialfeuchte innerhalb des Lehm-mauerwerks ist für die definierten Anwendungsfälle in Abbildung 6 gegenübergestellt. Zur einheitlichen Darstellung der Ergebnisse wird die Materialfeuchte dabei stets als äquivalente relative Luftfeuchte φ angegeben. Dieser Wert kann mit Hilfe der materialspezifischen Feuchtespeicherfunktion aus der absoluten Materialfeuchte ermittelt werden.

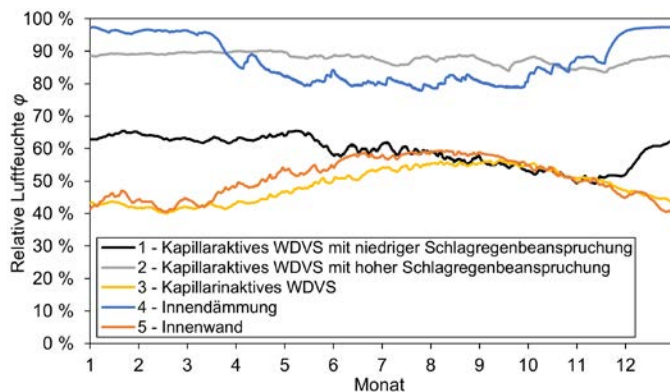


Abb. 6: Materialfeuchte von Lehm-mauerwerkswänden über den Jahresverlauf für verschiedene Anwendungsfälle. Quelle: Maximilian Brinkmann

Die Gegenüberstellung der Feuchteverläufe zeigt, dass die höchsten Materialfeuchten von $\varphi = 90\% - 95\%$ im Fall einer Außenwand mit außenliegendem, kapillaraktivem Wärmedämmverbundsystem und hoher Schlagregenbeanspruchung oder einer Außenwand mit Innendämmung erreicht werden. Die in diesen Anwendungsfällen auftretenden erhöhten Feuchtegehalte sind durch wiederkehrende Schlagregenereignisse in Verbindung mit der vergleichsweise geringen Regenschutzwirkung der äußeren Bauteilschichten zu erklären.

Kapillar(in)aktives Wärmedämmverbundsystem (WDVS)

Ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) dient der Wärmedämmung von Gebäudeaußenwänden und besteht in der Regel aus einer Dämmschicht, einer Putzträgerschicht, einem Oberputz und gegebenenfalls einer hydrophoben Beschichtung. Innerhalb des Forschungsprojekts wurden die untersuchten Wärmedämmverbundsysteme hinsichtlich ihrer Flüssigwasseraufnahme und -leitfähigkeit unterschieden. Es erfolgten Analysen mit kapillaraktiven Wärmedämmverbundsystemen, welche einen ausgeprägteren Flüssigwassertransport zulassen (z. B. bei Verwendung einer Dämmschicht aus Holzfasern oder Mineralschaum in Verbindung mit einem unbeschichteten Kalkzementputz). Außerdem wurden Außenwände mit kapillarinaktiven Wärmedämmverbundsystemen untersucht, welche den Flüssigwassertransport zum tragenden Lehm-mauerwerk nahezu vollständig vermeiden (z. B. durch die Verwendung von wasserundurchlässigen Wärmedämmmaterialien wie Polystyrol oder wasserabweisenden Außenputzen gemäß DIN 4108-3).

Die Ergebnisse zeigen, dass die vorherrschende Schlagregenintensität im Fall eines außenliegenden kapillaraktiven Wärmedämmverbundsystems einen erheblichen Einfluss auf die zu erwartende Materialfeuchte hat. Da der Schlagregenschutz bei einer Lehm-mauerwerkswand mit Innendämmung nur durch den mineralischen Außenputz sichergestellt wird und die Möglichkeit zur Feuchteabgabe in den Innenraum durch die Innendämmung zusätzlich eingeschränkt ist, können bei diesem Wandaufbau bereits bei niedriger Schlagregenbeanspruchung temporär erhöhte Materialfeuchten von $\varphi \geq 95\%$ auftreten. Die Simulationsergebnisse bestätigen damit, dass eine Lehm-mauerwerkswand mit Innendämmung bei mittlerer oder hoher Schlagregenbeanspruchung auf Grund der dabei zu erwartenden dauerhaft erhöhten Materialfeuchten nicht empfehlenswert ist.

Bei einer Außenwand mit kapillarinaktivem Wärmedämmverbundsystem sowie bei einer Innenwand treten durch die verminderte Feuchteeinwirkung nur geringere Materialfeuchten auf. Die Materialfeuchte ist in diesen Anwendungsfällen maßgeblich vom vorherrschenden Innenraumklima abhängig. Da die relative Innenraumluftfeuchte gemäß der angesetzten Klimamodelle mit zunehmender Außentemperatur ansteigt, treten in den Wintermonaten die niedrigsten und in den Sommermonaten die höchsten Feuchtegehalte innerhalb des Lehm-mauerwerks auf. Die Maximalwerte der Materialfeuchte liegen dabei sowohl bei der Außenwand mit kapillarinaktivem Wärmedämmverbundsystem als auch im Fall der Innenwand bei $\varphi \approx 60\%$.

