

Lola Ben-Alon¹, Vivian Loftness¹, Kent A Harries², Erica Cochran Hameen¹

¹ School of Architecture, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA.

² Civil and Environmental Engineering Department, University of Pittsburgh, USA.

Lebenszyklusbewertungen von Lehmbaukonstruktionen – ein Vergleich zu konventionellen Bauweisen

Ein Großteil der aktuellen Fortschritte im Lehm- bau entwickelt sich auf Grund des Engagements einzelner, bei dem diese Pioniere und Befürworter mit technischen, wirtschaftlichen und politischen Zwängen konfrontiert sind (Woolley, 2006). Trotz der zahlreichen ökologischen und sozialen Vorteile von Lehm- baustoffen zögert die Mainstream-Bauindustrie immer noch, Lehm- baustoffe zu übernehmen, und viele Fachleute in der konventionellen Bauindustrie sind nicht bereit, sich auf das einzulassen, was sie als nicht bewährte Materialien und experimentelle Techniken empfinden, die keine Standardzulassung, Zertifikate und Garantien haben (MacDougall 2016).

Diese Situation führt zu einer mangelhaften Einführung dieses Baustoffes in die Mainstream-Bauindustrie wobei die genauen Gründe für diese umfassende Herausforderung noch nicht gründlich herausgearbeitet sind. Ohne den Mechanismus zu kennen, der hinter der mangelnden Implementierung von Lehm- baustoffen steht, sind Lösungen schwer zu entwickeln. Aus diesen Gründen ist es notwendig, durch Forschung mehr Informationen und regionale Beispiele zu erhalten.

Auch wenn die Leistungsfähigkeit von Lehm- baustoffen ausgiebig untersucht wurde, ist das Wissen immer noch sehr divers und unsortiert. Insbesondere konzentrieren sich LCA-Studien zu Lehm- baustoffen hauptsächlich auf die Bestandsanalyse, die einen wichtigen ersten Schritt darstellt, aber es fehlt eine vergleichende Bewertung der Auswirkungen auf den Lebenszyklus von Lehm- bauteilen im Vergleich zu konventionellen Bauweisen.

Die vorliegenden LCA Studien zu Lehm- bauten umfassen Lehmsteine (Christoforou et al., 2016; Shukla et al., 2009), Lehmputze (Melié et al., 2014), so genannte Earthships (Freney et al., 2012; Kuil, 2012), gepresste

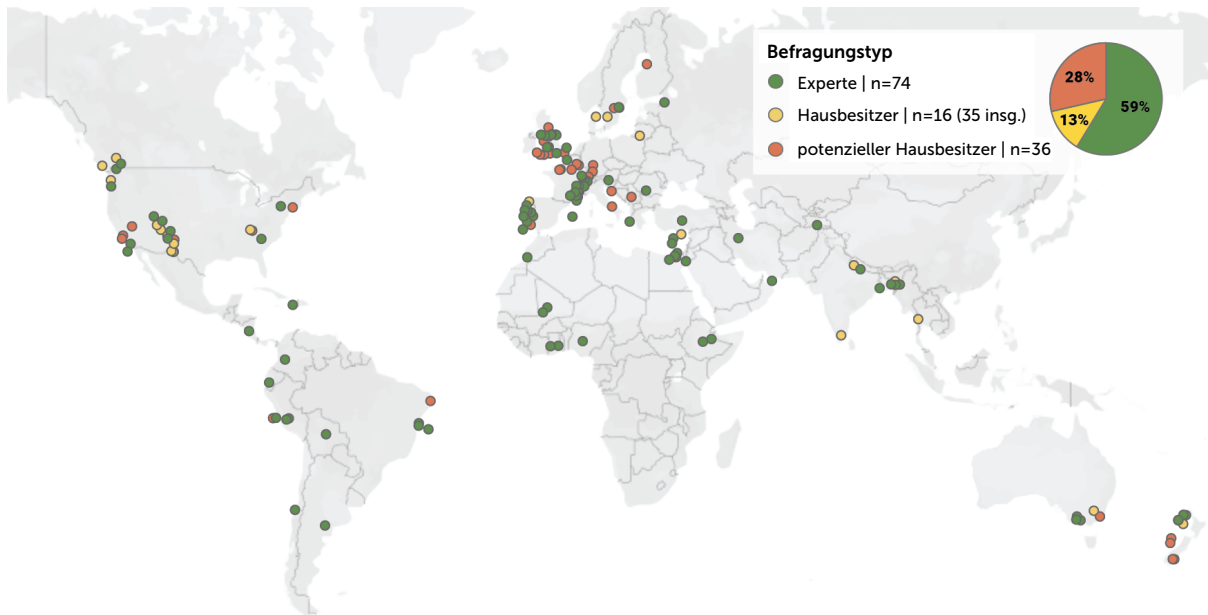
Lehmblöcke (Fernandes et al., 2019), und Lehmsäcke (Cataldo-Born et al., 2017), Stampflehm (Morel et al., 2001; Serrano et al., 2013) und Wellerlehm (Estrada, 2013; Kutarna et al., 2013). Diese bestehenden Studien konzentrieren sich meist auf einzelne Baugruppen, die aufgrund der in jeder Studie verwendeten orts-, material- und prozessspezifischen Daten nicht ohne weiteres vergleichbar sind. Das macht es schwierig, daraus Umweltmanagementempfehlungen zu extrahieren oder Designänderungsanforderungen zu bestimmen. Schließlich verwenden viele Studien eine funktionelle Einheit von 1 kg Material, die keinen realistischen Vergleich zwischen verschiedenen Konstruktionsweisen zulässt.

Die in diesem Papier vorgestellte Arbeit enthält eine eingehende Bewertung der Lehm- bausituation vor Ort, die von Lehm- baufachleuten und Hausbewohnern erhoben wurde. Zusätzlich wird eine vergleichende LCA aus einer Auswahl von Lehm- bauweisen und konventionellen Wohnbauweisen vorgestellt. Mit einer Funktionseinheit von 1 m² eines typischen ein- oder zweistöckigen Wandsystems ermöglicht diese Studie einen zukünftigen Vergleich sowie zukünftige Analysen, die betriebliche Überlegungen anderer typischer Wandbaugruppen berücksichtigen.