Des Weiteren ist auf Grundlage der Simulationsergebnisse festzuhalten, dass die ermittelten Materialfeuchten in Abhängigkeit des betrachteten Anwendungsfalls über den Jahresverlauf unterschiedlich stark schwanken. Diese zeitliche Streuung der Materialfeuchte wurde im Zuge der Zuverlässigkeitsanalyse durch eine geeignete Modellierung des Feuchteinflusses berücksichtigt.

1.4 Zuverlässigkeit von Lehm-mauerwerk unter Druckbeanspruchung

Um die Zuverlässigkeit druckbeanspruchter Lehm-mauerwerkswände zu ermitteln, wurde die Versagenswahrscheinlichkeit sowie der daraus resultierende Zuverlässigkeitsindex β mittels Monte-Carlo-Simulationen ermittelt. Die Ergebnisse der hygrothermischen Simulationen aus Kapitel 1.3 bildeten dabei die Grundlage zur Kalibrierung von statistischen Verteilungsfunktionen der Materialfeuchte. Mit deren Hilfe ließ sich der Feuchtegehalt von Lehm-mauerwerkswänden für verschiedene Anwendungsfälle als eigenständige Zufallsvariable modellieren und die daraus resultierende Streuungen der Wandtragfähigkeit bei der Ermittlung der Zuverlässigkeit explizit einbeziehen.

Die Ergebnisse der Zuverlässigkeitsanalysen sind in Abbildung 7 in Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsfalls und der Wandschlankheit h_{eff}/t für eine exemplarisch gewählte lichte Deckenspannweite von $l_t = 5\text{ m}$ dargestellt. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse ist der Zielzuverlässigkeitsindex von $\beta = 3,8$ gemäß DIN EN 1990 durch eine horizontale Hilfslinie markiert. Da der Zuverlässigkeitsindex in Abhängigkeit der jeweiligen Bemessungssituation sowie der gewählten Eingangsparameter zwangsläufig schwankt, wird zudem ein Zielbereich von $\beta = 3,8 \pm 0,5$ definiert und innerhalb der Diagramme grau hinterlegt. Liegt der ermittelte Zuverlässigkeitsindex

oberhalb dieses Zielbereichs, ist die Nachweisführung als zu unwirtschaftlich einzustufen. Liegt der ermittelte Zuverlässigkeitsindex dagegen unterhalb des Zielbereichs ist die Bemessung als unsicher zu bewerten.

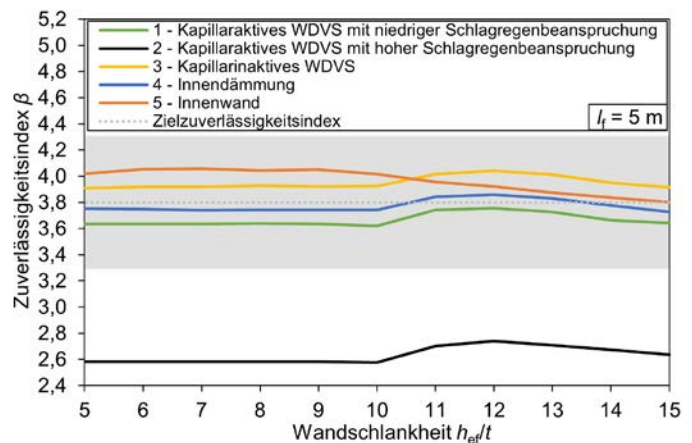


Abb. 7: Zuverlässigkeitsindex druckbeanspruchter Lehm-mauerwerkswände in Abhängigkeit der Wandschlankheit für verschiedene Anwendungsfälle. Quelle: Maximilian Brinkmann

Bei Betrachtung der unterschiedlichen Anwendungsfälle lässt sich feststellen, dass der Zuverlässigkeitsindex bei Außenwänden mit kapillarinaktivem Wärmedämmverbundsystem (Anwendungsfall 3), bei Außenwänden mit Innendämmung (Anwendungsfall 4) sowie bei Innenwänden (Anwendungsfall 5) stets in einem Wertebereich von $\beta = 3,7 - 4,2$ liegt und damit der angestrebte Zielzuverlässigkeitsindex zutreffend angenähert wird. Durch den effektiven Schlagregenschutz im Fall eines kapillarinaktiven Wärmedämmverbundsystems sowie bei Innenwänden ist die zu erwartende Materialfeuchte innerhalb des Lehm-mauerwerks vorrangig vom Innenraumklima abhängig. Aus diesem Grund spiegelt die Nutzungsklasse 1 mit einem Umgebungsfeuchtefaktor von $M = 0,80$ gemäß DIN 18940 den Feuchteinfluss auf die resultierende Wandtragfähigkeit in diesen Anwendungsfällen adäquat wider und führt zu einer zuverlässigen Bemessung. Bei einer Außenwand mit innenliegender Wärmedämmung sind im Vergleich deutlich höhere Materialfeuchten innerhalb des Lehm-mauerwerks zu erwarten (siehe Kapitel 1.3). Diese werden jedoch durch die Einordnung von Außenwänden mit Innendämmung in Nutzungsklasse 2 durch den zugehörigen Umgebungsfeuchtefaktor von $M = 0,55$ im Zuge der Nachweisführung nach DIN 18940 zutreffend berücksichtigt, weshalb auch in diesem Anwendungsfall von einer zuverlässigen Bemessung ausgegangen werden kann.

Im Fall einer Außenwand mit kapillaraktivem Wärmedämmverbundsystem ist das Lehmmauerwerk jedoch nicht vollständig vor einwirkendem Schlagregen geschützt, was zu einer erhöhten Materialfeuchte innerhalb der Wand führen kann. Bei geringer Schlagregenbeanspruchung (Anwendungsfall 1) sowie Zuordnung des Bauteils in Nutzungsklasse 1 gemäß DIN 18940 führt das gegenüber den bisher beschriebenen Anwendungsfällen bereits zu einem leicht reduzierten Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 3,6 - 3,9$. Trotz des gesteigerten Feuchteinflusses liegt der Zuverlässigkeitsindex jedoch noch innerhalb des definierten Wertekorridors und nähert die Zielzuverlässigkeit zutreffend an. Bei starker Schlagregenbeanspruchung (Anwendungsfall 2) sowie Zuordnung des Bauteils in Nutzungsklasse 1 gemäß DIN 18940 beträgt der Zuverlässigkeitsindex jedoch nur noch $\beta = 2,6 - 2,9$ und unterschreitet somit deutlich die angestrebte Zielzuverlässigkeit. Um eine unsichere Bemessung von Lehmmauerwerk zu vermeiden, sollte daher bei Ansatz der Nutzungsklasse 1 stets ein ausreichender Schlagregenschutz durch Verwendung eines wasserabweisenden Außenputzes oder eines kapillarinaktiven und außenliegenden Dämmmaterials vorgesehen werden. Kann der Schlagregenschutz bei Außenwänden aus Lehmmauerwerk nicht konstruktiv gewährleistet werden, sollte der zu erwartende gesteigerte Feuchtegehalt bei der Nachweisführung durch Zuordnung der entsprechenden Außenbauteile in Nutzungsklasse 2 rechnerisch berücksichtigt werden. Da der Schlagregenschutz bei der Planung tragender Lehmmauerwerkswände nach DIN 18940 durch diverse konstruktive Vorgaben sowie die obligatorische Verwendung eines wasserabweisenden Außenputzes in witterungsbeanspruchten Bereichen immer sichergestellt ist, kann Anwendungsfall 2 innerhalb des normativen Anwendungsbereichs nicht auftreten. Eine Unterschreitung des Zielzuverlässigkeitsniveaus ist daher bei der Planung und Bemessung von tragendem Lehmmauerwerk gemäß DIN 18940 nicht zu erwarten.

1.5 Weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde die Zuverlässigkeit druckbeanspruchten Lehmmauerwerks umfangreich analysiert und bewertet. Die Zuverlässigkeit von Lehmmauerwerkswänden muss jedoch auch bei anderen Beanspruchungsarten wie beispielsweise einer Schubbelastung in Längs- oder Querrichtung gegeben sein. Diese Beanspruchungsart ist insbesondere für die Gebäudeaussteifung oder den Nachweis windbeanspruchter Außenwände relevant. Aktuell wird der Schubnachweis von Lehmmauerwerkswänden gemäß DIN 18940 vereinfachend ohne rechnerischen Nachweis auf Grundlage verschiedener konstruktiver Randbedingungen geführt. Für die Einführung eines präziseren Schubnachweises müsste untersucht werden, ob das hierfür entwickelte Bemessungsverfahren unter Einbezug eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts ebenfalls zu einer hinreichenden Tragwerkszuverlässigkeit führt und die zulässige Versagenswahrscheinlichkeit nicht überschritten wird. In die erforderlichen Betrachtungen sollten ebenfalls die zu erwartende Materialfeuchte sowie deren Streuung für verschiedene Anwendungsfälle einbezogen werden.