Wahrnehmungstudie: Umfragen unter Lehmbauexperten und Hausbesitzern

Umfragegestaltung und Verteilung der Befragten

Eine Online-Befragung von Lehm- bauexperten und Lehm- hausbewohnern untersuchte sowohl den tatsächlichen Zustand des Lehm- bauens in der Praxis als auch die Standpunkte, Wahrnehmungen und Erfahrungen der Teilnehmer beim Bauen mit Lehm. Zur Beleuchtung wichtiger Informationen und Daten wurde eine Nichtwahrscheinlichkeitsstichprobe verwendet. Diese Art von Stichprobentechnik erlaubt es nicht, die Ergebnisse auf eine breitere Bevölkerungs-



01 Geographische Verteilung der Befragten zum Thema Lehmbau

gruppe zu verallgemeinern, ermöglicht es jedoch, Erfahrungen, Meinungen und Beziehungen in Bezug auf die Zielpopulationen zu identifizieren und zu beschreiben. Die Rekrutierung zur Befragung kombinierte zwei Stichprobenverfahren: Zielverfahren (d.h. Antworten von ausgewählten Berufsgruppen) und Schneeball (d.h. weitere Befragte wurden aus der ersten Gruppe der Befragten bezogen). Von Januar bis Juli 2018 haben insgesamt 126 Personen an der Online-Umfrage teilgenommen.

Alle Zielgruppen wurden nach ihrer vermeintlichen Motivation und Hindernissen für den Einsatz von Lehmstoffen befragt. Darüber hinaus wurden Experten auch nach ihrer Berufserfahrung und ihrer Wahrnehmung von Richtlinien für das Errichten von Lehmhäusern befragt. Hausbesitzer wurden gebeten, eine Reihe von Fragen zum Design und zur Performance Ihrer Lehmhäuser zu beantworten.

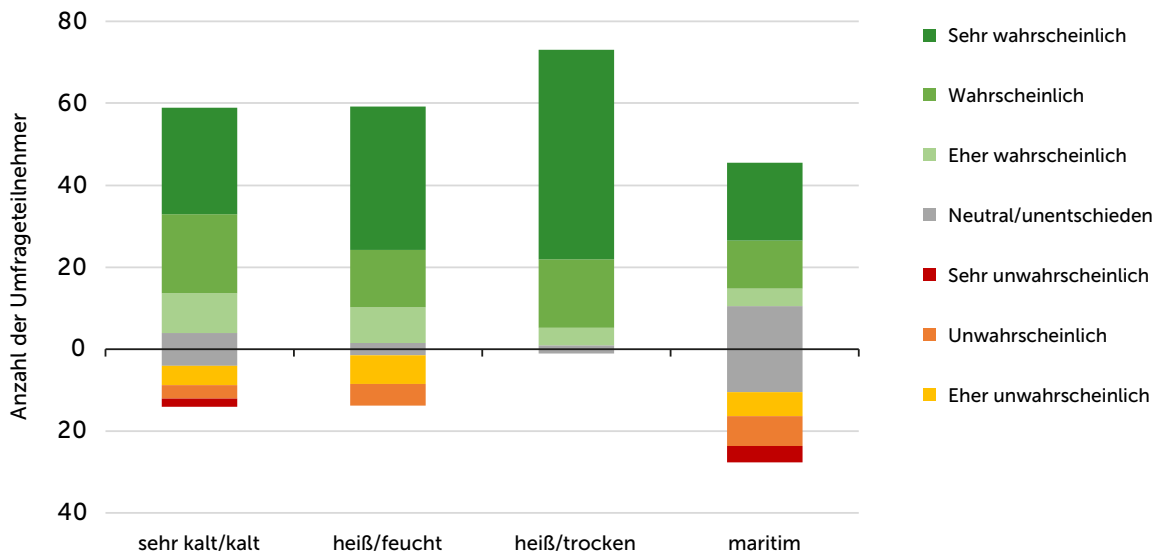
Abbildung 1 zeigt eine gute geographische Verteilung, wobei ein gewisser Schwerpunkt auf Europa liegt, da der Aufruf z.T. von einer akademischen Einrichtung der EU versandt wurde.

Zusätzlich zu den 16 Hausbesitzerbefragungen gaben 26% (n = 19) der Sachverständigen an, dass sie auch in einem Lehmhaus leben, wodurch sich die Gesamtzahl der vollständigen Fragebögen für Hausbesitzer auf 35 erhöht.

Umfrageergebnisse: Experten

Die Akademischen Forscher stellten die Mehrheit der Experten mit 37% (n=27), gefolgt von 31% (n=23) Architekten/Designern, 15% (n=11) Baufachleuten/Handwerker, 8% (n=6) Bauprojektleitern, 5% (n=4) Lehrern und 4% (n=3) Statikern. Die Experten wurden nach der Wahrscheinlichkeit gefragt, dass sie die Verwendung von Lehmstoffen und Lehmbauweisen für vier große Klimazonen empfehlen würden. Wie in Abbildung 2 dargestellt, neigen die Experten in der Regel dazu, Lehmstoffe in allen Klimazonen zu empfehlen. Das Meeresklima erhielt am wenigsten positiven Reaktionen, wahrscheinlich aufgrund der erwarteten Kombination von Niederschlag und Salz, die beide als wichtige Gefährdungsfaktoren für Gebäude angesehen werden.