Weiterhin wären zuverlässigkeitstheoretische Untersuchungen für andere tragende Lehmbaumaterialien erforderlich, sofern deren Bemessung zukünftig auch auf einem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept basieren soll. In diesem Kontext sind beispielsweise Stampflehmwände zu nennen, welche aktuell noch auf Grundlage der Lehmbaum-Regeln und daher mit Hilfe eines globalen Sicherheitskonzepts nachgewiesen werden.

2.1 Näherungsgleichung zur rechnerischen Abschätzung des Feuchteinflusses

Im Zuge des Forschungsprojekts wurden wichtige Erkenntnisse erlangt, welche zukünftig zur baupraktischen Planung und Bemessung von Lehmbauwerken herangezogen werden können. Hierzu zählen beispielsweise die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Materialfeuchte auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von unstabilisierten Lehmbaustoffen unter Druckbeanspruchung. Aufbauend auf den Versuchsergebnissen sowie einer umfangreichen Literaturdatenbank konnte ein linearer Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit bzw. dem Elastizitätsmodul und der Materialfeuchte abgeleitet werden. Die resultierende Näherungsgleichung kann in baupraktischen Anwendungsfällen dazu verwendet werden, den Feuchteinfluss auf die genannten Materialeigenschaften auf unkomplizierte Weise rechnerisch abzuschätzen, ohne zusätzliche Druckversuche unter individuellen Klimabedingungen durchführen zu müssen. Die von den Lehmstoffherstellern deklarierten Werte der Druckfestigkeit und des Elastizitätsmoduls können mit Hilfe der Näherung gemäß Gl. (1) von den zugrunde liegenden normativen Referenzklimabedingungen ($\varphi = 50\%$) auf beliebige andere Materialfeuchten umgerechnet werden. Die im Rahmen des Projekts durchgeführten experimentellen Untersuchungen zeigten hinsichtlich der Klimaabhängigkeit keinen wesentlichen Einfluss von baupraktisch relevanten Temperaturänderungen auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehmbaustoffen, weshalb die Temperatur bei der Umrechnung der Materialeigenschaften unberücksichtigt bleiben kann.

2.2 Traglastmodell für druckbeanspruchte Lehmmauerwerkswände

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss der Materialfeuchte wurde im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens zudem ein analytisches Traglastmodell entwickelt, welches die Berechnung der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände unter Berücksichtigung beliebiger Materialfeuchten erlaubt. Mit Hilfe dieses Berechnungsansatzes ist es möglich, die Tragfähigkeit von Lehmmauerwerk unter Einbezug des materialspezi-

fischen Festigkeits- und Verformungsverhaltens sowie unter Berücksichtigung verschiedener Materialfeuchten und geometrischen Randbedingungen (wie z.B. der Wandschlankheit) wirklichkeitsnah zu ermitteln. Ein wesentlicher Vorteil des dargelegten Vorgehens besteht darin, dass zur Berechnung der Ausgangstragfähigkeit ein beliebiges normatives oder wissenschaftliches Traglastmodell verwendet werden kann, welches für die Anwendung bei druckbeanspruchtem Mauerwerk geeignet ist. Der damit ermittelte Ausgangswert der Querschnitts- oder Systemtragfähigkeit kann im Anschluss in Abhängigkeit der im individuellen Anwendungsfall zu erwartenden Materialfeuchte unkompliziert modifiziert werden.

2.3 Materialfeuchte von Lehmmauerwerk in praxisrelevanten Anwendungsfällen

Um die zu erwartende Materialfeuchte innerhalb praxisüblicher Lehmmauerwerkswände abzuschätzen, wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens bauphysikalische Simulationen für verschiedene Anwendungsfälle durchgeführt. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass bei Lehmmauerwerkswänden mit einer geringen Feuchteexposition, wie zum Beispiel bei Innenwänden von Wohn- und Bürogebäuden oder bei Außenwänden mit effektivem Schlagregenschutz, über den Jahresverlauf eine Materialfeuchte von maximal $\varphi \approx 60\%$ zu erwarten ist. Bei Außenwänden mit einem kapillaraktivem Wärmedämmverbundsystem oder einer Außenwand mit Innendämmung können insbesondere bei erhöhter Schlagregenbeanspruchung deutlich größere Materialfeuchten von $\varphi \approx 95\%$ auftreten. Im Rahmen der Bemessung von tragendem Lehmmauerwerk gemäß DIN 18940 wird die zu erwartende Materialfeuchte in Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsfalls durch eine Zuordnung der Lehmmauerwerkswand in die Nutzungsklassen NKL 1 für trockenere Anwendungsbereiche und NKL 2 für feuchtere Anwendungsbereiche berücksichtigt. Die Wahl der Nutzungsklasse wirkt sich dabei erheblich auf die Bemessung aus, da durch die Nutzungsklasse auch die feuchtebedingte Anpassung der Tragfähigkeit in Form eines zugehörigen Umgebungsfeuchtefaktors M festgelegt wird. Eine korrekte Zuordnung in die jeweiligen Nutzungsklassen ist für eine zuverlässige Bemessung daher von entscheidender Bedeutung.

2.4 Zuverlässige Bemessungsergebnisse gemäß DIN 18940

Weiterhin konnten aufbauend auf den durchgeführten Voruntersuchungen zuverlässigkeitstheoretische Analysen durchgeführt und somit wissenschaftlich fundierte Rückschlüsse über die Versagenswahrscheinlichkeit sowie die Tragwerkszuverlässigkeit von Lehmmauerwerkswänden gezogen werden. Die Ergebnisauswertung der Zuverlässigkeitsanalysen zeigt, dass das Nachweisverfahren gemäß DIN 18940 innerhalb des nun deutlich erweiterten Anwendungsbereichs eine zuverlässige Bemessung von tragenden Lehmmauerwerkswänden ermöglicht. Der Einfluss der Materialfeuchte sowie deren zeitliche Streuung wird dabei im Rahmen der normativen Bemessung durch die Zuordnung in unterschiedliche Nutzungsklassen zutreffend abgedeckt und auf unkomplizierte Weise durch einen entsprechenden Anpassungsfaktor bei der Berechnung der Wandtragfähigkeit berücksichtigt. Die erforderliche Zielzuverlässigkeit für Hochbauten wird dabei für praxisübliche Anwendungsfälle gut angenähert. Die Untersuchungen zeigen jedoch auch, dass ein effektiver Schlagregenschutz sowie eine korrekte Einordnung in die jeweilige Nutzungsklasse notwendig sind, um die erforderliche Tragwerkszuverlässigkeit sicherzustellen. Hierauf ist insbesondere bei Außenbauteilen in Gebieten mit erhöhter Schlagregen-

beanspruchung zu achten. Bei konsequenter Einhaltung der Regelungen gemäß DIN 18940 ist ein ausreichender Schlagregenschutz durch die normativ definierten konstruktiven Feuchteschutzmaßnahmen sowie die obligatorische Verwendung eines wasserabweisenden Außenputzes allerdings stets vorhanden. Demzufolge ist die Tragwerkszuverlässigkeit von druckbeanspruchten Bauteilen aus Lehmmauerwerk innerhalb des normativen Anwendungsbereichs stets gegeben und wird durch die lehmspezifische Feuchteabhängigkeit der mechanischen Materialeigenschaften nicht negativ beeinträchtigt.

Neben den intensiv beleuchteten Aspekten des Feuchteinflusses legen die Ergebnisse des Forschungsvorhabens ebenfalls dar, dass eine semiprobabilistische Bemessung druckbeanspruchter Lehmmauerwerkswände in Anlehnung an die vereinfachten Berechnungsmethoden des Eurocode 6 zu zuverlässigen Ergebnissen führt. Dabei ergibt sich unter Ansatz des mauerwerkstypischen, materialeitigen Teilsicherheitsbeiwerts in Höhe von $\gamma_M = 1,5$ für die normativ abgedeckten Anwendungsfälle eine hinreichende Tragwerkszuverlässigkeit, was wiederum in einer sicheren und nachhaltigen Anwendung von Lehmmauerwerk als tragendem Baustoff resultiert.

3.1 Methodik

Um die Forschungsziele zu erreichen, wurde zunächst eine umfangreiche Datenbasis geschaffen. Hierzu erfolgte vorbereitend eine Literaturrecherche, mit deren Hilfe praxisübliche Wertebereiche der mechanischen und bauphysikalischen Materialeigenschaften von unstabilisierten Lehmbaustoffen identifiziert werden konnten. Die Feuchteabhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften unter Druckbeanspruchung wurde daraufhin anhand mehrerer Versuchsreihen analysiert. Die Ermittlung der tatsächlich zu erwartenden Materialfeuchte in praxisüblichen Lehm-mauerwerkskonstruktionen erfolgte anschließend mit Hilfe instationärer hygrothermischer Simulationen. Zur Durchführung der numerischen Analysen wurde die Software „Delphin“ verwendet. Die bauphysikalische Materialmodellierung des Lehm-mauerwerks wurde auf Grundlage von experimentellen Untersuchungen der hygrothermischen Eigenschaften verschiedener Lehmsteine und Lehm-mauermörtel durchgeführt. Die Entwicklung des Rechenansatzes zur Ermittlung der Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks unter Berücksichtigung des Feuchteinflusses erfolgte analytisch und basierte auf den innerhalb des Projekts gewonnenen Versuchs- und Literaturdaten. Als Grundlage für die Traglastermittlung dienten bestehende Berechnungsmodelle für herkömmliches Mauerwerk, welche hinsichtlich der materialspezifischen Besonderheiten von Lehm-mauerwerk

angepasst wurden. Die abschließend durchzuführenden Zuverlässigkeitsanalysen erfolgten mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen. Zur Optimierung der Rechen- bzw. Simulationsdauer wurden die Monte-Carlo-Simulationen in der Programmiersprache Python verfasst und ausgeführt.