Abbildung 3 zeigt die Vertrautheit der Experten mit bestehenden Lehm-Bauvorschriften und Richtlinien. 24% (n=18) der befragten Experten gaben an, im Allgemeinen unerfahren in der Verwendung von Bauvorschriften zu sein, während 76% (n=56) der Experten berichteten, vorhandene Bauvorschriften für ihre Lehmbauprojekte zu verwenden. Von den Experten, die Bauvorschriften verwenden, hatten 27% (n=15) konventionelle Materialvorschriften auf ihre Lehmbauprojekte angewendet. Die übrigen Experten berichteten, dass sie hauptsächlich die Lehmbau Regeln aus Deutschland verwenden (Dachverband Lehm, 2008; NABau, 2013), aus Neuseeland (New Zealand Standards, 1998a, 1998b, 1998c) oder von New-Mexico (New Mexico Regulation & Licensing Depart-



02 Die Experten empfehlen am ehesten Lehmbaumstoffe in gemischten heißen und trockenen Klimazonen

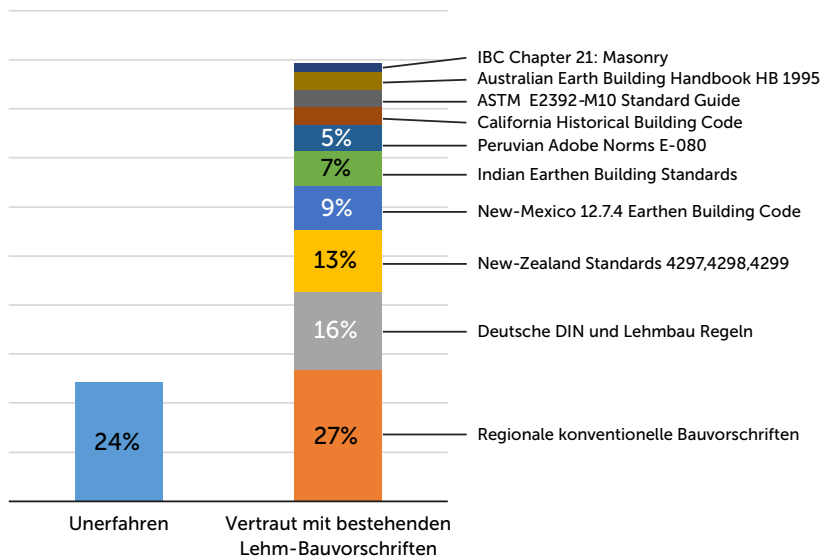
ment & NMAC, 2015). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass innerhalb der Lehmbaugemeinschaft Bauvorschriften oft noch unbekannt sind oder nicht angewendet werden. Es wurde keine dominante Norm/Richtlinie identifiziert.

Experten bewerteten die Qualität der von ihnen verwendeten Lehmbauverordnung/Norm/Richtlinie. Abbildung 4 zeigt, dass die Lehmbauvorschriften nach Ansicht von Experten im Allgemeinen benutzerfreundlich und relevant für die verschiedenen Lehmbautechniken sind, wobei die neuseeländischen Earthen Building Standards mit den höchsten Bewertungen aufwarten können (New Zealand Standards,

1998c, 1998a, 1998b). Experten wiesen jedoch darauf hin, dass die Verwendung von Lehmbaunormen im Vergleich zu herkömmlichen Bauprojekten zu einem teureren und längeren Genehmigungsverfahren führt, mit den größten Auswirkungen, bei der Verwendung von US-basierten Lehmbaunormen, insbesondere dem NM-Code (New Mexico Regulation & Licensing Department et al., 2015). Diese Feststellung ist wohl weniger eine Folge der Norm selbst, sondern eher ein Spiegelbild der Genehmigungspraxis in den Vereinigten Staaten.

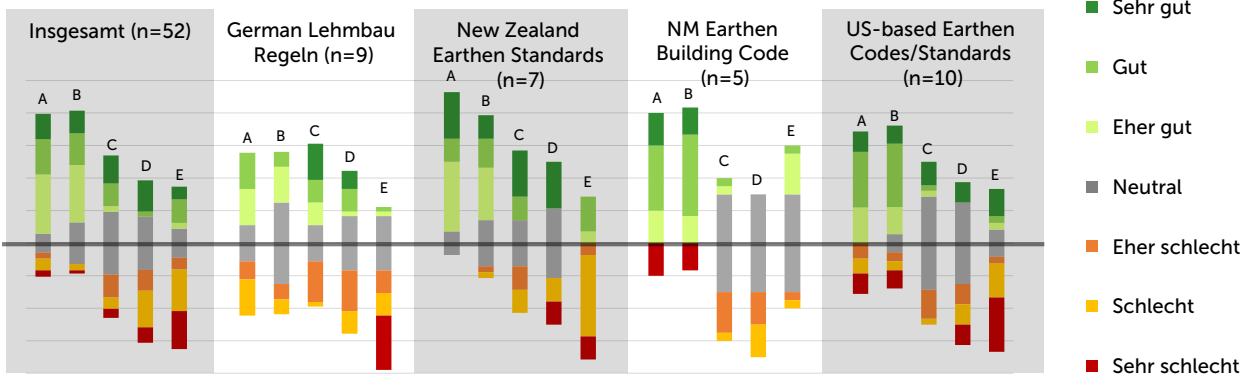
Darüber hinaus stellten Experten fest, dass Baubehörden im Allgemeinen mit den Lehmbauvorschriften

03 Die Experten haben vor allem Erfahrung mit der Anwendung konventioneller Bauvorschriften für Lehmbauprojekte



LEBENSZYKLUSBEWERTUNGEN VON LEHMBAU KONSTRUKTIONEN

- A Repräsentanz
- B Nutzerfreundlichkeit
- C Genehmigungskosten
- D Genehmigungsdauer
- E Vertrautheit in Baubehörden



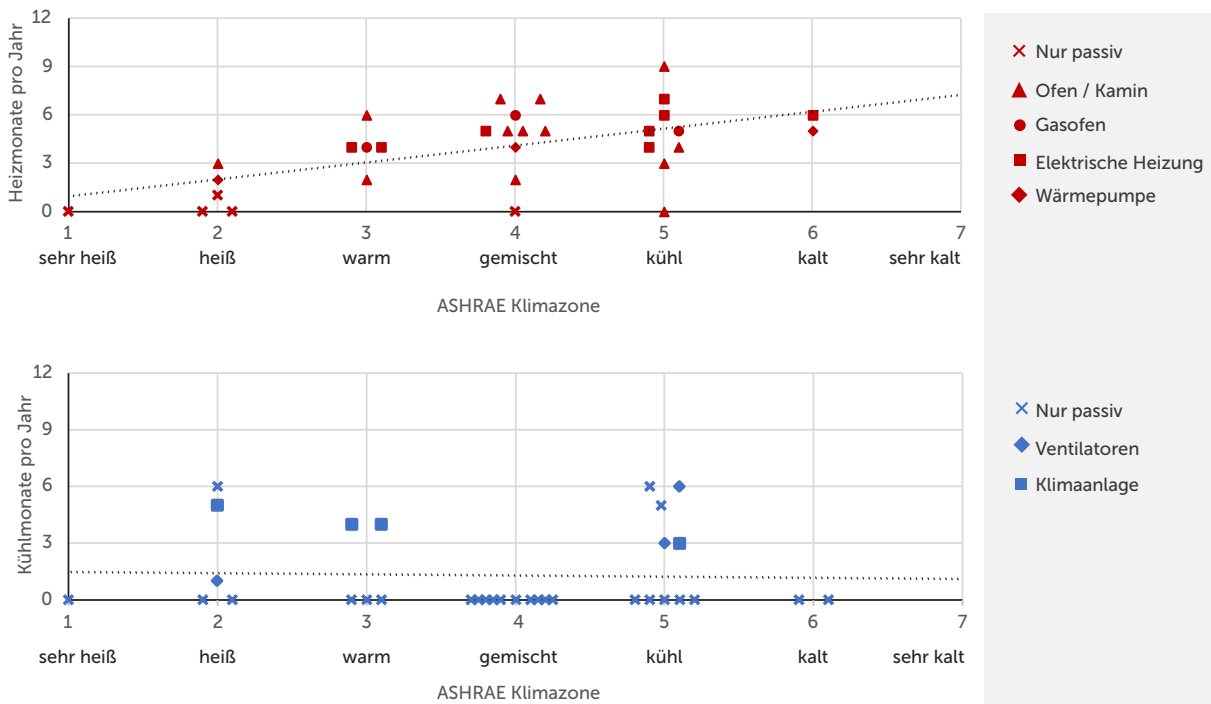
04 nach Aussage der Experten sind Lehm bauvorschriften und -Normen unter Baubehörden nicht verbreitet/bekannt

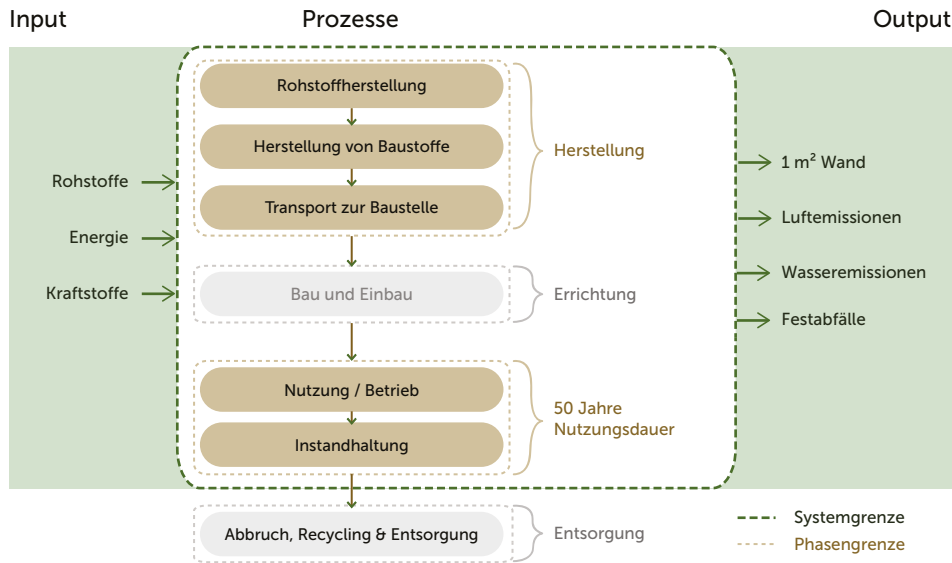
ten nicht vertraut sind. Insbesondere wurden die deutschen Lehm bau Regeln als die am wenigsten vertrauten bei Baubehörden eingestuft (schließlich sind sie zum Zeitpunkt des Schreibens dieses Papiers nur in deutscher Sprache verfügbar), gefolgt von den neuseeländischen Earthen Building Standards. Die Experten berichteten oft von einem anderen geografischen Standort als dem Ursprungsland der Normen; zum Beispiel für die Lehm bau Regeln, wo von 9 befragten Hausbewohnern 7 aus dem Ausland kamen.

Umfrageergebnisse: Hausbesitzer

Die 35 Fragebögen an Hausbesitzer zielten darauf ab einige Designaspekte von Lehmhäusern zu untersuchen, einschließlich der Wände, der Böden, des Daches und anderer Verkleidungsmaterialien. Von den Lehmhausbesitzern gaben 31% (n=11) an, Lehmsteine in den Außenwänden ihres Hauses zu haben. Andere Häuser umfassten eine Vielzahl von Techniken: Wellerlehm, hybride Strohballen- und Lehm baustoffe, Lehmputz auf verschiedenen Oberflächen, Stampf-

05 Laut den befragten Hausbesitzern reduzieren ihre Lehmhäuser den Bedarf an Kühlung für alle Klimazonen





06 Das Systemgrenzdiagramm der LCA-Studie. Die Phasen sind die Produktion und der Betrieb von der Wiege bis zum Ende der Lebensdauer (des Gebäudes).

lehm, Strohlehm und gepresste Lehmsteine. 55% (n=18) der Häuser hatten den Angaben zufolge keine zusätzliche Dämmung. Bei den gedämmten Häusern berichteten die Hausbesitzer von Strohballen, Strohlehm, eingeblassener Zellulose und Schafwolle. Keiner der Hausbesitzer meldete eine Kunstfaserdämmung in seinem Lehmhaus.