3.2 Projektverlauf

Zu Beginn des Forschungsprojekts wurde eine Literaturdatenbank zu den mechanischen und hygrothermischen Materialeigenschaften von unstabilisierten Lehm-baustoffen aufgebaut. Hierzu wurde sich vorrangig an Versuchsdaten aus wissenschaftlichen Veröffentlichungen wie Journal- und Konferenzbeiträgen oder Dissertationen bedient. Daraufhin wurden eigene experimentelle Untersuchungen an unstabilisierten Lehm-baustoffen zur Analyse des Klimaeinflusses auf die wesentlichen mechanischen Materialeigenschaften unter Druckbeanspruchung durchgeführt. Hierzu wurden alle Probekörper vor der Prüfung bei verschiedenen Umgebungsklimata bis zum Erreichen ihrer Massekonstanz innerhalb eines Klimaschranks gelagert. Die gewählten klimatischen Randbedingungen sowie die Anzahl der durchgeführten Untersuchungen sind für die analysierten Lehm-baustoffe in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Umfang der durchgeführten experimentellen Untersuchungen. Quelle: Maximilian Brinkmann

Relative Luftfeuchte φ	Temperatur θ	Versuchsumfang			
		Lehmstein I	Lehmstein II	Lehmmörtel	Lehmmauerwerk
5 %	23 °C	-	-	3	3
20 %		3	3	4	3
40 %		-	-	-	4
50 %	10 °C	-	-	-	3
	23 °C	3	3	3	6
	40 °C	-	-	-	3
65 %	23 °C	-	-	-	3
80 %		3	3	3	3
95 %		3	3	3	3

Darauf aufbauend erfolgte die Entwicklung eines analytischen Traglastmodells für feuchtebeeinflusstes Lehm-mauerwerk unter Druckbeanspruchung. Hierzu wurde zunächst eine Möglichkeit zur wirklichkeitsnahen Modellierung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Lehm-mauerwerk erarbeitet und anhand experimenteller Versuchsdaten validiert. Der einaxiale Modellierungsansatz beruht dabei auf dem Modell für nichtlineares Materialverhalten gemäß DIN EN 1992-1-1/NA. Die Eingangswerte zur Modellierung des Materialverhaltens, wie beispielsweise das Verhältnis aus Elastizitätsmodul und der Druckfestigkeit oder die Dehnung bei Erreichen der Höchstspannung, wurden für praxisübliches Lehm-mauerwerk auf Grundlage der vorab aufgebauten Literaturdatenbank ermittelt. Die feuchteabhängige Modifizierung der Spannungs-Dehnungs-Linie erfolgte anhand der experimentell ermittelten Näherungsgleichung zur Beschreibung des Feuchteinflusses auf die Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Lehm-mauerwerk (siehe Kapitel 1.1). Das adjustierte Materialmodell diente im weiteren Projektverlauf als Basis zur analytischen Berechnung der Querschnitts- und Systemtragfähigkeit von Lehm-mauerwerkswänden unter Berücksichtigung des Feuchteinflusses.

Zur Ermittlung der zu erwartenden Materialfeuchte wurden instationäre hygrothermische Simulationen für verschiedene praxisrelevante Anwendungsfälle von Lehm-mauerwerk durchgeführt. Auf Grundlage einer einleitenden Parameterstudie wurden dabei zunächst wesentliche Einflussgrößen auf den Feuchtegehalt von Lehm-mauerwerkswänden identifiziert und daraufhin fünf verschiedene Anwendungsfälle für die weiteren Untersuchungen festgelegt (siehe Abbildung 5). Der Wandaufbau einer Außenwand mit einem kapillaraktiven Wärmedämmverbundsystem (Anwendungsfall 1) ist in Abbildung 8 exemplarisch dargestellt.