58% (n=19) der Hausbesitzer gaben an, ihr Haus auf Betonfundamenten gebaut zu haben, während andere Hausbesitzer entweder Stein, Kies oder stabilisierte Lehmfundamente verwendeten. Die meisten Häuser hatten eine geringe Grundfläche. Mit 67% (n=20) lagen die Häuser im Bereich von 270-1470 ft² (~25-135 m²) Grundfläche. 83% (n=29) der Antworten gaben an, dass sie manuelle Arbeitstechniken verwendeten, um ihr Haus zu bauen und nur 17% (n=6) berichtet, mit einer Kombination von manuellen Techniken und Maschinen zu bauen. Die Hausbesitzer spezifizierten folgende Maschinen: Mechanischer Mischer, Blockverdichtungsmaschine (Steinpresse), Traktor, Rammer und Bagger für Niveaunivellierung.

Die Befragten gaben ihr Land und ihre Stadt, die Komfortniveaus in jeder Jahreszeit, die Heizungs- und Kühlsystemtypen sowie ihr Nutzungsmuster tagsüber und das ganze Jahr über an. Diese Reihe von Fragen ermöglichte die Analyse der thermischen Leistung der Lehmhäuser für Heiz- und Kühlzeiten nach der ASHRAE-Klimazone. Wie in Abbildung 5 dargestellt, gaben 75% (n=26) der Hausbesitzer an, dass ihr Haus über kein Kühlsystem verfüge. Diese Ergebnisse könnten darauf hindeuten, dass Lehm-

häuser den Bedarf an Kühlung für alle Klimazonen verringern. Einige passive Kühlsysteme wurden benannt, welche die Besitzer mehrere Monate im Jahr (manuell) „aktiviert“ haben. Passive Kühlstrategien umfassten Verschattungen und (temporär) geöffnete Fenster. Unter den passiven Heizstrategien, welche die Hausbesitzer angegeben haben waren Solar-Luft-Heizungen, Erdkollektoren für temperierte Belüftung, Trombe Wände, und Sonnenlicht.

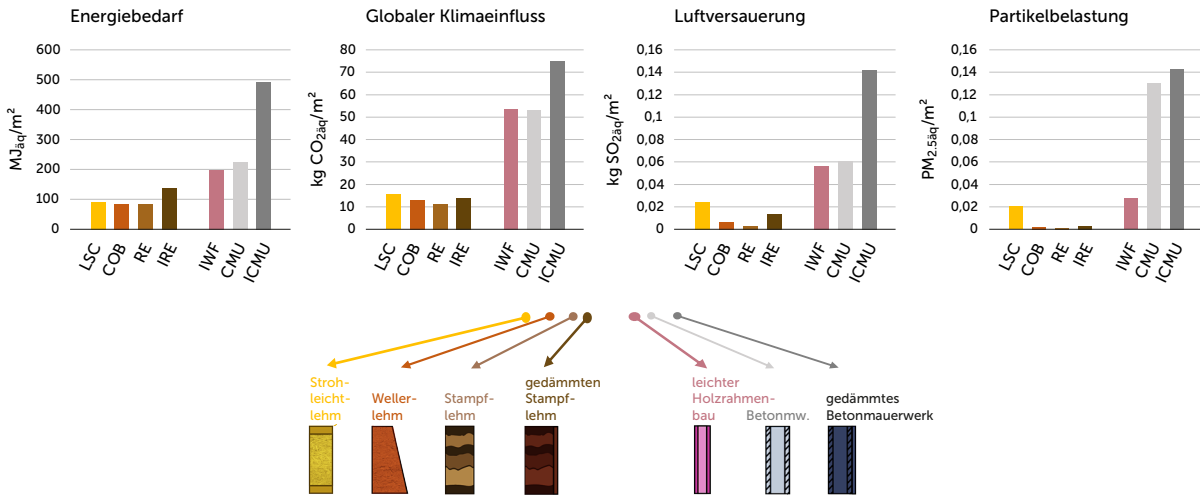
Technische Studie: Lebenszyklusbetrachtungen (LCA) von Lehmstoffen gegenüber konventionellen Baustoffen

LCA-Ziele, Geltungsbereich und Methoden

Das Hauptziel der vorgestellten LCA war es, die potenziellen Umweltauswirkungen von Bauen und Leben in den Lehmhäusern im Vergleich zu verschiedenen konventionell gebauten Häusern aufzuzeigen. Die Studie berücksichtigt vier Lehmbauweisen (Wellerlehm, Strohlehm, gedämmten und nicht gedämmten Stampflehm) und drei konventionelle Bauweisen (leichter Holzrahmenbau, gedämmtes und nicht gedämmtes Betonmauerwerk). Diese LCA folgt der Umwelt-Lebenszyklus-Bewertungsmethode, wie sie in der ISO-Serie der LCA-Normen (ISO, 2006a, 2006b) definiertversion 2006 ist. Eine SimaPro Software wurde verwendet, um Gebäudedaten zu modellieren, die für Nordamerika relevant sind.

Zu den Umweltauswirkungen gehörten Energieeinsparungen und Emissionsreduktionen für ein Einfamilienhaus in warm-heißen Klimazonen in den USA im Sinne von ASHRAE (ICC, 2018): Warm-Heiß-Kli-

LEBENSZYKLUSBEWERTUNGEN VON LEHMBBAUKONSTRUKTIONEN



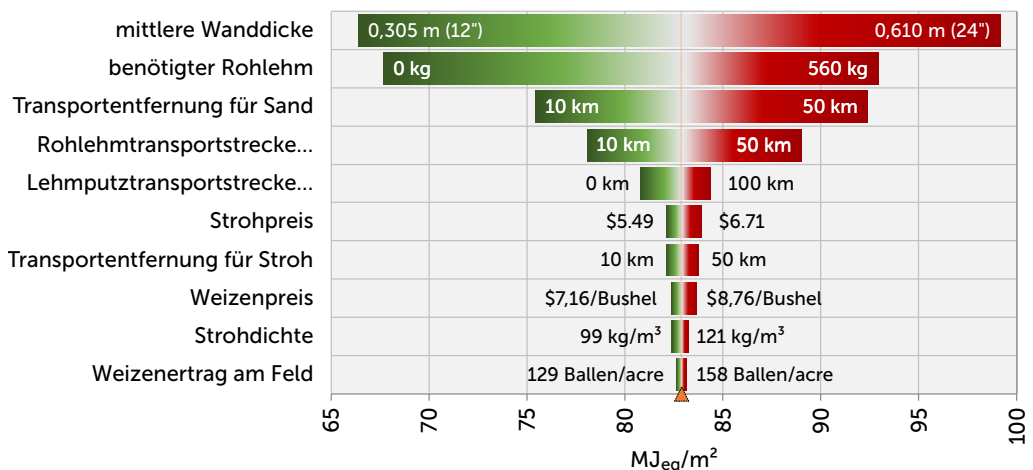
07 Vergleichsübersicht der Umwelteinflüsse für jeden Wandaufbau

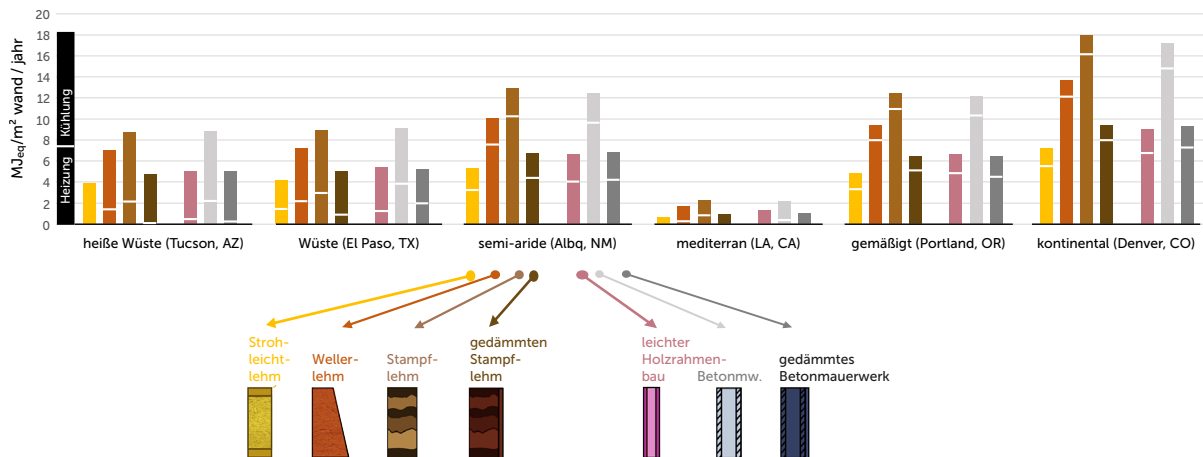
mazonen 2B (z.B. Tucson, AZ), 3B (z.B. El Paso, TX), 3C (z.B. Los-Angeles, CA), 4B (z.B. Albuquerque, NM), 4C (z.B. Portland, OR) und 5B (z.B. Denver, CO). Die Software EnergyPlus, Version 9.2.0 und DesignBuilder Version 6.1.3 wurden verwendet, um die thermische Leistung sowohl der Lehm- als auch der konventionellen Bauweisen zu modellieren.

Die LCA-Systemgrenze gilt von der Wiege bis hin zur *End-of-Life-Phase*, einschließlich der Gewinnung und Verarbeitung der Rohstoffe, der Herstellung der Baustoffe, dem Transport der Baustoffe zur Baustelle, dem Betrieb von Klimaanlagen für die Raumkonditionierung und Wartung für eine Lebensdauer von 50 Jahren. Baustelleneinrichtung sowie Abbruch- und Entsorgungsenergie und Emissionen gehen über die Systemgrenzen hinaus, wie Abbildung 6 zeigt.

Die verschiedenen Wandaufbauten wurden mit unterschiedlichen Konstruktionsmaterialien entworfen und die Bestandsanalyse für jedes Konstruktionsmaterial als erster Schritt für diese Arbeit entwickelt, wie in (Ben-Alon et al., 2019) low carbon, and locally available alternative to conventional building materials and methods. This paper provides a framework for a comparative Life Cycle Assessment (LCA) beschrieben. Jedes der Strohleichtlehm-, Wellerlehm- und Stampflehmwandsysteme enthält tonhaltige Erde (Rohlehm). Je nach Wandaufbau wurden Kies, Sand, Fasern und Wasser in das Gemisch einbezogen. Wellerlehm und Strohleichtlehm erhielten auch eine Lehmputzschicht. Zusätzlich erhielt der Strohleichtlehm einen leichten Holzrahmen.

08 Sensitivitätsanalyse des Energiebedarfs der Wellerlehmherstellung, geordnet nach dem Inputeffekt auf den Output-Mittelwert (Strohpreis: Input 4,64€, Output 5,68€ | Weizenpreis: Input 6,06€ – Output 7,41€)





09 Jährliche Auswirkungen des betrieblichen Energiebedarfs auf Heizung und Kühlung für jede Baugruppe an jedem der 6 geprüften Standorte. Geteilt durch eine weiße Linie, bedeuten die unteren Balken Heizbedarfe und obere Balken bedeuten Kühlbedarfe.

Enthaltene und operative Lebenszyklus-Folgenabschätzung (LCIA)

Abbildung 7 zeigt den Vergleich der enthaltenen (verkörperten) Umweltauswirkungen aller sechs Wandaufbauten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lehmbauweisen für alle Einflusskriterien eine deutlich bessere Umweltleistung aufweisen als die herkömmlichen gedämmten Holzrahmen- und Betonstein-Wandsysteme. Es wird gezeigt, dass Lehmbauweisen den Energiebedarf um 62-68%, das Klimawandelpotenzial um 83-86%, die Luftversauerung um 58-95% und die Partikelbelastung um 84-99% reduzieren.