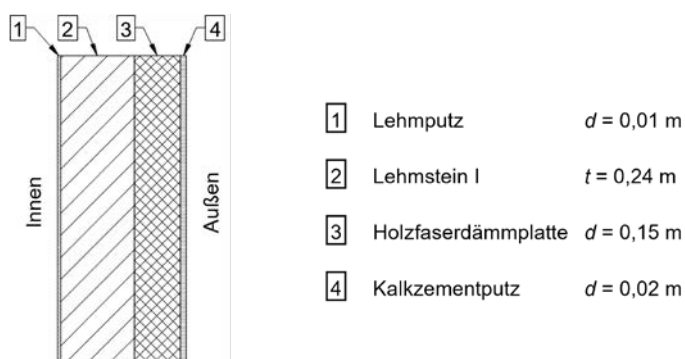


Abb. 8: Schematische Darstellung des Wandaufbaus für Anwendungsfall 1. Quelle: Maximilian Brinkmann

Aufbauend auf den Ergebnissen der hygrothermischen Simulationen konnte die zu erwartende Materialfeuchte für die einzelnen Anwendungsfälle durch statistische Verteilungsfunktionen modelliert werden. Diese bildeten die zeitliche Streuung des Feuchtegehalts innerhalb des Lehm-mauerwerks ab und wurden im Zuge der Zuverlässigkeitsanalysen als zusätzlicher Eingangsparameter berücksichtigt. Die Ergebnisse der hygrothermischen Simulationen wurden hierfür rechnerisch auf die bemessungsrelevante Nutzungsdauer eines Lehmgebäudes von 50 Jahren extrapoliert. Zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit von Lehm-mauerwerkswänden erfolgte anschließend die Durchführung diverser Monte-Carlo-Simulationen. Dabei wurden sowohl der Bauteilwiderstand unter Berücksichtigung des Materialfeuchteinflusses als auch die maßgebenden Einwirkungen basierend auf den individuellen statistischen Wahrscheinlichkeitsfunktionen der einzelnen Eingangsparameter wiederholt berechnet und gegenübergestellt. Das Verhältnis der dabei ermittelten Versagensfälle zur Gesamtanzahl der Berechnungsdurchläufe stellt die Versagenswahrscheinlichkeit dar. Hieraus ließ sich der Zuverlässigkeitsindex berechnen, welcher als normative Kenngröße für die Tragwerkssicherheit gilt. Im Rahmen eines abschließenden Vergleichs der für unterschiedliche Parameterkombinationen berechneten Zuverlässigkeitsindizes konnte anschaulich dargelegt werden, dass eine semiprobabilistische Bemessung von druckbeanspruchten Lehm-mauerwerkswänden gemäß DIN 18940 innerhalb des normativen Anwendungsbereichs sicher und zugleich wirtschaftlich ist.

Literatur

Brinkmann, M., 2023: Tragfähigkeit druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks unter Berücksichtigung nichtlinearer Feuchteprofile. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Brinkmann, M.; Wiehle, P., 2023: Correlation between relative humidity and the strength and deformation characteristics of unstabilised earth masonry. Construction and Building Materials 366.

Brinkmann, M.; Wiehle, P.; Thiele, M.; Graubner, C.-A., 2023: Grundlagen zur Bemessung druckbeanspruchten Lehm-mauerwerks. In: Mauerwerk-Kalender 2023. Instandsetzung, Erdbeben, Lehm-bau. Berlin: Ernst & Sohn.

El Fgaier, F.; Lafhaj, Z.; Chapiseau, C.; Antczak, E., 2016: Effect of sorption capacity on thermo-mechanical properties of unfired clay bricks. Journal of Building Engineering 6: 86–92.

Glock, C., 2004: Traglast unbewehrter Beton- und Mauerwerks-wände: nichtlineares Berechnungsmodell und konsistentes Bemessungskonzept für schlanke Wände unter Druckbeanspruchung. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.

Hansen, E.; Hansen, K., 2002: Unfired clay bricks - moisture properties and compressive strength. Proceedings of the 6th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries: 453–460.

Hartmann, R., 2019: Planungsgrundsätze im modernen Lehm-mauerwerksbau – Für eine Breitenanwendung im Wohnungsbau unter Berücksichtigung klimatischer Bedingungen gemäßiger Zonen am Beispielstandort Deutschland. Dresden: Technische Universität Dresden.

Heath, A.; Walker, P.; Fourie, C.; Lawrence, M., 2009: Compressive strength of extruded unfired clay masonry units. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials 162: 105–112.

Lemke, M.; Pistol, K.; Schroeder, H.; Schulz, J.-U., 2022: Erarbeitung von Datengrundlagen und Muster-Umweltproduktdeklarationen für Lehm-mauermörtel, Lehmsteine und Lehmplatten unter besonderer Berücksichtigung der Möglichkeiten des Recyclings, Osnabrück: Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU).

Morton, T.; Stevenson, F.; Taylor, B.; Smith, N., 2005: Low cost earth brick construction - 2 Kirk Park, Dalguise: Monitoring & Evaluation, Auchtermuchty: Arc Architecture.

Müller, U.; Ziegert, C.; Kaiser, C.; Röhlen, U., 2012: Eigenschaften industrieller Lehm-bauprodukte für den Mauerwerksbau und Verhalten von Lehmstein-mauerwerk. Mauerwerk 16, Band 1: 17–28.

Rempel, A.; Rempel, A., 2016: Intrinsic Evaporative Cooling by Hygroscopic Earth Materials. Geosciences 6.

Röhlen, U.; Ziegert, C., 2020: Lehm-bau-Praxis – Planung und Ausführung. Berlin: Beuth.

Schroeder, H., 2019: Lehm-bau – Mit Lehm ökologisch planen und bauen. Wiesbaden: Springer Vieweg.

United Nations Environment Programme, 2022: Global Status Report for Buildings and Construction – Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector, Nairobi: United Nations.

Wiehle, P.; Brinkmann, M., 2020: Tragfähigkeit von Lehm-mauerwerk – Eine experimentelle und numerische Analyse. LEHM 2020 – Tagungsbeiträge der 8. Internationalen Fachtagung für Lehm-bau.

Wiehle, P.; Brinkmann, M.; Thiele, M.; Graubner, C.-A., 2022: Schaffung von Bemessungsgrundlagen für Lehm-mauerwerk auf Basis von DIN EN 1996/NA mittels experimenteller und numerischer Untersuchungen, Osnabrück: Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU).

Projektbeteiligte



Beck Dr.-Ing.
Brinkmann Dr.-Ing.
Förster Prof. Dr.-Ing.
Beratende Ingenieure

Dr.-Ing. Maximilian Brinkmann
BBF | Beck Brinkmann Förster
Beratende Ingenieure PartG mbB
brinkmann@bbf-ing.de
www.bbf-ing.de

Dr.-Ing. Dominik Müller
RSP Rammel + Sattler
Ingenieurgesellschaft mbH
dominik.mueller@rsp-ingenieure.de
www.rsp-ingenieure.de

Dr.-Ing. Dominik Beck
BBF | Beck Brinkmann Förster
Beratende Ingenieure PartG mbB
beck@bbf-ing.de
www.bbf-ing.de

Prof. Dr.-Ing. Valentin Förster
BBF | Beck Brinkmann Förster
Beratende Ingenieure PartG mbB
foerster@bbf-ing.de
www.bbf-ing.de

Impressum

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG



Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.44
Projektlaufzeit: 07.21 bis 10.23
Bundesmittel in €: 65.844
Zuwendungsempfängende: Technische Universität Darmstadt

Über Zukunft Bau

Mit dem Innovationsprogramm Zukunft Bau stärkt das BMWSB gemeinsam mit dem BBSR die Zukunfts- und Innovationsfähigkeit des Bausektors. Die Zukunft Bau Forschungsförderung schafft Vorbilder, die die Machbarkeit von neuen Ideen ausloten und die Baupraxis weiterentwickeln. Gefördert werden Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, die einen Gebäudebezug als Schwerpunkt haben und einen substantiellen Beitrag zur Bewältigung aktueller und künftiger Herausforderungen im Baubereich erwarten lassen.

zukunftbau.de

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Dr. Jan Weckendorf
jan.weckendorf@bbr.bund.de

Autor

Dr.-Ing. Maximilian Brinkmann 
BBF | Beck Brinkmann Forster
Beratende Ingenieure PartG mbB
brinkmann@bbf-ing.de

Redaktion

BBF | Beck Brinkmann Förster
Beratende Ingenieure PartG mbB

Stand

Mai 2024

Grafisches Konzept

www.sans-serif.de

Gestaltung, Satz und Barrierefreiheit

www.sans-serif.de
www.satzweiss.com

Bildnachweis

Titelbild: Maximilian Brinkmann
Dall'Armi Ingenieure GmbH (S. 4)

Vervielfältigung



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons-Lizenz Attribution – Share Alike 4.0 (CC BY-SA 4.0). Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers und der Weitergabe unter gleichen Bedingungen die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell. Nähere Informationen zu dieser Lizenz finden sich unter: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de/>.

Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

Zitiervorschlag

Brinkmann, M., 2024: Nachhaltig und zuverlässig bauen mit Lehm: Aktualisierte Bemessung von Lehmmauerwerk unter Feuchteinfluss. Herausgeber: BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Zukunft Bau Forschung kompakt 1/2024. Bonn. <https://doi.org/10.58007/82mq-9d53>



Bonn 2024

ISSN 2944-067X

Dieses Werk ging aus folgendem Forschungsbericht hervor:

Brinkmann, M., 2024: Nachhaltig und zuverlässig bauen mit Lehm: Entwicklung eines semiprobabilistischen Sicherheitskonzepts für feuchtebeeinflusstes Lehmmauerwerk.
Herausgeber: BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung.
BBSR-Online-Publikation 25/2024, Bonn.

Hier geht es zum kostenfreien Forschungsbericht:

<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2024/bbsr-online-25-2024-dl.pdf>