Für einen detaillierteren Vergleich wurde eine Sensitivitätsstudie durchgeführt, um die Wirkung aller verschiedenen Annahmen zu demonstrieren, die in den verkörperten Umwelteinflüssen enthalten sind. Anhand von Dreiecks-Inputverteilungen und über 1000 modellierten Iterationen veranschaulicht die Sensitivitätsanalyse die Auswirkungen von Transportentfernungen, Weizenkorn- und Strohmarktpreisen, durchschnittlicher Wanddicke, benötigter Rohlehmmenge, Strohdichte und durchschnittlichem Weizenantrag auf dem Feld. Die Analyse wurde mit der @Risk-Software durchgeführt und verwendet ein Modell im Excel-Format (Palisade, 2009).

Die Sensitivitätsergebnisse für die Wellerlehmbauweise sind in Abbildung 8 dargestellt, wobei sie den „Durchschnitt“ zwischen dem Stampflehm- und den Strohleichtlehmkonstruktionen aufgrund ihrer Einbeziehung sowohl geologischer als auch biologischer Materialien darstellt. Die hohe Abhängigkeit der Um-

weltauswirkungen von Wellerlehm von der Menge des benötigten Rohlehms zeigt die Vorteile der Verwendung von Vor-Ort-Aushub, der durch Fundamentaushub oder aus nahegelegenen Aushubprojekten zur Verfügung gestellt werden kann. Dieses Szenario bietet den Vorteil, dass der Transport- oder Rückführungsaufwand von ansonsten nicht genutzten ausgehobenen Böden vermieden wird. Beispielsweise zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass die Verwendung von Lehm vor Ort den Energiebedarf von 83 MJeq/m² bis 66 MJeq/m² um bis zu 20% senken kann. Der Einfluss der Wanddicke auf die verkörperten Umweltauswirkungen von Wellerlehm sollte zu weiterer Forschung und Feldversuchen hinsichtlich einer optimalen Material-Mischung führen, die eine möglichst minimale Wanddicke liefern könnte. Die Erhöhung des R-Wertes des Wellerlehms kann auch eine geringere Wanddicke ermöglichen.

Für die betrieblichen (operativen) Auswirkungen des Lebenszyklus wurde eine Jahreswärmebilanz mit einer virtuellen Kammer in jedem der getesteten Klimazonen simuliert. Die Energielasten für jedes Klima wurden dann verwendet, um die betrieblichen Umweltauswirkungen aus einer Lebenszyklusperspektive abzuschätzen.

Die Details der Simulation der Heiz- und Kühlenergiebedarfe (Abbildung 9) zeigen, dass der Strohleichtlehm die anderen Baugruppen in den meisten Fällen übertrifft. Gedämmter Stampflehm führt nachweislich zu einem ähnlichen Energiebedarf wie herkömmliche Bauweisen mit weniger Heizlasten

für trockene und gemäßigte Klimazonen. Nur unter den mildesten Bedingungen schneidet die gesamte Gruppe der Lehmbauweisen am besten ab. Dies zeigt sich bei den Sommerkühllasten in Los Angeles, obwohl die Gesamtbelastung für diesen Standort aufgrund des milden Klimas und im Vergleich zu anderen Standorten geringer und weniger signifikant ist.

Die Kompromisse zwischen den enthaltenen (verkörperten) Umweltauswirkungen und den betrieblichen (operativen) Lebenszyklusauswirkungen für Raumheizung und -kühlung für eine 50-jährige Gebäudelebensdauer zeigen, dass die verkörperten Anteile für die Lehmbauweisen dominieren können und selbst bei einem 50-jährigen betrieblichen Energieverbrauch einen erheblichen Vorteil gegenüber dem konventionellen Bauen bieten.

Für alle Klimazonen mit Ausnahme des mildesten wird gezeigt, dass Strohleichtlehm die beste Leistung im Gegensatz zu herkömmlichen Baugruppen erzielt, sowohl für verkörperte als auch operative Auswirkungen. Gedämmter Stampflehm zeigt sich geeignet, um den Energiebedarf vor allem für heiße Wüsten und trockene Klimazonen zu reduzieren. Wellerlehm erweist sich am vorteilhaftesten in heißen Wüsten und mediterranen Klimazonen, wo er besser als nicht gedämmte Betonsteinbauweisen abschneidet, die in diesen Klimazonen weltweit vorherrschen. Jedoch wird Wellerlehm durch gedämmte Holzrahmenkonstruktion und gedämmte Betonsteinbauweisen in semiariden, gemäßigten und kontinentalen Klimazonen übertroffen.

Schlussfolgerungen und Diskussion

In diesem Beitrag werden wichtige Schritte zur Integration von Lehmstoffen in das Mainstream-Bauwesen anhand von Wahrnehmungserhebungen und Umwelt-Lebenszyklusbewertung (LCA) dargestellt.

126 Wahrnehmungserhebungen untersuchten die regulatorischen Barrieren und Komfortbedingungen, die von Lehmexperten und Lehmhausbesitzern wahrgenommen werden. Die Ergebnisse der Erhebungen zeigen, dass innerhalb der Lehmbaugemeinschaft Bauvorschriften oft unbekannt sind oder nicht angewendet werden. Darüber hinaus sind die örtlichen Baubehörden nach Ansicht von Experten mit den regionalen Lehmvorschriften nicht vertraut. Schließlich, so die Hausbesitzer, reduzieren Lehmhäuser den Bedarf an Kühlung für alle Klimazonen.

Für die Lebenszyklusbetrachtungen (LCA) wird die Umweltrelevanz von Lehmstoffen beleuchtet, wobei die Kompromisse zwischen dem enthaltenen (verkörperten) und dem betrieblichen Energiebedarf und den Emissionen berücksichtigt werden. Die Lebenszyklusbetrachtungen zeigen, dass Strohleichtlehm die konventionellen Bauweisen sowohl bei den enthaltenen als auch den operativen Umweltauswirkungen für die meisten Klimazonen in seiner positiven Bewertung übertrifft. Gedämmter Stampflehm übertrifft nachweislich die nicht gedämmte Bauweise sowie konventionelle Bauweisen. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Verwendung von Lehmstoffen und Dämmstoffen in den verschiedenen Teilen des Gebäudes zu einem optimalen Komfort im Gegensatz zu herkömmlichen Dämmungslösungen führen könnte. Dies kann die Grundlage für hygrometrische, Massen- und Wärmeleitbetrachtungen für den Innenraumkomfort und die anspruchsvollen aktuellen internationalen Energieanforderungen bilden.

Die in diesem Papier vorgestellten Arbeiten tragen zur Entwicklung ökologischer und politischer Maßnahmen bei, die zur Förderung der Implementierung von Lehmbauweisen in das Mainstream-Bauwesen eingesetzt werden könnten. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich damit befassen, wie sich Umweltauswirkungen wie Energiebedarf und Klimawandel auf gesellschaftliche Entwicklungen auswirken, wie z.B. den Zugang zu Materialressourcen und Kreislaufwirtschaft. Darüber hinaus sollten sich die künftigen Arbeiten auf die Bewertung und Minimierung der Diskrepanzen zwischen der kohlenstofffreien Biomaterialforschung und den gängigen Baupraktiken konzentrieren. Dies kann erreicht werden, indem die Kluft zwischen politischen Entscheidungsträgern, Produktentwicklern und Praktikern vor Ort überbrückt wird und indem politische und ökologische Maßnahmen für die Nutzung von Umweltproduktdeklarationen (EPDs) zur Verfügung gestellt werden.

Kontaktangaben

Web: www.arch.columbia.edu/faculty/3396-lola-ben-alon
www.natmatlab.com
E-Mail: rlb2211@columbia.edu

Referenzen

- Ben-Alon, L., Loftness, V., Harries, K. A., DiPietro, G., & Hameen, E. C. (2019). Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of natural vs conventional building materials: A case study on cob earthen material. *Building and Environment*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.028>
- Cataldo-Born, M., Araya-Letelier, G., & Pereira, C. P. (2017). Obstacles and motivations for earthbag social housing in Chile: energy, environment, economic and codes implications. *Revista de La Construcción. Journal of Construction*, 15(3), 17–26. Retrieved from <http://revistadelaconstruccion.uc.cl/index.php/rdlc/article/view/536/147>
- Christoforou, E., Kyllili, A., & Fokaidis, P. (2016). *Cradle to site LCA of adobe bricks*. *Journal of Cleaner Production*, 112, 443–452. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615012378>
- Dachverband Lehm. (2008). *Lehmbau Regeln*.
- DesignBuilder. (2019). *DesignBuilder Simulation Version 6.1.3.008*.
- Estrada, M. (2013). *A case study of cob earth based building technique in Matagalpa, Nicaragua – LCA perspective and rate of adoption*. Mid Sweden University.
- Fernandes, J., Peixoto, M., Mateus, R., & Gervásio, H. (2019). *Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks*. *Journal of Cleaner Production*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118286>
- Frenay, M., Soebarto, V., & Williamson, T. (2012). *Earthship monitoring and thermal simulation*. *Architectural Science Review*, 56(3), 208–219. <https://doi.org/10.1080/00038628.2013.809688>
- ICC. (2018). Chapter 4 [RE] *Residential Energy Efficiency*. In IECC. Retrieved from https://codes.iccsafe.org/content/iecc2018/chapter-4-re-residential-energy-efficiency?-site_type=public
- ISO. (2006a). *14040:2006 Environmental Management—LCA Principles and framework*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/37456.html>
- ISO. (2006b). *14044:2006 Environmental management—LCA Requirements and guidelines*. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0297-3>
- Kuil, E. (2012). *The sustainability of conventional houses, passive houses and earthships, based on legislation, environmental impact energy and operating energy*. University of Groningen. Retrieved from https://pure.rug.nl/ws/files/14411936/EES-2012-155T_ElenaKuil.pdf
- Kutarna, M., Li, K., & Radebe, N. (2013). *An investigation into the use of cob and/or straw bale construction in non-residential buildings*. <https://doi.org/10.14288/1.0108471>
- MacDougall, C. (n.d.). *Natural building materials in mainstream construction: lessons from the UK*. *Journal of Green Building*, 2008. Retrieved from <http://www.journalofgreenbuilding.com/doi/abs/10.3992/jgb.3.3.1>
- Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S., & Dotelli, G. (2014). *Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters*. *Journal of Cleaner Production*, 80, 179–186. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614005514>
- Morel, J. C., Mesbah, A., Oggero, M., & Walker, P. (2001). *Building houses with local materials: Means to drastically reduce the environmental impact of construction*. *Building and Environment*, 36(10), 1119–1126. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00054-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00054-8)
- NABau. (2013). *DIN 18945 Earth blocks – terms, requirements, test methods; DIN 18946 Earth masonry mortars – terms, requirements, test methods; DIN 18947 Earth plaster mortar – terms, requirements, test methods*.
- New Mexico Regulation & Licensing Department, & NMAC. (2015). *2015 New Mexico Earthen Building Materials Code*. Santa Fe, NM. Retrieved from <http://164.64.110.239/nmac/parts/title14/14.007.0004.htm>
- New Zealand Standards. *NZS 4297: Engineering Design of Earth Buildings* (1998).
- New Zealand Standards. *NZS 4298: Materials and Workmanship For Earth Buildings* (1998).
- New Zealand Standards. *NZS 4299: Earth Buildings Not Requiring Specific Design* (1998).
- Pre Consultants. (2017). *SimaPro Life Cycle Analysis version 8* (software). Amersfort, The Netherlands. Retrieved from citeulike-article-id:9782799
- Serrano, S., Barreneche, C., Rincón, L., Boer, D., & Cabeza, L. F. (2013). *Optimization of three new compositions of stabilized rammed earth incorporating PCM: Thermal properties characterization and LCA*. *Construction and Building Materials*, 47, 872–878. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.018>
- Shukla, A., Tiwari, G. N., & Sodha, M. S. (2009). *Embodied energy analysis of adobe house*. *Renewable Energy*, 34(3), 755–761. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.002>
- US Department of Energy. (2019). *EnergyPlus Version 9.2.0*.
- Woolley, T. (2006). *Natural Building: A Guide to Materials and Techniques*. Crowood Press. Retrieved from <https://www.amazon.com/Natural-Building-Guide-Materials-Techniques/dp/1861268416>

